

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Мистецтв і моди

(повне найменування інституту, назва факультету)

Технології моди

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

на тему: Розробка взуття з енергетичною системою накопичення енергії.

Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 182 Технології легкої промисловості
Освітня програма: Індустрія моди

Виконала: студентка групи: МГІМд-23

Кучер А.Д.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф. Первая Н.В

(прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доц. Бабич А.І.

(прізвище та ініціали)

Київ 2024

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет _____ Мистецтв і моди _____

Кафедра _____ Технології моди _____

Рівень вищої освіти другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 182 Технології легкої промисловості _____

Освітня програма _____ Індустрія моди _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТМ

_____ Ольга ГАРАНІНА

« » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кучер Анастасії Дмитрівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка взуття з енергетичною системою накопичення енергії.
2. Науковий керівник роботи Первая Наталія Володимирівна, д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від 03.09.2024 року № 188-уч.
3. Строк подання студентом роботи 21.11.2024
4. Вихідні дані до роботи: актуальні тенденції, дисертації, патенти, статті, науково-технічна література.
5. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):
Вступ, Розділ 1 Аналіз науково-технічної літератури за напрямом дослідження, Розділ 2 Об'єкти та методи дослідження, Розділ 3 Експериментально – апробаційний, Розділ 4 Розробка взуття з інтегрованими п'єзоелементами, Загальні висновки, Список використаних джерел.

6. Консультанти розділів дипломної магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Первая Н.В. д.т.н., проф	11.10.23	12.02.24
Розділ 1	Первая Н.В. д.т.н., проф	11.10.23	26.02.24
Розділ 2	Первая Н.В. д.т.н., проф	11.10.23	13.05.24
Розділ 3	Первая Н.В. д.т.н., проф	11.10.23	5.09.24
Розділ 4	Первая Н.В. д.т.н., проф	11.10.23	5.10.24
Висновки	Первая Н.В. д.т.н., проф	11.10.23	25.10.24

7. Дата видачі завдання 11.10.2023**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної магістерської роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	12.02.2024	12.02.24
2	Розділ 1. Аналіз науково-технічної літератури за напрямом дослідження	26.02.2024	26.02.24
3	Розділ 2. Об'єкти та методи дослідження	13.05.2024	13.05.2024
4	Розділ 3. Експериментально – апробаційний	5.09.2024	5.09.2024
5	Розділ 4. Розробка взуття з інтегрованими п'єзоелементами	5.10.2024	5.10.2024
6	Висновки	25.10.2024	25.10.2024
7	Оформлення дипломної магістерської роботи (чистовий варіант)	1.11.2024	1.11.2024
8	Здача дипломної магістерської роботи на кафедрі для рецензування (за 14 днів до захисту)	15.11.2024	15.11.2024
9	Перевірка дипломної магістерської роботи на наявність текстових співпадінь та помилок (за 10 днів до захисту)	18.11.2024	
10	Подання дипломної магістерської роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	21.11.24	

Студент

Анастасія КУЧЕР

Керівник проєкту

Наталія ПЕРВАЯ

Анотація

Кучер А.Д. Розробка взуття з енергетичною системою накопичення енергії.

– Рукопис.

Дипломна магістерська робота за спеціальністю 182 – Технології легкої промисловості. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2024 рік.

Дипломна магістерська робота присвячена розробці взуття з енергетичною системою накопичення енергії. В роботі проаналізовані застосування п'єзоелементів для інтеграції їх у виробу індустрії моди, їхні різновиди та способи з'єднання між собою.

Робота спрямована на вивчення та аналіз можливостей інтеграції п'єзоелектричних елементів у взуття з метою ефективного конвертування механічної енергії в електричну. Основну увагу в роботі приділено способу розміщення п'єзоелементів на стопі. За допомогою 3Д сканера було визначено конфігурацію відбитку стопи з урахуванням скупчення найбільшого навантаження на плантарній поверхні стопи, де п'єзоелементи піддаються найбільшому механічному впливу. Визначено, що для розробки прототипу п'єзоелектричного генератора для інтеграції його у взуття підходять п'єзоелементи PZT керамічного типу, які генерують енергію від механічного впливу, є недорогими та легко доступними.

В результаті цієї роботи була розроблена модель взуття з інтегрованою устілкою, що містить п'єзоелементи. Ця напівустілка є знімною, що дозволяє її легко знімати і використовувати в іншому взутті, що забезпечує універсальність і простоту використання. Такий підхід надає користувачам можливість скористатися всіма перевагами генерації електроенергії без необхідності заміни всього взуття.

Ключові слова: *п'єзоелементи, взуття та напівустілки, стопа, розподіл навантаження на стопі.*

ANNOTATION

Kucher A.D. Development of footwear with an energy storage system. - Manuscript.

Master's thesis in speciality 182 - Technologies of light industry - Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2024.

The work aims to study and analyse the possibilities of integrating piezoelectric elements into footwear to convert mechanical energy into electrical energy efficiently.

The main focus of the work is on the method of placing piezoelectric elements into the footwear. The footprint configuration and the concentration of the most significant load on the plantar surface of the foot were determined using a 3D scanner with plantograph functions. The piezoelectric elements will be subjected to the most significant mechanical impact in this plane. It has been determined that ceramic-type PZT piezoelectric elements, which generate energy from mechanical impact, are inexpensive and easily accessible and are suitable for developing a prototype piezoelectric generator for integration into footwear.

The shoe model with an integrated insole containing piezoelectric elements was developed. This insole is removable, allowing it to be easily removed and used in other shoes, providing versatility and ease of use. This approach lets users take advantage of all the power generation benefits without replacing their entire shoe.

Keywords: *piezoelectric elements, footwear and insoles, foot, load distribution on the foot.*

ЗМІСТ	Стр.
УМОВНЕ ПОЗНАЧЕННЯ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА НАПРЯМОМ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	13
1.1 Історія виникнення п'єзоелемента, переваги та недоліки, застосування.....	15
1.2 Види п'єзоелектричних матеріалів.....	19
1.3 Використання п'єзоелементів в текстильних виробках.....	22
1.4 Використання п'єзоелементів у взутті	25
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	34
2.1 Розподіл навантаження ваги тіла людини на стопу.....	36
2.2 Електричне підключення п'єзоелектричних перетворювачів.....	45
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – АПРОБАЦІЙНИЙ.....	52
3.1 3D види сканування стопи людини.....	52
3.2 Сканування стопи 3D-сканера INFOOD.....	56
3.3 Визначення контуру відбитку стопи для проектування устілки та визначення раціонального розміщення ПЕ у взутті.....	58
3.4 Визначення раціонального варіанту розміщення ПЕ на устілці з урахування найбільшого тиску на плантарній поверхні стопи.....	61

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ВЗУТТЯ З ІНТЕГРОВАНИМИ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТАМИ.....	65
4.1 Характеристика споживача.....	65
4.2 Технічний рисунок та опис чоловічого взуття.....	66
4.3 Конструювання, деталювання та структурна таблиця чоловічого взуття.....	67
4.4 Технологічний процес складання взуття.....	70
4.5 Розробка напівустілки з інтегрованими п'єзоелементами для взуття	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

Умовне позначення

PZT - (титанат цирконата свинцю)

PEDOT:PSS – (полістиролсульфонат)

НГ – (наногенератор)

FSR - (Резистор для вимірювання сили)

PVDF – (Полівініліденфторид або полівінілідендифторид)

PTFE – (Політетрафторетилен)

EDLC – (Конденсатор з подвійним електричним шаром)

ВСТУП

Дослідження, розробка та впровадження нових нетрадиційних методів та способів генерації електричної енергії набули неабиякої актуальності про що свідчать державні програми та проекти [1]. В останні кілька років постійний попит на збереження енергії призвів до постійних досліджень у сфері низької потужності пристроїв, зберігання енергії та нових джерел енергії. Збір енергії є цікавим рішенням, яке захоплює енергію з навколишнього середовища, яка інакше була б втрачена. Існують різні типи джерел енергії, кожне зі своїм основним застосуванням. Наприклад, для перетворення механічних деформацій в електричну енергію використовуються три методи: електромагнітні, електростатичні та п'єзоелектричні перетворювачі [2]. Енергетичні матеріали та матеріали для енергетики у 2021-2022 роках є одними з основних напрямів досліджень у світі [3]. Тисячоліттями властивості волокон і тканин, які використовувала людина, здавалися незмінними, непорушними, і лише з кінця ХХ століття, завдяки індустріалізації та винаходу синтетичних волокон, а потім під стимулюючим впливом нових суспільних вимог, традиційна концепція виробництва тканин змінилася. Широкого розповсюдження набула зміна структури тканини шляхом змішування різних волокон (натуральних і хімічних). Поява комп'ютерів - систем автоматизованого проектування - значно розширила можливості маніпулювання структурою і фактурою тканин. Революційні досягнення в науці, техніці та технологіях створили умови для поєднання в текстильному виробництві та текстильному дизайні суттєво різних високих технологій - космічних, електронних та інших. Інноваційні текстильні матеріали, можна розділити на дві групи. До першої групи належать текстильні матеріали, властивості яких є статичними, тобто їхні властивості, такі як колір, тепло- і електропровідність та інші, не змінюються залежно від впливу навколишнього середовища. Вони пасивно підтримують відчуття комфорту та емоційного задоволення. Друга група тканин, вироблених за високими технологіями, спроможна активно реагувати на виклики внутрішнього та зовнішнього

середовища. Їхні властивості стали динамічними. Такий текстиль називають «інтелектуальним», «розумним», який може змінювати колір під дією тепла або світла, дистанційно передавати біометричну інформацію та ін. [4]. Останнім часом текстиль та індустрія моди, електротехніка, комп'ютерна інженерія, біомедична інженерія, сільське господарство та інші галузі науки об'єднуються в мультидисциплінарну роботу. З використанням новітніх технологій та нових матеріалів в текстильному виробництві розробляються інноваційні рішення [5]. Майбутнє виробництво вимагатиме значного прогресу у технологіях та алгоритмах синтезу і виробництва нових матеріалів, хімічних речовин та систем із гарантованою якістю за розумною вартістю [3;6].

Актуальність теми: актуальність цієї теми підсилює необхідність створювати автономні енергосистеми для туристів, військових, медиків та в повсякденному житті. Завдяки технологіям, що виробляють енергію під час звичайної фізичної активності, забезпечуючи їх потрібною енергією без необхідності залучення додаткових джерел. Таким чином, створення взуття з системою зберігання енергії не тільки сприяє екологічній стійкості, але й надає користувачам нові можливості в умовах обмеженого доступу до основних традиційних джерел енергії, що робить тему дослідження надзвичайно актуальною та корисною.

Об'єкт: можливість інтеграції п'єзоелементів, які перетворюють механічну енергію в електричну у виробі індустрії моди.

Предмет: предметом дослідження є процес розробки взуття з системою накопичення енергії. Це включає вивчення характеристик та ефективність п'єзоелектричних матеріалів, технологій їх інтеграції у взуття, а також способи генерування, зберігання та використання електричної енергії, отриманої від механічної активності людини.

Мета: розробка взуття з інтегрованою системою накопичення енергії. Основними завданнями є підбір п'єзоелементів, визначення раціонального розміщення п'єзоелементів у взутті, з'єднання між собою.

Завдання дослідження: аналіз сучасного розвитку п'єзоелектричних матеріалів та технологій їх інтеграції у виробу індустрії моди. Визначення найбільш доцільних п'єзоелектричних матеріалів та інших компонентів для створення енергетичної системи у взутті. Запропонувати раціональні зони розташування п'єзоелементів та способи з'єднання їх між собою для максимізації ефективності генерації електричної енергії. Розробка моделі взуття з урахуванням можливості інтеграції п'єзоелементів у внутрішній простір взуття.

Наукова новина: Визначено раціональне розташування п'єзоелементів у взутті, враховуючи розподіл тиску на стопу та анатомо-морфологічну будову стопи.

Гіпотеза дослідження: 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.

Теоретична основа: Аналізування структурно-механічних характеристик п'єзоелектричних матеріалів, таких як PZT, з метою оцінки їх стабільності, гнучкості та ефективності при перетворенні механічної енергії в електричну енергію. Запропоновано методи для визначення оптимальних зон розміщення п'єзоелементів на устілці з урахуванням анатомо-морфологічної будови стопи та розподілу тиску під час ходьби.

Методологічна база дослідження: Аналіз науково-технічної інформації (наукових публікацій, патентів та сучасних досліджень) щодо можливості інтеграції п'єзоелектричних елементів у виробу індустрії моди.

Теоретична та практична значущість результатів дослідження: теоретичне значення результатів досліджень полягає в розширенні відомостей про п'єзоелектричні матеріали та їх використання у взутті для генерування електричної енергії. Дослідження сприяє розвитку новітніх теоретичних підходів до впровадження п'єзоелектричних елементів у взуття, а також раціонального їх

розташування для досягнення максимального ефекту. Теоретичні результати дослідження можуть бути основою для подальшого розвитку інтеграції п'єзоелектричних матеріалів та альтернативних джерел енергії у конструкцію взуття. До практичного значення результатів дослідження належить розробка вкладної устілки у взуття з інтегрованими п'єзоелементами. Можливість їх впровадження у виробництво взуття з інтегрованою системою енергозабезпечення. Основні результати дослідження:

1. Визначено раціональне розташування п'єзоелементів у взутті, враховуючи розподіл тиску на стопу та анатомо-морфологічну будову стопи.
2. Розроблено конструкцію повсякденного взуття та вкладну устілку з інтегрованими п'єзоелектричними генераторами.

Апробація результатів дослідження:

1. Первая Н.В., Борщевська Н.М., Кучер А.Д. Технологічні тренди генерації енергії у виробках індустрії моди. VII International Scientific-Practical Conference KyivTex&Fashion 19 October 2023. – p. 229-230
2. Dmytro Patlun, Volodymyr Khomenko, Nataliia Pervaia, Anastasiia Kucher. Hybrid energy system based on piezoelectric generators integrated into footwear. 6th ISE Satellite Student Regional Symposium on Electrochemistry «Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry» (6ISE SSRSEU 2024) in Kyiv on May 22, 2024.
3. Первая Н.В., Хоменко В.Г., Кучер А.В. Інтеграція п'єзоелектричних генераторів у взуття. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2024. №6. С. – 32-40.

РОЗДІЛ I

АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА НАПРЯМОМ ДОСЛІДЖЕННЯ

Збір енергії з навколишнього середовища та її перетворення в електричну енергію досягається завдяки гібридним енергетичним системам [7-9]. Енергосистеми, засновані на п'єзогенераторах, інтегрованих у взуття, можуть забезпечувати альтернативне джерело енергії для живлення електронних пристроїв із низьким енергоспоживанням, таких як GPS-сенсори та засоби зв'язку. Це може знизити потребу в залученні додаткових джерел струму для їхнього живлення. Зберігання енергії від п'єзоелектричного генератора є складним процесом. Зазвичай використовуються акумулятори як пристрої для зберігання енергії. Однак вони мають певні недоліки, такі як низька потужність, обмежена кількість циклів заряд-розряду та порівняно повільні окисно-відновні реакції для накопичення імпульсної енергії від п'єзоелектричного генератора. З іншого боку, конденсатори з подвійним електричним шаром (EDLC) можуть ефективно накопичувати імпульсну енергію завдяки високій потужності. Однак щільність енергії в EDLC значно нижча, ніж у акумуляторів. Гібридні конденсатори мають переваги перед EDLC, насамперед, завдяки високій щільності енергії. У цій роботі для накопичення енергії від п'єзоелектричного генератора, вбудованого в підошву взуття, використовувались гібридні конденсатори на основі інтеркаляції іонів іонної рідини у графітовий електрод. Більше того, дизайн гібридного суперконденсатора з використанням іонної рідини як електроліту дозволяє забезпечити безпеку використання джерела енергії [10].

Останнє десятиліття у легкій промисловості широко використовується розумні матеріали, що перетворюють дію зовнішніх факторів в електроенергію, зокрема для виготовленні верхнього одягу, спецодягу, спецустілок для взуття, виробів спеціального призначення, наприклад для туризму. Використовуються термоелементи та акумулятори для забезпечення комфортного теплового режиму

в умовах низьких температур забезпечує автономне ввімкнення обігріву одягу або взуття [4]. Функціональні матеріали та пристрої – це компоненти для підвищення продуктивності датчиків, обробки зображень і зв'язку. Одним з таких напрямків є створення нових матеріалів, які трансформують одну форму енергії в іншу в таких галузях, як термоелектрика. Попри те, що перспективні матеріали перетворення відомі для різноманітного застосування, їхня інтеграція в пристрої ще не реалізована. Іншим аспектом є розробка моделей поведінки матеріалів в електромагнітних полях високої потужності. Інший напрям передбачає розробку нових функціональних матеріалів і пристроїв, які дозволять кардинально зменшити розміри, вагу та енергоспоживання джерел нейтронів і гамма-випромінювання для нейтронної, гамма- та рентгенівської візуалізації з високою роздільною здатністю [3]. Використання функціональних матеріалів та спеціальних пристроїв стали невід'ємною частиною виробів легкої промисловості, особливо коли мова йдеться про вироби спеціального призначення. Сьогодні в світі актуальності набуло адаптація використання сонячних панелей, термін «розумний текстиль», який позначає широке поле досліджень та продуктів, що розширюють сферу застосування, функціональність і корисність звичайних тканин у виробах індустрії моди. Для його виготовлення використовують волокна, покриті провідними полімерами або металами, скручені волокна з тонкими металевими нитками або із нитками провідного полімеру, струмопровідну гуму, оптичні волокна, волокна з ефектом пам'яті форми, фазоперехідні матеріали, які інтегрують в текстильну структуру [1;11].

«Розумний» текстиль займає широку сферу життя суспільства, його виготовляють для військових, втілюючи їх вимоги, в охороні здоров'я, для космосу, використовуючи при його дослідженнях, спортивних цілей [12-13]. Електронний (e-textile) – вид «розумного» текстилю, що включає електроніку (невеликі комп'ютери), і в якому використовують цифрові технології [12;14]. Він може виконувати різноманітні функції, як антистатичні програми, захист

електромагнітних перешкод, електронні програми, інфрачервоне поглинання або захисний одяг у вибухонебезпечних зонах [11-12].

Не менш актуальним є використання п'єзоелементів у різних сферах людської діяльності де п'єзоелектричний ефект і його зворотна сторона є основним засобом, що використовується в різних сферах діяльності для перетворення акустичної енергії в електричну і навпаки. П'єзоелектрика знайшла багато інженерних застосувань в різних галузях науки, наприклад, таких як медицина. Електроніка може знайти своє практичне застосування й у взуттєвих виробках. У зв'язку з чим, важливо отримати загальне уявлення про можливість використання такого ефекту при експлуатації взуття для заряджання пристроїв, підігріву підошов взуття, для створення вібраційних сигналів для людей з порушенням зору, збору даних про стан здоров'я тощо. Сучасні напрями використання п'єзоелементів, сонячних батарей та струмопровідних волокон показує на можливість використання їх у виробках різного призначення з подальшим розвитком та трансформацією у виробу індустрії моди [1].

1.1 Історія виникнення п'єзоелемента, переваги та недоліки, застосування

У 1880 році Жак і П'єр Кюрі виявили, що деякі кристали, такі як кварц і турмалін, створюють електричні заряди під дією тиску; вони назвали це явище "п'єзоелектричним ефектом". Пізніше було виявлено, що п'єзоелектричні матеріали можуть деформуватися під дією електричних полів. Цей ефект відомий як "зворотний п'єзоелектричний ефект" [15-16]. П'єзоелектрика визначається Берлінкуром [17] як здатність матеріалу генерувати внутрішнє електричне поле під впливом механічного напруження або деформації, тоді як Erturk та Інман [18] визначають її як форму зв'язку між механічною та електричною поведінкою кераміки та кристалів, що належать до певних класів [11].

П'єзо - це грецьке слово, що означає стискання, тиск. П'єзоелектрика - це здатність перетворювати електричне поле або електричний потенціал матеріалу в результаті механічного тиску, застосованого до матеріалу [5].

П'єзоелектричні матеріали - це матеріали, які виробляють електричний струм, коли вони розміщуються під механічним навантаженням. П'єзоелектричний процес теж є зворотнім, тому якщо застосувати до цих матеріалів електричний струм, вони незначно змінять форму (максимум на 4%). Є декілька відомих нам матеріалів, які мають п'єзоелектричні властивості, включаючи кістки, білки, кристали (наприклад, кварц) та кераміку (наприклад, титанат цирконату свинцю) [19].

П'єзоелектричні матеріали мають кристалічну структуру, яка надає їм здатність перетворювати механічну енергію деформації в електричний заряд і навпаки, перетворювати прикладений електричний потенціал в механічну деформацію. Ця властивість надає цим матеріалам можливість поглинати механічну енергію з їх оточення, зазвичай амбієнтні вібрації, і перетворювати її на електричну енергію, яка може бути використана для живлення інших пристроїв [20].

П'єзоелектричні матеріали складаються з п'єзополімеру з гнучкою структурою. Будь-який тиск, який згинає п'єзополімер, створює дуже велике напруження на структурі, що призводить до виникнення високої напруги. Енергія вібрації більш підходить для згинання п'єзополімера для вироблення енергії [21].

П'єзоелектричні матеріали, які існують в природі, наприклад, кварц, не мають необхідних властивостей для виробництва електрики. Однак штучні п'єзоелектричні матеріали, такі як PZT (плomba цирконату титану), мають переваги. Коли матеріал деформується або напружується, електрична напруга може бути відновлена вздовж будь-якої поверхні матеріалу (через електроди). Переваги використання п'єзоелектричних матеріалів для виробів легкої промисловості: малі розміри, широкий діапазон частот, мала вага, дуже низький рівень шуму, широкий динамічний діапазон, широкий діапазон температур,

просте умовне подання сигналу, невисока собівартість. До переваг використання п'єзоелектричних матеріалів належать:

1. Вони не потребують зовнішнього живлення для роботи і, отже, є самодостатніми.
2. Висока частотна відповідь цих перетворювачів робить їх відмінним вибором для різних застосувань.
3. Температурні та атмосферні умови можуть впливати на поведінку перетворювача.

Вони можуть вимірювати лише змінний тиск, тому вони непридатні для вимірювання статичних параметрів [22].

П'єзоелектричні матеріали найчастіше використовуються: у сейсмографах для вимірювання вібрацій у ракетах, у напругових датчиках для вимірювання сили, напруги, вібрацій тощо, в автомобільна промисловість для вимірювання детонацій у двигунах, в ультразвуковому зображенні в медичних застосуваннях [22].

П'єзоелектричний матеріал можна знайти в багатьох місцях, таких як метро Marunouchi (Токіо) (рис. 1.1) [23-25], танцювальний підлогах (рис. 1.2) [26-27], футбольних стадіонах [21; 28], у запальничках (рис. 1.3) [5], на тротуарах, що генерують електроенергію (рис. 1.4) [26-27], в клавіатурі (рис. 1.5) [26; 29].



Рис. 1.1 - Система накопичувачів енергії, вмонтованих у настил підлоги на вході станції метро Marunouchi (Токіо)



Рис. 1.2 - П'єзоелектричний матеріал в танцювальній підлогах

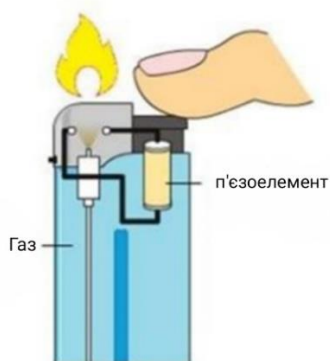


Рис. 1.3 - П'єзоелектричний матеріал у запальничках

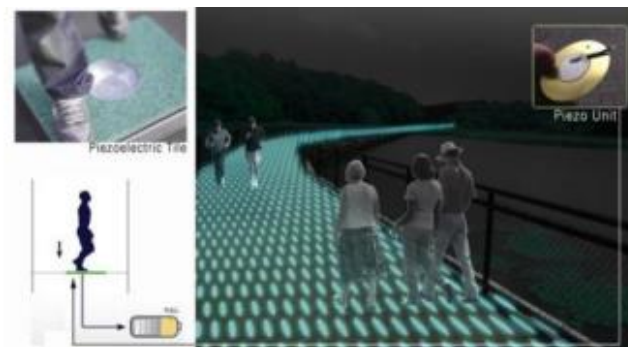


Рис. 1.4 - П'єзоелектричний матеріал на тротуарах



Рис.1.5 - П'єзоелектричний матеріал в клавіатурі

В останні роки були проведені численні дослідження п'єзоелектричного текстилю в найрізноманітніших областях, особливо в матеріалознавстві, техніці, фізиці, астрономії, хімії та енергетиці, як показано на рисунку 1.6 [30-31] наприклад, розроблені п'єзоелектричні наногенератори з коаксіальних дротів і гнучкої нержавіючої сталі [31].



Рис. 1.6 - Основне застосування п'єзоелектричного текстилю

1.2. Види п'єзоелектричних матеріалів

Існує декілька типів і моделей п'єзоелектричних матеріалів в залежності від розміру, форми і потужності. П'єзоелектричний матеріал також може відрізнятися від типу матеріалу та форми. На ринку є кілька моделей залежно від потреби, точності, розміру та ціни (рис. 1.7) [32-34].

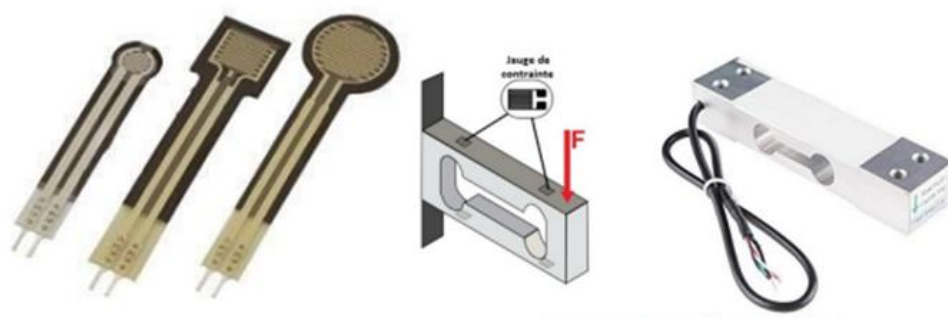


Рис. 1.7 - Моделі п'єзоелектричного матеріалу

П'єзоелектричні матеріали поділяються на три основні групи в залежності від матеріалу: кристали, кераміка та полімери [32].

- П'єзоелектричні кристали.

П'єзоелектрика присутня в багатьох кристалах, наприклад: турмалін, фосфати, цукру та інших. Практично п'єзоелектричний кристал використовується тільки в кварці, який є зі слабшим п'єзоелектричним коефіцієнтом, але зі стабільними характеристиками в часі, використовується у виробництві механічних годинників, мають дуже точну частоту (32768 Гц). Коли надходить імпульс, кристал вібрує на цій частоті, та випромінює електричний сигнал, який відновлює електричний ланцюг, що запускає систему годинникової стрілки (рис. 1.8). Існує кілька можливих застосувань для цього типу матеріалів, але висока вартість і крихкість цих кристалів роблять їх використання дуже обмеженим в поточних продуктах [32; 35].

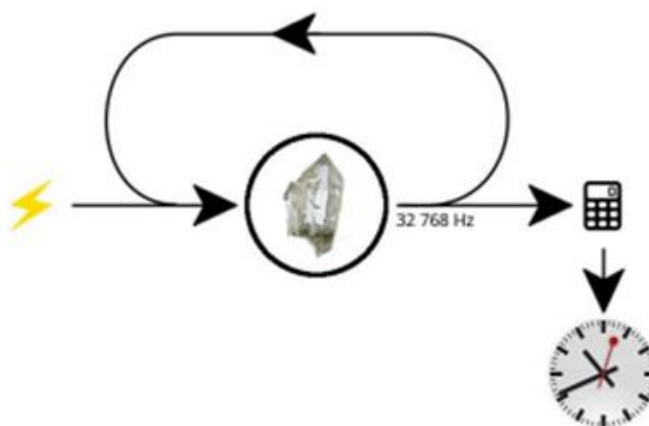


Рис. 1.8 - Зображення роботи кварцового годинника

- П'єзоелектрична кераміка.

Синтетична кераміка становить найбільший відсоток п'єзоелектричних матеріалів, що використовуються сьогодні. Їх виготовляють методом спікання суміші оксидів, пристосованим до промислових потреб. Кераміка використовується у виробництві різних автомобільних компонентів і деталей: датчиків детонації, датчиків рівня масла, датчиків тиску і звуку, датчиків рівня тощо. П'єзоелектричний датчик може складатися, наприклад, з шару PZT

(цирконату свинцю-титану), затиснутого між двома металевими електродами, причому простота виробництва є великою перевагою кераміки. Існує багато композицій різних керамік, чії діелектричні та механічні властивості суттєво відрізняються (форми, розміри та різні орієнтації поляризації), так що ми завжди можемо знайти кераміку, яка підходить для конкретного застосування (рис. 1.9) [32; 36].

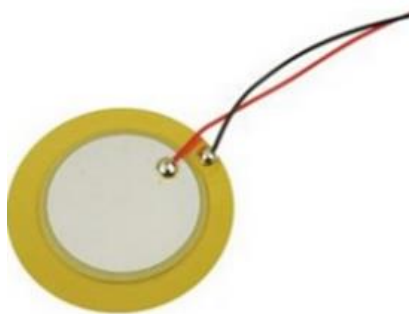


Рис. 1.9 - Зразок п'єзоелектричної кераміки

- П'єзоелектричні полімери.

П'єзоелектричні полімери являють собою третю категорію матеріалів п'єзоелектрики. Після кераміки виробники зацікавилися полімерами, властивості які присутні: чутливі до вібрації та дуже низький тиск. П'єзоелектричні полімери можуть бути аморфні або напівкристалічні, різниця між двома матеріалами полягає в тому, що аморфний має нерегулярну структуру, а напівкристалічний складається з двох фаз; кристалічний і аморфні. Частіше використовуються напівкристалічні полімери, оскільки вони мають кращі електромеханічної муфти і привернути більше уваги в науковому співтоваристві. Полівінілдіфториден (PVDF) є найбільш використовуваним напівкристалічним полімером завдяки своїй фазі, який становить 50%-60% об'єму, властивість матеріалів, оцінена та використовуються у виробництві датчиків вібрації (рис. 1.10), навіть якщо їх коефіцієнти зчеплення набагато слабше, ніж у кераміки [32; 37-38].

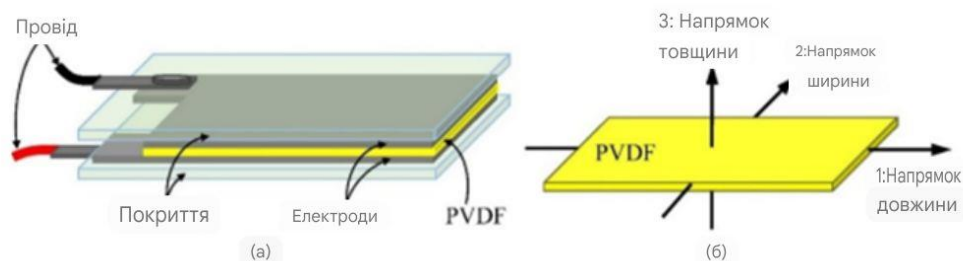


Рис. 1.10 - Загальна модель датчика PVDF, включаючи: а – структуру, б – напрямки чутливості датчика

1.3 Використання п'єзоелементів в текстильних виробах

Функціональні текстильні вироби почали проявляти особливості, і ці вироби почали виконувати багато додаткових функцій. Вони також почали користуватися попитом у споживача [31; 39].

Zhu et al. розробили функціональну шкарпетку з автономним живленням на основі полістиролсульфонату (PEDOT:PSS) з тканинним покриттям, що містить вбудований п'єзoeлектричний матеріал. Окрім базової здатності вловлювати енергію, шкарпетка може визначати характер ходьби для розпізнавання та відстеження руху людей. Також функціональна шкарпетка здатна оцінювати рівень потовиділення власника. Ці розробки дозволяють здійснювати моніторинг користувачів і можуть бути корисними для додатків домашнього догляду [31; 40].

Існує багато досліджень щодо розробки технологій виготовлення виробів легкої промисловості з п'єзoeлектричними наногенераторами (НГ) для уловлювання енергії від руху людини [31; 41-44]. П'єзoeлектричні НГ на текстильній основі поділяються на три групи за структурою утворення. Перша група складається з НГ на основі одного волокна, яке має коаксіальну структуру з сердечником і зовнішньою оболонкою (електродами), завдяки чому гнучкий п'єзoeлектричний матеріал знаходиться між сердечником і зовнішньою оболонкою. П'єзoeлектричні НГ на тканинній основі об'єднують п'єзoeлектричні волокна в двовимірні (2D) або тривимірні (3D) тканини, використовуючи різні

методи формування текстильної поверхні. Остання група - це НГ на основі багат шарових тканинних структур, які можуть бути отримані з шарами тканого полотна або нетканих матеріалів, утворених укладеними нановолокнами [31; 41]. В іншому розслідуванні п'єзоелектричний генератор був сконструйований у вигляді нитки розжарювання з електропрядених нановолокон з полівініліденфториду або полівінілідендифториду (PVDF), що беруть участь у провідному дроті (внутрішній електрод) і покриті двома плетеними провідниками (зовнішній електрод). П'єзоелектричні дроти, виготовлені з п'єзоелектричних нановолокон і зовнішніх електродів, були вшиті безпосередньо в тканину, створюючи переносну систему збору енергії [31; 39].

Дослідники з Технологічного університету Чалмерса, Аня Лунд та Крістіан Мюллер, розробили матеріал, комбінуючи п'єзоелектричну пряжу та струмопровідну нитку способом ткацтва. Дослідники продемонстрували результати, включивши частину матеріалу в ремінь плечової сумки (Рис. 1.11). Чим більше навантаження на текстиль і більша вологість, тим більше електрики генерує тканина [1; 45].



Рис. 1.11 - Фото п'єзоелектричної пряжі та електропровідної нитки в ремні сумки

Відомо про конструкцію рюкзака, який міг би перетворювати механічну енергію від вертикального руху переносимого вантажу на електроенергію.

Рюкзак був спроектований так, що лінійний підшипник та набір пружин утримували вантаж у відношенні до рами та плечової стяжки. Ця конфігурація дозволяє вантажу рухатися вертикально відносно рами. Цей рух перетворювався на електричну енергію за допомогою роторного електричного генератора з зубчастим механізмом передачі, як показано на рис. 1.12. Після дослідження рюкзака, дослідники вирішили щоб ремінці рюкзака були виготовлені з п'єзоелектричних матеріалів. Виготовивши зразки, було проведено експериментальне тестування, щоб охарактеризувати їх використання для збору енергії в ремінці рюкзака. Коли модель була перевірена за допомогою результатів експериментальних тестів, вона була використана для прогнозування потужності, яку може генерувати рюкзак з п'єзоелектричними ремінцями. Дані щодо натягу ремінця під час ходьби були використані для запуску моделювання (рисунок 1.13) ілюструє розрахункову вихідну потужність для рюкзака з двома п'єзоелектричними стрічками товщиною 52 мм. на плечові ремені рюкзака [46].

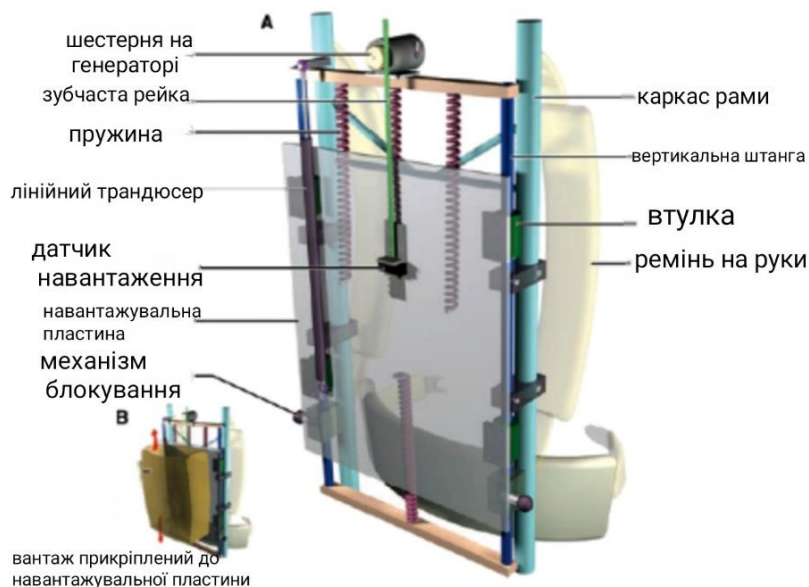


Рис. 1.12 - Схема рюкзака для збору енергії



Рис. 1.13 - Схема рюкзака з п'єзоелектричними ремінцями

1.4 Використання п'єзоелементів у взутті.

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 використана для заряджання електронних пристроїв, таких як мобільні телефони, переносні пристрої та медичні прилади [47].

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 [48-49], і має потенціал для генерації електроенергії [50-51]. У нещодавньому дослідженні Чен та ін. [52] трибоелектрична нитка були виготовлена з мідних дротів і розміщені в контакті з тканиною з політетрафторетилен (PTFE) для тестування. При притисканні до тканини PTFE з частотою 1,2 Гц і піковою контактною силою 70 Н один емальований мідний дріт діаметром 0,1 мм і довжиною 30 см створював напругу холостого ходу понад 60 В і струм короткого замикання 0,45 мкА. В іншому дослідженні Ван та ін. [53] розробили бістабільний електромагнітний комбайн з магнітом, що котиться, для збору енергії з рухів людини. Широкопосмугові

періодичні коливання між 5,8 і 22 Гц вироблялися шляхом стимуляції частоти розгортки силою 0,5 г.

В іншому дослідженні Zhang та ін. [54] теоретично дослідили реакцію термоелектричного генератора на збирання теплової енергії, доступної на поверхні шкіри. Kummissis та ін. [55] розробили п'єзоелектричне взуття для збору енергії з використанням 16 шарів полівініліденфториду або полівінілідендифториду (PVDF). Вони встановили магнітний генератор на зовнішній поверхні черевика і зафіксували середню вихідну потужність 0,23 Вт при 10 Ω навантаження. Альмусаллам та ін. [56] розробили п'єзоелектричні устілки на основі взуттєвої устілки з використанням гнучких полімерних композитів PZT, з'єднаних паралельно. Взуттєва устілка була розділена на вісім елементів, і була отримана напруга в розімкнутому контурі приблизно 2 В від ударів під час ходи людини вагою 70 кг. Лі та ін. [57] сконструювали п'єзоелектричний збирач енергії на основі взуття консольного типу PZT, який був протестований при швидкості ходьби 3 милі на годину і, як повідомляється, генерував середню потужність 49 мкВт. П'єзоелектричний генератор був розроблений Rguiti та ін. [58] з використанням шести консолей на основі PZT. При цьому всіх кантилеверів паралельно, максимальна вихідна потужність 2,5 мкВт була спостерігалася при опорі навантаження 275 кОм. Юнг та ін. [59] розробили вигнутий п'єзоелектричний генератор з використанням плівки PVDF, який був інтегрований у взуттєву устілку, і виробив середню вихідну напругу і струм ~ 14 В і ~ 18 мкА, відповідно. Ма та ін. [60] розробили ходу, засновану на пристрій одночасного збору енергії та зондування (SEHS) з використанням п'єзоелектричних перетворювачів. Використовуючи пристрій SEHS, зібрану енергію можна значно збільшити та підвищити точність збору енергії. Існує кілька переваг п'єзоелектричного механізму для збору енергії людиною. Нещодавно Алі та ін. [61] згадали про переваги п'єзоелектричних перетворювачів, використовуючи ці матеріали для живлення біомедичної електроніки, що імплантується. Digitsole – це компанія, яка розробила пов'язану

підшву для аналізу та запис ходьби та бігу. Ця підшва дає можливість отримувати інформацію як-от час, пройдена відстань, рівень спалених калорій, кількість кроків здійснюється, рівень демпфування і ритм (рис. 1.14) [32].



Рис. 1.14 – Підшва від компанії Digitsole

Інформація безпосередньо передається на наш смартфон через Bluetooth, він може візуалізувати безпосередньо за допомогою програми Digitsole Walk Active® для спортивної ходьби і Digitsole Run® для бігу. Ця устілка призначена для людей, які бажають стежити за своїми кроками під час занять спортом, щоб виправити поставу, ритм і підтримку для покращення їх продуктивності [32].

Пересування людини є джерелом енергії, яку можна використовувати для живлення пристроїв, що носяться, таких як "розумні" устілки та шкарпетки. Внуття відіграє важливішу роль у здоров'ї ніг, насамперед для пацієнтів з діабетом, для профілактики та лікування діабетичної виразки стопи. З цією метою для проведення аналізу ходи або моніторингу параметрів користувача використовують устілки FeetMe (Франція) (Рис. 1.15). Vibrasole - це інтелектуальна устілка на основі FSR (Force Sensing Resistor), яка допомагає літнім людям контролювати і управляти своєю рівновагою під час ходьби і стояння [62-63].



Рис. 1.15 – Устілка від компанії FeetMe (Франція)

П'єзоелектричні матеріали були використані у підощвах взуття. Коли людина починає ходити, бігати або стрибати, вібрація від фізичної активності перетворює механічну напругу в електричну енергію. Електрична енергія, що генерується п'єзоелектричними матеріалами, може бути використана як джерело живлення для електричних пристроїв [21].

Дослідження пристроїв для аналізу ходи стають все більш поширеними завдяки відкриттям, зробленим в області деяких хронічних захворювань, пов'язаних з порушеннями ходьби. Все більше фахівців діагностують певні захворювання, аналізуючи стопу пацієнтів та їхню ходу. Сенсорні підощви є одними з пристроїв, що використовуються фахівцями для аналізу ходи, і їх розробка базується на різних технологіях [32].

Деякі пристрої використовують концепцію зберігання енергії для створення продукту, який дуже привабливий для споживачів. На рисунку 1.16 PowerSole використовує котушку Фарадея для зарядки акумулятора, який перетворює кінетичну енергію в електричну енергію, яка може бути використана для зарядки інших пристроїв, таких як телефони, iPod або світлодіодні ліхтарики. Цей пристрій використовує концепцію фарадейової котушки, яка зберігається в підощві взуття для створення електричного струму. Створена електроенергія зберігається в невеликій батареї, яка зручно розміщена спереду взуття. Пристрій має доступ до USB і є дуже екологічним. Патент на цей пристрій ще знаходиться

на розгляді. Ще одним пристроєм, який перетворює кінетичну енергію на корисну електричну енергію, є пристрій збору енергії у взутті. Як показано на рисунку 1.17, цей пристрій використовує концепцію п'єзоелектричних матеріалів і розміщується в устілці взуття для перетворення механічної енергії в електричну [64].



Рис. 1.16 - Взуттєвий пристрій, який перетворює кінетичну енергію в електричну енергію



Рис. 1.17 - Взуття на основі п'єзоелектричних матеріалів

У 2018 році Крішна Педдінті розробив підошву-сенсор, що дозволило аналізувати хід і визначати відповідні патології. Система складалася з двох

промислових п'єзоелектричних матеріалів типу FSR (Force Sensing Resistor), які реагують на прикладений тиск, і сенсора руху, що складається з акселерометра і гіроскопа. Розташування п'єзоелектричних матеріалів було здійснено на нижню частину стопи яку поділено на три різні зони: передню частину, середню частину і задню частину, як показано на рис. 1.18. Двоє п'єзоелектричних матеріалів було розміщено в метатарзальній області та області п'ятки, а сенсор руху розташований біля п'ятки [32; 65].

У роботі [66 - 67] увагу приділено використанню п'єзоелектричних матеріалів у подошві взуття, тому було проаналізовано розподіл сил під час ходьби. Оскільки більшість населення ходить і бігає, спираючись на п'яту, це означає, що п'ята стопи є першою частиною, яка торкається землі. На рисунку 1.19 наведені величини розподілу тиску на стопу під час ходьби. На рисунку 1.20 наведено подошву взуття з 10 п'єзоелектричними матеріалами [66 - 67].

Саме ці п'єзоелектричні матеріали генерують електрику, коли відчують вібрації, в даному випадку, коли людина ходить, механічно деформують кристал диска і таким чином генерують змінний струм. Якщо пристрій не заряджається, а людина йде, буде вироблятися надмірна кількість енергії. Тому, якщо немає акумулятора або подібного накопичувача енергії, ця енергія буде втрачена. На рисунку 1.21 показано схему електричний вихідний ланцюг [66].



Рис. 1.18 – Розташування п'єзоелектричних матеріалів на стопі

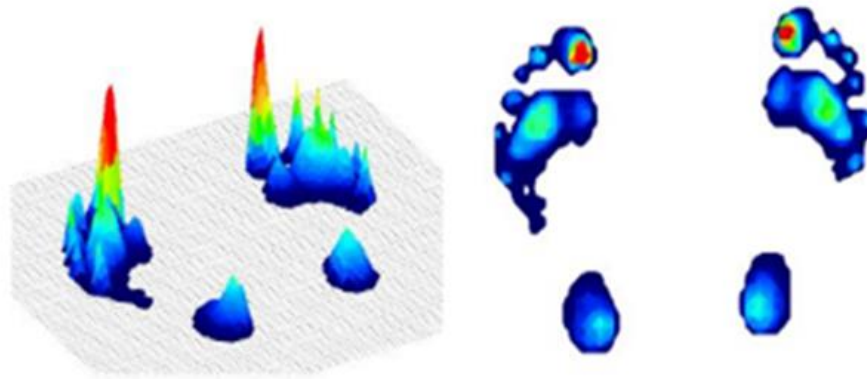


Рис. 1.19 - Величина розподілу тиску на стопу

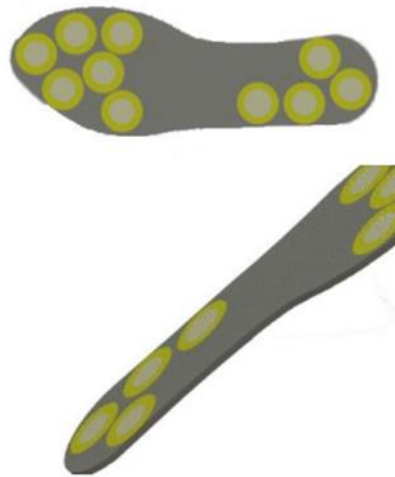


Рис. 1.20 - П'єзоелектричні матеріали на підшви взутті

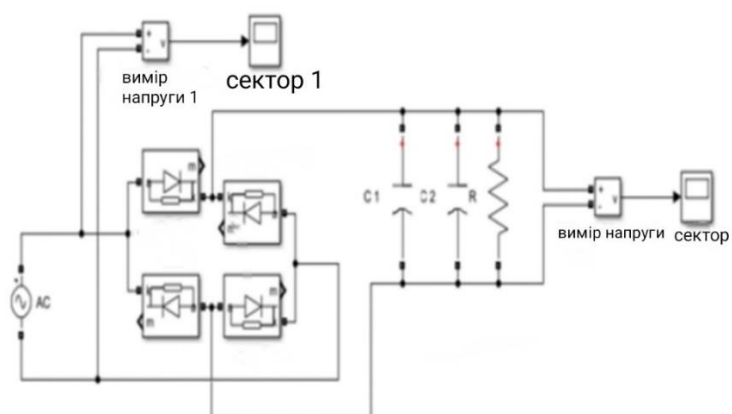


Рис. 1.21 – Схема електричного вихідного ланцюга

Оскільки п'єзоелектричні матеріали на підошви взутті стискаються під час ходьби, комфорт є важливим питанням. Тому устілка, бавовняна та гнучка. Устілка розташовується над розумною підошвою, збільшуючи гнучкість при натисканні на п'єзоелектричні матеріали. На виході виходить USB-кабель, який можна вставити в мобільний телефон для його зарядки. На рисунку 1.22 показана фінальна модель взуття [66].



Рис. 1.22 - Модель взуття з п'єзоелектричним матеріалом: 1 - п'єзоелектричні матеріали, 2 – підошва взуття, 3 – вкладна устілка, 4 – USB-кабель

Висновок:

1. Дослідження в області використання п'єзоелектричних матеріалів та їх застосування є перспективним напрямом. Різноманітні методи створення та використання п'єзоелектричних матеріалів, в тому числі їх інтегрування в текстиль, відкривають нові можливості для створення енергозберігаючих виробів.

2. До переваг у використанні п'єзоелектричних матеріалів можна віднести їх малий розмір, широкий діапазон частот, мала вага та можливість інтеграції їх у виробу легкої промисловості.

3. Трендовим напрямом є використання розумних текстильних матеріалів в аксесуарах та при виготовленні різноманітних виробів легкої промисловості.

4. Застосування п'єзоелектричних матеріалів, як джерела генерації енергії, під час активного використання взуття стає також є актуальним, оскільки вібрація від фізичної діяльності людини перетворює механічну напругу в електричну енергію, яка може бути використана для живлення електричних пристроїв.

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Леонардо да Вінчі (1452 - 1519), художник епохи Відродження, скульптор, архітектор і винахідник, назвав людську стопу «шедевром інженерії та витвором мистецтва» [68 - 69]. У його зошитах є численні малюнки та описи форми людської стопи. Да Вінчі добре розумів поздовжнє склепіння стопи і те, як вона змінює форму під час перенесення ваги. Та як вона змінює форму під час навантаження. Поздовжнє склепіння стопи також було в центрі уваги медиків протягом багатьох поколінь. Понад століття тому у 1896 році нью-йоркський хірург-ортопед Роял Вітмен описав, як руйнування поздовжнього склепіння стопи може спричинити стан, відомий як "слабка стопа", який також був відомий в той час як "плоскостопість", "розпластана стопа" та "пронація стопи" [68; 70 - 71].

Стопи з високими поздовжніми склепіннями, вперше названі *pes cavus* Літлом у 1853 році, були також відомі в той час як "порожниста стопа", "кігтеподібна стопа", "болтова стопа", "*pes arcuatus*" та "передній еквінус" [72; 73].

Навіть у сучасну епоху лікарі-ортопеди та клініцисти все ще приділяють пильну увагу поздовжньому склепінню як одній з ключових структур людської стопи. Вважається, що крайнощі у висоті поздовжнього склепіння призводять до патології та дисфункції стопи. Махан і Фланіган відзначили, що люди зі зменшеною висотою поздовжнього склепіння, або плоскостопістю, можуть страждати від болю, втоми, дегенерації суглобів та/або супутніх деформацій, таких як вальгусна деформація стопи, молоткоподібні пальці та метатарзалгія [74]. Особи зі збільшеною висотою поздовжнього склепіння Сміт і Грін відзначили, що люди зі збільшеною висотою поздовжнього склепіння, або *pes cavus*, можуть викликають аномальні навантаження на стопу, нестабільність та обмеженість стопи та гомілковостопного суглоба, обмежену рухливість стопи та труднощі з при підборі взуття [68].

Знання розподілу сил під стопою під час статичної та динамічної діяльності становить значний інтерес для аналізу функцій стопи. Більшість досліджень, присвячених кількісній оцінці розподілу навантаження під стопою, здається в першу чергу стосуються розташування результуючого центру опори, а також сил і моментів опори, зокрема, під час ходьби. Дослідження розподілу сил опори між різними ділянками стопи були відносно мало. Зазвичай вважалося, що стопа діє як триногу, а трьома точками опори п'ятка і головки першої та п'ятої плеснових кісток. Мортон (Morton, 1935) продемонстрував, що всі чотири бічні головки плеснових кісток беруть участь у перенесенні ваги і що стопа не розподіляє свою вагу як тринога [75].

Elftman (1934) виміряв розподіл тиску в стопі людини під час ходьби за допомогою кінематографії і продемонстрував, що вся площа кулі стопи бере участь у розподілі ваги [76]. Джонс (1941) застосував різні навантаження на вертикальну великогомілкову кістку ноги трупа, так і натягував сухожилля, дублюючи дії м'язів, і виміряв тиск і рух, що виникали тиск і рух, спричинені або навантаженням на великогомілкову кістку, або натягом сухожиль, або і тим, і іншим. Він спостерігав розподіл тиску між першою плесновою кісткою і чотирма бічними плесновими кістками в стопі трупа у співвідношенні 1:1, тоді як у розслабленій живій стопі цей показник становив 1:1 [77]. У живій стопі в положенні стоячи співвідношення було 1:2. Мортон повідомив про більш низьке значення 1:2 для співвідношення в положенні стоячи [75]. Schwartz (1964) використовував осцилографічний метод у поєднанні з датчиками прикріпленими до підшви стопи для запису часової історії сил у шести функціонально значущих ділянках під стопою під час локомоції [78]. В аналогічному дослідженні ходьби, Бауман і Бранд (1963) також прикріплювали датчики тиску до стопи для вимірювання розподілу тиску. В обох цих дослідженнях можна припустити, що прикріплення датчиків призводить до незначного викривлення підшви, таким чином змінюючи таким чином ходу піддослідних [79]. Цей недолік подолано у дослідженнях Хаттона і Драббла (1972) де суб'єкти ходили

босоніж по твердій чутливою до навантаження поверхнею, що складалася з дванадцяти інструментальних балок, розміщених поруч один з одним. Розміщуючи балки поперек напрямку ходьби, вимірювали поздовжній розподіл тиску (від п'яти до стопи) [80].

Ходьба - це спосіб пересування, який є одним із важливих факторів, необхідних для того, щоб жити незалежним життям. Залежно від того, як працює механізм, кожна здорова людина робить в середньому від 3500 до 8500 кроків на день [81].

Повний цикл ходи - це проміжок часу між двома послідовними подіями однієї і тієї ж ноги під час нормальної ходьби. Зазвичай його реєструють від моменту, коли нога вперше торкається землі, до моменту, коли ця ж нога знову торкається землі [82]. Кожен крок символізує один цикл ходи, який поділяється на два періоди: стояння та замах. Стояння становить 60% циклу ходи, протягом якого стопа залишається в контакті з поверхнею. 40% становить решту циклу ходи, коли стопа не контактує з поверхнею [81].

2.1 Розподіл навантаження ваги тіла людини на стопу

На стопі знаходиться близько 70 000 нервових закінчень, кожне з яких відповідає за роботу певних органів. Некомфортне взуття спричиняє неправильний розподіл навантаження на стопи, що, в свою чергу, має негативний вплив на стан нашого здоров'я: порушується кровообіг у всьому тілі та органах. Тому не дивно, що правильно обране взуття має вагомий вплив не тільки на стан наших ніг, але й на наш організм в цілому [83].

Людська стопа являється основою для розробки дизайну взуття. Частина стопи, яка безпосередньо взаємодіє з поверхнею, називається підошвою. Стопа має три точки кісткової опори, дві з них розташовані в передній частині стопи і одна - в задній. Задня частина має назву п'ятка; передня частина, яка охоплює п'ять пальців, називається пальцями стопи. Пальці стопи розташовані майже паралельно один одному і мають меншу рухливість, ніж пальці рук [84].

Функціонування стопи забезпечується набором завдань, які вона виконує: - поглинання енергії удару в момент "приземлення" і передача вертикального імпульсу тілу в момент його відштовхування від опори, що є характерним для здійснення природних рухів (ходьба, біг, стрибки); - забезпечення опори і рівноваги при стоянні і ходьбі; - захист опорно-рухового апарату від можливих травм і перевантажень [85].

Форма стопи описується її довжиною, шириною та обхватом. За довжиною стопи поділяють на короткі, середньої довжини та довгі; за шириною - на вузькі, середньої ширини та широкі. Крім того, стопи відрізняються також товщиною жирового шару стопи [85].

Стопа - це складна анатомічна структура, розташована на дистальному кінці ноги, що входить до складу нижньої кінцівки і є її кінцевим сегментом. Вона є основою системи антигравітаційного контролю (постуральної системи) і саме завдяки їй ходити, стояти та утримувати рівновагу [86]. Виділяють три основні функції стопи [87]:

- ресорна - здатність пружно сплющуватися під навантаженням і відновлювати свою форму після його зняття;
- балансування - участь у регуляції постави і позиційної активності при стоянні і ходьбі;
- -поштовхова (опорна) - передача прискорення загального центру мас (ЗЦМ) при локомоції.

Протягом життя функціональні показники стопи змінюються. Передусім це стосується її ресорної та опорної функцій. У випадку порушення симетричності розподілу навантаження на стопу, а також через зменшення її пружних характеристик збільшуються ударні навантаження та посилюється вібраційний вплив на всю кісткову систему [88].

Скелетна структура стопи складається з 26 кісток (рис. 2.1) і може бути розділена топографічно на три відділи [89]:

- 1) передній відділ стопи, що складається з кісток фаланг і плеснові кістки;

- 2) середня частина стопи, що складається з трьох клиноподібних, кубоподібної та човноподібної (або ладьевидної) кісток;
- 3) задня частина стопи задній відділ стопи, що складається з таранної та п'яткової кісток.

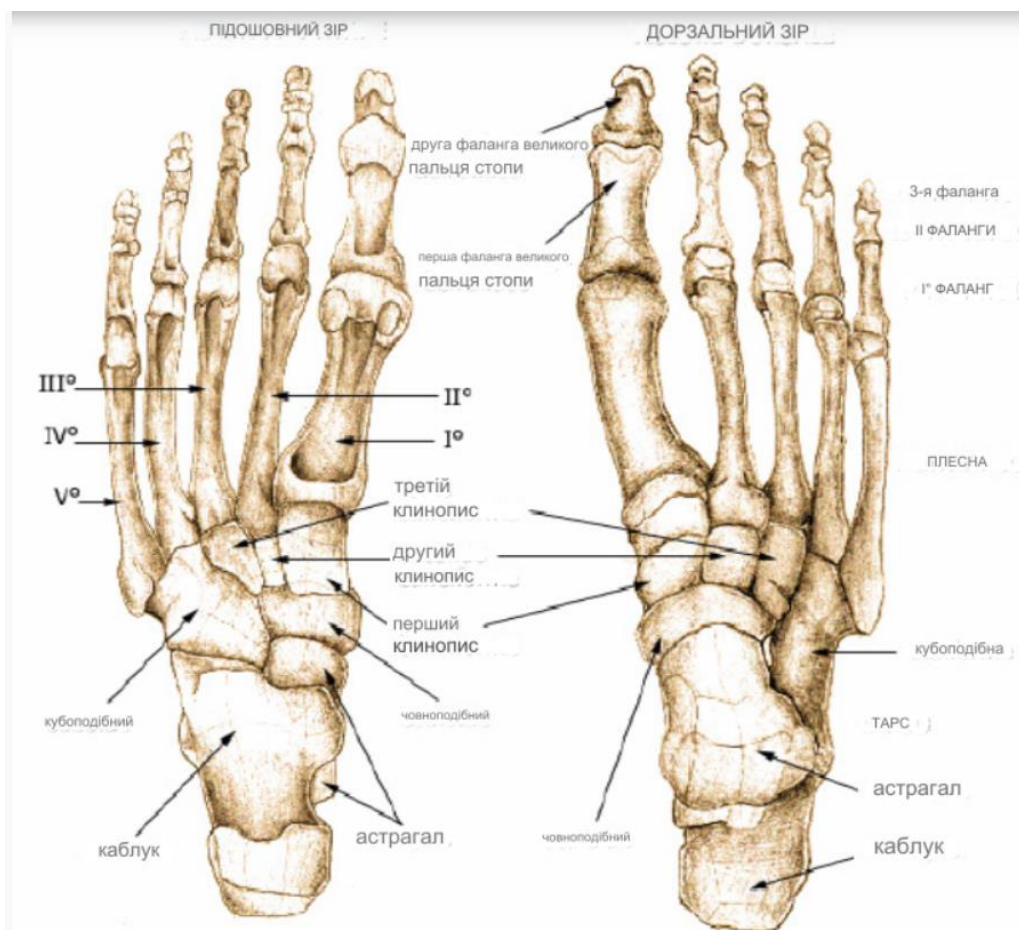


Рис. 2.1 - Скелетна структура стопи

Під час стояння вага тіла розподіляється на обидві стопи, хоча у деяких людей найбільша вага припадає на ліву ногу. Вага, яка припадає на кожену стопу, розподіляється через таранну кістку на п'яту і передню частину стопи, і особливо на ту сторону стопи, де відбувається контакт з поверхнею землі (рис. 2.2). Це відбувається тому, що середня частина підшви стопи увігнута внизу, більш акцентована з медіальної сторони і менш розвинена з латеральної [89].

У положенні опущеної вертикалі центр ваги тіла падає далі вперед ніж гомілковостопний суглоб. Лінія тяжіння повинна фактично перетинати вершину

склепіння між точками контакту з землею, тобто п'ятою і передньою частиною стопи, щоб вага була правильно розподілена. Насправді вона зазвичай проходить між горбком плеснової кістки з медіальної сторони та основою п'ятої плеснової кістки з латеральної сторони. Таким чином, лінія, що відображає тиск, який чиниться через великогомілкову кістку, не є вертикальною, а злегка нахилена, оскільки проходить через центр ваги тіла (рис. 2.2) [89].

У положенні стоячи 60% тиску припадає на п'яткову кістку, а 30% - на рівень головок плеснових кісток (рис. 2.3). Решта 10% тиску розподіляються між пальцями стопи і фасцією середнього відділу стопи [89].

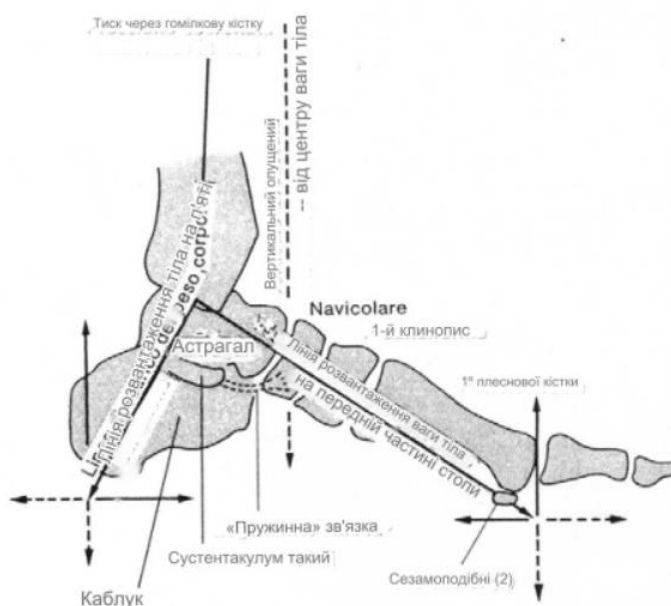


Рис. 2.2 – Схема навантаження ваги людини на стопу в положенні стоячи

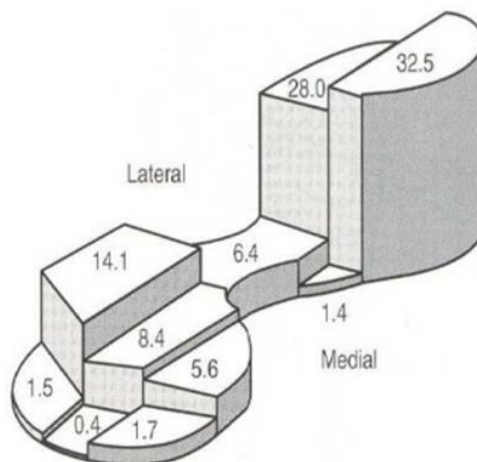


Рис. 2.3 – Розподіл навантаження (%) на стопу людини під час стояння

За статистикою ВООЗ, 75% людей мають ті чи інші патологічні порушення у стопах, найпоширенішим з яких є плоскостопість (зміна будови стопи, що характеризується зменшенням висоти її поперечного та поздовжнього склепінь). Ця патологія є причиною багатьох серйозних хвороб, які досить часто призводять до інвалідності. Підраховано, що в середньому протягом дня людина проводить приблизно чотири години стоячи [87].

Аналіз ходи - це медичне обстеження, яке стало майже необхідним для пацієнтів з розладами ходьби, метою цього обстеження є вимірювання прикладеного тиску і записувати кроки пацієнта для порівняння з довідковими даними [32]. Бігова доріжка для ортопедів - це пристрій, який ортопеди використовують під час огляду динаміки ходьби, він складається з матриці датчиків високої роздільної здатності, які реагують на прикладений тиск (рис. 2.4). Ортопед записує кроки босого пацієнта, потім дані відображаються на комп'ютері у вигляді кривих і карт стопи. З цих даних ортопед може мати кілька відомостей про динаміку стопа, тип кроку (супінатор, пронататор або нейтральний), тип стопи (плоска, порожниста або звичайна) і багато іншого [32].

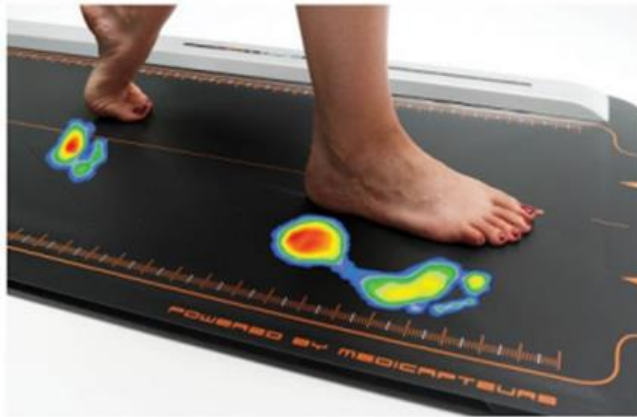


Рис. 2.4 – Бігова доріжка для ортопедів

Розподіл тиску на стопу залежить від багатьох факторів, серед них швидкість ходи, вага тіла, форма стопи та стать [47].

Дослідження ходи є предметом цілої низки наукових напрямків, у тому числі спортивних, з метою покращення результатів спортсменів під час бігу [90]; шляхом вивчення їхніх поз та різних точок тиску [32; 91-92].

Кожна людина має свою власну і унікальну ходу, але саме скоординована дія зчленування м'язів, що дозволяє тілу рухатися, однакова для кожної людини, при ходьбі вага розподіляється на спільні точки тиску між кожною людиною.

Існує три основні етапи, які визначають крок:

- Під час першого кроку нога контактує з землею через п'яту, сила реакція землі приблизно дорівнює масі тіла при нормальній швидкості і під час цієї фази центр ваги знаходиться за п'ятою.
- На другому кроці стопа рівно стоїть на поверхні, тиск розподіляється всередині вся стопа і центр ваги зміщується до центру стопи.
- Остання стадія (також називається пропульсивною фазою) – це фаза, на якій весь тиск зміщується до передньої частини стопи, ця поза дозволяє рухатися назад до ваги ініціал людини та встановити новий центр ваги.

Три етапи представляють цикл ходьби, який повинна мати здорова людина (рис. 2.5) [32].

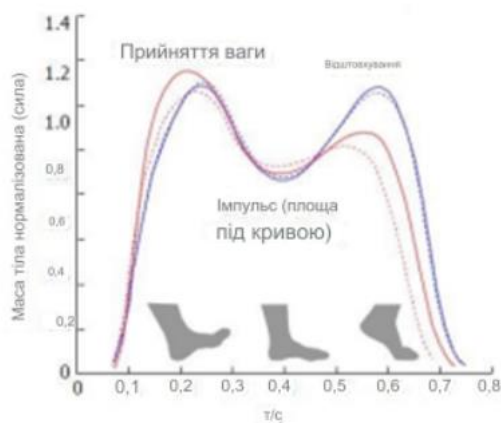


Рис. 2.5 – Сила реакції землі під час нормального циклу ходи

Щоб краще оцінити розподіл тиску, стопу зазвичай ділять на різні зони, які ще називають маскою. Розподіляють зону стопи на 10 областей, як показано на рисунку 2.6. На рисунку 2.7 показано розподіл максимального тиску на стопу для одного кроку, виміряного за допомогою взуттєвих устілок з 99 ємнісними датчиками [93; 94], де максимальний тиск припадає на п'яту та п'яткову зону. Це дослідження також дозволило зробити висновок що старіння впливає на динаміку розподілу тиску на стопу під час звичайної ходьби, і люди похилого віку демонструють нижчий тиск в області п'яркової кістки та підйому порівняно з молодими людьми. Збільшення маси тіла демонструє позитивний зв'язок між піковим та середніми показниками підошовного тиску для більшості підошовних ділянок [93; 95]. Окрім віку та маси тіла, на зміну підошовного тиску також впливає взуття. Наприклад, дослідження Wiegand щодо підошовного тиску у 37 спортсменів, які бігали з самостійно обраною швидкістю, показало, що загальний піковий тиск на стопу в біговому взутті на плоскій підошві становив $446,6 \pm 77,25$ кПа, тоді як у тренувальних кросівках він становив $407,3 \pm 91,7$ кПа [95; 96].

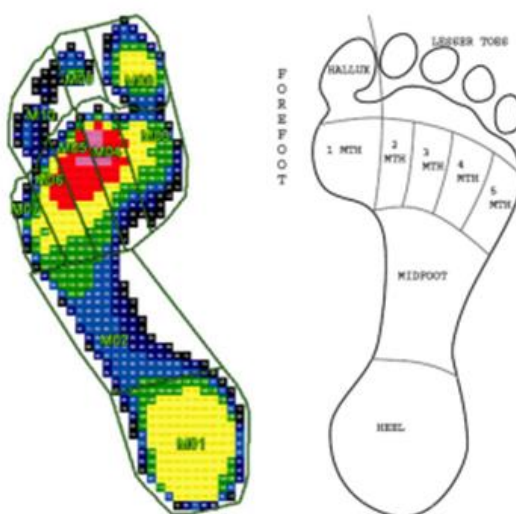


Рис. 2.6 - Маска, що розподіляє зону з 10 ділянок стопи

Робота Летиції Клавері [97] дозволила в першій частині дослідження розмістити датчики у стопі за допомогою платформи тиску (Win-pod®), який записує дані про підошовний тиск, і платформу для сили (АМТІ), розміщеної під Win-pod® для реєстрації сили реакції. Після ідентифікації точки підошовного тиску (рис. 2.8), для дослідження використовується бездротова система. Він складається з 9 промислових п'єзорезистивних датчиків і карти збору з а програмне забезпечення для обробки, розроблене компанією-партнером (рис. 2.9) [32].

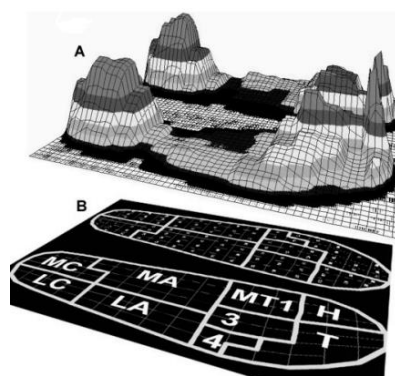


Рис 2.7 - Розподіл тиску на стопу (а - максимальний розподіл тиску, б - дев'ять анатомічних масок, що накладаються на устілку)

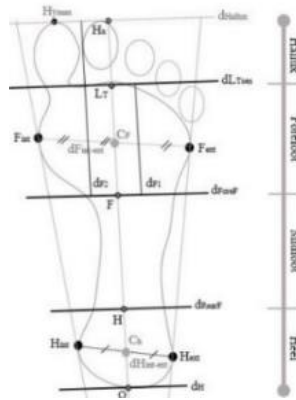


Рис. 2.8 – Алгоритм поділу тиску.



Рис. 2.9 - Система W-inshoe® з 9 ізольованими датчиками, підключеними до коробки

Створення підошви є першим кроком у розробці прототипу. Л. Клавері [97], який розробив алгоритм, який дозволяє розділити відбиток стопи на кілька відповідних зон тиску. Це алгоритм ділить стопу на 4 зони, як показано на рис. 2.10. Вони становлять 30% (зона з п'яти; сегмент А), 35% (середина стопи; сегмент В), 20% (передня частина стопи; сегмент С) і 15% (область пальців; сегмент D) від загальної довжини стопи.) [32].

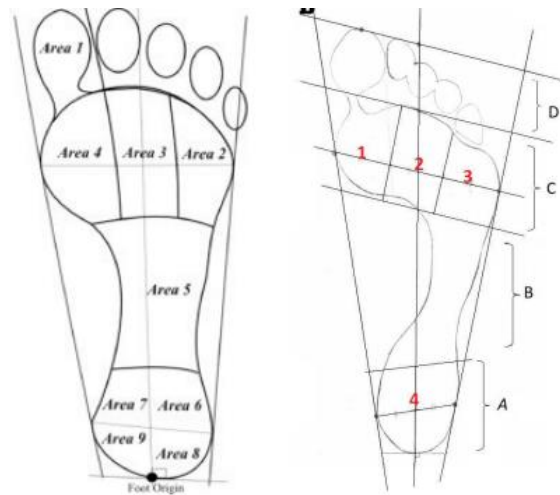


Рис. 2.10 – Схема ділення стопи на 4 зони

2.2 Електричне підключення п'єзоелектричних перетворювачів

У своєму дослідженні *Du et al.* [98] підключили ' n ' число PZT безпосередньо як послідовне і випрямило ' n ' число виходу послідовного з'єднання з мостовим випрямлячем, щоб збільшити вихідну потужність. *Wang et al.* [99] експериментували з підключенням чотирьох PZT як послідовно, так і паралельно, і отримали максимальну вихідну потужність 28 мВт при оптимальному виході 160 кОм і частоті вібрації 150 Гц у випадках, коли перетворювачі були послідовно підключені. При паралельному підключенні перетворювачів вони вимірювали максимальну вихідну потужність як 27 мВт для оптимальної вихідної потужності 11 кОм на тій же частоті. *Du et al.* [100] запропонували схему динамічного структурованого інтерфейсу для електричного зв'язку між PZT і порівняли продуктивність цієї схеми з послідовними та паралельними з'єднаннями. Однак запропонована схема може бути використана для автоматичного контакту двох ПЗТ паралельно або послідовно відповідно до рівня збудження навколишнього середовища і напруги в накопичувальному конденсаторі. *Lu et al.* [101] сконструювали п'єзоелектричний збирач енергії, що складається з багатошарових шарів. Як того вимагає конструкція проектованого енергозбирача, ПЗТ у всіх шарах паралельно з'єднані один з одним. Аналогічним чином, *Jasim et al.* [102] провели числове

моделювання та лабораторні випробування п'єзоелектричного збирача енергії для застосування на дорожньому полотні. Вони паралельно з'єднали між собою ПЗТ в розроблюваному енергозбиральному комбайні. Аккая і Оздемір [103] розробили збиральний комбайн, який міг перетворювати енергію вітру в електричну за допомогою PZT і в цьому комбайні; вони паралельно з'єднали п'ять гілок, що складаються з п'яти ПЗТ і мостового випрямляча на виході кожної. На додаток до представлення стратегії випрямлення з падіннями низької напруги, топологія схеми, запропонована в цьому дослідженні, також вирішує проблеми електричного з'єднання між більш ніж одним PZT. Крім того, за рахунок використовуваних конденсаторів, запропонована топологія схеми також має характерні регулювання. Ще однією важливою характеристикою даної топології схеми є те, що вона має дуже просту структуру. Нарешті, запропонована топологія схеми не включає в себе зовнішнє джерело живлення. На рис. 2.11 слід розглянути, щоб зрозуміти використовувану стратегію виправлення.

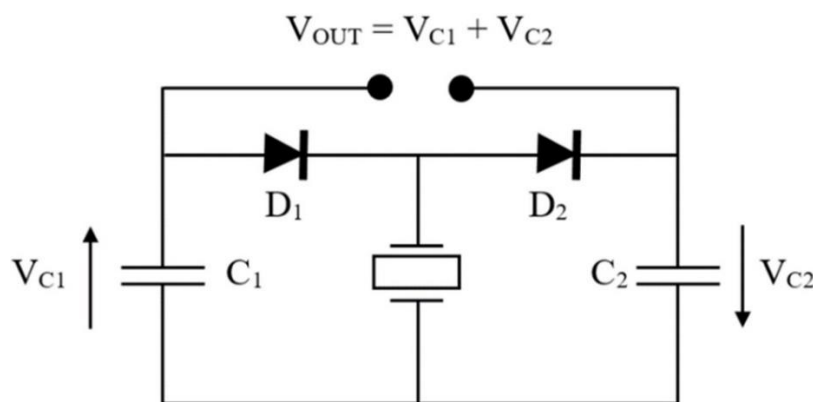


Рис. 2.11 - Стратегія випрямляча

Припустимо, що PZT, який видно на рис. 2.11 – ідеальне синусоїдальне джерело напруги. У цьому випадку під час негативного напівперіоду живлення буде проводити тільки діод D_1 і заряджатися конденсатор C_1 . Втрата напруги, яка виникне в цьому випадку, складається з падіння напруги на діоді D_1 . Аналогічно під час позитивного напівперіоду живлення діод D_2 буде проводити і заряджатися C_2 . Втрата напруги, яка виникне в цьому випадку, складається з

падіння напруги на діоді D2. Однак, оскільки два діоди завжди проводять як позитивні, так і негативні цикли в повному квадратному випрямлячі, втрати напруги, що виникають, в два рази вище. Зв'язок між цими ланцюгами випрямляча наведена на рис. 2.12

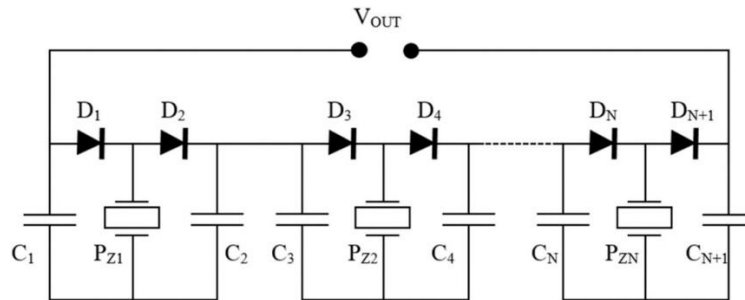


Рис. 2.13 – Електричні з'єднання між п'єзоелектричними перетворювачами

На рис. 2.14 можна побачити напруги, що генеруються PZT, випрямляються з найменшими втратами напруги так що електричний зв'язок між перетворювачами виконується ефективно. Крім того, ще одним важливим питанням є той факт, що перетворювачі не можуть посылати струми один через одного.

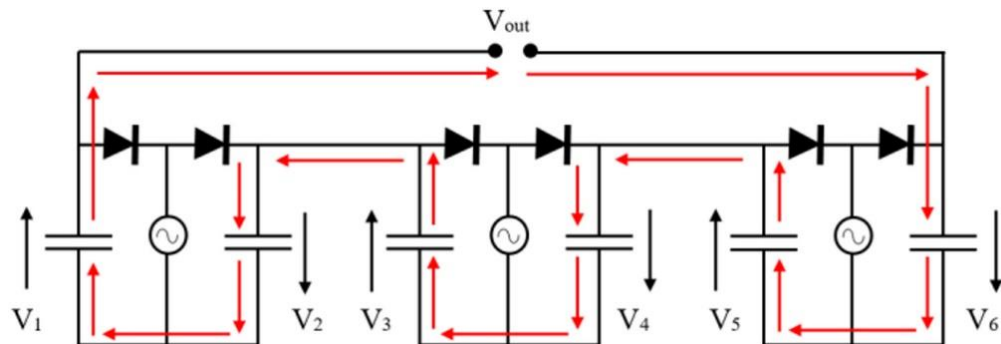


Рис. 2.14 – Зразок схеми наведений для аналізу запропонованої топології

Для експериментів використовувалася одна і та ж робоча частота. Ця робоча частота була визначена як 200 Гц. У першому експерименті вихід послідовно з'єднаних чотирьох PZT використовувався для зарядки вихідного конденсатора 100 мкФ через мостовий випрямляч. Використовуваний тип послідовного з'єднання показаний на рис. 2.15

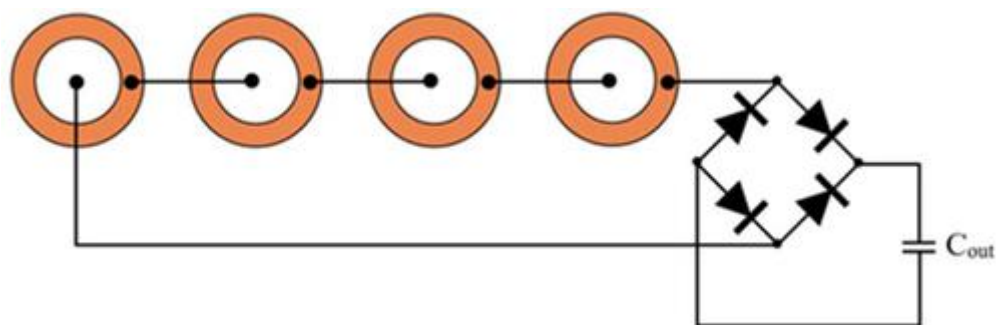


Рис. 2.15 - Послідовне з'єднання PZT

Напруга, що виникла на вихідному конденсаторі в разі послідовного з'єднання PZT, наведена на рис. 2.16

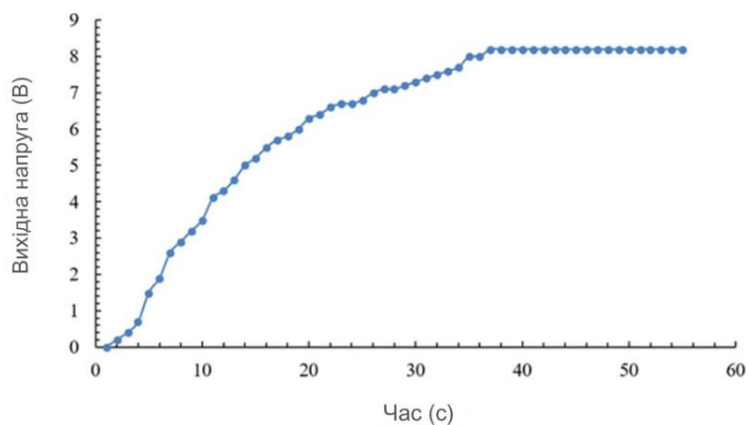


Рис. 2.16 - Вихідна напруга на конденсаторі для послідовного підключення

Максимальне значення напруги, що зберігається на вихідному конденсаторі при послідовному підключенні PZT, становило 8,2 В за 38-ю секунду. У другому проведеному експерименті PZT були паралельно з'єднані, як видно на рис. 2.17.

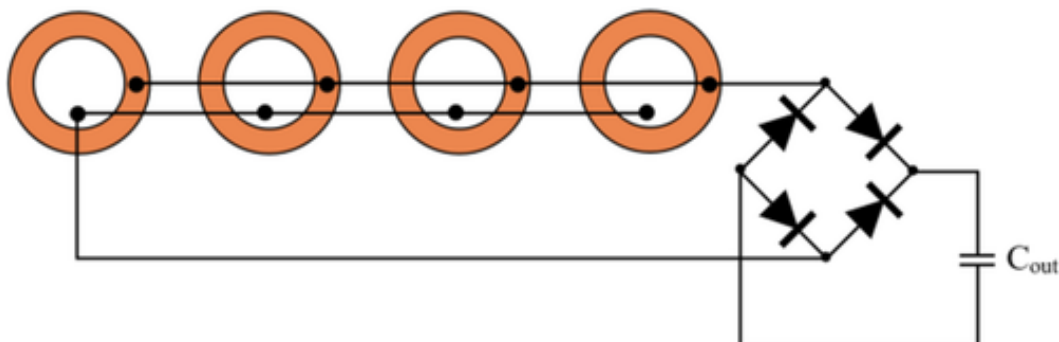


Рис. 2.17 - Паралельне підключення PZT

Рис. 2.18 показано напругу на вихідному конденсаторі при паралельному з'єднанні PZT .

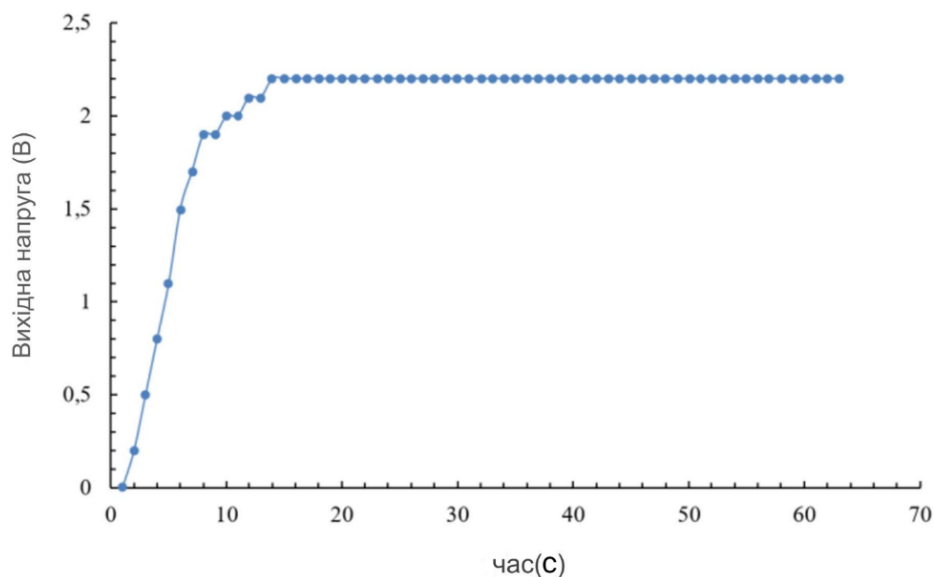


Рис. 2.18 - Вихідна напруга на конденсаторі для паралельного підключення

При паралельному з'єднанні PZT максимальне значення напруги, що зберігається на вихідному конденсаторі, становило 2,2 В за 14-ту секунду. У більшості застосувань метою паралельного підключення п'єзоелектричних перетворювачів є збільшення зарядного струму. Однак вихідна напруга, отримана в цьому випадку, буде нижчою, ніж вихідна напруга, отримана від послідовно підключеного п'єзоелектричного перетворювача, таким чином, що буде обернено пропорційно кількості використовуваних перетворювачів. Якщо порівнювати це з рис. 2.16 і 2.18, видно, що максимальна вихідна потужність, одержувана при послідовному з'єднанні, приблизно в чотири рази перевищує максимальну вихідну потужність, одержувану при паралельному з'єднанні. Причиною цього є той факт, що в експериментах використовувалися чотири перетворювача.

У третьому проведеному експерименті значення напруги на вихідному конденсаторі при послідовно-паралельному з'єднанні наведені на рис. 2.19.

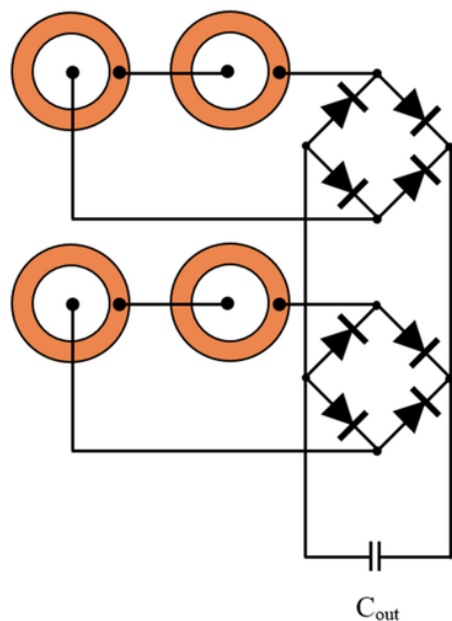


Рис. 2.19 - Послідовне – паралельне з'єднання PZT

Напряга на вихідному конденсаторі в разі послідовно-паралельного з'єднання PZT показана на рис. 2.20

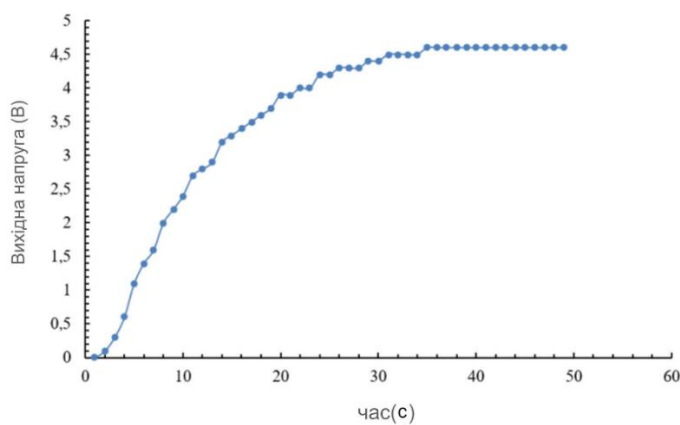


Рис. 2.20 - Вихідна напруга на конденсаторі для послідовно-паралельного з'єднання

Аналізуючи надану інформацію для отримання максимального ефекту від впровадження п'єзоелементів у взуття запропоновано розташовувати їх під п'яткою в зоні розміщення п'яткової та таранної кістки.

Для цього було обрано п'єзоелементи у вигляді дисків діаметром 27 мм в кількості 4-6 штук, які з'єднанні послідовно між собою, що дозволить генерувати в середньому 25 мВт електричної потужності під час ходьби.

Висновок:

1. Визначено, що у положенні стоячи 60% тиску припадає на п'яткову кістку, а 30% - на рівень головок плеснових кісток. Решта 10% тиску розподіляються між пальцями стопи і фасцією середнього відділу стопи.
2. 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.
3. Виявлено, що найбільша генерація енергії від PZT відбувається при послідовному їх з'єднанні. Максимальна вихідна потужність, одержувана при послідовному з'єднанні, приблизно в чотири рази перевищує максимальну вихідну потужність, одержувану при паралельному з'єднанні.
4. Проаналізовано, що максимального ефекту від впровадження п'єзоелементів у взутті можна досягнути при розміщенні їх в зонах найбільшого тиску в стопі – при ходьбі та стоянні, а саме: у п'ятковій частині стопи, середній та передній частині стопи.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – АПРОБАЦІЙНИЙ

3D-сканування є однією з менш обговорюваних технологій, які використовуються для проектування, перевірки та контролю якості. Ця безконтактна вимірювальна технологія перетворює фізичну модель на цифрове 3D-комп'ютерне проектування (CAD) за допомогою різних програм для сканування. Він стає важливим інструментом для виробників, яким потрібна точна перевірка розмірів, віртуальне зображення, аналіз і навіть виготовлення фізичних прототипів. 3D технології сканування зазвичай збирають необроблені дані у вигляді інформації хмари точок і перетворюють їх у зручні формати, такі як модель CAD також [104].

Вироби різних розмірів можна сканувати 3D з точними вимірами. Це можна використовувати для моделювання, аналізу та друку, тим самим економлячи час при проектуванні. Розробка будь-якого прототипу може бути легко можливою, що також може бути корисним для процесу зворотного інжинірингу. 3D-сканери працюють швидше, ніж вимірювання, зроблені вручну, практично для всіх видів робіт. На великих об'єктах вони набагато зручніше і швидше [105;106].

Для одержання антропометричної інформації існують контактні та безконтактні методи отримання антропометричних параметрів стопи. В Україні введена система координат, яка поєднує вимірювання стопи з проектуванням взуттєвих колодок [107].

3.1 3D види сканування стопи людини

Знання точної тривимірної (3D) форми стопи надзвичайно важливе для взуттєвої промисловості, оскільки правильна посадка взуття на нозі є важливим фактором комфорту [108].

Повноцінні системи 3D-сканування є логічним продовженням згаданих обмежень більш ранніх систем. Ці системи в основному засновані на принципі

лазерної триангуляції. Однією з перших таких систем стала вимірювальна система виробництва науково-дослідної корпорації VORUM [109]. Він має чотири лазерні проєктори та вісім камер, які вимірюють бічний поперечний переріз стопи, що визначається проєкційною світловою площиною. Вся 3D-форма стопи додатково сканується переміщенням повного вузла камер проєктора вздовж поздовжньої осі стопи (від пальців до п'яти). Оскільки складність цієї системи відносно висока через велику кількість камер і лазерів, які повинні спрацьовувати під час процедури вимірювання, ціна системи досить висока. Подібна система, але дешева, була пізніше розроблена Коучі і Мочімару [110].

Система 3D сканування стоп з поворотною вимірювальною головою [108] схематично представлена на рис. 3.1. Цей процес хоч і забезпечував достатній рівень точності, але був доволі складним і трудомістким.

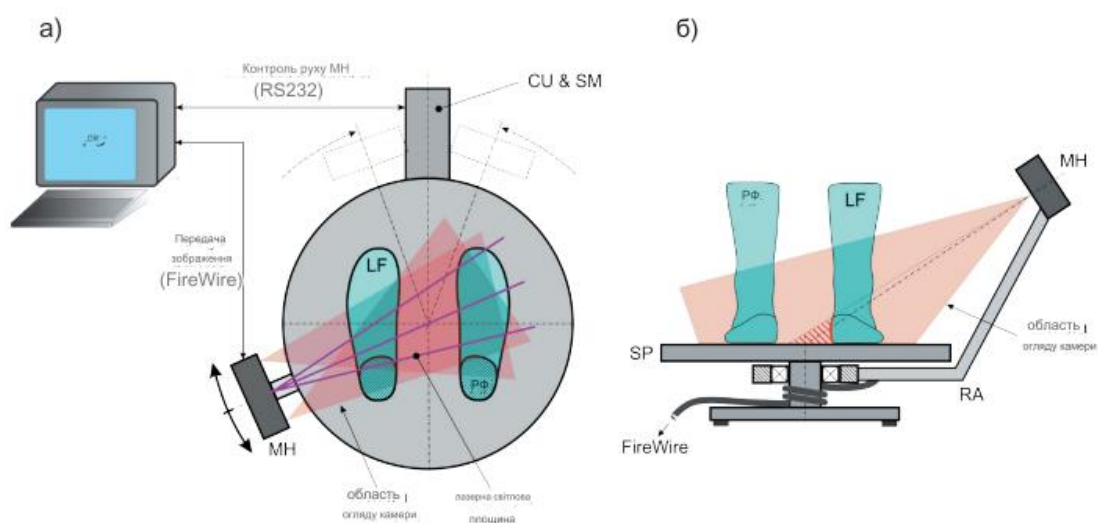


Рис. 3.1 - Схеми системи 3D сканування стопи з поворотною вимірювальною головою, а) вид зверху, б) вид спереду: МГ - вимірювальна головка, CU - блок управління, SM - привід крокового двигуна

З появою FootStation Pack з'явилися нові можливості. Ця сучасна технологія дозволяє швидко і точно отримати тривимірні моделі стопи, що відображає всі її індивідуальні анатомічні особливості (рис. 3.2) [111].

Особливості модуля:

- Висока точність: точність 3D даних стопи до 0,5 мм;
- Передає дані в режимі реального часу і формує детальний звіт про аналіз анатомії стопи, що охоплює більше 30 точок індивідуальних вимірювань від п'яти до носка;
- Сумісність: виведення даних у форматі STL.

Основні технічні характеристики.

- Габарити платформи - 450 мм x 310 мм x 61,5 мм;
- Максимальний розмір ніг - 44 (270 мм);
- Максимальна вага навантаження на платформу - 120 кг.



Рис. 3.2 - 3D сканер FootStation Pack

Одним із важливих кроків у розвитку 3D технології сканування була поява 3D Footscanner Tiger (рис. 3.3). Цей інноваційний пристрій надає ще більш високу точність і деталізацію сканування, ніж його попередники.

3D Footscanner Tiger застосовує вдосконалені алгоритми обробки зображень і високочутливі датчики для отримання надточних моделей стоп за найкоротший час. В наслідок цього процес сканування стає ще комфортнішим і швидшим, забезпечуючи високоякісні результати.

Крім точного відтворення анатомічних особливостей стопи, цей сканер також дозволяє детально проаналізувати розподіл навантаження на стопу під час ходьби або інших видів активності [112].

Томоко та інші розробили інноваційний 3D-сканер стопи, яким можна скористатися безпосередньо з телефону. Ця інновація робить процес сканування якомога доступнішим і зручнішим для кінцевого користувача, не жертвуючи при цьому точністю та якістю отриманих даних (рис 3.4).



Рис. 3.3 - 3D Footscanner Tiger

За допомогою мобільного застосунку користувачі можуть відсканувати власні стопи, отримавши тривимірні моделі, які точно відображають анатомічні особливості (рис 3.5). Такий підхід не тільки економить час, але й забезпечує високу точність даних для подальшої обробки.

Цей мобільний 3D-сканер є проривом у галузі ортопедії, надаючи можливості отримувати індивідуальні консультації та виготовляти персоналізовану ортопедичну продукцію на основі даних, зібраних у домашніх умовах. Інтеграція технологій Томоко відкриває нові можливості для зручного та ефективного догляду за ногами [113].



Рис. 3.4 - 3D-сканер стопи з телефону

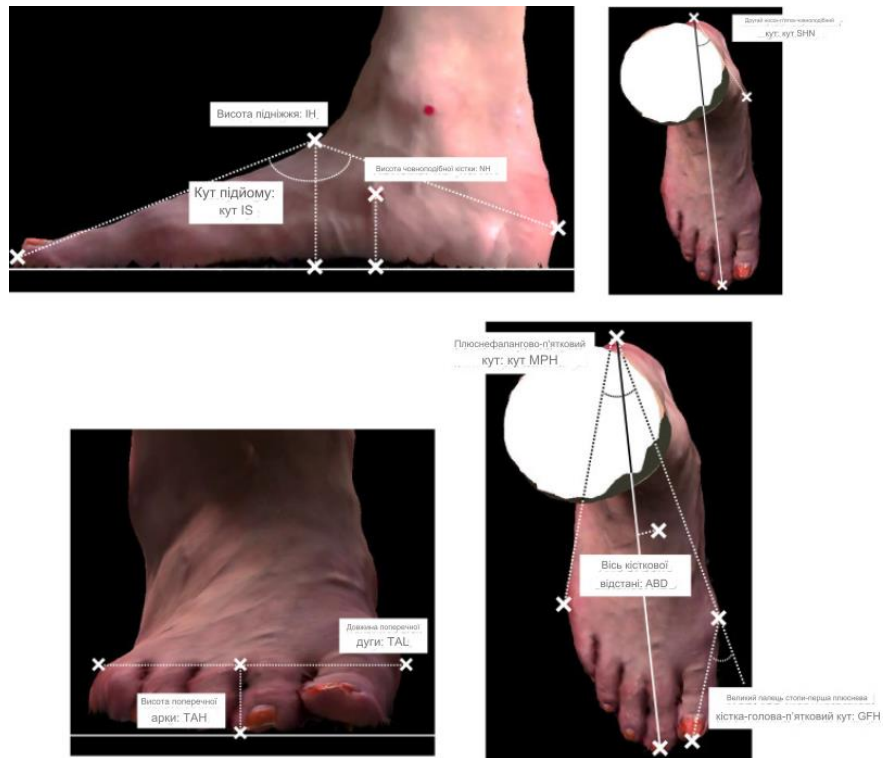


Рис. 3.5 - Тривимірна модель відсканованої стопи

3.2 Сканування стопи 3D-сканера INFOOD

Вимірювання стопи зазвичай проводиться в звичайній позиції (основна антропометрична поза), коли обидві стопи навантажені вагою тіла і знаходяться на відстані 20 см одна від одної (рис. 3.6).



Рис. 3.6 - Сканування стопи з використанням 3D-сканера INFOOD

Сам процес сканування відбувається в наступній послідовності:

- сканування відбувається на босу ногу;
- ліва стопа розміщується на спеціальній підставці, яка розташовується на рівні робочої частини сканера;
- права нога розміщується на робочій поверхні сканера;
- у програмному режимі необхідно вибрати об'єкт для сканування (R,L);
- у діалоговому вікні одержуємо основні розміри стопи (рис. 3.7);
- таким же чином скануємо ліву стопу

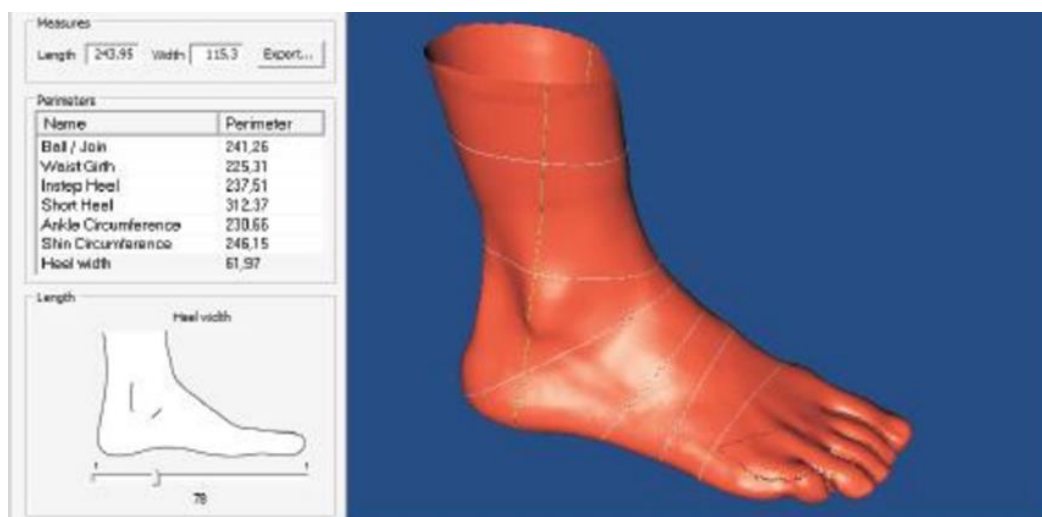


Рис. 3.7 - Зображення 3D-моделі стопи

3D-зображення відсканованої стопи отримується швидше, ніж за 27 секунд, у трьох видах якості. У комплект даних входить фотоплантограма лівої і правої стопи в масштабі 1:1

3.3 Визначення контуру відбитку стопи для проектування устілки та визначення раціонального розміщення ПЕ у взутті.

За допомогою 3D-сканера INFOOD було зроблено детальне сканування стопи, в результаті якого був одержаний високоточний тривимірний відбиток стопи людини (Рис. 3.8). Цей метод дозволив відтворити всі анатомічні форми стопи, в тому числі вигини та нерівності.



Рис. 3.8 – Відбиток стопи людини, отриманий за допомогою 3D сканера INFOOD

Отриманий відбиток стопи був використаний для створення індивідуального контуру устілки. Зокрема, дані були імпортовані в Corel Draw. В програмі створили контур устілки, яка якомога точніше відповідає анатомічній будові стопи, забезпечуючи ідеальне прилягання та підтримку (Рис. 3.9).



Рис. 3.9 - Графічне зображення устілки на основі контуру та відбитку стопи

Місце розташування п'єзоелементів на устілці взуття може значно вплинути на ефективність генерації електроенергії під час ходьби. Ми розглянули декілька варіантів розташування п'єзоелементів:

Під п'ятовою частиною стопи. Найбільше навантаження під час ходьби отримує п'ята, що забезпечує максимальну деформацію п'єзоелементів і, відповідно, генерацію енергії (рис. 3.10).

Під передньою частиною стопи. Передня частина стопи також отримує значне навантаження, особливо під час швидкого бігу або ходьби (рис. 3.11).

По всій довжині устілки. Рівномірний розташування п'єзоелементів дозволяє отримувати енергію з усієї поверхні стопи (рис. 3.12).

Комбіноване розташування. Оптимізація генерації енергії під час різних станів ходьби (рис. 3.13).



Рис. 3.10 – Схема розташування п'єзоелементів на п'ятовій частини стопи



Рис. 3.11 - Схема розташування п'єзоелементів на передній частині стопи

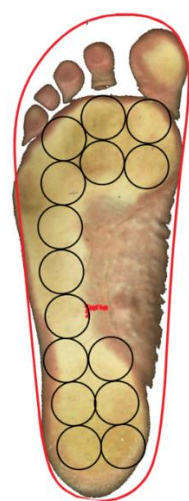


Рис. 3.12 - Схема розташування п'єзоелементів по всій довжині устілки



Рис. 3.13 - Схема комбінованого розташування п'єзоелементів

3.4 Визначення раціонального варіанту розміщення ПЕ на устілці з урахування найбільшого тиску на плантарній поверхні стопи

Під час розробки та розташування п'єзоелементів на устілці було розглянуто декілька важливих аспектів, зокрема, їх крихкість та ймовірність пошкодження. Так як п'єзоелементи можуть легко зламатися при розташуванні в передній частині стопи, де тиск і навантаження значно змінюються під час руху, було прийняте рішення оптимізувати їх розміщення.

В кінцевому результаті було вибрано переважно розташування п'єзоелементів у п'ятковій частині стопи, де під час ходьби або бігу відбувається найбільше навантаження. Це не лише забезпечує максимальну генерацію енергії, але й захищає п'єзоелементи від ймовірних пошкоджень, збільшуючи їх зносостійкість та ефективність (рис. 3.10).

При розробці раціональних рішень інтеграції п'єзоелементів у взуття для конвертації механічної енергії в електричну постала необхідність оптимізувати їхню форму та місце розташування.

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. 3.14) [114].



Рис. 3.14 - Схема розташування п'єзоелектронних генераторів зі зрізаним ділянками електрода на устілці з урахуванням найбільшої концентрації тиску в п'ятковій зоні стопи

Для визначення способу з'єднання п'єзоелектричних елементів враховано дослідження Shubham Gupta [115], 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 елементів 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.

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 заряджання конденсатора під час руху. Для зарядження конденсатора знадобилося близько 1500 кроків, щоб підвищити напругу від 0 до 2 В, але для подальшого підвищення напруги до 4 В знадобилося 5000 кроків. На рисунку

3.15 показано продуктивність зарядки конденсатора під час ходьби. Результати цього дослідження показали, що електроенергія, яка генерується під час ходьби людини, може бути ефективно накопичена в гібридних конденсаторах. Гібридний конденсатор мав максимальну робочу напругу 4,0 В і був здатний зберігати енергію на рівні приблизно 30 Вт год/кг.

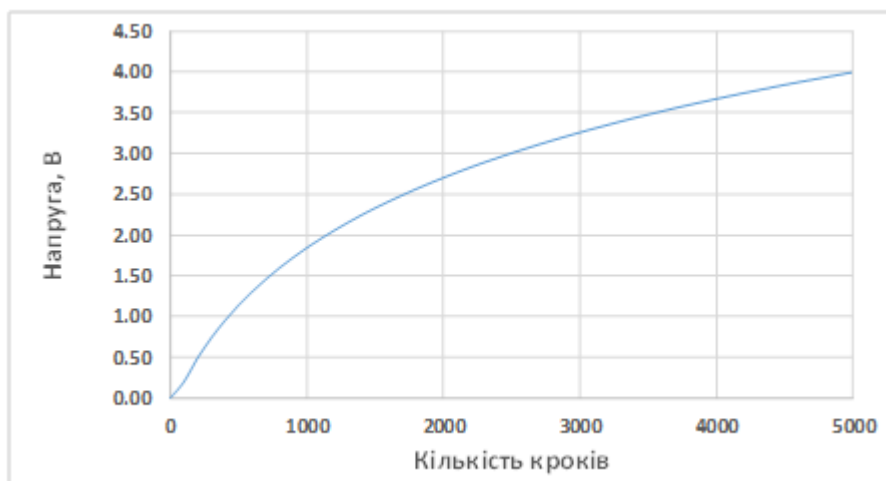


Рис. 3.15 – Схема продуктивності зарядки конденсатора під час ходьби

В результаті дослідження було розроблено прототип п'єзоелемента з шістьма PZT-дисками, розміщеними на устілці взуття, який забезпечував 25 мВт імпульсної потужності під час руху людини (рис. 3.16).



Рис. 3.16 - Зовнішній вигляд прототипу взуття з інтегрованими п'єзоелементами

Висновок:

1. Зроблено детальне сканування стопи, в результатом якого був одержаний високоточний тривимірний відбиток стопи, за яким визначено контур внутрішнього відбитка, який визначив площину розміщення п'єзоелементів.
2. Виявлено, що для збільшення генерації п'єзоелементів можна 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.
3. Обрано паралельне з'єднання п'єзоелектричних елементів для інтеграції їх у взуття.
4. Розроблено макет устілки з інтегрованим п'єзоелементами.
5. Визначено, що для зарядження конденсатора потрібно близько 1200 кроків, щоб підвищити напругу від 0 до 2 В, але для подальшого підвищення напруги до 4 В знадобиться 5000 кроків.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ВЗУТТЯ З ІНТЕГРОВАНИМИ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТАМИ

Розробка та дизайн чоловічого взуття з інтегрованими п'єзоелементами для отримання енергії розширює горизонти у сфері багатофункціональних виробів. Подібне взуття може вдало використовуватися в туризмі, у військових цілях, медичному застосуванні та в повсякденному житті. П'єзоелементи, розміщені на устілці взуття, можуть перетворювати механічну енергію, що виробляється під час ходьби або бігу, в електричну. Це надає додаткове живлення для портативних пристроїв, підвищуючи автономність користувачів в умовах, коли обмежений доступ до електромережі. Впровадження таких технологій у дизайн взуття сприяє енергозбереженню та розвитку альтернативних джерел енергії, роблячи їх доступними та зручними для широкого кола застосування.

4.1 Характеристика споживача

Чоловіки віддають перевагу взуттю, яке об'єднує в собі комфорт, практичність та моделі, які відповідають сучасним трендам. Тому характерним споживачем чоловічого повсякденного взуття є молодий чоловік середнього віку, який веде активний спосіб життя і віддає перевагу стилю, що поєднує в собі свободу і сучасний вигляд в таблиці 4.1 наведена характеристика споживача.

Таблиця 4.1

Характеристика типу споживача взуття.

Найменування ознаки	Взуття
Сезон, кліматична зона	Літнє, осінньо-весняний; 3А
Ситуація використання	Вихід на роботу, прогулянки, похід в гори
Призначення	Повсякденне

Статус споживача	Середній
Види Одягу/взуття/аксесуарів	Снікери, кросівки

4.2 Технічний рисунок та опис чоловічого взуття

Технічний рисунок – це графічне зображення об'єкта на площині, зроблене від руки в розмірах, доступних для огляду, зі збереженням його пропорцій (рис. 4.1) [116].

За допомогою Shoemaker було створено модель взуття, яка відповідає вимогам сучасного ринку та задовольняє потреби користувачів.

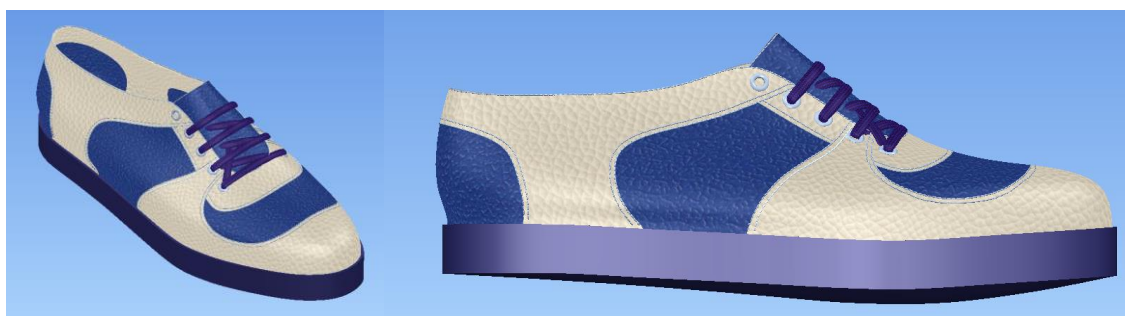


Рис. 4.1 - Технічний рисунок чоловічого взуття.

Технічний опис моделі

Вид: напівчеревик з настрочною союзкою.

Рід: Чоловічі.

Фасон: 9113

9 – чоловіча.

1 – напівчеревик.

2 – середній каблук, 20 мм.

3 – форма носка вузька.

Призначення: спортивне.

Матеріал верху: натуральна шкіра, хромового методу дублення.

Матеріал низу: ПУ.

Метод кріплення низу: клейовий, нитковий.

Метод кріплення деталей заготовок: ниткові шви, настрочний в загин.

4.3 Конструювання, деталювання та структурна таблиця чоловічого взуття

Конструкція чоловічого взуття виконувалася Італійським способом.

На колодці відмічаємо лінію середини п'ятки, лінію гребеня, точку кальцати. Липкою стрічкою обклеюють колодку (рис. 4.2). Для цього необхідно розмістити колодку на робочому столі і почати обклеювати від лінії п'яти до носка. Смужки накладаються один на одного і щільно притискаються до колодки, секція за секцією, не допускаючи заломів і нерівностей. На поверхні стрічки розмічають лінії кальцати, п'ятки, краю колодки і краю сліду колодки. Розрізаємо по лініях розподілу колодки. Контури деталей прикладають до оболонки, проводять лінію променів через точку С. Копію розплющують на папері, починаючи з п'яtkової частини, а потім вирізають [117].

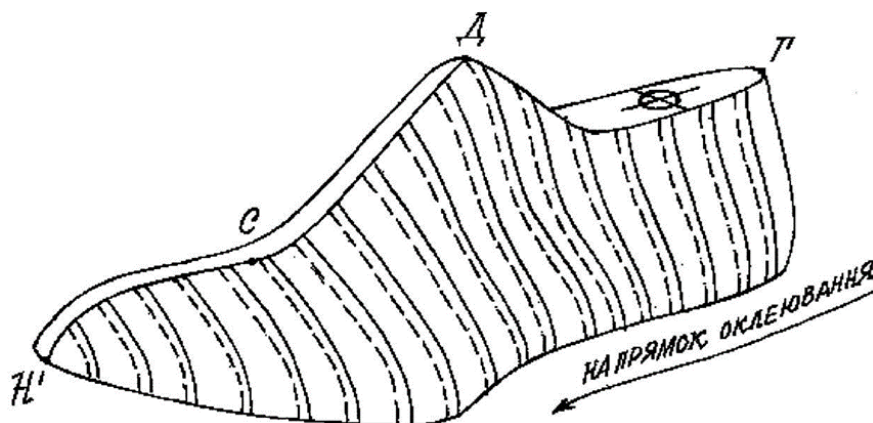


Рис. 4.2 - Вид зовнішньої поверхні колодки обклеєної липкою стрічкою.

Італійський метод передбачає отримання розгортки з бічної сторони колодки за використання липкої стрічки, нанесення контурів деталей верху та коригування положення носкової частини розгортки для покращення формування заготовки на колодці. Розгортки усереднюють. По лінії пучків роблять надрізи, не доходячи до її середини. У точці союзи частини розгортки розводять на 1.5 мм і фіксують. (рис. 4.3). Перевагами цього методу є можливість перевірити якість проектування за допомогою паперової макету заготовки. Має

високу точність і низьку трудомісткість. Найбільш поширений у багатьох країнах [118].



Рис. 4.3 – Розгортка моделі.

Деталювання взуття є ключовим завданням у процесі виробництва взуття та забезпечення його високої якості. Даний процес передбачає аналіз та розробку всіх компонентів взуття, від верху до підошви, з метою забезпечення комфорту, довговічності та відповідності сучасним модним тенденціям (рис. 4.4).

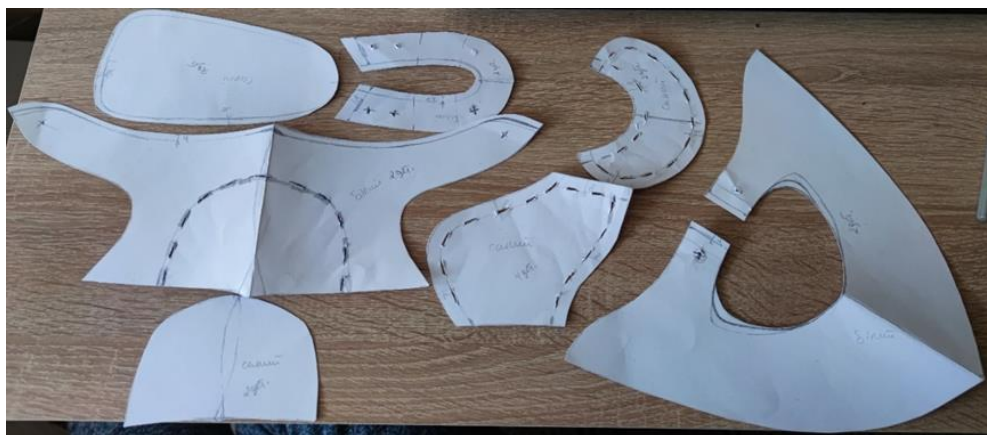


Рис. 4.4 – Деталювання чоловічого взуття.

Структурна таблиця деталей взуття є одним з важливих засобів для аналізу та систематизації елементів, з яких складається взуттєвий виріб. Це дозволяє детально описати кожен елемент, його призначення, матеріали, з яких він виготовлений, та технології, що застосовуються у виробничому процесі [119]. Такий підхід спрощує розробку нових моделей і сприяє оптимізації виробничих процесів [120]. У даній роботі наведена структурна таблиця деталей взуття (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Структурна таблиця деталей взуття

№ п/п	Назва деталі	Кількість на пару	Матеріал/товщина
Зовнішні деталі			
1	Союзка	2	Натуральна шкіра 1,0-1,3мм
2	Овальна вставка	2	Натуральна шкіра 1,0-1,3мм
3	Блочник	2	Натуральна шкіра 1,0-1,3мм
4	Берець	4	Натуральна шкіра 1,0-1,3мм
5	Задинка	2	Натуральна шкіра 1,0-1,3мм
6	Дет. задинки	2	Натуральна шкіра 1,0-1,3мм
7	Язичок	2	Натуральна шкіра 1,0-1,3мм
Внутрішні деталі верху			
1	Шкіряна кишеня	2	Шкіра підкладкова 0,8-1,0мм
2	Підкладка під союзку та берець	2	Шкіра підкладкова 0,8-1,0мм
3	Підкладка під язичок	2	Шкіра підкладкова 0,8-1,0мм
Проміжні деталі			
1	Міжпідкладка під союзку	2	Термо б'язь 0,5-0,6мм
2	Міжпідкладка під овальну вставку	2	Термо б'язь 0,5-0,6мм

3	Міжпідкладка під блочник	2	Термо б'язь 0,5-0,6мм
4	Міжпідкладка під берець	4	Термо б'язь 0,5-0,6мм
5	Міжпідкладка під задинку	2	Термо б'язь 0,5-0,6мм
6	Підносок	2	Картон, 1,0-0,1мм
7	Задник	2	Картон, 1,0-0,1мм

4.4 Технологічний процес складання взуття

Технологічний процес складання взуття - це складна і багатоетапна операція, яка складається з низки операцій з підбору, обробці та з'єднанню різноманітних компонентів для створення готового виробу. Кожний етап вимагає високої точності, уважності до деталей та використання новітніх технологій і матеріалів [121]. В таблиці 3.3 представлений технологічний процес складання взуття напівчеревик з настрочною союзкою. На рисунку 4.5 – представлено взуття в готовому вигляді.

Таблиця 3.3

Технологічний процес складання взуття напівчеревик з настрочною союзкою

№	Назва операцій	Характер робіт	Устаткування	Допоміжні матеріали, інструменти
1	Запуск деталей крою в роботу	Р	Технологічна картка складання заготовки	Згідно змінному завданні

2	Вирівнювання деталей за товщиною	М	ШВ-2-О	Шпальт, прес товщиною якої 1,0-1,3 мм
3	Скошування країв деталей	М	АСТ-13	Під настрочним швом 0,3-0,4 мм. Під загинання 0,2- 0,3мм
4	Дублювання деталей верху з міжпідкладкою	М	Прес ДВ-1-О, посуд для води, пензель, вода	Від краю що загинається 6,0- 8,0мм. Від зшивного шва 0,8-1,0мм. Від настрочного шва 1,0-3,0мм. Від краю затяжної кромки 10,0- 12,0мм. Прасування виконується температурою 125-130°C. Під тиском 0,25 МПА на протязі 5- 7с.
5	Настрочування блочника на овальну вставку	М	1224PFAFF, нитки, голки	Від краю 0,5- 0,8мм. Кількість стібків 4-6шт. на 10мм., відстань між строчками 0,5 мм

6	Настрочування союзки на овальну вставку та берець до блочника	М	1224PFAFF, нитки, голки	Від краю 0,5-0,8мм. Кількість стібків 4-6шт. на 10мм., відстань між строчками 0,5 мм
7	Настрочування деталь задинки на задинку	М	1224PFAFF, нитки, голки	Від краю 0,5-0,8мм. Кількість стібків 4-6шт. на 10мм., відстань між строчками 0,5 мм
8	Настрочування задинки на блочник та берець	М	1224PFAFF, нитки, голки	Від краю 0,5-0,8мм. Кількість стібків 4-6шт. на 10мм., відстань між строчками 0,5 мм
9	Зклеювання підкладки під союзку та берець з шкіряною кишенею	Р	Посуд для клею, пензель, вода	Відстань клейової смужки краю деталі 0,2-0,4 мм, час сушки 2-5 хв.
10	Зістрочування підкладки під союзку та берець з шкіряною кишенею	М	441PFAFPFAF, нитки, голки	Відстань строчки від краю 0,7-1,2 мм, кількість стібків 5-6 шт на 10мм шва
11	Зклеювання деталей верху і підкладки. Зіставлення.	Р	Посуд для клею, пензель, вода	Відстань клейової смужки краю

				деталі 0,2-0,4 мм, час сушки 2-5 хв.
12	Прокладання строчки по верху берця з одночасно обрізання підкладки	М	378 – G PFAFF	Відстань строчки від краю 1,0-1,5 мм, кількість стібків 5-6шт на 10 мм шва
13	Пробивання блочок	М	ВБ - 2 - О	Відстань від країв деталі 10-15 мм. Між блочками 10- 12 мм
14	Пристрочування язичка до верху союзки	М	441PFAFF, нитки, голки	Відстань строчки від краю 0,7- 1,2мм, кількість стібків 5-6 шт на 10 мм шва
15	Зклеювання підкладки під язичок з підкладкою союзки	Р	Посуд для клею, пензель, вода	Відстань клейової Смужки краю деталі 0,2-0,4 мм, час сушки 2-5 хв.
16	Зіставлення деталей верху і підкладки вузла союзки, обстрачування по лінії язичка	М	441PFAFF, нитки, голки	Відстань строчки від краю 0,7-1,2 мм, кількість стібків 5-6шт на 10мм шва
17	Шнуровка заготовки, чистка заготовки.	М/Р	Стіл СТБ	Шпагатом фіксують краї

				берець перед затяжкою.
--	--	--	--	---------------------------



Рис. 4.5 – Чоловіче взуття в готовому вигляді

4.5 Розробка напівустілки з інтегрованими п'єзоелементами для взуття

Розробка напівустілки з інтегрованими п'єзоелементами підійде для різних типів взуття як для чоловіків, так і для жінок. Це забезпечує універсальність у повсякденному житті, що дозволяє легко змінювати напівустілку з одного взуття на інше. Ця устілка не тільки комфортна, але й забезпечує ефективне генерування енергії під час ходьби або бігу, що робить її ідеальною для повсякденного використання.

Технологічна послідовність складання напівустілки з інтегрованими п'єзоелементами:

1. Напівустілка: це основний шар, на якому кріпляться всі інші елементи (рис. 4.6).
2. Розміщення п'єзоелементів: п'єзоелементи прикріплюються до напівустілки за допомогою двосторонньої клейової стрічки. Це забезпечує

надійне прикріплення п'єзоелементів і їхню фіксацію на місці (рис. 4.7).

3. Тонкий шар пінополіуретану (ППУ): тонкий шар ППУ наклеєний на п'єзоелементи та напівустілку для забезпечення комфорту п'яти. Це позбавляє від дискомфорту під час експлуатації напівустілки (рис. 4.8).

4. Шкіряна підкладка: На останньому етапі ми прикріплюємо шкіряну підкладку на всю основу. Шкіряна підкладка забезпечує додатковий комфорт, зносостійкість та естетичну привабливість напівустілки. На рисунку 4.9 кінцевий результат напівустілки.



Рис. 4.6 - Основа напівустілки



Рис. 4.7 - Розміщення п'єзоелементів на напівустілки



Рис. 4.8 – Розміщення тонкого шару пінополіуретану (ППУ)



Рис. 4.9 – Напівустілка з п'єзоелементами.

Розробили спеціальний чохол для конденсатора та перетворювача, які доєднуються до виводів інтегрованих п'єзоелементів. Конструкція чохла повинна забезпечувати надійний захист і зручність використання з урахуванням специфіки експлуатації взуття (рис. 4.10). Чохол виготовлений із натуральної шкіри, що забезпечує надійний захист системи «конденсатор + перетворювач» від механічних пошкоджень (рис. 4.11).

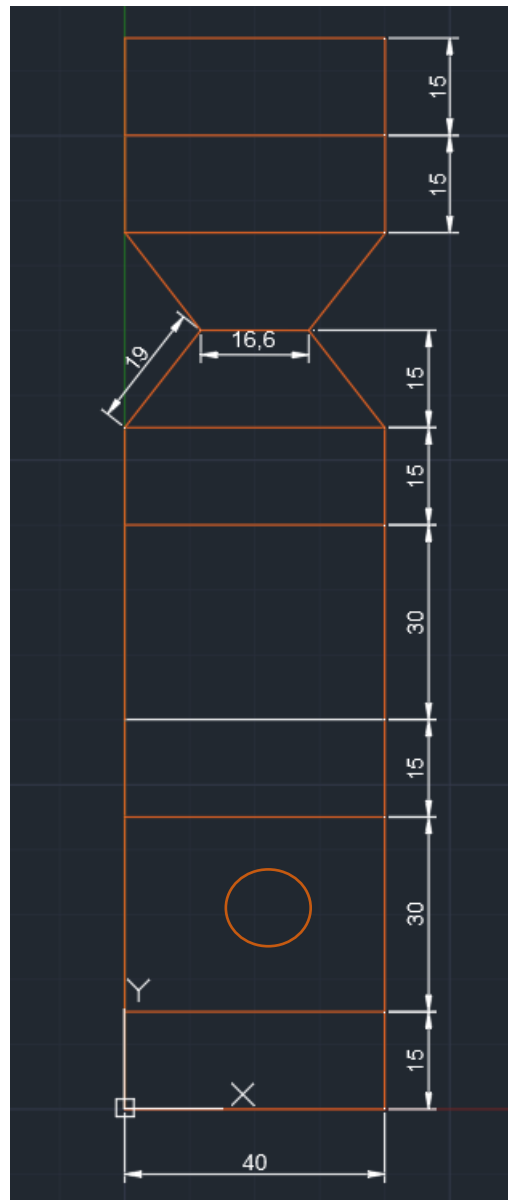


Рис. 4.10 - Конструкція чохла на конденсатор



Рис. 4.11 – Чохол для конденсатора

Кріплення чохла до взуття здійснюється за допомогою клейовою стрічкою. Місце розташування гібридного конденсатора у взутті має бути з урахуванням як

анатомії стопи, так і необхідності захисту елементів від зовнішнього впливу, при цьому забезпечуючи оптимальну функціональність і комфорт для власника (рис. 4.12).



Рис. 4.12 – Готовий виріб з чохлом для конденсатора.

Висновки:

1. Виготовлене взуття призначене для різних видів діяльності, включаючи туризм, військову службу та повсякденне використання.

2. В результаті маємо взуття для повсякденного призначення. Розроблена конструкція, специфікація деталей крою, технічні умови виготовлення виробу. Виготовлена напівустілка з інтегрованими п'єзоелементами та чохлом для системи «кондесатор+перетворювач» для можливого живлення переносних гаджетів під час експлуатації взуття.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дослідження в області використання п'єзоелектричних матеріалів та їх застосування є перспективним напрямом. Різноманітні методи створення та використання п'єзоелектричних матеріалів, в тому числі їх інтегрування в текстиль, відкривають нові можливості для створення енергозберігаючих виробів. Трендовим напрямом є використання розумних текстильних матеріалів в аксесуарах та при виготовленні різноманітних виробів легкої промисловості.

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. Виявлено, що найбільша генерація енергії від PZT відбувається при послідовному їх з'єднанні. Максимальна вихідна потужність, одержувана при послідовному з'єднанні, приблизно в чотири рази перевищує максимальну вихідну потужність, одержувану при паралельному з'єднанні.

Розроблено макет устілки з інтегрованим п'єзоелементами у п'ятковій частині стопи. Визначено, що для зарядження конденсатора потрібно близько 1200 кроків, щоб підвищити напругу від 0 до 2 В, але для подальшого підвищення напруги до 4 В знадобиться 5000 кроків.

Виготовлено взуття з інтегрованою устілкою, що містить п'єзоелементи та чохоч для конденсатора та перетворювача. Така конструкція забезпечує ефективне генерування та зберігання електричної енергії під час ходьби, що робить це взуття не тільки зручним, але й функціональним для повсякденного використання, туризму та військових потреб.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Первая Н.В., Борщевська Н.М., Кучер А.Д. «Технологічні тренди генерації енергії у виробках індустрії моди». VII International Scientific-Practical Conference KyivTex&Fashion 19 October 2023. – p. 229-230
2. Enrico Camilloni, Mirko Carloni, Marco Giammarini, Massimo Conti. «Energy harvesting with piezoelectric applied on shoes», SPIE Microtechnologies, 2013, Grenoble, France.
3. Кваша Т.В., Коваленко О.В. «Технологічні тренди у сфері нових матеріалів для енергетики та військової сфери». International scientific journal «Grail of Science», April, 2022 - № 12-13 – С. 154-163
4. Марущак О.В. Основи технологічного виробництва інноваційних текстильних матеріалів у професійній підготовці майбутніх фахівців швейного виробництва / О.В. Марущак, Н.А. Дрончак // Сучасні технології підготовки майбутніх учителів трудового навчання та технологій, педагогів професійної освіти і фахівців образотворчого та декоративного мистецтва: теорія, досвід, проблеми: збірник наукових праць / О.В. Марущак (голова) та [ін.]. – Вінниця: ТОВ «Меркьюрі-Поділля», 2020. – Вип. 2. – С. 77-81
5. Dr. Öğr. Üyesi. Mustafa Oğuz GÖK. «Piezoelectgic applied shoe design». Journal of social and humanities sciences research – 2018-Vol:5/Issue:22, pp.888-893
6. Materials Innovation Platforms (MIP) (2021). Materials Innovation Platforms NSF. [Електронний ресурс]: <https://new.nsf.gov/funding/opportunities/materials-innovation-platforms-mip>
7. N.S. Shenck, J.A. Paradiso, Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics, IEEE Micro 21 (2001) 30–42, <https://doi.org/10.1109/40.928763>.
8. H.S. Kim, J.H. Kim, J. Kim, A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration, Int. J. Precis. Eng. Manuf. 126 (12) (2011) 1129–1141, <https://doi.org/10.1007/S12541-011-0151-3>, 2011.

9. A. Toprak, O. Tigli, Piezoelectric energy harvesting: state-of-the-art and challenges, *Appl. Phys. Rev.* 1 (2014), 031104, <https://doi.org/10.1063/1.4896166>.
10. Хоменко В., Первая Н., Патлун Д., Кучер А. «Гібридна енергетична система, заснована на п'єзоелектричних генераторах, інтегрованих у взуття». 6th ISE Satellite Student Regional Symposium on Electrochemistry «Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry».
11. Matteo Stoppa and Alessandro Chiolerio (2014). *Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. Sensors.* – Vol. 14, P.11957-11992
12. Романенко М.В. Розробка трикотажу для застосування у функціональних виробках: диплома магістерська робота: 182 «Технології легкої промисловості» / Романенко Марія Вікторівна; КНУТД – 2020. – С.19
13. О. П. Кизимчук, Д. С. Новак, М. В. Романенко, Р. О. Овсієнко /Трикотаж для застосування у виробках спеціального функціонального призначення // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2019. - № 2 (132). - С. 87-98.
14. Кизимчук О. П. Розумний текстиль в інтер'єрі / О. П. Кизимчук, І. В. Єрмоленко, Є. С. Троян // Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний стан легкої і текстильної промисловості: інновації, ефективність, екологічність» (12-17 вересня 2017 р.). - Херсон: Видавництво ХНТУ, 2017. – С. 57-59
15. Zhao, B. Qian, F. Hatfield, A. Zuo, L. Xu, T.-B. «A Review of Piezoelectric Footwear Energy Harvesters: Principles, Methods, and Applications". *Sensors* 2023 – P. 5841
16. PI Ceramic GmbH, *Fundamentals of Piezo Technology*.
[Електронний ресурс]:
<https://www.piceramic.com/en/expertise/piezotechnology/fundamentals/> (accessed on 6 November 2022).
17. Berlincourt, D. *Piezoelectric Crystals and Ceramics*. In *Ultrasonic Transducer Materials*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1971; P. 63–124

18. Erturk, A.; Inman, D.J. 1.4 Summary of the Theory of Linear Piezoelectricity. In *Piezoelectric Energy Harvesting*, 1st ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2011; P. 9–12.
19. Немирович О. А., Поплавко Ю.М./ Магістерська дисертація «Температурні та частотні властивості п'єзоелектричних кристалів германо- і силіко-силіценів.» /Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут». 2019 – С.17
20. Henry A. Sodano and Daniel J. Inman, Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 36, No. 3, May 2004 – P.197–205
21. Affa Rozana Abdul Rashid¹ , Nur Insyierah Binti Md Sarif² , Khadijah Ismail³. «Development of Smart Shoes Using Piezoelectric Material» *MJoSHT* 2021, Volume 7, Issue 1. P. 49-55
22. Mallikarjun Mudda, Kotte Nived Maanyu, Dasa Goutham Raj, R Vamshi Krishna, «Esole: Energy Harvesting using Piezoelectric Sensors». *International Journal of Research and Analytical Reviews* February 2020, Volume 7, Issue 1- P.600-605
23. А.В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ.В. Аргун, доц., к.т.н., О.А. Ульянець «Властивості та способи застосування п'єзоелектричних елементів як генераторів електроенергії». Харківський національний автомобільно-дорожній університет. 2017 – С. 178-187
24. Proc. 7th Brazilian Conf. on Dynamics, Control and Applications. «Dincon 2008». [Електронний ресурс]: www.dem.feis.unesp.br/ (accessed 20 September 2017).
25. R East Starts Test of Floor Able to Generate Power with Weight Applied by Passengers Going Through Ticket Gate. [Електронний ресурс]: http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20061017/122345/ (accessed 5 August 2017).

26. Pratibha Arun, Divyesh Mehta. «Eco-Friendly Electricity Generator Using Scintillating Piezo» Pratibha Arun V et al. Int. Journal of Engineering Research and Applications . Vol. 3, Issue 5, Sep-Oct 2013, P.478-482
27. Tanvi Dikshit, Dhawal Shrivastava, Abhijeet Gorey, Ashish Gupta, Parag Parandkar, Sumant Katiyal, “Energy Harvesting via Piezoelectricity”, BVICAM’s International Journal of Information Technology 2010 – P.265-270
28. Yang Carmen Emily. What is the piezoelectric effect?. Electronic Design. 2016.
[Электронный ресурс]:
What is the Piezoelectric Effect? | Electronic Design
29. Roundy S., Wright P. K. and Rabaye J., "A. study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", Computer Communications 26 (2003) P. 1131–1144
30. Uddin MM, Blevins B, Yadavalli NS, et al. Highly flexible and conductive stainless-steel thread based piezoelectric coaxial yarn nanogenerators via solution coating and touch-spun nanofibers coating methods. Smart Mater Struct 2022 - P. 350.
31. Gabriela Maestri, Ludimilla B Ferreira, Pedro Bachmann, Ana AM Paim, Claudia Merlini, and Fernanda Steffens. «Recent advances in piezoelectric textile materials: A brief literature review» : Journal of Engineered Fibers and Fabrics.
[Электронный ресурс]:
[Recent advances in piezoelectric textile materials: A brief literature review - Gabriela Maestri, Ludimilla B Ferreira, Pedro Bachmann, Ana AM Paim, Claudia Merlini, Fernanda Steffens, 2023 \(sagepub.com\)](#)
32. Samia ADRAR «Semelle piézoélectrique connectée pour applications médicales». ECOLE DOCTORALE N° 601. 13 décembre 2022 - IETR, UMR 6164
[Электронный ресурс]: [Semelle piézoélectrique connectée pour applications médicales \(hal.science\)](#)
33. “CAPTEURS DE PRESSION SUPERFICIELLE REF 182389-62 Comparer les prix de CAPTEURS DE PRESSION SUPERFICIELLE REF 182389-62 sur

- Hellopro.fr.” <https://materiel.hellopro.fr/capteurs-de-pression-superficielle-ref-182389-62-495643-3000728-produit.html> (accessed Jun. 30, 2022).
34. Sense, “Les capteurs de pesage à jauge de contrainte.” [Электронныйресурс]: <https://www.automationsense.com/blog/automatisme/les-capteurs-de-pesage-a-jauge-de-contrainte.html> (accessed Jun. 30, 2022).
35. “Comment fonctionnent les montres à quartz ? - Couleur-Science.” [Электронныйресурс]: <https://couleurscience.eu/?d=3fe5fa--comment-fonctionnent-les-montres-a-quartz>
36. F. MOCQ, “Module Buzzer,” Framboise 314, le Raspberry Pi à la sauce française...., Feb. 28, 2018. <https://www.framboise314.fr/scratch-raspberry-pi-composants/module-buzzer/> (accessed Jul. 01, 2022).
37. A. Cornogolub, “Nouvelles structures à polymères électroactifs,” phdthesis, Université de Lyon, 2016. Accessed: Jul. 05, 2022.
[Электронныйресурс]: Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01494674>
38. M. Luo, H. Luo, D. Axinte, D. Liu, J. Mei, and Z. Liao, “A wireless instrumented milling cutter system with embedded PVDF sensors,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 110, pp. 556–568, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.03.040.
39. Ji SH, Cho YS, Yun JS. Wearable core-shell piezoelectric nanofiber yarns for body movement energy harvesting. *Nanomater* 2019 – P.555.
40. Zhu M, Shi Q, He T, et al. Self-powered and self-functional cotton sock using piezoelectric and triboelectric hybrid mechanism for healthcare and sports monitoring. *ACS Nano* 2019 – P.1940–1952.
41. Dong K, Peng X, Wang ZL. Fiber/fabric-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators for flexible/stretchable and wearable electronics and artificial intelligence. *Adv Mater* 2020 – P.32
42. Faruk Ünsal Ö, Çelik Bedeloğlu A. Recent trends in flexible nanogenerators: a review. *Mater Sci Res India* 2018 – P. 114–130.

43. Su Y, Chen C, Pan H, et al. Muscle fibers inspired high-performance piezoelectric textiles for wearable physiological monitoring. *Adv Funct Mater* 2021 – P.1–8.
44. Abanah Shirley J, Esther Florence S, Sreeja BS, et al. Bio-compatible piezoelectric material based wearable pressure sensor for smart textiles. *Smart Mater Struct* 2022
[Електронний ресурс]: [Bio-compatible piezoelectric material based wearable pressure sensor for smart textiles - IOPscience](#)
45. Вчені створили тканину, яка генерує електрику (відео)
[Електронний ресурс]:
<https://1news.com.ua/tsikave/vcheni-stvoryly-tkanynu-yaka-generuye-elektryku-video.html>
46. Jonathan Granstrom, Joel Feenstra, Henry A Sodano, and Kevin Farinholt. «Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps». *IOP PUBLISHING SMART MATERIALS AND STRUCTURES Smart Mater. Struct.* 16 (2007) – P.1810–1820
47. 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
48. J.G. Rocha, L.M. Gonçalves, P.F. Rocha, M.P. Silva, S. Lanceros-Méndez, «Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear», *IEEE Trans. Ind. Electron.* 57 (2010) – P. 813–819
49. 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>.
50. A.T. Joo, Z. «Dahari, Investigation of human kinetic energy harvesting from human foot strike», *J. Eng. Sci.* 14 (2018) - P.1–14.
51. 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

52. Y. Chen, E. Chen, Z. Wang, Y. Ling, R. Fisher, M. Li, J. Hart, W. Mu, W. Gao, X. Tao, B. Yang, R. Yin, «Flexible, durable, and washable triboelectric yarn and embroidery for self-powered sensing and human-machine interaction», *Nano Energy* 104 (2022), 107929, <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2022.107929>.
53. W. Wang, Y. Zhang, Z.H. Wei, J. Cao, «Design and numerical investigation of an ultra-wide bandwidth rolling magnet bistable electromagnetic harvester», *Energy* 261 (2022), 125311, <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.125311>.
54. A. Zhang, D. Pang, B. Wang, J. Wang, «Dynamic responses of wearable thermoelectric generators used for skin waste heat harvesting», *Energy* 262 (2023), 125621, <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.125621>.
55. J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, N. Gershenfeld, «Parasitic power harvesting in shoes, in: Proceedings of the International Symposium Wearable Computational Digital Paper», 1998, pp. 132–139.
56. 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>
57. 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
58. M. Rguiti, A. Hajjaji, S. D’Astorg, C. Courtois, A. Leriche, «Elaboration and characterization of a low frequency and wideband piezoceramic generator for energy harvesting», *Opt. Mater.* 36 (2013) P. 8–12
59. W.S. Jung, M.J. Lee, M.G. Kang, H.G. Moon, S.J. Yoon, S.H. Baek, C.Y. Kang, «Powerful curved piezoelectric generator for wearable applications», *Nano Energy* 13 (2015) P. 174–181
60. D. Ma, G. Lan, W. Xu, M. Hassan, W. Hu, «Simultaneous energy harvesting and gait recognition using piezoelectric energy harvester», *IEEE Trans. Mob. Comput.* (2020), <https://doi.org/10.1109/TMC.2020.3035045>.

61. F. Ali, W. Raza, X. Li, H. Gul, K.H. Kim, «Piezoelectric energy harvesters for biomedical applications», *Nano Energy* 57 (2019) P. 879–902
62. de Fazio, R.; Perrone, E.; Velázquez, R.; De Vittorio, M.; Visconti, P. Development of a Self-Powered Piezo-Resistive Smart Insole Equipped with Low-Power BLE Connectivity for Remote Gait Monitoring. *Sensors* 2021-P. 4539.
63. Niroshan Amarasiriwardena/Vibrasole.
[Электронный ресурс]: <http://niroshan.com/projects/vibrasole> (accessed on 16 May 2020).
64. Hillyard, Daniel C.; Thompson, Jesse; Kosinski, Anthony; and McNabb, Payton, "Development of an Energy Harvesting Shoe" (2014). Chancellor's Honors Program Proje.
[Электронный ресурс]: [Development of an Energy-Harvesting Shoe \(tennessee.edu\)](http://developmentofanenergyharvestingshoe.tennessee.edu)
65. S. V. K. Peddinti, "Smart shoe gait analysis and diagnosis: designing and prototyping of hardware and software," Thesis, 2018. doi: <https://doi.org/10.7912/C2HT0C>.
66. Franka Grazhdani, Maja Anačkova, Jovana Jovanov « ENERGY HARVESTING USING PIEZOELECTRIC CERAMICS INCORPORATED IN A SHOE-SOLE». *Mechanical Engineering – Scientific Journal*, Vol. 38, No. 1, pp. 29–36 (2020)
67. Nandikolla, V. K., Bochen, R., Meza, S., Garcia, A: Experimental gait analysis to study stress distribution of the human foot. *Journal of Medical Engineering*, 2017-P.1-13
68. Kevin A. Kirby «Longitudinal arch load-sharing system of the foot» *Revista Española de Podología* 2017 c.-18-26
69. Valderrabano V, Easle M, editors. *Foot and ankle sports orthopaedics*. New York: Springer; 2016.
70. Whitman R. A study of the weak foot, with reference to its causes, its diagnosis, and its cure; with an analysis of a thousand cases of so-called flat-foot. *JBJS*. 1986;8:42---77.

71. Whitman Royal, editor. A treatise on orthopaedic surgery. 6th edition. Philadelphia: Lea & Febiger; 1919.
72. Smith TF, Green DR. Pes cavus. In: Banks AS, Downey MS, Martin DE, Miller SJ, editors. McGlamry's comprehensive textbook of foot and ankle surgery, 1, 3rd ed Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins; 2001. p. 761-98.
73. Parkin A. The causation and mode of production of pes cavus. Medico-chirurgical Trans. 1891; 74:485-95.
74. Mahan KT, Flanigan KP. Pathologic pes valgus disorders. In: Banks AS, Downey MS, Martin DE, Miller SJ, editors. McGlamry's comprehensive textbook of foot and ankle surgery, vol. 1, 3rd ed Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins; 2001. p. 799-899.
75. Morton, D. J. (1935) The human foot, Columbia University Press. C.-244
76. Elftman, H. (1934) A cinematographic study of the distribution of pressure in the human foot. Anat. Rec., 59, 481
77. Jones, R. L. (1941) The human foot: an exgerimental study of its mechanics and the role of its muscles and ligaments in the support of the arches. Am. J. Anat., 68, 1.
78. Scbmrtz, R. P., Heath, A. L., Morgan, D. W. and Toms, R.C. (1964) A quantitative analysis of recorded variables in the walking pattern of normal adults. 1. Bone Jt Surg., 46A, 324.
79. Bauman, J. H. and Brand, P. W. (1963) Measurement of pressure between foot and shoe. Lancet, 1, 629
80. Hutton, W. C. and Drabble, G. (1972) An apparatus to give the distribution of vertical load under the foot. Rheum. Phys. Med., 11, 313.
81. Dr. Charudatta V. Shinde, M.S. MCh (Orthopaedics), Dr. Weijie Wang, Ph D*, Dr. Rami J Abboud, Ph D, Dr. Lynda Cochrane, Ph D «Analysis of Foot Pressure Variation with Change in Stride Length» Journal of Dental and Medical Sciences (IOSR-JDMS) e-ISSN: 2279-0853, p-ISSN: 2279-0861. Volume 13, Issue 10 Ver. IV (Oct. 2014), PP 46-51

82. Gage, J.R. (1990) An overview of normal walking. *Instr Course Lect*; 39:291-303.
83. Сідорова О.І., Журавльова К.С. Моделювання форми устілок як результат дослідження розподілу навантаження під час руху людини. Теорія та практика дизайну: зб. наук. праць. Культура і мистецтво. 2022. Вип. 26. С. 216-221. doi: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2022.26.26>
84. Основи прикладної антропології та біомеханіки. Методичні вказівки до виконання лаб.робіт. – Хмельницький: ХДУ, 2004. – с.19–22.
85. Т.А. Надопта, В.П. Либа «Уточнення положення базових ліній для проектування деталей верху взуття на основі антропометричних досліджень дорослого населення України» Вісник КНУТД № 2 2010 р с. – 85-89.
86. Davide Meulli «Biomeccanica dei tendini del piede» Anno Accademico 2021 – 2022 21 luglio 2022.
87. О. П. Шуляк, А. В. Мневець « Деталізація розпізнавальних алгоритмів Уу діагностиці пацієнтів та оцінки її результативності» Вісник КПІ. Серія Приладобудування, Вип. 63(1), 2022 с.-89-99
88. V. Tsapenko, M. Tereshchenko, V. Shevchenko, R. Ivanenko, “Methodology for calculating shock loads on the human foot”, *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, no. 6(2), pp. 58-64, 2021.
89. Valentina Ticcinell «Analisi della configurazione di plantari in realzione alla caratterizzazione biomeccanica del piede» Corso di laurea triennale in Ingegneria Biomedica Anno Accademico 2009/2010
90. “FOOT STRIKE PATTERNS OF RUNNERS AT THE 15-KM POINT DURING AN ELITELEVEL HALF MARATHON - ProQuest.” <https://www.proquest.com/openview/afe46ff74bf0438dd2f78dcaaa4eb17e/1?cbl=30912&pqorigsite=gscholar&parentSessionId=W2pRw0qix%2BdryeOuBjUqQ3b7JjMX3UQZf%2Fo32W HsfZ0%3D> (accessed Jun. 21, 2022)
91. A. Mündermann, B. M. Nigg, R. Neil Humble, and D. J. Stefanyshyn, “Foot orthotics affect lower extremity kinematics and kinetics during running,” *Clinical*

- Biomechanics, vol. 18, no. 3, pp. 254–262, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0268-0033(02)00186-9.
92. M. W. Lawless, G. T. Reveal, and R. T. Laughlin, “Foot Pressures During Gait: A Comparison of Techniques for Reducing Pressure Points,” *Foot Ankle Int.*, vol. 22, no. 7, pp. 594–597, Jul. 2001, doi: 10.1177/107110070102200712.
93. Citation: Zhao, B.; Qian, F.; Hatfield, A.; Zuo, L.; Xu, T.-B. A Review of Piezoelectric Footwear Energy Harvesters: Principles, Methods, and Applications. *Sensors* 2023, 23, 5841. <https://doi.org/10.3390/s23135841>
94. Hessert, M.J.; Vyas, M.; Leach, J.; Hu, K.; Lipsitz, L.A.; Novak, V. Foot Pressure Distribution during Walking in Young and Old Adults. *BMC Geriatr.* 2005, 5, 8.
95. Arnold, J.B.; Causby, R.; Dip Pod, G.; Jones, S. The Impact of Increasing Body Mass on Peak and Mean Plantar Pressure in Asymptomatic Adult Subjects during Walking. *Diabet. Foot Ankle* 2010, 1, 5518.
96. Wiegerinck, J.I.; Boyd, J.; Yoder, J.C.; Abbey, A.N.; Nunley, J.A.; Queen, R.M. Differences in Plantar Loading between Training Shoes and Racing Flats at a Self-Selected Running Speed. *Gait Posture* 2009, 29, 514–519.
97. L. Claverie, “Biofeedback pour l’optimisation de la locomotion : conception et validation d’un système embarqué d’évaluation de la locomotion à partir des pressions plantaires,” phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Accessed: Jun. 27, 2022.
98. Du, S., Jia, Y., Zhao, C., et al: ‘A passive design scheme to increase the rectified power of piezoelectric energy harvesters’, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2018, 65, (9), pp. 7095–7105
99. Wang, W., Yang, T., Chen, X., et al: ‘Vibration energy harvesting using a piezoelectric circular diaphragm array’, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2012, 59, (9), pp. 2022–2026
100. Du, S., Jia, Y., Seshia, A.A.: ‘An efficient inductorless dynamically configured interface circuit for piezoelectric vibration energy harvesting’, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2017, 32, (5), pp. 3595–3609, doi: 10.1109/TPEL.2018.2873079

101. Lu, Q., Liu, L., Scarpa, F., et al: 'A novel composite multi-layer piezoelectric energy harvester', *Compos. Struct.*, 2018, 201, pp. 121–130
102. Jasim, A., Yesner, G., Wang, H., et al: 'Laboratory testing and numerical simulation of piezoelectric energy harvester for roadway applications', *Appl. Energy*, 2018, 224, pp. 438–447
103. Akkaya Oy, S., Özdemir, A.E.: 'Piezoelectric based low power wind generator design and testing', *Arab. J. Sci. Eng.*, 2018, 43, (6), pp. 2759–2767
104. Mohd Javaid, Abid Haleem, Ravi Pratap Singh, Rajiv Suman «Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications» *Sensors International Volume 2*, 2021, 100114
<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114>
105. M. Vogt, A. Rips, C. «Emmelmann Comparison of iPad Pro®'s LiDAR and TrueDepth capabilities with an industrial 3D scanning solution» *Technologies*, 9 (2) (2021 Jun), p. 25
106. H. Anwar, I. Din, K. Park «Projector calibration for 3D scanning using virtual target images» *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 13 (1) (2012 Jan), pp. 125-131
107. Борщевська Н. М., Гаркавенко С. С. «Методи проведення антропометричних досліджень стоп з використанням 3D – технологій» III International Scientific-Practical Conference 31 October 2019 Kyiv, Ukraine, С. – 143-146.
108. Boštjan Novak, Aleš Babnik, Janez Možina, Matija Jezeršek, «Three-Dimensional Foot Scanning System with a Rotational Laser-Based Measuring Head», *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 60 (2014)11, P. - 685-693. DOI:10.5545/sv-jme.2014.195
109. Yeti TM. (2013). VORUM research corporation, from <http://www.vorum.com/english/footware/measurementcarving-yeti-3d-scanner.php>, accessed on 2013-07-04.

110. Kouchi, M., Mochimaru, M. (2001). Development of a low cost foot-scanner for a custom shoe making system. Proceedings of 5th Symposium on Footwear Biomechanics, Zürich, p. 58-59
111. [Електронний ресурс]: <https://center3dprint.com/ua/footstation-pack-dla-3d-scanera>
112. [Електронний ресурс]: <https://hs-pro.co.uk/3d-scanirovanie/tiger3d/>
113. Tomoko Yamashita, Kazuhiko Yamashita, Mitsuru Sato, Masashi Kawasumi, Shingo Ata «Foot-surface-structure analysis using a smartphone-based 3D foot scanner» Medical Engineering and Physics 95 (2021) P. 90–96, <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2021.08.001>
114. APC International Ltd. «Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications.» (2011) APC Catalog No. 90-1016
115. 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>
116. [Електронний ресурс]: <https://uahistory.co/pidruchniki/lebedev-labor-training-technical-types-of-work-8-class-2016/8.php>
117. В.П. Кернеш. / Методичні вказівки до виконання лабораторних занять для студентів першого (бакалаврського) рівня освіти галузі знань 18 - Виробництво та технології, спеціальності 182 - Технології легкої промисловості, освітньої програми «Індустрія моди»/ Київ : КНУТД, 2022 – 63 с.
118. [Електронний ресурс]: [італійський спосіб конструювання взуття - Поиск](#)
119. Петров В. І., Сидоренко А. О. Технологія виготовлення взуття. – Київ: Наукова думка, 2015. – 320 с.
120. Johnson, R. (2019). Footwear Design and Manufacture. London: Footwear Press.
121. [Електронний ресурс]: [Технологічний процес — Вікіпедія](#)

