

УДК 616-78

# ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ АКТИВНИХ ІМПЛАНТОВАНИХ ПРИСТРОЇВ

*Фелді Діана Андріївна*  
[dinifeldi@gmail.com](mailto:dinifeldi@gmail.com)

*Козяр Василь Васильович*  
[kozyarvasilij@gmail.com](mailto:kozyarvasilij@gmail.com)

Факультет біомедичної інженерії

Національного технічного університету

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

**Реферат** - Медична практика широко використовує активні імплантовані пристрої для підтримки або заміни певних функцій організму. Проте, основною проблемою лишається термін функціонування таких пристроїв, який визначається енергоємністю джерела живлення. При закінченні строку дії джерела енергії потрібне хірургічне втручання для заміни пристрою або його батареї. Потреба в частій підзарядці робить пацієнта залежним від зовнішнього джерела живлення (підзаряджаючого пристрою) і обмежує пацієнту життєвий простір та вільне пересування. Для усунення цієї проблеми пропонується використовувати енергію, що генерується тілом людини. Енергія, яку виробляє людський організм, розподіляється на теплову, механічну та електричну. Найбільш перспективною є трансформація кінетичної енергії. Для версифікації джерел і гарантування надійності енергопостачання імплантованих пристроїв доцільно комбінувати використання кінетичної енергії тіла людини із додатковими системами перетворення і накопичення енергії. З огляду на це, пропонується система бездротового електроживлення активних імплантів, яка складається із сонячної панелі і ручного магнітно-електричного генератора, в якості первинних джерел, і літій-іонного акумулятора та іоністора, в якості накопичувачів енергії.

**Ключові слова** – активні імпланти, бездротове живлення, ручний генератор, сонячна панель, накопичувачі.

## I. ВСТУП

Завдяки бурхливому розвитку медичної техніки все більше проблем, пов'язаних із здоров'ям, знаходять своє вирішення. Активні імплантовані прилади медичного призначення цілодобово слідкують за станом організму, підтримують різноманітні функції та, нерідко, здатні повністю протезувати роботу того чи іншого органу. Енергозабезпечення імплантованих медичних приладів може становити проблему через обмеженість електричної ємності джерела. [1]. Забезпечення роботи автономних пристроїв потребує бездротової передачі енергії від зовнішніх мережевих джерел електрики, постійної чи періодичної [2]. З-за цього пацієнти втрачають свою мобільність, обмежуються в пересуванні, в певних діях. тощо. Живлення активних імплантів від мережевих джерел електрики не є абсолютно надійним, такі системи виявляються громіздкими, незручними і некомфортними для пацієнтів. Для подолання залежності від зовнішніх джерел електроенергії є можливість

використовувати перетворювачі сонячного світла, а, також, отримувати енергію безпосередньо від організму людини [3].

## II. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Медична практика широко використовує активні імплантовані пристрої для підтримки або заміни певних функцій організму. Проте, основною проблемою лишається термін функціонування таких пристроїв, який визначається енергоємністю джерела живлення. При закінченні строку дії джерела енергії потрібне хірургічне втручання для заміни пристрою або його батареї. Це питання особливо актуальне для автономних штучних органів. Енергоємність сучасних електроджерел активних імплантів обмежується, також, певними масо-габаритними вимогами [1].

Прогрес прямує в напрямку створення автономних активних імплантів для підтримки або повного протезування рганів. Реалії сучасного стану в цій галузі такі, що більшість імплантів мають обмежений термін функціонування через вичерпання

джерела енергії та/або потребують частого поповнення запасу енергії, що некомфортно, незручно для пацієнта. Потреба в частій підзарядці робить пацієнта залежним від зовнішнього джерела живлення (підзаряджаючого пристрою) і обмежує пацієнту життєвий простір та вільне пересування. Крім того, оптимізації, удосконалення потребує сам процес бездротової передачі енергії та вибір незалежних від електричної мережі первинних джерел. В якості таких можна розглядати електромагнітні поля, гідроелектричні, теплові, хімічні джерела, але, згідно даних літератури, реально може бути використана енергія тіла людини (самого пацієнта або оточуючих) і сонячна енергія [1, 2, 3, 5].

Енергія, яку виробляє людський організм, розподіляється на теплову, механічну та електричну. Вважається, що найбільш ефективним може бути використання механічної енергії, що генерується тілом людини [4, 5]. Під час повсякденної діяльності людина витрачає значну кількість механічної енергії, переважно несвідомо. Реально використовувати п'єзоелементи, які зазнають тиску при ході, але отримати при цьому потужність, достатню для задоволення базових потреб людини, поки неможливо [6]. Теплова та хімічна енергія також можуть бути використані, але з набагато меншою ефективністю. Пряме використання електричної енергії, що генерується тілом людини, практично неможливе [2, 5].

Використання механічної енергії людського тіла найпростіше реалізується за допомогою ручного генератора, що базується на принципах електромагнітної індукції. Привабливість полягає у можливості перетворення енергії, яка "втрачається дарма", але такий процес в дійсності потребує додаткових суттєвих фізичних зусиль. На теперішній час, механічну енергію тіла перетворити на електричну, не створюючи додаткового навантаження на людину, проблематично. Хоча вже існують кілька досліджень, які

відкривають перспективи практичної реалізації перетворення механічної енергії людини за допомогою електромагнітних генераторів [6,7,8,9,10].

Ручний магнітно-електричний генератор (ручна динамо-машина) призначений для організації обертового руху і конвертації механічної енергії в електричну. Така генерація може бути важливою в надзвичайних ситуаціях або у випадках, коли немає доступу до електричної мережі. Для використання ручного генератора, людина повинна докладати фізичний труд, обертаючи ручку або педаль. Споживана людська енергія може коливатися, але в середньому для генерації 10 ватт електричної потужності людина повинна розвивати потужність приблизно 75-100 ватт [11]. Ручні генератори використовуються у різних сферах, включаючи аварійне живлення медичних пристроїв, таких як інсулінові помпи, електрокардіографи, вентилятори, освітлювачі, у випадках відключення мережевого електроживлення або у надзвичайних обставинах [12] При відсутності доступу до основного джерела енергії застосування ручного генератора може бути критичним, життєвоважливим.

Використання ручного генератора для живлення медичних пристроїв обґрунтоване такими аспектами: Надійність, безперебійність, незалежність від електромережі; ефективність та потужність; мобільність, портативність та компактність; можливість негайного використання; екологічна чистота. [13,14, 15,16 ]

Загалом, ручні генератори можуть бути важливим інструментом для забезпечення живлення медичних пристроїв в умовах надзвичайних ситуацій та обмеженого доступу до електромережі. Поєднання зазначених вище властивостей робить їх цінним джерелом енергії для медичного застосування.

Сонячні панелі (або фотоелектричні панелі, модулі) використовують сонячне випромінювання для генерації електричної енергії. Основний принцип роботи полягає в перетворенні світлової енергії в електричний струм за допомогою фотоефекту. Фотоефект

є прямим перетворенням сонячного світла в електричну енергію. Сонячна панель складається з фотоелектричних сонячних елементів, таких як кристали силіцію або тонкі плівки напівпровідників, які абсорбують фотони сонячного світла. Фотоелектричні елементи створюють позитивний і негативний заряди при зіткненні з фотонами. Електричний струм, що генерується цим зарядом, потім збирається і виводиться як корисна електрична енергія [17]. Використання сонячних батарей для живлення медичних пристроїв має кілька важливих переваг, особливо у ситуаціях, коли доступ до електроживлення обмежений або відсутній: Стійкі до екстремальних умов та портативні; є системами незалежного живлення; енергетично незалежні та надійні; тривалий термін служби та мінімальна технічна складність; висока ефективність конверсії сонячної енергії; достатній вихідний струм та напруга; можуть бути ефективними і при слабкому освітленні; екологічна чистота та відсутність викидів [18,19,20].

Сонячні батареї є надійним та екологічно чистим джерелом енергії для живлення медичних пристроїв. Вони поєднують в собі високу ефективність, низьку вартість обслуговування та надійність у найрізноманітніших умовах, що робить їх ідеальним вибором для сучасного забезпечення медичних приладів, у випадку відсутності доступу до стаціонарного електроживлення.

Іоністори (суперконденсатори) поєднують в собі особливості конденсаторів і звичайних акумуляторів. Вони використовуються для зберігання електричної енергії і відрізняються від інших акумуляторів тим, що їх енергія зберігається у вигляді іонів у розчині, а не у хімічних реакціях. Вони працює на основі переміщення іонів у електроліті між двома електродами під дією зовнішнього електричного поля [21]. Іоністори мають низький внутрішній опір і це дозволяє їм віддавати велику потужність та швидко заряджатися і розряджатися. Основні характеристики іоністорів включають

ємність, напругу, щільність енергії, тривалість життя та потужність розряду. Основна перевага іоністорів - висока швидкість заряджання та розряджання, що дозволяє їм бути використаними для ефективного зберігання та віддачі енергії в миттєвих потребах [22,23].

Літій-іонні акумулятори - це сучасний тип акумуляторів, які використовують літєві сполуки у якості активного матеріалу для обміну іонів під час заряджання та розряджання. Вони широко використовуються для зберігання енергії в різних пристроях, від мобільних телефонів до електричних автомобілів. Основні характеристики літій-іонних акумуляторів аналогічні характеристикам іоністорів. Перевагами як літій-іонних акумуляторів, так і іоністорів є: Висока енергетична щільність та напруга; довгий циклічний термін служби; низький саморозряд; малі масо-габаритні характеристики; високий коефіцієнт ефективності. [24,25]

Отже, літій-іонні акумулятори і іоністори мають свої унікальні переваги перед іншими накопичувачами енергії та можуть бути оптимальним вибором залежно від конкретних вимог і особливостей конкретного застосування. З огляду на це, пропонується система бездротового електроживлення активних імплантів, яка складається із сонячної панелі і ручного магнітно-електричного генератора, в якості первинних джерел, і літій-іонного акумулятора та іоністора, в якості накопичувачів енергії.

Якщо узагальнити, забезпечення енергопостачання активних імплантованих пристроїв можливе шляхом перетворення видів енергії, притаманних тілу людини: механічної, теплової, енергії біохімічних реакцій. Найбільш перспективною є трансформація кінетичної енергії. Для версифікації джерел і гарантування надійності енергопостачання імплантованих пристроїв доцільно комбінувати використання кінетичної енергії тіла людини із додатковими системами перетворення і накопичення енергії. З огляду на це, пропонується система бездротового

електроживлення активних імплантів, яка складається із сонячної панелі і ручного магнітно-електричного генератора, в якості первинних джерел, і літій-іонного акумулятора та іоністора, в якості накопичувачів енергії.

### III. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Основні труднощі енергопостачання імплантованих активних медичних приладів потребують ефективного подолання. На даний момент найбільш доцільним є використання механічної енергії людини. Через те, що людина має періоди механічного спокою, перетворення механічної енергії в електричну слід поєднувати із незалежними від людини системами використання відновлюваної енергії. Це підвищить ефективність і надійність автономного джерела живлення. Тому перспективним є створення автономного комплексу бездротового енергозабезпечення імплантованих (медичних, активних) пристроїв з використанням різних типів джерел і накопичувачів.

### IV. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є підвищення надійності функціонування імплантованих пристроїв і подовження терміну їх безперервної дії. В першу чергу потребують електрозабезпечення виробу медичної техніки, які безпосередньо і постійно функціонують в контакті з організмом людини [1].

### V. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Джерелами електроструму в розроблюваному комплексі слугували магнітно-електричний генератор мод. UTM 1603 з ручним приводом і сонячна панель розміром 115 х 160 мм. В якості накопичувачів енергії використані Li-іон акумулятор мод. 18650, 3,7 В, 2000 мА\*год. та суперконденсатори (іоністори) 500 Ф. Підтримку потрібної напруги живлення передавальної антени забезпечував DC-DC конвертор (напруга на виході 5 В при вхідній напрузі 5 - 0,9 В). Для бездротового

сприйняття електроенергії використана приймальна антена розмірами 40 х 60 х 1 мм. Незначні габарити приймальної антени дозволяють без труднощів імплантувати її в підшкірну клітковину. Перемикачі, застосовані в комплексі автономного електроживлення забезпечували вибіркочку комутацію між джерелам електроживлення і накопичувачами, а, також, вибіркоче живлення конвертора.

Для контролю і визначення електричних характеристик комплексу використовувався осциллограф DiSco 2, мультиметр Owon V35T, вимірювач індуктивності UTM1603. Статистична обробка експериментального матеріалу виконувалась із використанням програмного пакету IBM SPSS Statistics 26.0, побудова графіків виконувалась за допомогою програмного забезпечення GNU Octave.

### VI. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ І ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСУ

Комплекс автономного електроживлення імплантованих активних пристроїв зібраний згідно запропонованої блок-схеми (рис. 1).

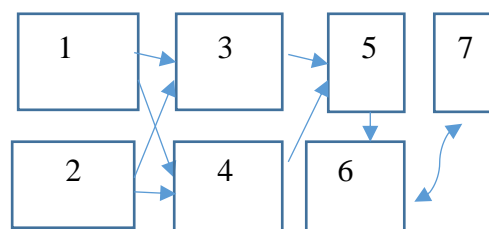


Рис. 1. Блок-схема комплексу  
Ручний генератор мод. UTM 1603 (поз. 1).  
Сонячна панель 115 х 160 мм (поз. 2).  
Акумулятор мод. 18650, 3,7 В, (поз. 3).  
Іоністори 500 Ф (поз. 4).  
Конвертор постійної напруги (поз.5).  
Передавальна антена (поз. 6).  
Приймальна антена (поз. 7).

Магнітно-електричний генератор (рис. 2) містить 3-х ступінчасту зубчасту передачу. Завдяки цій передачі швидкість обертання в генеруючому вузлі зростає до 1600 об./хв.



Рис. 2. Ручний електрогенератор

Перевірка функціонування генератора показала, що при обертанні ручки приводу первинно на виході отримується змінна напруга форми, близької до синусоїдальної (рис. 3).

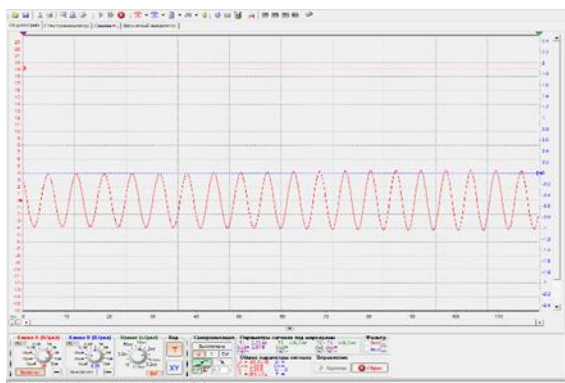


Рис. 3. Осцилограма вихідної напруги генератора.

Після випрямлення і стабілізації на виході генератора реєструвалася постійна напруга до 4 В в залежності від швидкості обертання генератора. При цьому на осцилограмі спостерігалися високочастотні низькоамплітудні коливання, накладені на графік постійної напруги (рис. 4).

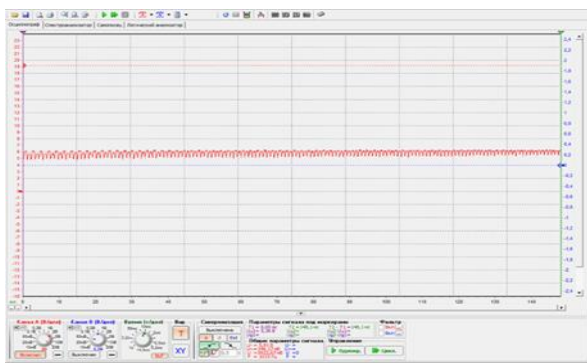


Рис. 4. Осцилограма вихідної напруги генератора після випрямлення

Для усунення цих коливань між вихідними контактами додатково був підключений конденсатор 3300 мкФ і це підключення виявилось ефективним (рис. 5).

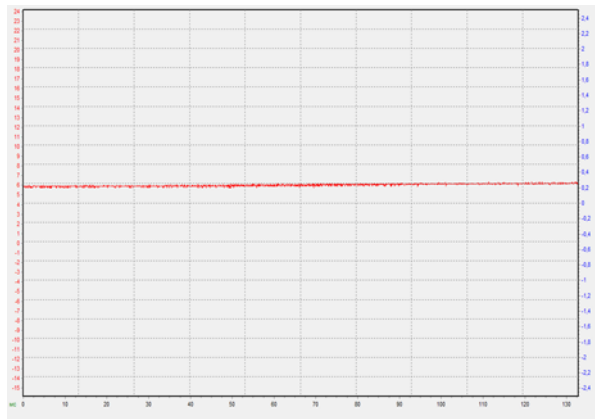


Рис. 5. Осцилограма вихідної напруги генератора після додаткової стабілізації

В комплексі для гарантованого електрозабезпечення використане альтернативне джерело – сонячна панель (рис. 6), вихідна напруга якої при яскравому сонячному освітленні сягала 6,2 В.

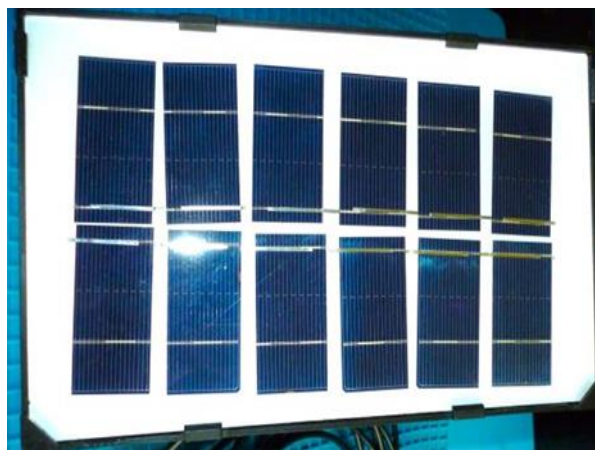


Рис. 6. Сонячна панель

Проведені експериментальні перевірки заряджання акумулятора та іоністора як від генератора, так і від сонячної панелі. Результат заряджання акумулятора (рис. 7) за допомогою ручного генератора показаний в табл. 1 та графіку рис. 8.



Рис. 7. Акумулятор 18650

Таблиця 1. Зарядження акумулятора ручним генератором

Оберти	мВ	Оберти	мВ
0	670	3500	3330
500	2950	4000	3355
1000	3080	4500	3383
1500	3150	5000	3410
2000	3210	5500	3428
2500	3260	6000	3438
3000	3300		

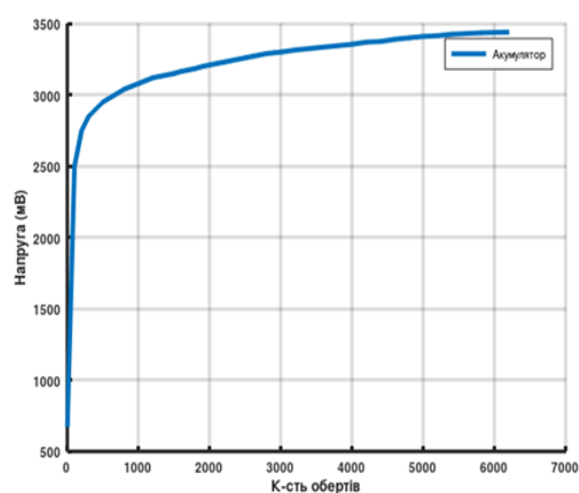


Рис. 8. Графік зарядження акумулятора ручним генератором

Для зарядження акумулятора до напруги 3,2 – 3,4 В потрібно було зробити з перервами не менше 6000 обертів рукою генератора. В часі на це витрачалося біля трьох годин. Перерви були потрібні з-за того, що генератор розігрівався (пластикові шестерні) і через втомлюваність експериментатора.

Результати зарядження акумулятора від сонячної панелі наведені в табл. 2 та показані

на графіках рис. 9. Через мінливість сонячної освітленості протягом дня, зарядження акумулятора або іоністора від панелі проводилось 10 разів з підрахунком середніх значень.

Таблиця 2. Зарядження акумулятора від сонячної панелі, В

Години	0	1	3	5	7	9
Серед-ня з 10-ти	0,7	2,6	3,3	3,5	3,6	3,6 +- 0,02
Лампа, h=0,2 м	0,7	2,8	3,0	3,1	3,2	3,3
Лампа h=0,4 м	0,7	2,6	2,8	2,9	3,0	3,1
Розсія-не світло	0,7	1,5	2,6	3,0	3,0	3,0

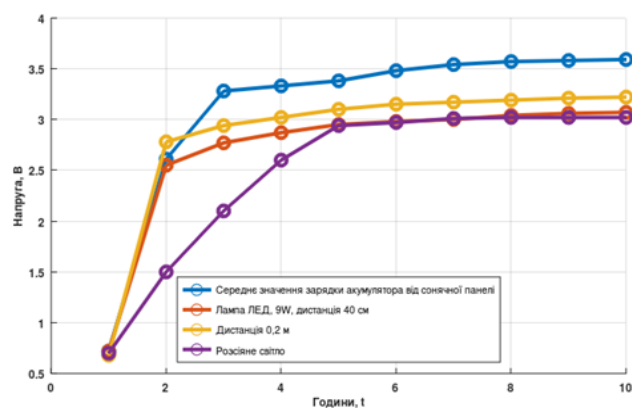


Рис. 9. Графіки зарядження акумулятора від сонячної панелі при різному рівні освітленості, В.

Для порівняння проводилось зарядження акумулятора або іоністора від стабільного джерела світла – LED електролампи 9 Вт з відстані 0,4 м та 0,2 м, а також при розсіяному кімнатному освітленні. Відповідні результати показані вище.

Результати зарядження іоністора (рис. 10) від генератора та від сонячної панелі наведені в табл. 3 і 4 та на графіках рис. 11 та 12.

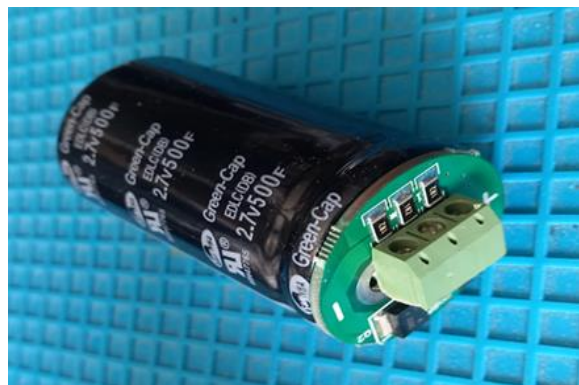


Рис. 10. Іоністор 500 Ф із модулем захисту і компенсації

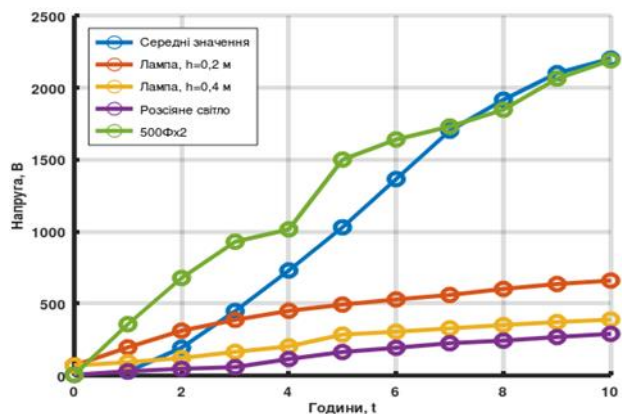


Рис. 12. Графіки зарядження іоністора від сонячної панелі при різному рівні освітленості, В

Таблиця 3. Зарядження іоністора ручним генератором

Оберти	mV	Оберти	mV
0	16	3500	1605
500	428	4000	1700
1000	662	4500	1792
1500	935	5000	1857
2000	1203	5500	1925
2500	1361	6000	2008
3000	1490		

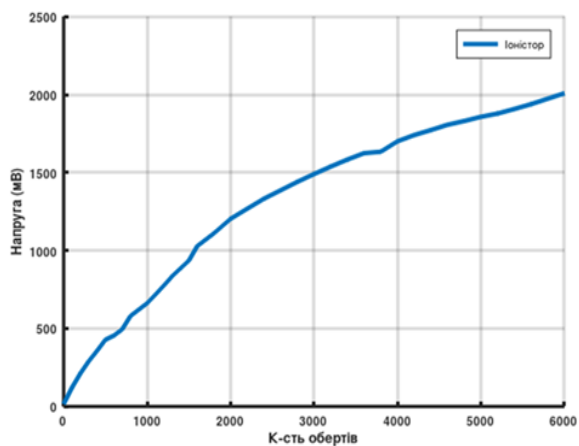


Рис. 11. Графік зарядження іоністора ручним генератором, мВ.

Таблиця 4. Зарядження іоністора від сонячної панелі, В

Години	0	2	4	6	8	10
Середня з 10-ти	0,03	0,45	1,0	1,7	2,1	2,24 +/- 0,14
Лампа, h=0,2 м	0,07	0,31	0,5	0,53	0,6	0,66
Лампа, h=0,4 м	0,07	0,12	0,2	0,31	0,4	0,39
Розсіяне світло	0,01	0,05	0,1	0,2	0,2	0,29
500 Фx2	0,01	0,68	1,0	1,6	1,9	2,1

Проведено порівняння середніх значень кінцевої напруги при заряджанні акумулятора (3,59+0,02 В) та іоністора (2,24+0,14 В) від сонячної панелі. Згідно розрахунку, t-критерій дорівнював 9,5, що з високою вірогідністю ( $P < 0,001$ ) свідчило про суттєвість різниці.

Для ефективного використання накопиченої енергії в системі, згідно блок-схеми, застосовано DC – DC конвертер (рис. 13).

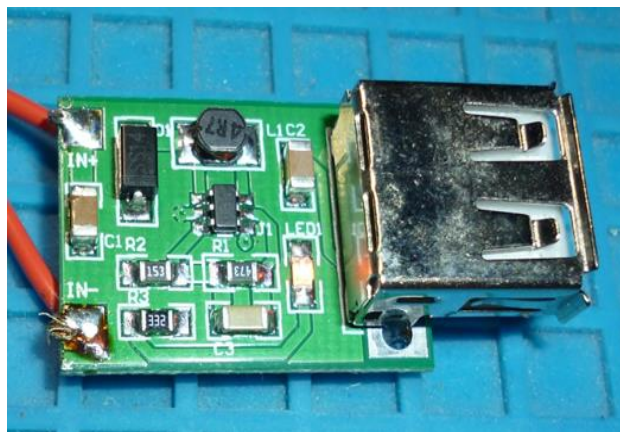


Рис. 13. Конвертер постійного струму

Даний конвертер здатний підтримувати на виході напругу 5 В при входній напрузі від 5 до 0,9 В. Завдяки цьому забезпечувалось стабільне і довготривале функціонування системи бездротової передачі енергії при поступовому зменшенні запасів електроенергії в акумуляторі або іоністорі.

## VI. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Забезпечення довготривалого функціонування автономних, імплантованих медичних приладів є актуальним. Дані, наведені в розглянутих літературних джерелах, надають інформацію про можливість використання енергії людського організму для енергопостачання медичної техніки. Найбільш перспективними вбачаються системи перетворення механічної енергії в електрику. При спробі практичної реалізації системи, які використовують природні рухи людини в 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, що не є комфортним для пацієнтів.[1] Перетворення потоку теплової енергії тіла людини теж має перспективу.[3] На відміну від фізичного навантаження, теплопродукція - більш стабільний процес і це гарантує надійне, безперервне енергоперетворення і енергопостачання. Але, згідно закону Карно, ефективність цих процесів має велику залежність від градієнту температури.[26]

Для незалежного, гарантованого і безперервного енергопостачання імплантованих пристроїв розроблена система містить два джерела електроживлення: ручний магнітно-електричний генератор і сонячну панель. Експерименти показали, що для зарядження акумулятора або іоністора потрібно зробити не менше 6000 обертів рукояткою генератора, на що витрачається не менше 3-х годин часу (табл. 1, 3, рис. 8, 11). Отримані результати заряджання акумулятора слід оцінювати з огляду на те, що сучасні Лі-Іон акумулятори випускаються із вбудованою системою захисту від перезарядки. Досягнутий рівень 3,44 В слід вважати результатом обмеження, встановленого системою захисту. Подібні обмеження існують і для іоністорів – напруга заряджання не повинна перевищувати 2,7 В. Тому іоністори використовуються, і в даній

розробці також, в комбінації із модулями захисту і компенсації (рис. 10). Рівень зарядки іоністора 2 В (табл. 3, рис. 14), не зважаючи на прикладені зусилля, був далеким від максимального можливого значення (2,7 В). Це, в свою чергу, свідчить, що накопичення енергії в іоністорі не було повним. Порівняльні графіки зарядження накопичувачів від ручного генератора та від сонячної панелі наведені на рис. 14 та 15.

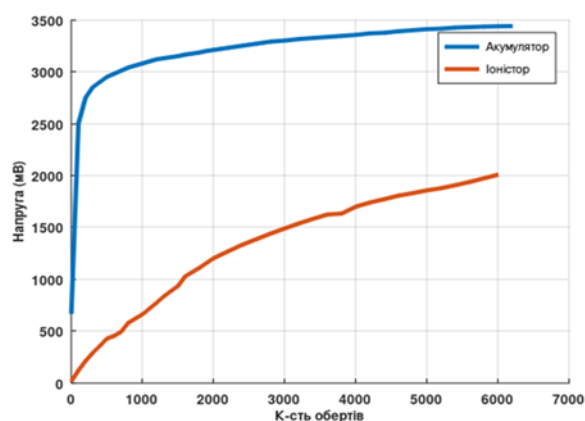


Рис. 14. Порівняння ефективності зарядження акумулятора та іоністора ручним генератором

Використання сонячної панелі для отримання електроенергії було ефективним при різних умовах освітлення (табл. 2, 4, рис. 9, 12). Середній (за 10 днів) рівень зарядки акумулятора на протязі 9 годин становив 3,6 В. При освітленні сонячної панелі електричною лампою з різної відстані, та навіть при похмурому світлі акумулятор заряджався до рівня вище 3 В. Подібні результати отримані і при проведенні експериментів з іоністором (рис. 15).

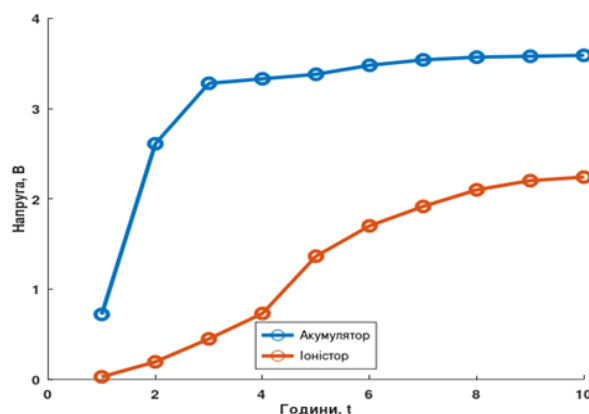


Рис. 15. Порівняння ефективності зарядження акумулятора та іоністора від сонячної панелі



Середній за 10 світлових днів рівень його зарядки становив 2,24 В. Зарядка двох іоністорів 500 Ф, з'єднаних паралельно дала подібний результат – 2,19 В. На жаль, при освітленні фотоелектричної панелі світлом електролампи та розсіяним світлом, результат заряджання іоністора був незначний (табл. 4).

В таких випадках є можливість зробити потрібний запас енергії завдяки з'єднанню паралельно чи послідовно кількох іоністорів. Масо-габаритні характеристики іоністорів не є перешкодою для цього.

З огляду на отримані результати, можна рекомендувати в системі автономного енергопостачання в якості джерела електроенергії використовувати сонячні панелі, експлуатація яких не потребує додаткових зусиль. Для накопичення і енергії доцільно використовувати літій-іонні акумулятори. Їх властивості забезпечують стабільне збереження накопиченої енергії для подальшої передачі її імплантованим пристроям. Ручний магнітно-електричний генератор та іоністор в складі запропонованої системи являють собою резерв, який гарантує постачання енергії при можливих відмовах інших компонентів.

На прикладі імплантованих кардіостимуляторів можна оцінити економічний і соціальний (медичний) ефект від створення системи бездротового живлення. Гарантований виробниками середній термін функціонування електрокардіостимуляторів становить 5 років. Якщо за рік імплантуються 5000 стимуляторів, то кожного року п'ята частина з них (1000) потребує заміни. Ціна одного нового стимулятора складає не менше 20000 гривень. Перебування в стаціонарі на протязі мінімум 5 діб: 500 грн. x 5 = 2500 грн. За роботу медиків всіх рівнів і спеціальностей, витрати на операцію – 10000 грн. Щорічна економія в цілому складе 32,5 млн. гривень.

Навіть якщо термін роботи кардіостимуляторів буде збільшений лише вдвічі передбачувана економія досягне 65 млн. гривень. До цього слід додати невиконання щорічно 1000 хірургічних втручань по заміні стимуляторів, і

виключення для цього контингенту пацієнтів можливих післяопераційних ускладнень.

## VI. ВИСНОВКИ

1. Для живлення імплантованих активних медичних виробів актуальним є використання автономних джерел енергії, що в багатьох випадках підвищує надійність функціонування імплантів та комфорт пацієнтів.

2. Робота автономних джерел може бути забезпечена завдяки трансформації кінетичної енергії тіла людини в електричну.

3. Отримання електроенергії за допомогою ручних магнітно-електричних генераторів потребує додаткових витрат м'язової енергії і тому такі пристрої доцільно комбінувати із додатковими технологіями перетворення і накопичення енергії.

4. Створена автономна система електроживлення, яка включає, на додаток до перетворювача механічної енергії людини, фотоелектричну панель, забезпечує збереження енергії на різних типах накопичувачів для подальшої бездротової передачі її імплантованому пристрою.

5. Експериментальна перевірка показала, що для отримання електроенергії оптимальним є використання фотоелектричної панелі, яка достатньо ефективно функціонує при різних умовах освітлення, а для накопичення енергії – літій-іонні акумулятори.

6. Наявність в складі запропонованої системи ручного магнітно-електричного генератора та іоністора підвищує надійність та гарантує постачання енергії при можливих відмовах інших компонентів.

**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 (A, D, E, F) Kozyar Vasyly

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. Фелді Д. А., Козяр В. В. Перспективи використання енергії тіла людини для енергозабезпечення медичних приладів. *Біомедична інженерія і технологія*. 2023;(10):62–72.
2. Wong J. Y., Bronzino J. D., Peterson D. R. *Biomaterials – Principles and Practices*. Taylor & Francis Group, Boca Raton. 2013; 2(1): 168.
3. 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*: 93-98
4. Yun J., Patel S. N., Reynolds M. S., Abowd G. D. Design and Performance of an Optimal Inertial Power Harvester for Human-Powered Devices. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2011 May;10(5):669–83.
5. Фелді Д.А., Козяр В.В. Використання енергії тіла людини для електроживлення медичних виробів. *Матеріали МНТК Сучасні технології біомедичної інженерії*. Одеса, 2022: 69–72.
6. Гончаров Є., Крюкова Н., Марков В., Поляков І. Тіло людини як джерело енергії. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2021; 2 (6): с. 60–5.
7. Ручний генератор динамо-машина заряд-ка для телефону 20 W [Електронний ресурс]. Ре-жим доступу: <https://i-mag.kiev.ua/ua/p1622164636-ruchnoj-generator-dinamo.html>. 2023
8. Martin J. P., Li Q. Generating electricity while walking with a medial–lateral oscillating load carriage device. *Royal Society Open Science*. 2019 Jul 10;6(7):182021.
9. Donelan J. M., Li Q., Naing V., Hoffer J. A., Weber D. J., Kuo A. D. Biomechanical Energy Harvesting: Generating Electricity During Walking with Minimal User Effort. *Science*. 2008 Feb 8;319(5864):807–10.
10. Zhang Q., Wang Y., Kim E. S. Power generation from human body motion through magnet and coil arrays with magnetic spring. *Journal of Applied Physics*. 2014 Feb 14;115(6):064908.
11. Khalid S., Raouf I., Khan A., Kim N., Kim H. S. A Review of Human-Powered Energy Harvesting for Smart Electronics: Recent Progress and Challenges. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2019 Jul 29;6(4):821–51.
12. Fouzia F. M. Shaikh, Kamat R. K. *Fundamentals, Mechanisms and Key Performance Factors in Super-Capacitor*. Elsevier eBooks. 2022 Jan 1;299–313.
13. Sanjeev Kumar R. A, Padashetty V. J. Design and Operation of Low Cost Portable Power Generation Using Hand Pedal for Multipurpose. *Journal of Emerging Trends in Electrical Engineering* [Internet]. 2023 Jul 3;5(2):33–8.
14. Singla A., Dhand S., Virk G. S. Mathematical modelling of a hand crank generator for powering lower-limb exoskeletons. *Perspectives in Science* [Internet]. 2016 Sep;8:561–3.
15. Chakma R., Chawaphan T., Mamun K. A. A., Chakma A., Harun S. Portable Smart Phone Charger Using Human Mechanical Energy by Gear Train with Hand Crank. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2017 May;12(03):20–5.
16. Choi S. Powering point-of-care diagnostic devices. *Biotechnology Advances*. 2016 May;34(3):321–30.
17. Deepak Thrithamarassery Gangadharan, Xu Z., Liu Y., Izquierdo R., Ma D. Recent advancements in plasmon-enhanced promising third-generation solar cells. *Nanophotonics*. 2016 Aug 19;6(1):153–75.
18. Hao D., Qi L., Tairab A. M., Ahmed A., Azam A., Luo D., et al. Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review. *Renewable Energy*. 2022 Apr;188:678–97.
19. Sheik Mohammed S., Devaraj D., Imthias Ahamed T. P. Modeling, Simulation and Analysis of Photovoltaic Modules under Partially Shaded Conditions. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016 May 19;9(16).
20. Fernandez-Fuentes M. H., Eras-Almeida A. A., Egidio-Aguilera M. A. Characterization of Technological Innovations in Photovoltaic Rural Electrification, Based on the Experiences of Bolivia, Peru, and Argentina: Third Generation Solar Home Systems. *Sustainability* [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2022 Feb 4];13(6):3032. Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3032>
21. Goodenough JB, Park KS. The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective. *Journal of the American Chemical Society*. 2013 Jan 18;135(4):1167–76.
22. Lukatskaya M.R, Dunn B, Gogotsi Y. Multidimensional materials and device architectures for future hybrid energy storage. *Nature Communications*. 2016 Sep 7;7(1).
23. Panda, M., Choudhary, A., Li, X., Lundgren, C. A., Huang, X., Lu, J., & Ji, X. Recent Progress in Rechargeable Aqueous Zinc-Ion Batteries: Insights from Crystallography. *Accounts of Chemical Research*. 2020; 53(5): 1031-1040
24. Mou H., Xiao W., Miao C., Li R., Yu L. Tin and Tin Compound Materials as Anodes in Lithium-Ion and Sodium-Ion Batteries: A Review. *Frontiers in Chemistry*. 2020 Mar 19;8.
25. Boaretto N., Garbayo I., Valiyaveetil-SobhanRaj S., Quintela A., Li C., Casas-Cabanas M, et al. Lithium solid-state batteries: State-of-the-art and challenges for materials, interfaces and processing. *Journal of Power Sources*. 2021 Aug;502:229919.
26. He H, Lu X, Hanc E, Chen C, Zhang H, Lu L. Advances in lead-free pyroelectric materials: a comprehensive review *Journal of Materials Chemistry C*. 2020;8(5):1494–516.

UDC 616-78

# CHOICE OF POWER SUPPLY SYSTEM FOR ACTIVE IMPLANTED DEVICES

*Diana Feldi*

[dinifeldi@gmail.com](mailto:dinifeldi@gmail.com)

*Vasyl Kozyar*

[kozyarvasilij@gmail.com](mailto:kozyarvasilij@gmail.com)

Faculty of Biomedical Engineering

National Technical University

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Kyiv, Ukraine

**Abstract**—Medical practice widely uses active implantable devices to support or replace certain functions of the body. However, the main problem remains the term of operation of such devices, which is determined by the energy capacity of the power source. When the energy source expires, surgery is required to replace the device or its battery. The need for frequent recharging makes the patient dependent on an external power source (charging device) and limits the patient's living space and free movement. To eliminate this problem, it is proposed to use the energy generated by the human body. The energy produced by the human body is divided into thermal, mechanical and electrical. The most promising is the transformation of kinetic energy. To verify the sources and guarantee the reliability of the energy supply of implanted devices, it is advisable to combine the use of the kinetic energy of the human body with additional energy conversion and storage systems. In view of this, a system of wireless power supply of active implants is proposed, which consists of a solar panel and a manual magneto-electric generator, as primary sources, and a lithium-ion battery and an ionistor, as energy accumulators.

**Keywords**— active implants, wireless power, hand generator, solar panel, storage devices.