



Микитюк П.Д.

Микитюк П.Д., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Микитюк О.Ю., канд. фіз.-мат. наук³



Микитюк О.Ю.

¹Інститут термоелектрики НАН та МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatysh@gmail.com

²Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна;

³Буковинський державний медичний університет,
Театральна площа, 2, Чернівці, 58002, Україна

ІНВЕСТИЦІЙНА ПРИВАБЛИВІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНУ ЕНЕРГІЮ ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА

У статті показано можливості отримання економічних переваг при використанні термоелектричного способу перетворення низькопотенційної енергії, котрий є надійним, автономним і передбачає використання джерел живлення з великим ресурсом роботи, що використовують енергію оточуючого середовища для забезпечення живленням малопотужних пристроїв, розміщених у віддалених і важкодоступних місцях. Бібл. 5, рис. 1, табл. 1.

Ключові слова: термоелектричне джерело живлення, тепла енергія, активний шар ґрунту, тепловий потік (ТП), економічна ефективність.

Вступ

Проведений авторами аналіз показав, що термоелектричний спосіб перетворення теплової енергії в електроенергію може мати економічні переваги перед традиційними електричними генераторами в наступних випадках:

1. Коли виникає потреба у високій надійності, автономності і великому ресурсі роботи джерела живлення;
2. Для генерації малих (менших за 20 Вт) [1] потужностей, при яких застосування теплового двигуна є неприйнятним з економічної точки зору;
3. При використанні низькопотенційної теплової енергії з максимальною температурою теплоносія нижчою за 100–150 °С. За наявності значного ресурсу теплової енергії, як це має місце, наприклад, в оточуючому середовищі (ґрунті, воді, Повітрі) вона не може бути використана традиційними способами через дуже низький коефіцієнт корисної дії (ККД) її перетворення в електроенергію;
4. При необхідності забезпечення живленням малопотужних (до кількох Ватт) пристроїв у віддалених, важкодоступних районах. Де використання традиційних джерел живлення із її регулярною заміною є дуже дорогим.

Незважаючи на певні обмеження в порівнянні із машинними методами перетворення тепла в електричну енергію, усі відомі застосування термоелектричних генераторів (ТЕГ) мають перевагу за надійністю через відсутність у їх конструкціях рухомих частин, володіють значно більшим ресурсом роботи, характеризуються низькою вартістю технічного обслуговування (за його потреби), технологічно-конструктивною пластичністю та властивому ТЕГ модульному принципу.

При оцінці економічної ефективності будь-якого способу генерування електричної енергії, зазвичай, в основу розрахунку, перш за все. Прийнято враховувати ККД перетворення. І на тій підставі, що ККД ТЕГ є меншим за ККД машинного методу отримання електричної енергії робиться хибний висновок про млу ефективність застосування ТЕГ.

Насправді низький ККД ТЕГ не має такого істотного негативного впливу на економічний аспект термоелектричного генерування електричної енергії, як видається на перший погляд.

Метою даної роботи є проведення оцінки економічної ефективності застосувань створених в Інституті термоелектрики НАН та МОН України (ІТЕ) термоелектричних джерел живлення, що використовують низькопотенційну теплову енергію активного шару ґрунту, під яким розуміють шар ґрунту, в якому відбувається перетворення сонячної енергії в інші види енергії. [2]. Така оцінка проведена на основі раніше проведених в ІТЕ теоретичних досліджень і практичних застосувань ґрунтового термоелектричного генератора (ГТЕГ).

Метод оцінки економічної ефективності ГТЕГ

Вартість електроенергії, отриманої від генератора будь-якого типу, залежить від багатьох факторів, а не лише від ККД генератора. В неї входить вартість палива, вартість капітальних витрат, заробітна плата, вартість технічного обслуговування, транспортні витрати і т.і. Вартість B 1 кВт-години виробленої електроенергії можна подати як

$$B = B_n I + B_k X (B_a + B_e), \quad (1)$$

де B_n – вартість паливних ресурсів,

I – ККД генеруючого пристрою,

B_k – капітальні витрати,

X – час роботи протягом року,

B_a – відсоток вартості амортизації капітальних вкладень,

B_e – експлуатаційні витрати, як частка капітальних вкладень за рік.

Із рівняння (1) видно, що ККД генерації електроенергії відіграє важливу роль при високій вартості палива (енергоресурсу). Але для дешевого палива, такого, як тепла енергія оточуючого середовища в системі «ґрунт-повітря», яка є практично необмеженою по кількості і практично нічого не коштує, визначальним є інші члени рівняння. Вони в значно меншій мірі залежать від ККД, але не зовсім ігнорують його вплив на вартість електроенергії B . *

Другий член B_k / X у рівнянні (6.1) залежить від корисного терміну служби ТЕДЖ, протягом якого його вартість має бути амортизована. За даними [1] фіксована вартість витрат при терміні служби ТЕГ 3 роки складає 45.2 % у рік. Для терміну служби рівному 20 років цей показник буде рівним 16.7 %, а для 30 років ~ 15.6 %. Член B_k / X також є залежним від надійності ТЕДЖ, від якої залежить його ресурс роботи і величина експлуатаційних витрат.

Так як ресурс робота ГТЕГ складає не менше за 30 років, його надійність є значно вищою за інші типи традиційних генеруючих пристроїв, а капітальні вкладення на створення ГТЕГ є

набагато меншими, то закономірно можна вважати, що фіксована вартість витрат для ГТЕГ буде нижчою за 15 %.

За даними [1] у 1980 р. вартість електроенергії від ТЕГ була досить високою і складала від 5 \$/Вт, для ТЕГ на твердому паливі до 5000 \$/Вт для генераторів космічного призначення, що використовують радіоізотопні джерела тепла. Такі, відносно великі, вартісні показники були зумовлені перш за все великими затратами ручної праці при виготовленні ТЕГ, які склали біля 90 % затрат. Однак за останні 25 років у розвиток термоелектрики вкладені великі інвестиції, налагоджений масовий випуск термоелектричних модулів різного призначення, створені ефективні сучасні технології отримання термоелектричних, значно ефективніших і дешевших, матеріалів, розроблені нові більш досконалі конструкції ТЕГ. Завдяки новим конструкціям ТЕГ і розробленим методам їх виготовлення, з'явилася можливість використання автоматизованих методів масового виробництва ТЕГ аналогічних за ціною іншим виробам масового виробництва. Вартість таких ТЕГ в середньому в 1.5 раза перевищує вартість сировинних матеріалів, що входять у виріб.

Динаміка ціноутворення вартості генерованої ТЕГ електроенергії за останні роки подана на рис. 1, з якого видно, що вартість електроенергії, отриманої від термоелектричного генераторного модуля зменшилася від 20 \$/Вт у 1990 р. до 0.5 \$/Вт у 2010 р., тобто зменшилася в 40 раз.

Для порівняння можна навести приклад із вартістю електроенергії, отриманої від фотоелектричного перетворювача. Вартість 1 Вт електроенергії, отриманої від перших зразків фотоелектричних перетворювачів, складала біля 20 тис. \$/Вт, а в даний час для кращих зразків фотоперетворювачів вона складає 1.5–2.0 \$/Вт.

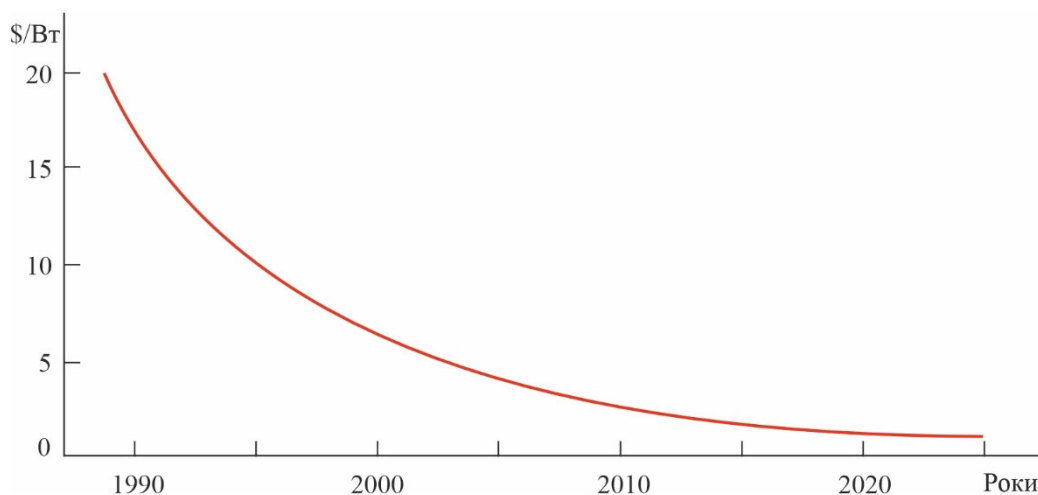


Рис. 1. Крива зменшення питомої вартості генераторних модулів

Але, крім фотоелектричної батареї, в систему генерації фотоелектричного струму входять і інші елементи (акумулятори, перетворювачі і ін.), внаслідок чого вартість електроенергії від сонячних батарей суттєво зростає.

Економічна ефективність практичних застосувань ГТЕГ

Зважаючи на вищевикладене перспективною є можливість різноманітних застосувань ГТЕГ, Конструкції ГТЕГ є простими. Конструктивні матеріали - загальнодоступні і дешеві. Виробництво ГТЕГ не потребує істотних капітальних витрат, тому що ГТЕГ можуть випускатися

на існуючих виробничих потужностях підприємств термоелектричного приладобудування. Крім того, для функціонування ГТЕГ використовується безоплатна, практично необмежена в ресурсі тепла енергія системи «грунт-повітря». Сукупність цих факторів, поєднаних в одному виробі (ГТЕГ) забезпечує йому інвестиційну привабливість. Вона підтверджується наступними оцінками.

ГТЕГ для систем охоронної сигналізації

Потужність ГТЕГ для живлення елементів охоронної сигналізації у середньому не перевищує 0.32 Вт. Витрати на виготовлення такого ГТЕГ складатимуться з:

- вартості конструктивних матеріалів, \$ – 180;
- вартості термоелектричного перетворювача, \$ – 200;
- вартості теплового і електричного блоків, \$ – 245;
- трудозатрат на виготовлення, \$ – 250;
- прибутку виробника, % від вартості – 15(131\$);
- експлуатаційних витрат, % від вартості – 10 (87.5 \$).

Потреба в ГТЕГ для елементів охоронних систем лише для України, за нашими оцінками, може скласти біля 15 тис. штук. А це означає, що прибуток для виробника-реалізатора такої кількості ГТЕГ може скласти 1.31 млн. \$.

Автономні джерела живлення для датчиків сейсмічного і метеорологічного призначення

Як мінімум на 3-х тисячах типових сейсмічних станціях світової сейсмічної мережі використовуються сейсmodатчики з рівнями енергоспоживання від кількох міліват до 0.3 Вт. Живлення таких датчиків здійснюється як від стаціонарних джерел живлення (за наявності ліній електропередач), так і від різноманітних автономних джерел живлення. Аналіз, проведений нами за вище застосованою методикою показав, що вартість ГТЕГ, придатного для автономного живлення сейсmodатчиків, не перевищує 380 \$, що при тривалості експлуатації в 30 років може в порівнянні з традиційними способами енергозабезпечення є в 1.8 разів вигіднішим і може дати економію орієнтовно 912 тис. \$.

Аналогічно для кількох десятків тисяч метеорологічних станцій, які комплектуються пристроями для вимірювання температури ґрунту, гігрометрами для ґрунту і ін., вартість ГТЕГ, що може успішно використовуватись для довготривалого автономного живлення таких пристроїв не перевищуватиме 150 \$/шт.

За прийнятою нами методикою оцінки вартість традиційного енергозабезпечення згаданих пристроїв буде в 1.65 раз вищою, що, наприклад, лише для 20 тис. застосувань може дати очікувану економію в 1.95 млн. доларів США.

ГТЕГ для електронних схем газової телеметрії

Лише в Україні на газопроводах використовуються 1437 газорозподільних станцій, на яких здійснюється облік газу. На об'єктах газотранспортних систем встановлено понад 2000 обчислювачів, коректорів і інших приладів, для живлення яких необхідно мати автономні малопотужні джерела живлення з великим ресурсом роботи.

При використанні традиційних джерел живлення (акумуляторів, літєвих батарей і ін.) основу затрат складають транспортні витрати, зарплата персоналу, вартість заміни

відпрацьованих елементів, затрати на їх утилізацію і ін. Наприклад, при використанні акумуляторної батареї (АБ), вартість якої складає як мінімум 60 \$, вона підлягає заміні щонайменше кожні 2.5–3 роки. За 30 років експлуатації таку заміну потрібно зробити 8–10 разів, що складе 480–600 \$. Не враховуючи транспортні витрати і заробітну плату персоналу.

Порівняльна характеристика транспортних і амортизаційних витрат для акумуляторної батареї в якості джерела живлення і для ГТЕГ показана в таблиці 1.

Таблиця 1

*Транспортні і амортизаційні витрати для обслуговування
заміни одного джерела живлення в пункті обліку газу*

№ п/п	Види витрат та їх вартість при експлуатації 30 років	Використання АБ	Використання ГТЕГ
1.	Вартість джерела живлення, \$	60	350
2.	Витрати на заміну джерела живлення	(1/3 роки) 600	–
3.	Витрати на обслуговування та профілактичні огляди (транспорт із розрахунку на 50 км пробігу для одного обслуговування та його амортизація)	(10 раз × 15 \$) 150	(3 раз × 15 \$) 45
4.	Зарплата обслуговуючого персоналу при заміні і профілактиці (з/п 3 \$/год)	(10 раз × 3 год) 90	(3 рази × 2 год) 18
5.	Утилізація відпрацьованих джерел живлення (транспорт, з/п персоналу)	(10 шт. × 15 \$) 150	–
	Разом	1050	413

Поверхневі оцінки дають різницю у витратах 637 \$ на користь використання ГТЕГ

З врахуванням того, що лише в Україні існує більше 2000 тис. автономних пунктів обліку газу, то при впровадженні на них лише по одному ГТЕГ економія коштів може скласти біля 1.27 млн. \$.

ГТЕГ для термо- і теплометрії ґрунтів

Для виробництва сільськогосподарської продукції надзвичайно важливим є відслідковування динаміки зміни температурного і теплового режиму ґрунтів. У даний час питаннями створення відповідного метрологічного забезпечення в Україні займаються 53 організації і установи. Поточна достовірна інформація про теплові процеси в ґрунтах сільськогосподарського призначення є актуальною для 56 тис. господарств різних форм власності, які вирощують сільськогосподарську продукцію.

При агрономічних дослідженнях теплового стану ґрунтів в основному використовують термометри Савінова, вартість яких складає від 100 до 280 \$/шт, а експлуатаційні витрати перевищують її в десятки, а іноді – в сотні раз. Більш досконалі є створені в УкрНДГМІ прилади “Агротестер” та вимірювач параметрів ґрунтів ВПГ-4ц і подібні до них. Вартість таких приладів за даними [3 ,4] складає біля 650 \$/шт.

Значно ефективнішими і дешевшими є створений в ІТЕ прилад “Термоелектричний агротестер”, в основі функціонування якого закладено використання ГТЕГ. Вартість “Термоелектричного агротестера” орієнтовно складає 230 \$, яка в порівнянні з відомою розробкою є меншою на 420 \$. З врахуванням потенційної кількості користувачів “Термоелектричного агротестера” лише в Україні можна очікувати прибутку від реалізації таких приладів біля 23.5 млн. \$.

Спеціальні застосування ГТЕГ

Та обставина, що ГТЕГ разом з об’єктом, що живиться від нього, розташовується у ґрунті створює особливу зацікавленість у застосуванні ГТЕГ для живлення електронних пристроїв спеціального призначення. Визначальними у цьому випадку будуть рівень споживання на рівні кількох міліват і відсутність демаскувальних факторів при експлуатації ГТЕГ. Вартість такого ГТЕГ не перевищуватиме 100 \$. Обсяги застосувань ГТЕГ і економічні показники їх ефективності можуть оцінюватись для кожного конкретного випадку застосування.

Актуальним є питання про космічне використання ГТЕГ. За даними [1] 1 Вт електроенергії, отриманої від ТЕГ з плутонієвим джерелом тепла для космосу оцінювався біля 5000 \$. Така вартість зумовлювалась, в основному, дорогим джерелом тепла. Однак, наприклад, поверхня Місяця має температуру, що змінюється протягом доби від +170 °С (вдень) до –130 °С (вночі). При такому градієнті температури на поверхні Місяця ГТЕГ може мати ККД більший в 50–60 раз у порівнянні з його використанням на поверхні Землі. Це може на два порядки зменшити вартість 1 Вт години. Витрати на доставку ГТЕГ на Місяць при цьому будуть аналогічні з витратами для ТЕДЖ з ізотопним джерелом тепла.

Побутове використання ГТЕГ

Є великі невикористані можливості масових використань побутових приладів на основі ГТЕГ, що можуть успішно конкурувати з відомими аналогами. Так, створений, термоелектричний відлякувач шкідників, вартість якого при масовому виробництві не перевищуватиме 10–12 \$/шт., має значно кращі технічні характеристики, в порівнянні з відомими аналогами. Потреба в таких приладах лише в Україні оцінюється нами в 200–250 тис. штук. При закладеному в ціну лише 10 % прибутку, інвестиційна привабливість для виробника термоелектричного відлякувача шкідників складе 200–250 тис. \$. Крім того, такий прилад може успішно реалізуватися в інші країни. *

Інша розробка з використанням ГТЕГ – “Сонячне термоелектричне джерело живлення” при вартості в 10–15 \$/шт. може масово використовуватись в інтер’єрах ландшафтного дизайну, так як має ряд переваг перед відомими світильниками з використанням сонячних елементів. За нашими оцінками дохід від реалізації розробки лише в Україні може складати не менше 500–550 тис. доларів США.

Ще один варіант є використання створеного ГТЕГ на основі «сонячного ставка». Запропонована конструкція в залежності від теплових характеристик «сонячного ставка» може

генерувати потужності, необхідні для забезпечення автономної роботи теплового насоса, що використовуватиме теплову енергію того ж «сонячного ставка». Дана розробка є новаторською, вона не має аналогів у світі. Наразі проводиться визначення її економічної ефективності.

Вищенаведені економічні оцінки використання ГТЕГ мають достатньо наближений характер і не враховують цілий ряд різних непередбачуваних факторів, що можуть виникати при їх експлуатації. Але в даний час є не так багато таких інвестиційно привабливих пропозицій, прогноз розвитку яких має позитивну динаміку, для впровадження в різні галузі науки і техніки та народного господарства ТЕДЖ з відновлювальними джерелами енергії для живлення автономних пристроїв, з малою потужністю споживання і ресурсом роботи, що перевищує 30 р.

Висновки

1. Навіть поверхневий економічний аналіз деяких розробок з використанням ГТЕГ, якими перелік їх можливих застосувань далеко не вичерпується, показує, що валовий дохід від їх реалізації може скласти 58.32 млн. \$. США.
2. Інвестиційна привабливість використання розробок, що функціонують на основі використання ГТЕГ, підтверджена промисловими випробуваннями.

Література

1. Benson D.K., & Jayadev T.S. (1980). Thermoelectric energy conversion. Proc. 3rd Int. Conf. Thermoel. Convers., Arlington, Tex.
2. Anatychuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat (part 1). *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 90–96.
3. Mykytiuk P.D. (2004). Devices for thermoelectric conversion of soil thermal energy (PhD Thesis). Chernivtsi.
4. Available at: <http://uhmi.org.ua/rozi/agro/index.php#Z1>
5. Report on the research work "Develop an automated system for monitoring humidity, soil temperature and other agrometeorological parameters." UKR Research Institute M1, Kyiv, 1997.

Надійшла до редакції: 11.09.2024.

P.D. Mykytiuk, Cand. Sc. (Phys.-Math.)^{1,2}

O.Yu. Mykytiuk, Cand. Sc. (Phys.-Math.)³

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

³Bukovinian State Medical University,
2 Theater Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

INVESTMENT ATTRACTIVENESS OF THERMOELECTRIC POWER SOURCES USING LOW-GRADE ENERGY OF THE ENVIRONMENT

The article shows the possibilities of obtaining economic advantages when using a thermoelectric method of converting low-grade energy, which is reliable, autonomous and provides for the use of power sources with a long service life, using the environmental energy to provide power to low-power devices located in remote and hard-to-reach places. Bibl. 5, Figs. 1, Table. 1.

Key words: thermoelectric power source, thermal energy, active soil layer, heat flux, economic efficiency.

References

1. Benson D.K., & Jayadev T.S. (1980). Thermoelectric energy conversion. Proc. 3rd Int. Conf. Thermoel. Convers., Arlington, Tex.
2. Anatyhuk L.I., Prybyla A.V., Korop M.M., Kiziuk Yu.I., Konstantynovych I.A. (2024). Thermoelectric power sources using low-grade heat (part 1). *Journal of Thermoelectricity*, (1-2), 90–96.
3. Mykytiuk P.D. (2004). Devices for thermoelectric conversion of soil thermal energy (PhD Thesis). Chernivtsi.
4. Available at: <http://uhmi.org.ua/rozt/agro/index.php#Z1>
5. Report on the research work "Develop an automated system for monitoring humidity, soil temperature and other agrometeorological parameters." UKR Research Institute M1, Kyiv, 1997.

Submitted: 11.09.2024.