

О. В. ЛУЧШЕВА, П. О. ЛУЧШЕВ, Д. С. ІГНАТЬЄВ, І. Б. ТУРКІН

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

СМАРТФОН ЯК ІНСТРУМЕНТ АНАЛІЗУ СУЧАСНИХ ТРЕНДІВ ЗБИРАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ РУХУ ЛЮДИНИ

Практичність сучасних електронних пристроїв, які носять, визначається автономністю їх джерел енергоживлення. Концепція збору і перетворення допоміжної, фонові енергії з енергетичних джерел навколишнього середовища пропонує різні варіанти вирішення проблеми такої енергозалежності. Проте на даний момент, проблема не має комплексного рішення і фактично переноситься у нові площини. Одна з них: як оцінити доцільність і ефективність застосування і використання таких малопотужних і непостійних енергетичних джерел. У статті обговорюється і аргументовано доводиться можливість застосування електронно-механічних мікродатчиків, які доступні в будь-якому смартфоні, для вивчення потенційного енергетичного ефекту від використання фонових джерел енергії. Мета статті – розповісти всім, кому цікаві сучасні технології збору та перетворення різних видів енергії навколишнього середовища, про можливість застосування широкодоступного і бюджетного смартфона з операційною системою Android для дослідження індивідуальних характеристик руху людини як джерела допоміжної, фонові енергії. Крім цього, розказано про застосування енергії, що збирається і накопичується, виконано огляд технологій і проведено порівняння енергетичної щільності різних методів збору енергії. Наведено результати архітектурного моделювання і приклад прототипу програмного забезпечення для дослідження механічних джерел енергії. Для отримання результату розроблено додаток, що зчитує дані з датчиків акселерометра із заданою частотою, призначений для вивчення та оцінки можливості використання механічної енергії руху людини як джерела електричної енергії живлення автономних електронних пристроїв. Незважаючи на виконану роботу, яка була спрямована на досягнення зазначеної мети, продовження досліджень вимагає розширення можливостей розробленого додатка з одного боку за рахунок спільного використання різних датчиків для комплексного дослідження можливості отримання енергії взаємодії людини з навколишнім середовищем і з іншого боку – застосування сучасних методів і алгоритмів цифрової фільтрації для забезпечення точності і достовірності вимірювань.

Ключові слова: збирачі енергії; носимі пристрої; рух людини; електричний генератор; біомеханічна енергія; вимірювальні пристрої.

Вступ

Щороку сучасні мобільні пристрої підвищують свої обчислювальні здатності – досить пригадати той факт, що вся обчислювальна спроможність NASA під час місячної програми 1960-х вже років з 10 міститься у кожному смартфоні. Але є, як завжди, одне але. Це – необхідність задовольняти сьогоднішні потреби пересічного користувача, урахувавши його потребу бути незалежним від будь-яких енергетичних обмежень [1]. Сучасні досягнення у галузі переносних та/або імплантованих пристроїв постійно збільшують інтерес науковців та промисловців до нових технологій через їх вкрай необхідність для моніторингу здоров'я, профілактики захворювань, діагностики і лікування тощо. Проте всі ці системи, як і раніше, застосовують у якості джерела живлення електрохімічні батареї. Обмежена ємність і великі розміри батареї призводять до об-

межень її терміну служби та тривалості автономної роботи. Використання батареї більшої ємності не є вірним рішенням, оскільки ємність батареї зазвичай прямо пропорційна її об'єму та масі. Перспективним є розробка нових, альтернативних рішень, в яких енергія з довкілля може бути здобута за допомогою так званих збирачів енергії (ЗЕ) для її генерації та перетворення. ЗЕ щонайменше мають забезпечити додаткову потужність для подовження терміну експлуатації основної батареї пристроїв, які носять та/або імплантують. Але найкращим результатом буде можливість повністю замінити ресурсобмежене електрохімічне джерело енергії таким, що здатне здобувати енергію з навколишнього середовища.

У цій статті пропонується рішення для дослідження індивідуальних характеристик руху людини, як джерела додаткової електричної енергії. Стаття структурована таким чином. У першому розділі подано короткий опис застосувань ЗЕ. Розділ 2 містить

основні підходи до ЗЕ. У розділі 3 наведено основи для моделювання, тестування і прототипування програмного забезпечення для вивчення ЗЕ. Розділ 4 містить результати використання розробленого авторами програмного застосування, яке реалізовано для операційної системи Android та призначене для вивчення можливості перетворення механічної енергії руху людини в електричну.

1. Застосування для збирання енергії

Одним з найактуальніших застосувань ЗЕ є різноманітні портативні медичні пристрої. Такі пристрої повинні мати невелику вагу, а споживана ними метаболічна енергія має бути незначною, аби власник не відчував дискомфорту. Портативні медичні пристрої мають бути придатними для носіння майже увесь час (наприклад, сфігмоманометри) або імплантовані усередині тіла (наприклад, кардіостимулятори). Оскільки ці пристрої мають невеликий розмір, споживання ними енергії також є невеликим. Батареї меншого розміру задовольняють цим вимогам, але час роботи і продуктивність переносних пристроїв, вимагає періодично замінювати або перезаряджати батарею. Людина з літєвим батарейним кардіостимулятором потребує хірургічної операції для заміни батареї кожні 8 років. Аналогічно, нейростимулятор, що імплантується, і інфузійні насоси мають скорочений термін служби від 3 до 5 років. Таким чином, залежність від батареї має бути зменшена в цій області, даючи можливість збирати енергію у якості альтернативного рішення.

П'єзоелектрика, теплова й електромагнітна енергія відповідно до людського тіла в основному розглядаються як біомедичні ЗЕ [2].

Тіло живого суб'єкта є особливо сприятливим джерелом енергії, враховуючи величезну кількість і широкий спектр доступних енергій. Наприклад, теоретичні розрахунки показують, що рухи тіла, дихання і рухи рук можуть генерувати 2,8-4,8 Вт, 0,83 Вт і 60 Вт відповідно [3].

Концепція збирання енергії з довколишнього середовища знайшла безліч застосувань в області бездротового зв'язку та мереж. Деякі ad-hoc мережі оптимізують використання енергії на вузлах таким чином, що обмежені ресурси окремих пристроїв будуть використовуватися мережею найбільш ефективно. В той же час, якщо вузол з низькою енергією буде використовуватися занадто інтенсивно, це призведе до зменшення енергозабезпеченості всього каналу та навіть мережевого розриву. Тому протоколи маршрутизації, що підтримують енергозберігаючу стратегію для всієї мережі, повинні використовуватися з урахуванням можливостей сучасних ЗЕ. Використання збору енергії допомагає усунути

необхідність заміни і обслуговування батареї і продовжити термін служби вузлів ad-hoc мережі. Основні існуючі проблеми і труднощі – найбільш важливі для майбутніх досліджень в цій області наведено в роботі [4]. В мережах з вимогою безперервності роботи необхідно визначити мінімально достатню швидкість поповнення енергії для забезпеченості такої безперервності.

У роботі [5] розглядається ефективна конструкція матриць попереднього кодування для максимізації пропускної спроможності мережі при обмеженнях до якості обслуговування QoS (Quality of service). Розглянуто розділення як часу, так і потужності для забезпечення практичного ЗЕ і декодування інформації. Вказані проблеми досить складні через дуже негнучкі цілі та обмеження.

Носима електроніка протягом останніх десяти років розвивається швидкими темпами. Добре функціонуючі носимі пристрої мають велику залежність від стабільного постачання енергії. Носима електроніка, якщо вона стане енергетично самодостатньою та отримує хорошу координацію процесів збирання, управління і зберігання енергії, буде вкрай потрібна, оскільки матиме властивості легкості, високоінтегрованості та свободи від зовнішніх електричних з'єднань [6]. П'єзоелектричний черевик є одним з прикладів практичного застосування ЗЕ, він містить п'єзоелектричний матеріал, вбудований всередину підшви черевика. ЗЕ сприймає вібрації кроку, бігу тощо, і перетворює їх в енергію, яка може бути використана для живлення невеликої електроніки.

У статті [7] розглянуто «Носиме біомеханічне збирання енергії», яке відбувається завдяки людській кінетичній енергії. Автори статті класифікували розглянуті пристрої на основі їх принципів роботи таким чином: трибоелектричні, п'єзоелектричні та електромагнітні. Викликає інтерес в цій статті саме дослідження людського кроку як джерела енергії, оскільки тільки він одночасно забезпечує високу потужність та високу ефективність. Було обґрунтовано, що для збирання енергії на рівні декілька Ват електромагнітні енергетичні комбайни типу «генератор-генератор» є практичними.

Збирання енергії знайшло своє застосування також у промисловості. Наприклад, інтеграція автономної і бездротової електроніки в авіаційних двигунах забезпечує інформацію з обмеженого простору. У замкнутому об'єкті, що обертається, наприклад підшипнику, часто неможливо під'єднати датчик за допомогою дротів, а зміна батареї буде важкою і витратною через час простою машини. В роботі [8] було продемонстровано, що в системах авіаційної діагностики є надзвичайно ефективним використанням датчиків та мікроконтролера з можливістю живлення від термоелектричних генераторів,

оскільки високий температурний градієнт, доступний в системі підшипників авіадвигуна, надає змогу енергетично забезпечити всю діагностичну систему. Іншим прикладом є збирання енергії в клубному середовищі шляхом розташування ЗЕ на танцполі, які перетворюють вібрації руху під час танців в електричну енергію.

Визначальна роль технологій IoT в сучасному світі обумовлює необхідність найшвидшого розвитку ЗЕ. Так, за оцінками Gartner в 2017 році було задіяно 8,4 мільярда пристроїв IoT, що демонструє зростання на 31 відсоток порівняно з 2016 роком, і до 2020 року кількість таких пристроїв сягне 20,4 мільярда. Тільки невелика частина з них буде смартфонами і комп'ютерами, але більшість з них будуть виконувати такі елементарні завдання, як отримання та передавання невеликих обсягів даних з помірною частотою. Основними галузями застосування IoT в промисловості стануть вбудовані інтелектуальні давачі для збору життєвоважливих даних, необхідних для відстеження запасів і управління машинами, що дозволить підвищити ефективність, зменшити витрати і навіть врятувати життя. Це забезпечить надзвичайний приріст доходів, про що повідомляє Intel «До 2025 року загальна глобальна вартість технологій IoT досягне 6,2 трлн. дол. США – велика частина цієї вартості від облаштувань охорони (2,5 трильйона доларів США) здоров'я і виробництва (2,3 трильйона доларів США)» [9].

2. Технології збирання енергії

У більшості випадків ЗЕ генерують електричну енергію, яка потім зберігається в конденсаторах або батареях. Підходи до збирання енергії засновані на піроелектричних, п'єзоелектричних, трибоелектричних, флексоелектричних, термоелектричних та/або фотоелектричних ефектах. Піроелектричні, п'єзоелектричні і флексоелектричні ефекти генерують електричний заряд в результаті зміни поляризації матеріалу шляхом використання температурної зміни, застосованого тиску або градієнта деформації відповідно, тоді як фотоелектричний ефект виникає від збудження електронів від сонячної енергії в зоні провідності.

Трибоелектричні заряди створюються в результаті фрикційного (тертевого) контакту між двома матеріалами, які стають електрично зарядженими; вони зазвичай будуються на основі трибоелектричних наногенераторів, які є електрично сполученими з електрохімічним накопичувальним елементом. Застосування трибоелектричних пристроїв для збирання механічної енергії та її перетворення в електричну було розглянуто в роботі [11], де обговорено різні види автономних пристроїв.

Теплові градієнти виникають в результаті багатьох процесів, включаючи спалювання паливних речей, або геотермальних процесів. Термоелектричні енергонакопичувачі видобувають електричну енергію з температурних градієнтів. Це видобування визначається ефектом Зеебека, за якого різниця температур на провіднику або напівпровіднику приводить до мережевого переміщення електронів від високотемпературного боку до низькотемпературного боку, так що генерується електричний струм (і напруга). У результаті термоелектричного ефекту генерується заряд (різниця потенціалів) з градієнта температури між двома різнорідними провідниками через ефект Зеебека. Саме цей ефект зазвичай використовується як основа для побудови пристроїв, що збирають енергію, яка доступна через різницю температур.

Сонячні елементи, принцип роботи яких базується на фотоелектричному ефекті, підходять для застосувань, що потребують використання ЗЕ в таких системах, як бездротові сенсорні мережі і портативні електронні пристрої. Проте доступність сонячної енергії є непередбачуваною через її високу залежність від погодних умов. Крім того, пристрої, які потрібно розміщати під одягом або усередині людського тіла, навряд чи можуть заряджатися сонячною енергією. Звукова енергія – це ще одна форма неживаної енергії, яку можна зібрати. Звукова енергія присутня практично безперервно і на значному рівні в навколишньому середовищі, наприклад, на залізничній колії, злітно-посадочній смузі, портах або на дорозі. Гучна музика в клубах, на вечірках, або на будівельних майданчиках тощо, дає достатні рівні звукового тиску, які можуть бути використані для ЗЕ [10].

П'єзоелектричний механізм є найбільш поширеним і добре вивченим методом в області механічних енергонакопичувачів [12]. Ці пристрої працюють з властивістю матеріалу, відомою як п'єзоелектрика. Властивістю всіх матеріалів є заряд, чи різниця потенціалів, які виникають в результаті їх механічного навантаження. Деякими з популярних матеріалів, що мають дуже привабливі п'єзоелектричні властивості, є кварц, титанат цирконату свинцю (PZT), нітрид алюмінію (AlN), оксид цинку (ZnO) і полівініліденфторид (PVDF) тощо.

Коливальні накопичувачі енергії використовують механічну енергію від коливальних докільця, яку перетворюють в електричну. У вібраційних енергетичних накопичувачах механічна енергія перетворюється в електричну в два етапи. Спочатку механічна енергія захоплюється від зовнішньої вібрації і подається на перетворювач, потім власне й здійснюється перетворення. Запропонована в статті [13] модель цього процесу є досить складною, оскільки поєднує в собі

2 складові: збирання механічної енергії та її перетворення в електричну.

У дослідженні [14] автори вивчали можливість збору енергії вібрації з вібрації дерев'яної підлоги, яка викликається рухами людини. З аналізу результатів експерименту вони прийшли до наступного:

1) основна частота вібрації дерев'яної підлоги варіюється в різних режимах збудження, але домінуючий частотний діапазон вібрації дерев'яної підлоги складає від 0 до 420 Гц. У системі збору енергії п'єзоелектричний генератор має бути налаштований на резонансний режим в цьому діапазоні, що дозволить збирати максимальний об'єм енергії;

2) вихідна потужність п'єзоелектричного генератора пов'язана з частотою і амплітудою збудження. Більш висока частота і велика амплітуда збудження можуть привести до необхідності забезпечувати більшу потужність для того ж самого п'єзоелектричного генератора;

3) система ЗЕ здатна отримувати енергію від вібрації дерев'яної підлоги і зберігати її в конденсаторах або батареях в кількостях, достатніх для практичних потреб.

Електростатичні накопичувачі це компактні перетворювачі з простою конструкцією. Щільність доступної енергії від цих пристроїв може бути легко змінена шляхом зміни структури конденсатора. Це є потенційним рішенням для розвитку ринку енергонакопичуючих застосувань, що дозволяє розробляти недорогі пристрої для збору енергії. Конструкція перетворювача електростатичної енергії залежить в основному від структури змінного конденсатора і механізму перетворення. У дослідницьких роботах представлено широкий спектр можливих структур і підходів, які можуть бути використані. Проте запропоновані структури і підходи, які надано в літературі, й досі мають як переваги, так і недоліки [15].

Запропонований в [16] пристрій було розроблено у рамках проекту SMARTER (Smart Multifunctional Architecture & Technology for Energy-Aware wireless sensor). Пристрій є енергонезалежним і працює на основі п'єзоелектричного перетворювача в якості первинного джерела енергії, що дозволяє не використовувати електрохімічні батареї. Система здатна перетворювати механічне навантаження в електричну енергію, що є цікавою темою в додатках для структурного моніторингу здоров'я, в аерокосмічній області, як-то отримання електричної енергії від механічної, що виробляється у польоті під час вібрації крила літака. Привабливим у запропонованому рішенні [16] є те, що один і той же перетворювач, який використовується для збору енергії, також виконує діагностичну функцію - визначає механічну деформацію, що зумовлює його багатofункціональну концепцію.

В усіх випадках гібридні підходи комплекують різні механізми генерації електричного заряду, наприклад, такі як збір сонячної енергії та фотогенеруючі носії [17]. Бажаною поведінкою адаптивних гібридних пристроїв, призначених для роботи в середовищах зі змінною амплітудою енергетичних джерел, буде розумне регулювання потоків потужності, що подаються в накопичувач, використовуються, або розсіюється. Це говорить про те, що пристрій має бути розрахований на гідний стан, але мати інтелект для збільшення електричного згасання і збору більшої кількості енергії, якщо буде необхідно [18].

Дослідники розробили наногенератори з п'єзоелектричними і трибоелектричними властивостями, які можуть бути використані для перетворення механічної енергії в електрику, які є ефективними пристроями для збору низькочастотної механічної енергії [19].

Як відомо, будова наногенератора та його матеріал надають переваги високої продуктивності, простої конструкції, низької вартості, гнучкості, невеликої ваги і відмінного поєднання з іншими матеріалами і пристроями. Проте, наногенератори мають і серйозний недолік: для використання в практичній електроніці їм необхідно генерувати безперервну потужність, хоча наногенератор може генерувати миттєву або імпульсну потужність, коли в якості вхідного сигналу потрібна механічна енергія. Щоб здолати цю критичну проблему наногенераторів, понині пропонуються нові рішення.

Запропоновано термін «гібридне облаштування усе-в-одному», який означає, що один пристрій містить у собі як наногенератор, який уловлює енергію, так і накопичувач енергії. Ідея гібридного облаштування «усе-в-одному» надає безліч переваг для компактних, простих і портативних пристроїв, але для їх промислового потрібно набагато більше зусиль. Основні результати порівняння щільності потужності різних методів збору енергії приведені в таблиці 1.

3. Моделювання, випробування і прототипування програмного забезпечення для дослідження механічних енергоджерел

Вирішуване завдання полягає в тому, щоб розглянути тільки деякі можливі структури та компоненти з доступних технологій збору та перетворення енергії, щоб потім будувати схеми та алгоритми оптимального управління живленням.

У статті [21] автори описали конструкцію і оцінку емулятора Echo, який дозволяє відтворювати

експерименти з пристроями для збору енергії на основі конденсаторів без необхідності використання апаратури і моделювання накопичувачів. Ekho здатний реєструвати умови збору енергії і точно відтворювати ці умови в лабораторії.

Таблиця 1
Порівняння щільності енергії різних методів збору енергії [20]

Джерело енергії	Щільність енергії
Акустичний шум (acoustic noise)	0.003 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ @ 75dB 0.96 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ @ 100dB
Температурна варіація (temperature variation)	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Навколишні радіочастоти (ambient radio frequency)	1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Навколишнє світло (ambient light)	100 mW/cm ² (direct sun) 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (illuminated office)
Термоелектричний генератор (thermoelectric generator)	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Вібрація/мікрогенератор (vibration/microgenerator)	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (human motion - Hz) 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ (machines - kHz)
Вібрація/п'єзоелектрик (vibration/piezoelectric)	200 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Повітряний потік (airflow)	1 mW/cm ²
Натискання на кнопки (push buttons)	50 $\mu\text{J}/\text{N}$
Вставки для взуття (shoe inserts)	330 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Індуктори (hand generators)	30 W/kg
Удар п'яти (heel strike)	7 W/cm ²

Автори також описали дизайн і використання мобільної версії Ekho; в даному випадку дозволяється профілювати енергетичні середовища в місцях, де датчики вже встановлені або будуть встановлені. Ekho – це універсальний інструмент, який підтримує широкий спектр технологій збору енергії.

Автори статті [22] показують формулювання моделі ЗЕ і можливість її використання для розробки ефективних систем збору енергії. Вони досліджують співвідношення між оптимальними часами резервного копіювання. Це, на думку авторів, дозволить допомогти програмістам визначити гранулярність та розмірність завдань, архітекторам – налаштувати сторожові таймери тощо. Автори також надають архітекторам рекомендації по оптимізації часу резервного копіювання або відновлення. Їх модель здатна забезпечити визначення нижчої та вищої меж продуктивності при розрахунку недетермі-

нованості переривчастого виконання, необхідних обчислювальних робіт.

У роботі [23] було наведено відкриту апаратну платформу Medlay, яка складається з базової плати і уніфікованих модулів. Medlay допомагає зрозуміти роботу складних мікроенергетичних систем, підтримує розробку управління живленням на ранній стадії проектування. Готові до використання модулі допомагають користувачеві створити робочий прототип, який дозволяє комплекту бути відмінним інструментом для навчання студентів на курсі вбудованих систем. Medlay – це, по-перше, інтелектуальна цеглина і, по-друге, енергозберігаюча система моніторингу – саме так вважають автори. Демонстраційна плата ADP5091 від Analog Devices [24] є найближчим рішенням, конкурентним для Medlay, але Medlay на відміну від Analog Devices не обмежується тільки одним джерелом.

4. Розроблення застосунку для дослідження можливості використання механічної енергії руху людини як джерела електричної енергії живлення електронних пристроїв

У системі Android існує декілька вбудованих опитуючих датчиків, які підходять для різних типів застосувань. Для дослідження характеристик руху людини, як правило, необхідна достатньо велика швидкість опитування датчиків, оскільки це дозволяє робити точнішу вибірку високочастотних коливань, а також зменшувати похибки від білого шуму.

Завдяки широкому діапазону вбудованих датчиків смартфони на сьогодні є дуже поширеними вимірювальними інструментами. Наприклад, дані акселерометра смартфона вже натеper використовуються для моніторингу якості дорожньої поверхні під час їзди на велосипеді [26].

Застосунок для платформи Android було розроблено з використанням технології .Net "Xamarin". Спочатку була створена архітектура застосунку, яка базується на двох основних компонентах: «Основний компонент Android» (Main Android Component), який відповідає за окремий код Android і «Загальний код» (Overall code), який містить загальний код для усіх платформ. Важливо відзначити, що точка входу розташована в Android-компоненті у підкомпоненті «Основний компонент застосування» (Main Application Component). Цей підкомпонент викликає методи підкомпонента «Довгі завдання» (Long Tasks), відповідальні за довгострокову роботу в «прихованому» стані. «Загальний код» (Overall Code), у свою чергу, працює над графічним інтерфейсом користувача (GUI) і бізнес-логікою

(Business logic). Підкомпонент бізнес-логіки використовує методи з Android-компонента, оскільки має доступ до OS API (рис. 1).

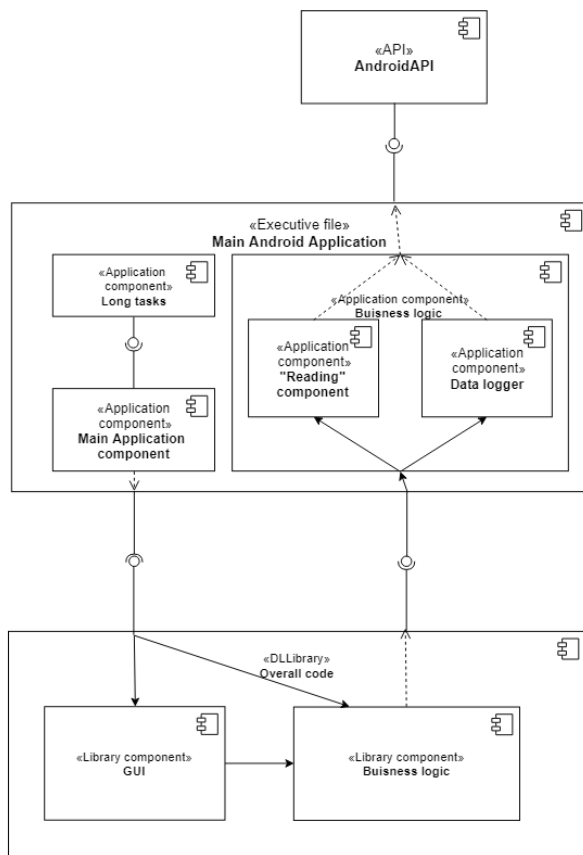


Рис. 1. Архітектура застосування

Наступним кроком стало розроблення застосунку, який надає можливість зчитувати дані з датчиків акселерометра з обраною частотою і записувати їх в текстовий файл. На рис. 2 наведено основну форму графічного інтерфейсу. Детальнішу інформацію про застосування можна побачити на сторінці GitHub [28].

5. Результати

Дослідження характеристик можливості руху людини для збору енергії проводилося на смартфоні (Lenovo, Lenovo Group Limited), який працює на операційній системі Android 6.0. Для порівняння та оцінки точності розробленого власного застосунку у якості еталону було використано застосунок для Android «Набір інструментів для фізичних явищ» Крістіана Війера [25].

В якості алгоритму калібрування, який зменшує зсув без пошкодження даних, було використано плаваюче середнє. Це було зроблено для усунення великих помилок, які послідовно мають повторюватися у більшості прогонів (рис. 3):

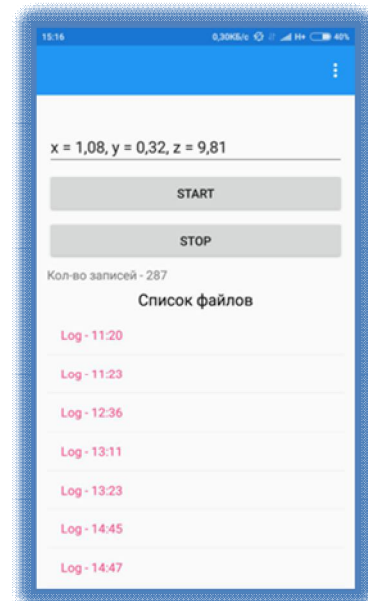


Рис. 2. Основна форма графічного інтерфейса

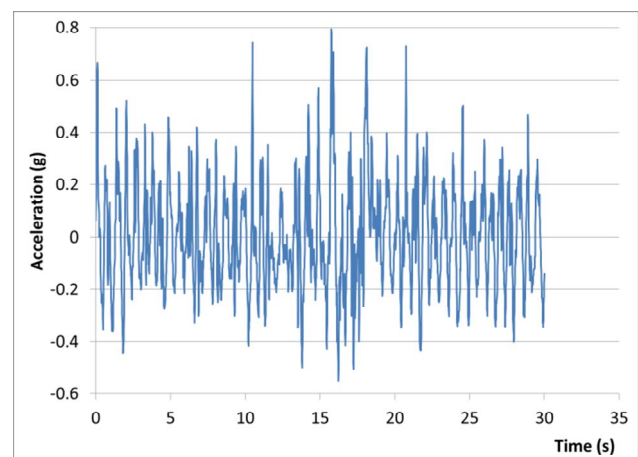


Рис. 3. Прискорення як функція часу під час ходьби людини після використання алгоритму калібрування

$$a_c(t) = a(t) - \int_{\tau=t-\Delta t}^{t+\Delta t} a(\tau) d\tau / 2\Delta t, \quad (1)$$

де $a_c(t)$ – прискорення після видалення плаваючого середнього, $a(t)$ – загальне прискорення, яке отримано з вимірювань прискорень по трьом осям

$$a(t) = \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t) + a_z^2(t)}. \quad (2)$$

Рух акселерометра приводить до швидкості і прискорення, які фактично моделюється сумою синусоїдальних хвиль, що можуть мати зсув по фазі, періоду або амплітуді:

$$a_c(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right), \quad (3)$$

де a_0 , a_n , b_n – коефіцієнти перетворення Фур'є.

Для визначення спектрів потужності прискорення при ходьбі людини використовувалося швидке перетворення Фур'є (ШПФ). ШПФ – це алгоритм, який відображає сигнал протягом періоду часу та ділить його на частотні складові. Ці компоненти є поодинокими синусоїдальними коливаннями на різних частотах, кожна зі своєю власною амплітудою і фазою (рис. 4.).

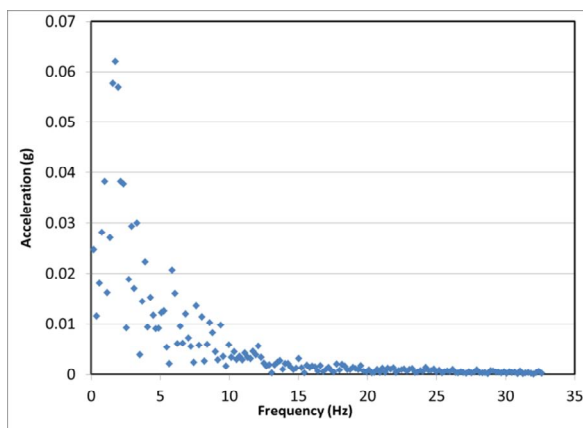


Рис. 4. Спектр прискорення під час ходьби людини

Попередні результати цього дослідження показали такі характеристики руху людини під час пішої ходи: частота – 1...12 Гц з максимальним прискоренням, яке не перевищує 0,8 g.

П'єзоелектричні перетворювачі, що нині випускаються промисловістю, орієнтовані на застосування в умовах вібраційних частот не менше 20-50 Гц, залежно від версії. Наприклад, стандартна лінійка продуктів Piezo Protection Advantage (PPA) від Midé Technology Corporation є низкою прямокутних п'єзоелектричних пакетів, призначених для консольних, скріплених або фіксованих конфігурацій пучків. Застосування для цих продуктів включають вібрацію ЗЕ, вібраційне зволоження, точне спрацьовування, вібрацію і деформацію, а також багато інших [27].

6. Висновки та перспективи

Основна мета цього дослідження полягала в тому, щоб запропонувати просте рішення, яке базується на операційній системі Android для дослідження індивідуальних характеристик руху людини

для збирання енергії і навести приклад практичних результатів використання цього рішення. Для досягнення зазначеної мети в якості інструмента для фізичних вимірів було використано смартфон. Широке розповсюдження смартфонів, наявність нових датчиків, які вони містять у собі, роблять ці пристрої необхідними в сучасній фізиці в лабораторіях.

Незважаючи на виконану роботу, яка була спрямована на досягнення зазначених цілей, необхідно прикласти додаткові зусилля щодо підвищення надійності цього рішення і, отже, розширення його можливостей.

Недоліки кожного з інерційних давачів (акселерометр, магнітометр, гіроскоп) можуть бути зменшені за допомогою їх спільного використання та комплексування. Поєднання даних з усіх цих трьох видів інерційних датчиків є кращим рішенням для дослідження можливості використання механічної енергії руху людини як джерела електричної енергії живлення електронних пристроїв. Алгоритмічна реалізація сучасних методів цифрової фільтрації – є необхідною складовою забезпечення точності та достовірності результатів вимірювань.

Література

1. Pérez, D. J. *A Survey Of Energy Harvesting Circuits: Research Issues And Challenges [Text] / D. J. Pérez, R. G. Gómez, J. T. Gómez. – Revista Telem@tica. – 2016. – vol. 15, no. 2. – P. 73-90.*
2. *Recent Progress on Piezoelectric and Triboelectric Energy Harvesters in Biomedical Systems [Text] / Q. Zheng, B. Shi, Z. Li and Z. L. Wang // Advanced Science. – 2017. – vol. 4, Iss. 7. – P. 1700029, doi: 10.1002/advs.201700029.*
3. Dagdeviren, C. *Energy Harvesting from the Animal/Human Body for Self-Powered Electronics [Text] / C. Dagdeviren, Z. Li and Z. L. Wang. – The Annual Review of Biomedical Engineering. – 2017. – No. 19. – P. 85–108. doi: 10.1146/annurev-bioeng-071516-044517.*
4. Prasad, R. V. *Reincarnation in the Ambiance: Devices and Networks with Energy Harvesting [Text] / R. V. Prasad, S. Devasenapathy, V. S. Rao, and J. Vazifehdan // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2014. – vol. 16, no. 1. – P. 195-213. doi: 10.1109/SURV.2013.062613.00235.*
5. *MIMO Energy Harvesting in FullDuplex Multi-User Networks [Text] / H. H. M. Tam, H. D. Tuan, A. A. Nasir, Q. Duong, H. V. Poor // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2017. – vol. 16, no. 5. – P. 3282-3297. doi: 10.1109/TWC.2017.2679055.*
6. *Flexible and Transparent Paper-Based Ionic Diode Fabricated from Oppositely Charged Microfibrillated Cellulose [Text] / W. Zhang, X. Zhang,*

- C. Lu, Y. Wang, Y. Deng // *The Journal of Physical Chemistry*. – 2012. – vol. 116, no. 16. – P. 9227-9234. doi: 10.1021/jp301924g.
7. Young-Man, C. *Wearable Biomechanical Energy Harvesting Technologies [Text]* / C. Young-Man, L. Moon Gu, J. Yongho // *Energies*, MDPI, *Open Access Journal*. – 2017. – vol. 10, no. 10. – P. 1-17.
8. *Integrated smart bearings for next generation aero-engines. Part II: Energy harvesting and wireless communication development [Text]* / I. Bashir, L. Wang, T. J., Harvey, B. Zaghari, A. S. Weddell, N. M. White // *1st World Congress on Condition Monitoring (WCCM 2017)*. – 2017. – P. 715-725.
9. *Paving the Path to a Green and Self-Powered Internet of Things [Text]* / M. Shirvanimoghaddam, K. Shirvanimoghaddam, M. M. Abolhasani, M. Farhangi, V. Z. Barsari, H. Liu, M. Dohler, M. Naebe. – 2017. eprint arXiv:1712.02277.
10. Sil, I. *A review of energy harvesting technology and its potential applications [Text]* / I. Sil, S. Mukherjee, K. Biswas // *Environmental And Earth Sciences Research Journal*. – 2017. – vol. 4, no. 2. – P. 33-38. doi: 10.18280/eesrj.040202.
11. Dhakar, L. *Triboelectric Devices for Power Generation and Self-Powered Sensing Applications [Text]* / L. Dhakar // *Springer Theses*. – 2017. – 123 p. doi: 10.1007/978-981-10-3815-0.
12. *Energy harvesting with a bimorph type piezoelectric diaphragm multilayer structure and mechanically induced pre-stress [Text]* / J. Palosaari, M. Leinonen, J. Juuti, H. Jantunen // *Energy Technology*. – 2016. – Vol. 4, No. 5. – P. 620-624.
13. *Smart materials and structures for energy harvesters [Text]* / T. Liu, S. Liu, X. Xie, C. Yang, Z. Yang and X. Zhai. – 2017. eprint arXiv:1709.00493.
14. *Energy harvesting from wood floor vibration using a piezoelectric generator [Text]* / J. Kan, R. J. Ross, X. Wang, Li, Wenbin // *Research Note FPL-RN-0347*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. – 2017. – 7 p.
15. Aljadiri, R. T. *Electrostatic Energy Harvesting Systems: A Better Understanding of Their Sustainability [Text]* / R. T. Aljadiri, L. Y. Taha, P. Ivey // *Journal of Clean Energy Technologies*. – 2017. vol. 5, no. 5. – P. 405-412.
16. *Self-Powered energy harvester strain sensing device for structural health monitoring [Text]* / A. ÁlvarezI, M. Bafleur, J-M. Dilhac, J. Colomer, D. Dragomirescu, J. Lopez, M. Zhu, P. Miribel // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – vol. 773, no. 1. doi:10.1088/1742-6596/773/1/012070.
17. Zhang, Y. *Control of electro-chemical processes using energy harvesting materials and devices [Text]* / Y. Zhang, M. Xie, V. Adamaki, H. Khanbareh, C. R. Bowen // *Chem. Soc. Rev.* – 2017. no. 4. – P. 7757-7786.
18. Stephen, N. G. *On energy harvesting from ambient vibration [Text]* / N. G. Stephen // *Journal of Sound and Vibration*. – 2006. – no. 293. – P. 409-425.
19. *Research Update: Hybrid energy devices combining nanogenerators and energy storage systems for self-charging capability [Text]* / J. Kim, J. Lee, Y. Yamauchi, C. Choi // *APL Materials*. – 2017. – No. 5, 073804. doi: 10.1063/1.4979718.
20. Yildiz, F. *Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques [Text]* / F. Yildiz // *Journal of Technology Studies*. Epsilon Pi Tau Inc. – 2009. – vol. 35, no. 1. doi: 10.21061/jots.v35i1.a.6.
21. *Realistic and Repeatable Emulation of Energy Harvesting Environments [Text]* / J. Hester, L. Sitanayah, T. Scott, J. Sorber // *ACM Transactions on Sensor Networks*. – 2017. – vol. 9, no. 4, article 39. – P. 1-33.
22. *The EH Model: Analytical Exploration of Energy-Harvesting Architectures [Text]* / J. S. Miguel, K. Ganesan, M. Badr, N. E. Jerger // *IEEE Computer Architecture Letters*. – 2018. – vol. 17, no. 1. – P. 76-79. doi: 10.1109/LCA.2017.2777834.
23. Kokert, J. *Medlay: A Reconfigurable Micro-Power Management to Investigate Self-Powered Systems [Text]* / J. Kokert, T. Beckedahl L. M. Reindl // *Sensors*. – 2018. – No. 18. – P. 259. doi: 10.3390/s18010259.
24. *Analog Devices*. Available at: <http://www.analog.com/en/products/power-management/batterymanagement/battery-charger-ic/adp5091/> (Accessed 4 March 2018).
25. *Vieyra Software, Physics Toolbox Sensor Suite Pro*. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=net.vieyrasoftware.physicstoolboxsuitepro&hl=uk> (Accessed 18 February 2018).
26. *Prediction of Road Surface Quality during Cycling Using Smartphone Accelerometer Data [Text]* / S. Litzengerger, T. Christensen, O. Hofstätter, A. Sabo // *Proceedings ISEA*. – 2018. – No. 2. – P. 217. doi: 10.3390/proceedings2060217.
27. *Midé Technology Corporation. PPA PRODUCTS. Datasheet & User Manual. PPA Piezo Protection Advantage. REVISION No. 002*. Available at: <https://www.mouser.com/ds/2/606/ppa-piezo-product-datasheet-844547.pdf> (Accessed 28 February 2018).
28. *NAU department 603, Acceleration-recorder application*. Available at: <https://github.com/devmrx/Acceleration-recorder> (Accessed 28 February 2018).

References

1. Pérez, D. J., Gómez, R. G., Gómez, J. T. A Survey Of Energy Harvesting Circuits: Research Issues And Challenges. *Revista Telem@tica*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 73-90.
2. Zheng, Q., Shi, B., Li, Z., Wan, Z. L. Recent Progress on Piezoelectric and Triboelectric Energy Harvesters in Biomedical Systems. *Advanced Science*, 2017, vol. 4, Issue 7, pp. 1700029, doi: 10.1002/advs.201700029.
3. Dagdeviren, C., Li, Z., Wang, Z. L. Energy Harvesting from the Animal/Human Body for Self-Powered Electronics. *The Annual Review of Biomedical Engineering*, 2017, no. 19, pp. 85–108, doi: 10.1146/annurev-bioeng-071516-044517.
4. Prasad, R. V., Devasenapathy, S., Rao, V. S., Vazifehdan, J. Reincarnation in the Ambiance: Devices and Networks with Energy Harvesting. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 195-213. doi: 10.1109/SURV.2013.062613.00235.
5. Tam, H. M., Tuan, H. D., Nasir, A. A., Duong Q., Poor, H. V. MIMO Energy Harvesting in FullDuplex Multi-User Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, vol. 16, no. 5, pp. 3282-3297, doi: 10.1109/TWC.2017.2679055.
6. Zhang, W., Zhang, X., Lu, C., Wang, Y., Deng Y. Flexible and Transparent Paper-Based Ionic Diode Fabricated from Oppositely Charged Microfibrillated Cellulose. *The Journal of Physical Chemistry*, 2012, vol. 116, no. 16, pp. 9227-9234. doi: 10.1021/jp301924g.
7. Young-Man, C., Moon Gu, L., Yongho, J. Wearable Biomechanical Energy Harvesting Technologies. *Energies, MDPI, Open Access Journal*, 2017, vol. 10, no. 10, pp. 1-17.
8. Bashir, I., Wang, L., Harvey, T. J., Zaghari, B., Weddell, A. S., White, N. M. Integrated smart bearings for next generation aero-engines. Part II: Energy harvesting and wireless communication development. *1st World Congress on Condition Monitoring (WCCM 2017)*, 2017, pp. 715-725.
9. Shirvanimoghaddam, M., Abolhasani, M. M., Farhangi, M., Barsari, V. Z., Liu, H., Dohler, M., Naebe, M. Paving the Path to a Green and Self-Powered Internet of Things. *Eprint arXiv:1712.02277*, 2017.
10. Sil, I., Mukherjee, S., Biswas, K. A review of energy harvesting technology and its potential applications. *Environmental And Earth Sciences Research Journal*, 2017, vol. 4, no. 2, pp. 33-38, doi: 10.18280/eesrj.040202.
11. Dhakar, L. Triboelectric Devices for Power Generation and Self-Powered Sensing Applications. *Springer Theses*, 2017. 123 p., doi: 10.1007%2F978-981-10-3815-0.
12. Palosaari, J., Leinonen, M., Juuti, J., Jantunen, H. Energy harvesting with a bimorph type piezoelectric diaphragm multilayer structure and mechanically induced pre-stress. *Energy Technology*, 2016, vol. 4, no. 5, pp. 620-624.
13. Liu, T., Liu, S., Xie, X., Yang, C., Yang, Z., Zhai, X. Smart materials and structures for energy harvesters. *Eprint arXiv:1709.00493*, 2017.
14. Kan, J., Ross, R. J., Wang, X., Li, Wenbin. Energy harvesting from wood floor vibration using a piezoelectric generator. *Research Note FPL– RN–0347. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, 2017. 7 p.
15. Aljadiri, R. T., Taha, L. Y., Ivey, P. Electrostatic Energy Harvesting Systems: A Better Understanding of Their Sustainability. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2017, vol. 5, no. 5, pp. 405-412.
16. Álvarez1, A., Bafleur, M., Dilhac, J-M., Colomer, J., Dragomirescu, D., Lopez, J., Zhu, M., Miribel, P. Self-Powered energy harvester strain sensing device for structural health monitoring. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 773, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/773/1/012070.
17. Zhang, Y., Xie, M., Adamaki, V., Khanbareh, H., Bowen, C. R. Control of electrochemical processes using energy harvesting materials and devices. *Chem. Soc. Rev*, 2017, no. 46, pp. 7757-7786.
18. Stephen, N. G. On energy harvesting from ambient vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, no. 293, pp. 409–425.
19. Kim, J., Lee, J., Yamauchi, Y., Choi, C. Research Update: Hybrid energy devices combining nanogenerators and energy storage systems for self-charging capability. *APL Materials*, 2017, no. 5, 073804, doi: 10.1063/1.4979718.
20. Yildiz, F. Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques. *Journal of Technology Studies. Epsilon Pi Tau Inc.*, 2009, vol. 35, no. 1, doi: 10.21061/jots.v35i1.a.6.
21. Hester, J., Sitanayah, L., Scott, T., Sorber, J. Realistic and Repeatable Emulation of Energy Harvesting Environments. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2017, vol. 9, no. 4, article 39, pp. 1-33.
22. Miguel, J. S., Ganesan, K., Badr, M., Jerger N. E. The EH Model: Analytical Exploration of Energy-Harvesting Architectures. *IEEE Computer Architecture Letters*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 76-79, doi: 10.1109/LCA.2017.2777834.
23. Kokert, J., Beckedahl, T., Reindl, L. M. Medlay: A Reconfigurable Micro-Power Management to Investigate Self-Powered Systems. *Sensors*, 2018, no. 18, pp. 259, doi:10.3390/s18010259.

24. *Analog Devices*. Available at: <http://www.analog.com/en/products/power-management/batterymanagement/battery-charger-ic/adp5091/> (Accessed 4 March 2018).

25. *Vieyra Software, Physics Toolbox Sensor Suite Pro*. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=net.vieyrasoftwares.physicstoolboxsuitepro&hl=uk> (Accessed 18 February 2018).

26. Litzenberger, S., Christensen, T., Hofstätter, O., Sabo, A. Prediction of Road Surface Quality during Cycling Using Smartphone Accelerometer Data. *Proceedings ISEA*, 2018, no. 2, pp. 217, doi: 10.3390/proceedings2060217.

27. *Midé Technology Corporation. PPA PRODUCTS. Datasheet & User Manual. PPA Piezo Protection Advantage. REVISION No. 002*. Available at: <https://www.mouser.com/ds/2/606/ppa-piezo-product-datasheet-844547.pdf> (Accessed 28 February 2018).

28. *NAU department 603, Acceleration-recorder application*. Available at: <https://github.com/devmrx/Acceleration-recorder> (Accessed 28 February 2018).

Поступила в редакцію 12.10.2018, рассмотрена на редколлегии 12.12.2018

СМАРТФОН КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА СОВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ СБОРА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ДВИЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

О. В. Лучшева, П. А. Лучшев, Д. С. Игнатьев, И. Б. Туркин

Практичность современных носимых электронных устройств определяется автономностью их источников энергопитания. Концепция сбора и преобразования вспомогательной, фоновой энергии из энергетических источников окружающей среды предлагает различные варианты решения проблемы такой энергозависимости. Тем не менее на данный момент, проблема не имеет комплексного решения и фактически переносится в новые плоскости. Одна из них: как оценить целесообразность и эффективность применения и использования таких маломощных и непостоянных энергетических источников. В статье обсуждается и аргументировано доказывается возможность применения электронно-механических микродатчиков, которые доступны в любом смартфоне, для изучения потенциального энергетического эффекта от использования фоновых источников энергии. Цель статьи – рассказать всем, кому интересны современные технологии сбора и преобразования различных видов энергии окружающей среды, о возможности применения широкодоступного и бюджетного смартфона с операционной системой Android для исследования индивидуальных характеристик движения человека как источника вспомогательной, фоновой энергии. Кроме этого рассказано о применении собираемой и накапливаемой энергии, выполнен обзор технологий и произведено сравнение энергетической плотности разных методов сбора энергии. Приведены результаты архитектурного моделирования и пример прототипа программного обеспечения для исследования механических источников энергии. Для получения результата разработано приложение, считывающее данные с датчиков акселерометра с заданной частотой, предназначенное для изучения и оценки возможности использования механической энергии движения человека как источника электрической энергии питания автономных электронных устройств. Несмотря на выполненную работу, которая была направлена на достижение указанной цели, продолжение исследований требует расширения возможностей разработанного приложения с одной стороны за счет совместного использования различных датчиков для комплексного исследования возможности получения энергии взаимодействия человека с окружающей средой и с другой стороны – применения современных методов и алгоритмов цифровой фильтрации для обеспечения точности и достоверности измерений.

Ключевые слова: сборщики энергии; носимые устройства; движение человека; электрический генератор; биомеханическая энергия; измерительные устройства.

SMARTPHONE FOR SMART ENERGY HARVESTING INVESTIGATIONS

O. V. Luchsheva, P. O. Luchshev, D. S. Ihnatiev, I. B. Turkin

The practicality of modern wearable electronic devices is determined by the autonomy of their power supply sources. The concept of collecting and converting auxiliary, background energy from energy sources of the environment offers various options for solving the problem of such energy dependence. However, at the moment, the problem does not have a complex solution and is actually being transferred to new planes. One of them: how to

evaluate the feasibility and effectiveness of the applying and usage of such low-power and non-permanent energy sources. In the article it is discussed and substantiated the possibility of using electronic-mechanical microsensors, which are available in any smartphone, to study the potential energy effect from the use of background energy sources. The purpose of the article is to tell everyone who are interested in modern technologies of collecting and converting various types of environmental energy about the possibility of using a widely available and budgetary smartphone with the Android operating system to study the individual characteristics of human movement as a source of auxiliary, background energy. In addition, it is said about the usage of collected and accumulated energy, a review of technologies and a comparison of the energy density of different methods of energy collection were made. The results of architectural modeling and an example of a prototype software for the study of mechanical energy sources are given. To obtain the result, an application has been developed that reads data from accelerometer sensors with a given frequency, designed to study and evaluate the possibility of using the mechanical energy of human movement as a source of electrical energy to power autonomous electronic devices. Despite the work has been done, which was aimed at achieving this goal, the continuation of research requires expanding the capabilities of the developed application on the one hand by sharing various sensors for a complex study of the possibility of obtaining human interaction energy with the environment and applying modern methods and digital filtering algorithms to ensure accuracy and reliability of measurements.

Keywords: energy harvesting; wearable devices; human motion; electric generator; biomechanical energy; sensing devices.

Лучшева Оксана Вадимівна – ст. викл. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лучшев Павло Олександрович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Ігнатєв Дмитро Сергійович – ас. каф. інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Туркін Ігор Борисович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Luchsheva Oksana Vadymivna – Senior Teacher of Department of Software Engineering Department, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: o.luchsheva@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-3855-2815.

Luchshev Pavlo Oleksandrovych – PhD, Assistant Professor of Department of Software Engineering Department, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: p.luchshev@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-3522-7622.

Ihnatiev Dmytro Sergijovych – Teaching Assistant of Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: d.ihnatiev@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-8751-3965.

Turkin Ihor Borysovych – DrS on Engineering, Professor, Head of Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: i.turkin@khai.edu, Scopus Author ID: 57203145725, ORCID Author ID: 0000-0001-6456-1120.