

УДК 616-78

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ОРГАНІЗМУ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕДИЧНИХ ПРИЛАДІВ

Фелді Діана Андріївна
dinifeldi@gmail.com

Козяр Василь Васильович
kozyarvasilij@gmail.com

Факультет біомедичної інженерії

Національного технічного університету

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна

Реферат – Для енергозабезпечення дозуючих, моніторних, стимулюючих медичних приладів, особливо тих, які імплантуються, пропонується використовувати електроенергію, отриману від людського організму. Електрика може бути отримана в результаті перетворень інших видів енергії, які притаманні тілу людини: механічної (кінетичної), теплової, енергії окисно-відновлюваних біохімічних реакцій. Завдяки успіхам нанотехнологій з'являється більше можливостей для прогресу в цьому напрямку. З практичної точки зору, використання механічної енергії є найбільш перспективним. Рухи кінцівок або інших частин тіла без додаткового навантаження, навіть невідомо, здатні забезпечити накопичення енергії, достатньої для медичних потреб. Генерація тілом теплової енергії є більш стабільною, порівняно із механічними рухами. Тому очікується, що отримання електричної енергії за рахунок конвертації тепла людини з використанням, наприклад, ефекту Зеебека, буде мати певні переваги в плані гарантованості та надійності. Існує великий ряд практичних пропозицій отримання електрики для живлення медичних приладів за рахунок біохімічних реакцій, які відбуваються в організмі людини. Ці роботи поки залишаються на експериментальному рівні в пошуку більшої продуктивності. Теоретично, оптимальним є пряме, без перетворень, споживання електрики, яка реєструється при функціонуванні органів. Але при даному рівні наукового розвитку це практично неможливо.

Ключові слова – енергія, людина, механіка, тепло, трансформація.

I. ВСТУП

Завдяки бурхливому розвитку медичної техніки все більше вирішується проблем, пов'язаних із здоров'ям. Прилади медичного призначення в тісному контакті з пацієнтами цілодобово слідкують за станом організму, підтримують різноманітні функції та, нерідко, здатні повністю протезувати роботу того чи іншого органу. Звісно, що для їх роботи потрібне постачання енергії. Проблема енергозабезпечення має велику актуальність для пристроїв, які імплантуються, особливо, для автономних.[1] При використанні останніх бездротове електроживлення не є надійним, сама система виявляється громіздкою і незручною, некомфортною для пацієнтів. Тому, для реалізації пропонується ідея - енергію, потрібну для роботи слідкуючих, стимулюючих, протезуючих медичних

приладів, отримувати безпосередньо від організму людини.

II. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Вже багато років використовуються годинники з автопідзарядом, які не потребують щоденного закручування пружини. Механізм таких годинників містить маховик, який робить коливання при рухах руки. І цього достатньо, щоб годинник працював безперервно. Цей приклад спонукає до пошуку аналогічних рішень для зовнішніх та імплантованих стимулюючих, діагностичних, дозуючих, моніторних медичних приладів.

Енергозабезпечення медичних приладів, особливо, імплантованих, може становити проблему. Головний чинник – обмежена електрична ємність джерела. Для продовження роботи імплантованого пристрою при випрацюванні його батареї

потрібне хірургічне втручання для заміни пристрою або його батареї. Щоб уникнути такої ситуації, ведуться розробки з використання енергії людського тіла.[2,3,4]

Енергія, що виробляється людським тілом, підрозділяється на теплову, механічну та електричну. Вбачається, що найефективніше можна використовувати механічну енергію людського тіла.[4,5] Механічна енергія при повсякденній діяльності людини витрачається в значній кількості і, зазвичай, несвідомо. Теплова та хімічна енергії також можуть бути використані, проте із значно меншою ефективністю. Безпосередньо електричну енергію людського тіла використати практично неможливо.[3,5]

Використання механічної енергії людського тіла має давню історію, коли був винайдений ручний генератор на основі електромагнітної індукції. Пізніше були запропоновані моделі радіоприймачів та ліхтариків, які працювали за рахунок руху людини. Привабливим є перетворення енергії, яка витрачається «марно», але поки що таке перетворення вимагає додаткових витрат. В багатьох випадках електромагнітні пристрої для генерації електроенергії великі та масивні, потребують прикладання значних зусиль. Хоча вже є кілька перспективних для практичної реалізації дослідницьких робіт щодо перетворення механічної енергії людини за допомогою електромагнітних генераторів.[6,7,8,9,10]

Механічну енергію людської рухової діяльності можна перетворити на електрику за допомогою пристроїв збору механічної енергії як для пристроїв, що імплантуються, так і для приладів, розташованих поза тілом людини. Механічні пристрої відбору енергії також можна використовувати як датчики з автономним живленням для управління рухами та контролю стану людського тіла. .

У табл. 1 наведено приблизні значення потужності, яку виробляє людина залежно від навантаження.[11]

Таблиця 1

1	2	3	4	5
60 - 80 Вт	100 - 150 Вт	250 - 290 Вт	500 - 650 Вт	800 - 900 Вт

Потужність, що виробляється: 1 - у стані спокою чи повільної ходи; 2 – при виконанні легкої роботи чи під час швидкої ходи; 3 – під час фізичної роботи середньої тяжкості; 4 - при важкій фізичній роботі; 5 – спортсменами під час змагань.

Для перетворення кінетичної енергії тіла людини на електричну, пропонуються генератори різного типу.[3]

Перспективним є використання п'єзоелементів.[2,12,13] Прямий ефект (генерація електричного заряду) виникає при механічному впливі на п'єзоелемент: стиску, розтягування або вібрації.[4] Реальним джерелом дармової енергії є хода. Цей режим пересування, малоефективний з енергетичної точки зору, має низький ККД. При ходьбі у момент торкання ступнями землі та перенесенні маси тіла на неї відбувається механічна робота. Є розрахунки стосовно функції п'єзоелементів, вмонтованих у взуття. При масі людини 70 кг генерована потужність очікується на рівні 14 мВт, що достатньо для енергозабезпечення деяких медичних приладів.[11] Якщо п'єзоперетворювачі розташовувати в великих суглобах, вони здатні генерувати потужність близько 7 мВт, Основною проблемою генерації енергії за допомогою п'єзоелементів є великий розмір п'єзоелементів.[3]

На теперішній час, механічну енергію тіла перетворити на електричну, не створюючи додаткового навантаження на людину, проблематично. Реально використовувати п'єзоелементи, які зазнають тиску при ході, але отримати при цьому потужність, достатню для

задоволення базових потреб людини, поки неможливо.[11]

Нещодавно був запропонований наногенератор на основі дротів з оксиду цинку, який здатний перетворювати механічну енергію скорочення м'язів на електричну. Електрика генерується, коли нанодроти згинаються та повертаються в початкове положення.[5] Також, як джерело енергії, пропонують використовувати пульсацію кровоносних судин. Таким чином, можна забезпечувати енергією датчики, призначені для моніторингу серцебиття та кров'яного тиску.[6]

Електростатичні генератори перетворюють механічні коливання в електричну енергію шляхом переміщення перетворювача проти електричного поля.[7] В них використовуються конденсатори змінної ємності, положення пластин яких під дією зовнішньої сили міняється. При фіксованій напрузі рух пластини генерує струм через конденсатор.[8]

Генератор осьового потоку здатний перетворювати енергію потоку крові в електричну за допомогою електромагнітної плоскої котушки. При фіксації котушки на щиколотці генерація становила 3,9 мкВт.[7]

Також можливо генерувати енергію за допомогою імплантованого магніту та котушки, розташованої назовні. Потрібна висока швидкість обертання мікрогенератора забезпечується відповідною системою передачі обертів до магніту. Така система здатна виробляти кількість енергії, достатню для енергозабезпечення кардіостимулятора.[9]

Розрахунки показують, що можна ефективно, з практичним виходом, перетворювати механічну енергію тіла на електричну. Однак, якщо перетворювати лише енергію супутню природнім рухам, ту, що витрачається «марно», виробництво електрики буде недостатнім. Тому постає питання про застосування додаткових

пристроїв для отримання електричної енергії з кінетичної.

Науковий прогрес дає можливість використати для перетворення механічної енергії новітні нанотехнології. Перспективним є практичне застосування п'єзоелектричних наногенераторів (ПЕНГ) і трибоелектричних наногенераторів (ТЕНГ).

П'єзоелектричні наногенератори працюють з використанням п'єзоелектричного ефекту: поляризаційних зарядів та змінного електричного поля.[14] Принцип роботи ПЕНГ показаний на рис. 1.[15]

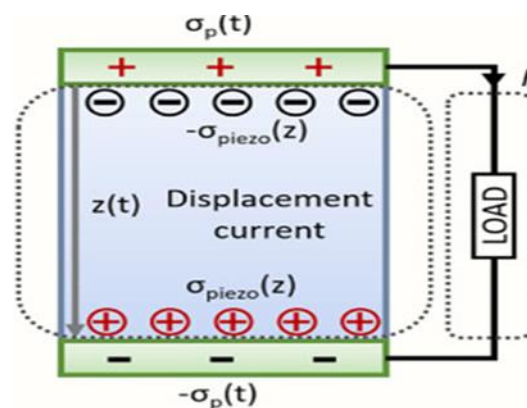


Рис. 1. Генерація диполів в ПЕНГ

Струм зміщення генерується всередині генератора, а ємнісний струм провідності генерується в зовнішньому ланцюзі. Простий ПЕНГ створюється шляхом покриття верхнього та нижнього електродів двома наночастинами ізолюваного п'єзоелектричного матеріалу. Коли п'єзоелектричний матеріал деформується зовнішньою силою вздовж певного напрямку, відносно зміщення позитивних і негативних іонів в елементарній комірці призводить до того, що центри позитивного і негативного заряду більше не збігаються, утворюючи електричні диполі.

У цьому випадку еквівалентні п'єзоелектричні поляризаційні заряди з протилежною полярністю генеруються на

обох кінцях п'єзоелектричного матеріалу, і щільність поляризаційного заряду збільшується разом із прикладеною силою.[16,17] Електростатичний потенціал, створений поляризаційними зарядами, змушує вільні електрони перетікати від одного електрода до іншого через зовнішній ланцюг, щоб збалансувати потенціал, таким чином викликаючи генерацію струму в ланцюзі та реалізуючи перетворення сили в електрику. Приклад практичної реалізації ПЕНГ показаний на рис. 2.[15]

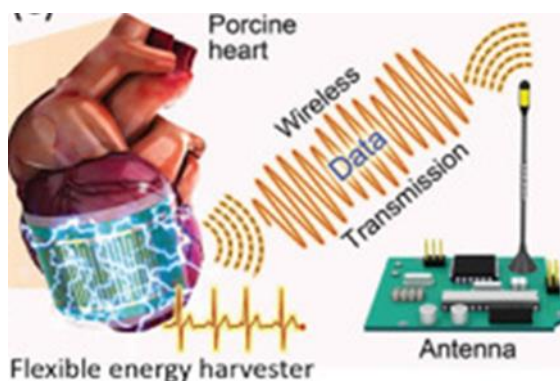


Рис. 2. Збір біомеханічної енергії серця свині за допомогою біосумісного ПЕНГ.

Трибоелектричний наногенератор для отримання електричної енергії використовує явища трибоелектризації та електростатичної індукції.[14] Принцип роботи ТЕНГ в найбільш типовому випадку полягає в використанні режиму роз'єднання контактів. [15,18]

Варіант реалізації технології ТЕНГ показано на рис. 3.[15]

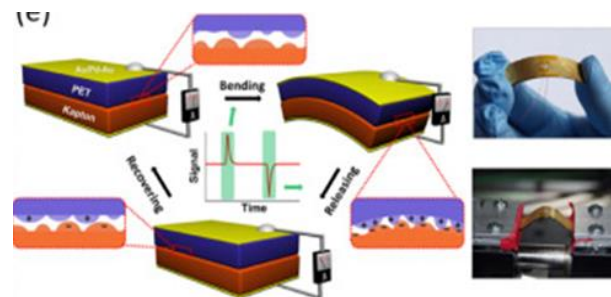


Рис. 3. ТЕНГ на основі двох складених полімерних плівок.

Як і в ПЕНГ, струм зміщення генерується всередині генератора, а ємнісний струм реєструється в зовнішньому ланцюзі. Тильна сторона двох діелектричних матеріалів з різною спорідненістю до електронів покрита металевими електродами. Коли два діелектричні матеріали вступають у фізичний контакт під дією зовнішньої сили, електростатичні заряди на поверхні двох матеріалів будуть перенесені через трибоелектричний ефект, який призводить до того, що внутрішня поверхня двох матеріалів несе еквівалентну кількість різнорідних зарядів.[19] Зі збільшенням часу контакту між двома діелектричними матеріалами поверхнева щільність статичного заряду досягає насичення, яка не залежить від відстані між двома матеріалами. Електростатичне поле, утворене трибоелектричними зарядами, змушує електрони протікати через зовнішнє навантаження, що призводить до накопичення вільних електронів в електродах на тильній стороні діелектричного матеріалу. Коли до ТЕНГ періодично прикладається періодична зовнішня сила, утворюється змінний струм.

З використанням такої технології був створений імплантований кардіостимулятор.[20] Кількості отримуваної від серцебиття дослідної тварини напруги було достатньо для забезпечення електрокардіостимуляції. Ця розробка може в перспективі лягти в основу

«вічних» кардіостимуляторів, незалежних від традиційних джерел живлення. Інші приклади застосування ПЕНГ та ТЕНГ наведені в роботах. [21-28]

Свідченням гомеостазу організму людини є стабільність його температури незалежно від температури оточуючого середовища. Ця гомеостатична властивість забезпечує певний рівень обмінних процесів, потрібний для нормальної життєдіяльності. Теплопродукція здебільшого залежить від інтенсивності рухів. Але навіть від сплячої людини можна отримати джерело потужністю 80 мВт. Під час руху людини такі можливості значно зростають – до – 1600 мВт.[2]

Традиційно, для збору тепла тіла людини з подальшою трансформацією в електрику, використовують термоелектричний і піроелектричний ефекти. Термоелектричний ефект, також відомий, як ефект Зеєбека. Створений на його основі термоелектричний генератор (ТЕГ), це пристрій, здатний безпосередньо перетворювати теплову енергію в електричну.[29,30] Ефект Зеєбека спричинений дифузією носіїв від гарячого кінця до холодного і в металах він менше виражений, ніж у напівпровідниках.[31] Виготовляють ТЕГ деякої кількості напівпровідникових термопар, з'єднаних послідовно або паралельно. Через різницю температур між гарячим і холодним кінцями відбувається накопичення позитивних зарядів на холодному кінці напівпровідника р-типу та накопичення негативних зарядів на холодному кінці напівпровідника n-типу.[29,32] Щоб отримати високу вихідну потужність, багато термопар з'єднують послідовно або паралельно, щоб утворити термобатарею. [33,34]

На відміну від ТЕГ, перетворення енергії за допомогою піроелектричних генераторів (ПЕГ) залежить від часової різниці температур. ПЕГ для свого функціонування використовують піроелектричний ефект,

який полягає в здатності деяких кристалів, піроелектриків, поляризуватися при зміні температури. Піроелектричний ефект притаманний таким матеріалам, як цирконат титанат свинцю (PZT), титанат барію (ВТО), ZnO, CdS. [35,36] Зміна температури спочатку спричиняє деформацію матеріалу, а потім, завдяки п'єзоелектричному ефекту, генерується п'єзоелектричний потенціал. При однаковій швидкості зміни температури ПЕГ генерує піроелектричні заряди в однаковій кількості та протилежної полярності, коли температура зростає та знижується.[36,37]

Існує ряд пропозицій щодо застосування ТЕГ в медичній сфері. В основному, перетворення енергії пропонується реалізувати за допомогою ТЕГ у вигляді тканини, яка контактує із тілом людини. Тривимірні тканини ТЕГ при щільному приляганні до тіла і при різниці температур 44 К може забезпечити щільність потужності до $70 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$, що достатньо для керування деякою малопотужною електронікою. Термоелектричні блоки в складі полімерної тканини, з якої виготовлена футболка, генерують вихідну напругу близько 200 мВ при різниці температур 40 К. [38,39] Еластичний ТЕГ для збору тепла людського тіла, адаптований до його поверхні, може генерувати вихідну потужність $0,15 \text{ мВт} / \text{см}^2$ при різниці температур 19 К. [40] Датчик температури і тиску на основі термоелектричних і п'єзорезистивних ефектів, може працювати в умовах природного градієнта температури без зовнішнього джерела живлення.[41]

Є кілька перспективних розробок із використанням ПЕГ. Один нанодріт з цирконат-титанату свинцю (PZT) при зміні температури від 296 до 333 К дає на виході 60 мкВ і 0,6 нА.[42] Вочевидь, що такий незначний ефект збору теплової енергії не забезпечить роботу медичного приладу, але реалізація цього можлива при

мультиплікації процесу. Продуктивність високорозтяжного ПЕГ на основі піроелектричного матеріалу значно вища. При різниці температур 22 K і швидкості зміни температури $105 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$, розтяганий ПЕГ може генерувати напругу 2,5 В і щільність струму $570 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$. [43]

Ряд технологій передбачають отримання електроенергії за допомогою хімічних реакцій, які відбуваються в організмі людини. В основному представлено два види технології збору хімічної енергії людини: біопаливний елемент (БПЕ) і генератор гідроелектричного ефекту (ГГЕ). Перша технологія використовує глюкозу та лактат, як субстрат для отримання електричної енергії, а в основі гідроелектричного ефекту лежить перетворення, з використанням наноматеріалів, енергії випаровування води на електрику.

Для виробництва електроенергії біопаливні елементи використовують окисно-відновні реакції у живих організмах. В залежності від типів каталізаторів БПЕ поділяють на ферментативні (ФПЕ) та мікробні (МПЕ) паливні елементи. [44] Останні в якості каталізаторів використовують живі мікроорганізми. В такому випадку виникають побоювання можливого розвитку інфекційного процесу.

Механізм роботи ФПЕ оснований на використанні в якості субстрату глюкози і каталізаторів оксидоредуктаз, осаджених на вуглецевих нанотрубках. Еластична штучна шкіра, в яку вмонтовані БПЕ, використовуючи лактат поту людини, продукує щільність потужності $1,2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ при напрузі 0,2 В. [45] Розроблений безмембранний біопаливний елемент на основі трубчастого графітового електроду, який імітує вени людини. При розміщенні його у венозному потоці пристрій генерує потужність 0,74 мкВт при 0,16 В. [46] Таким чином, була вперше показана можливість отримання електрики з кровотоку.

Дослідники встановили, що біопаливний елемент об'ємом менше 1 cm^3 , на основі покритих глюкозооксидазою вуглецевих нанотрубок, при імплантації може генерувати з цукру крові електроенергію, але, одночасно утворюються переокисні сполуки, які можуть шкодити організму. [45]

Явище гідроелектричного отримання електричної енергії базується на ефектах, які виникають при контакті молекул води з наноматеріалами. [47,48] В результаті такого контакту на межі розділу середовищ відбувається поляризація і накопичення зарядів електрики. Первинно увага приділялася електрокінетичним ефектам, пов'язаним із рухом води. [47,49] В теперішній час великий інтерес викликає можливість генерації електроенергії за рахунок вологості середовища та випаровування води. [50,51] Молекули води, які були випаровувані, при русі в проміжках наноматеріалів викликають генерацію потокового потенціалу. Градієнт тиску в наноканалах змушує іони OH^- накопичуватися в напрямку руху води і призводить до виникнення потокового потенціалу. [47]

Зміни вологості навколишнього середовища також можуть викликати генерацію електроенергії. При гідратації та дегідратації відбувається вивільнення гідратованих іонів. Рух цих іонів за градієнтом концентрації призводить до продукції електроенергії. [50,52] Низька ефективність БПЕ та ГГЕ поки не задовольняє потреби медицини. Але збір хімічної енергії тіла людини постійно вдосконалюється і результати, отримані в експериментах, вказують на перспективу практичного використання цієї енергії для живлення медичних приладів.

Раціональним вбачається отримувати електричну енергію безпосередньо з організму людини, без перетворень з інших видів енергії. Для цього є такі передумови як

наявність в тілі людини електрогенераторів. До них можна віднести головний мозок, серце, периферійні рецептори.[11] У серці первинним генератором імпульсів є синатріальний вузол, звідки хвиля збудження розповсюджується на весь серцевий м'яз, викликаючи його скорочення. В результаті скорочення генерується електрокардіограма, зубці якої мають амплітуду до 1 мВ. При вхідному опорі електрокардіографа 1 МОм вхідний струм буде становити максимум 10^{-9} А. Лише такого рівня струм можна отримати, якщо реєструвати потенціали з кінцівок людини. Пояснюється це тим, що людина є замкнутою електричною системою і всі різниці потенціалів що виникають в процесі життєдіяльності, є тимчасовими і вирівнюються через зв'язок по тканинам. Потужностей електрогенераторів тіла людини недостатньо для безпосереднього живлення виробів медичної техніки.[11]

III. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Розгляд літературних джерел дав змогу окреслити основні проблеми трансформації різних видів енергії організму людини в електричну і використання її для енергопостачання споріднених з пацієнтом медичних приладів. На даний момент найбільш ефективною є можливість використання механічної енергії людини. Через те, що людина рухається не постійно, має періоди механічного спокою, перетворення механічної енергії в електричну доцільно поєднувати із додатковими системами накопичення енергії, в тому числі, відновлюваної. Це підвищить ефективність і надійність автономного джерела живлення. Тому перспективним є створення універсального модуля самозарядки і збереження енергії з використанням різних типів накопичувачів, що включає перетворення механічної енергії

людини і сонячної енергії, як резервного джерела.

IV. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є огляд та аналіз наукової літератури стосовно можливості трансформації різних видів енергії організму людини в електричну та практичного використання її. В першу чергу потребують електрозабезпечення виробу медичної техніки, які безпосередньо і постійно функціонують в контакт з організмом людини.

V. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Дані, наведені в розглянутих літературних джерелах, надають широку інформацію про можливість використання енергії людського організму для енергопостачання медичної техніки. В першу чергу, доцільно забезпечити функціонування автономних, імплантованих медичних приладів.

Найбільш перспективними вбачаються системи перетворення механічної енергії в електрику. Системи, які використовують природні рухи людини при її повсякденному житті, мають обмежену надійність і не гарантують стабільне електропостачання через природну властивість людського тіла рухатись періодично. Для гарантованого енергопостачання додатково можуть бути використані системи примусової дії, але в цьому випадку доведеться поступитися комфортом існування.[6,7]

Перетворення потоку теплової енергії тіла людини, до 1600 мВт, теж має перспективу.[2] На відміну від фізичного навантаження, теплопродукція - більш стабільний процес і це гарантує надійне, безперервне енергоперетворення і енергопостачання. Матеріали, створені з використанням термоелектричного і піроелектричного ефектів, здатні забезпечити щільність потужності до 70

$\text{мВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Але ефективність цих процесів має велику залежність від градієнту температури, згідно закону Карно.[38]

Сучасний розвиток нанотехнологій сприяє дослідникам у вирішенні проблеми використання окисно-відновних реакцій організму людини для генерації електричної енергії. Обнадійливі результати застосування біопаливних елементів, отримані в експерименті, спонукають до перенесення цих досліджень в клінічну сферу, хоча треба ще вирішити деякі питання безпеки. Близьким до біопаливних елементів, за зв'язком із нанотехнологіями, є використання генераторів гідроелектричного ефекту, які навіть зміни вологості здатні перетворювати на електрику.[47]

Найкращим, із-за відсутності проміжних процесів, було б забезпечити живлення медичних приладів безпосередньо від існуючих в організмі людини електрогенераторів. Трансмембранний внутрішньоклітинний потенціал становить близько 90 мВ, але струм деполяризації настільки мізерний, що не реєструється звичайними приладами. Щоб отримати струм на рівні 1 мВ, потрібно було б мати підключення до тисяч окремих клітин, що наразі технічно неможливо.[11]

З огляду на недостатню ефективність вже опанованих в експерименті різних процесів збирання енергії тіла людини і перетворення її в електричну, зустрічним напрямком може бути зменшення енергопотреб медичних приладів, які плануються використовувати у такий спосіб.

VI. ВИСНОВКИ

Для живлення медичних приладів, особливо, імплантованих, доцільно використовувати електроенергію, отриману від організму людини.

Для отримання електрики потрібне перетворення інших видів енергії,

притаманних тілу людини: механічної, теплової, енергії біохімічних реакцій.

Найбільш перспективною є трансформація кінетичної енергії із застосуванням п'єзоелектричних і трибоелектричних наногенераторів.

Такі пристрої доцільно комбінувати із додатковими системами перетворення і накопичення енергії, що підвищить ефективність і надійність автономного джерела живлення.

Перспективним є створення універсального модуля самозарядки і збереження енергії на різних типах накопичувачів, який включас, на додаток до перетворення механічної енергії людини, використання сонячної енергії, як резервного джерела.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Згода на публікацію. Пацієнти участі в дослідженні не приймали.

ORCID ID та внесок авторів.

0000-0002-6252-6660 (А, D, E, F) Kozyar Vasyi

0009-0002-0446-6230 (B, C, E) Feldi Diana

A – Концепція роботи та дизайн, B – аналіз даних, C – Відповідальність за статистичний аналіз, D – Написання статті, E – Критичний огляд, F – Остаточне схвалення статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Wong, J. Y., Bronzino J. D., Peterson, D. R. Biomaterials: Principles and Practices // Boca Raton, FL CRC Press.–2012.– 168 p.
2. Paulo, J., Gaspar P. D. Review and future trend of energy harvesting methods for portable medical devices // Proceedings of the world congress on engineering.–2010.– p. 93-8.
3. Jaeseok, Y., Shwetak N., Patel M., Reynolds S., Gregory A. D. Design and performance of an optimal inertial power harvester for human-powered devices // IEEE. Trans mobile computation.– 2011.– vol. 10.– p. 669 – 83.

4. Фелді Д.А., Козяр В.В. Використання енергії тіла людини для електроживлення медичних виробів // *Матеріали МНТК Сучасні технології біомедичної інженерії*.- Одеса, 22-27.05.2022.- с. 69-72.
5. Choi C. The body electric [електронний ресурс] // *Knowable magazine*.-2018. Available from: <https://knowablemagazine.org/article/technology/2018/body-electric>.
6. Rome L.C., Flynn L., Goldman E.M. Generating electricity while walking with loads // *Science*.-2005.- 309 (5741).- p. 1725-28.
7. Donelan J.M., Li Q., Naing V. Biomechanical energy harvesting: generating electricity during walking with minimal user effort // *Science*.-2008.-319 (5864).- p. 807-10.
8. Zhang Q., Wang Y.F., Kim E.S. Power generation from human body motion through magnet and coil arrays with magnetic spring // *J. Appl. Phys.*-2014.-115 (6).- article 064908.
9. Zurbuchen A., Haeblerlin A., Bereuter L. Endocardial energy harvesting by electromagnetic induction // *IEEE. Trans Bio-Med. Eng.*-2017.- 65 (2).- p. 424-30.
10. Haeblerlin A., Rosch Y., Tholl M.V. Intracardiac turbines suitable for catheter-based implantation-an approach to power battery and leadless cardiac pacemakers // *IEEE. Trans Bio-Med. Eng.*-2019.-67 (4).- p. 1159-66.
11. Гончаров Є., Крюкова Н., Марков В., Поляков І. (2021). Тіло людини як джерело енергії // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.-2021.- 2 (6).- с. 60-5. DOI: 10.20998/2079-3944.2021.2.12
12. Casimiro, F., Gaspar, P.D., Gonçalves aplicação do princípio piezoelétrico no desenvolvimento de pavimentos para aproveitamento energético // *In III Conferência nacional em mecânica de fluidos termodinâmica e energia*.- 2009.- p. 19 - 23.
13. Sohn, J. W., Choi S. B., Lee D. Y. An investigation on piezoelectric energy harvesting for microelectromechanical systems power sources // *Journal of mechanical engineering and sciences*.- 2005.- p. 429-36.
14. Wang Z.L. On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators // *Mater. Today*.-2017.-20 (2). - p. 74-82.
15. Briscoe J., Dunn S. Piezoelectric nanogenerators - a review of nanostructured piezoelectric energy // *Harvesters. Nano Energy*.-2015.- 14.- p. 15-29.
16. Hu Y.F., Wang Z.L. Recent progress in piezoelectric nanogenerators as a sustainable power source in self-powered systems and active sensors // *Nano Energy*.-2015.-14.- p. 3-14.
17. Wang X.D. Piezoelectric nanogenerators-Harvesting ambient mechanical energy at the nanometer scale // *Nano Energy*.-2012.-1.- p. 13-24.
18. Luo J., Wang Z.L. Recent progress of triboelectric nanogenerators: From fundamental theory to practical applications // *EcoMat*.-2020.- 2 (4).- article 12059.
19. Wang Z.L., Chen J., Lin L. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors // *Energ. Environ. Sci.*-2015.- 8 (8).- p. 2250-82.
20. Ouyang H., Liu Z., Li N. Symbiotic cardiac pacemaker // *Nat. Commun.*-2019.-10.- article 1821.
21. Dong L., Closson A.B., Oglesby M. In vivo cardiac power generation enabled by an integrated helical piezoelectric pacemaker lead // *Nano Energy*.-2019.-66.- article 104085.
22. Park D.Y., Joe D.J., Kim D.H. Self-powered real-time arterial pulse monitoring using ultrathin epidermal piezoelectric sensors // *Adv. Mater.*-2017.-29 (37).- article 1702308.
23. Cheng X.L., Xue X., Ma Y. Implantable and self-powered blood pressure monitoring based on a piezoelectric thinfilm: simulated, in vitro and in vivo studies // *Nano Energy*.-2016.- 22 .- p. 453-60.
24. Seung W., Gupta M.K., Lee K.Y. Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator // *Acs Nano*.-2015.- 9 (4).- p. 3501-9.
25. Zhou X.H., Chen K., Li X.S. Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays // *Nat. Electron*.-2020.-3 (9). - p. 571-8.
26. Liu Z., Ma Y., Ouyang H. Transcatheter self-powered ultrasensitive endocardial pressure sensor // *Adv. Funct. Mater.*-2019.-29 (3). - article 1807560.
27. Lu X., Qu H., Skorobogatiy M. Piezoelectric micro- and nanostructured fibers fabricated from thermoplastic nanocomposites using a fiber drawing technique: comparative study and potential applications // *Acs Nano*.-2017.-11 (2).- p. 2103-14.
28. Sun J.G., Yang T.N., Wang C.Y. A flexible transparent one-structure tribo-piezo-pyroelectric hybrid energy generator based on bio-inspired silver nanowires network for biomechanical energy harvesting and physiological monitoring // *Nano Energy*.-2018.-48.- p. 383-90.
29. Zhang Q.H., Huang X.Y., Bai S.Q. Thermoelectric devices for power generation: recent progress and future challenges // *Adv. Eng. Mater.*-2016.-18 (2).- p. 194-213.
30. Siddique A.R.M., Mahmud S., Van Heyst B. A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their existing challenges // *Renew. Sust. Energ. Rev.*-2017.- p. 730-44.
31. Zoui M.A., Bentouba S., Stocholm J.G. A review on thermoelectric generators: progress and applications // *Energies*.-2020.-13 (14).-article 3606.
32. Li D.L., Gong Y.N., Chen Y.X. Recent progress of two-dimensional thermoelectric materials. *Nano-Micro Lett.*-2020.- 12(1).-article 36.
33. Zaia E.W., Gordon M.P., Yuan P.Y. Progress and perspective: soft thermoelectric materials for wearable and internet-of-things applications // *Adv. Electron. Mater.*-2019.-5 (11).- article 1800823.
34. Wang Y., Yang L., Shi X.L. Flexible thermoelectric materials and generators: challenges and innovations // *Adv. Mater.*-2019.-31 (29). - article 1807916.
35. Ryu H., Kim S.W. Emerging pyroelectric nanogenerators to convert thermal energy into electrical energy // *Small*.-2021.-17 (9).- article 1903469.
36. Bowen C.R., Taylor J., LeBoulbar E. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications // *Energ Environ. Sci.*-2014.-7 (12).- p. 3836-56.
37. He H.Y., Lu X., Hanc E. Advances in lead-free pyroelectric materials: a comprehensive review // *J. Mater. Chem.*-2020.-8 (5). - p. 1494-516.

38. Sun T.T., Zhou B.Y., Zheng Q. Stretchable fabric generates electric power from woven thermoelectric fibers // *Nat. Commun.*–2020.–11 (1).– article 572.
39. Li M.F., Chen J.X., Zhong W.B. Large-area, wearable, self-powered pressure-temperature sensor based on 3D thermoelectric spacer fabric // *Acs. Sensors.*–2020.–5 (8).– p. 2545-54.
40. Yang Y., Hu H.J., Chen Z.Y. Stretchable nanolayered thermoelectric energy harvester on complex and dynamic surfaces // *Nano Lett.*–2020.–20 (6).– p. 4445-53.
41. Zhang F.J., Zang Y.P., Huang D.Z. Flexible and self-powered temperature-pressure dual-parameter sensors using microstructure-frame-supported organic thermoelectric materials // *Nat. Commun.*–2015.–6.– article 8356.
42. Yang Y., Zhou Y.S., Wu J.M. Single micro/nanowire pyroelectric nanogenerators as self-powered temperature sensors // *Acs. Nano.*–2012.–6 (9).– p. 8456-61.
43. Lee J.H., Ryu H., Kim T.Y. Thermally induced strain-coupled highly stretchable and sensitive pyroelectric nanogenerators // *Adv. Energy Mater.*–2015.–5 (18).– article 1500704.
44. Schroder U. From in vitro to in vivo-biofuel cells are maturing // *Angew. Chem. Int. Edit.*–2012.–51 (30).– p. 7370-2.
45. Bando A.J., You J.M., Kim N.H. Soft, stretchable, high power density electronic skin-based biofuel cells for scavenging energy from human sweat // *Energ. Environ. Sci.*–2017.–10 (7).– p. 1581-89.
46. Pankratov D., Ohlsson L., Gudmundsson P. Ex vivo electric power generation in human blood using an enzymatic fuel cell in a vein replica // *RSC Adv.*–2016.–6 (74).– p. 70215-20.
47. Zhang Z.H., Li X.M., Yin J. Emerging hydrovoltaic technology // *Nat. Nanotechnol.*–2018.–13 (12).– p. 1109-19.
48. Yin J., Zhou J.X., Fang S.M. Hydrovoltaic energy on the way // *Joule.*–2020.– 4 (9).– p. 1852-55.
49. Xie J., Wang L., Chen X. The emerging of hydrovoltaic materials as a future technology: a case study for China Green Energy and Environment // *IntechOpen.*–2019.– p. 45-66.
50. Shen D., Duley W.W., Peng P. Moisture-enabled electricity generation: from physics and materials to self-powered applications // *Adv. Mater.*–2020.–32 (52).– article 2003722.
51. Wang Y., Gao S.W., Xu W.H. Nanogenerators with superwetting surfaces for harvesting water/liquid energy // *Adv. Funct. Mater.*–2020.–30 (26).– article 1908252.
52. Han Y.Y., Zhang Z.P., Qu L.T. Power generation from graphene-water interactions // *Flatchem.*–2019.–14.–article 100090.

UDC 616-78

PROSPECTS OF USING BODY ENERGY FOR ENERGY SUPPLY OF MEDICAL DEVICES

Feldi Diana

dinifeldi@gmail.com

Kozyar Vasyl

kozyarvasilij@gmail.com

Faculty of Biomedical Engineering

National Technical University

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Kyiv, Ukraine

Abstract - It is proposed to use electricity obtained from the human body to power dosing, monitoring, stimulating medical devices, especially those that are implanted. Electricity can be obtained as a result of transformations of other types of energy inherent in the human body: mechanical (kinetic), thermal, energy of oxidation-reduction biochemical reactions. Thanks to the advances in nanotechnology, there are more opportunities for progress in this direction. From a practical point of view, the use of mechanical energy is the most promising. Kinetic energy can be converted into electrical energy using electromagnetic, electrostatic and piezoelectric generators. Breathing movements, movements of limbs or other parts of the body during daily activities, without additional load, even unconsciously, can ensure the accumulation of energy sufficient for medical needs. The generation of heat energy by the body is more stable compared to mechanical movements. Therefore, it is expected that obtaining electrical energy due to the conversion of human heat using, for example, the Seebeck effect, will have certain advantages in terms of guarantee and reliability. There are a large number of practical proposals for obtaining electricity for powering medical devices due to biochemical reactions that occur in the human body. These robots still remain at the experimental level in the search for greater productivity. Theoretically, the optimal is direct, without transformations, consumption of electricity, which is registered during the functioning of organs. But at this level of scientific development, this is practically impossible.

Key words – body, energy, mechanics, heat, transformation.