*Микитюк П.Д.*

# ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОХОРОННОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ

*Микитюк П.Д.*
*(Інститут термоелектрики, вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна)*

• *Створення безпечних автономних термоелектричних джерел живлення малої потужності з більшим терміном служби робить можливим появу сучасних пристроїв різного призначення з мінімальним рівнем споживання електроенергії. Зокрема актуальними є дослідження в галузі створення таких джерел живлення для систем охоронної сигналізації. У пропонованій статті показано результати теоретичних і експериментальних досліджень поряд з досягненнями в галузі створення фізичних основ термоелектричних пристроїв для безпосереднього перетворення теплової енергії ґрунту в електричну енергію. Зазначені дослідження призвели до створення автономних відновлювальних джерел живлення для систем охоронної стабілізації з терміном служби до 25 – 30 років. Наводиться порівняльний аналіз основних характеристик ґрунтових термоелектричних джерел живлення для систем охоронної сигналізації. Визначено перспективні сфери застосування ґрунтових термоелектричних джерел живлення, що використовують теплові потоки в ґрунті.*

## Вступ

Підтримка працездатності різних автономних систем тривалого користування неможлива без наявності відповідних джерел електроживлення.

Сучасні електронні пристрої характеризуються досить низькими рівнями енергоспоживання (від десятків міліват до декількох ват). Такий прогрес в галузі електроніки підсилив потребу в ефективних джерелах живлення малої потужності, які перезаряджаються, що призвело до створення *Ni-Cd* акумуляторів, найпоширеніших тепер. Вони мають більше число циклів «заряд-розряд», низьку вартість й технологічність виготовлення. Однак їм властиві низька питома енергоємність і великий саморозряд, що не дає можливості довго зберігати такі джерела струму в неробочому стані, а також так званий «ефект пам'яті».

Спроби поліпшення *Ni-Cd* батарей призвели до створення нікель-металогидридних (*Ni*-MH) акумуляторів. Як і *Ni-Cd,* вони мають номінальну напругу 1.2 В, але вдвічі кращу енергоємність, допускають прискорений заряд і практично вільні від «ефекту пам'яті».

Сьогодні все частіше використовуються літієві батареї, що мають більш високу напругу (~ 3.6 В) і порівняно малий саморозряд.

Проте всім найпоширенішим у цей час джерелам живлення властиві однакові недоліки: необхідність обслуговування під час перезарядження, великий саморозряд, ресурс роботи у межах 2 – 3 років, необхідність утилізації. Тому актуальним є пошук інших джерел живлення, придатних для живлення автономних виробів з терміном служби більше як 10 років.

Одним з альтернативних варіантів вирішення завдання створення автономного екологічно чистого джерела живлення з більшим терміном служби є застосування термоелектричних джерел живлення, що використовують поновлювану теплову енергію ґрунту, який має необмежений запас низькопотенціальної енергії. Інформація про створення таких джерел живлення є метою пропонованої роботи.

## Фізичні основи термоелектричного перетворення тепла ґрунту

Принциповою перевагою термоелектричного способу перетворення енергії є можливість його функціонування за малих перепадів температур, що саме характерно для ґрунту. Крім того, ТЕГ має низку інших переваг: ресурс роботи 25÷30 років, безшумність, незалежність від орієнтації в просторі, незалежність його ККД і ресурсу роботи від потужності й ін. [1].

Детальний аналіз літератури з фізики ґрунту [2÷6] показав, що в ґрунтах постійно наявний градієнт температури, зосереджений у діяльному шарі. Для більшості кліматичних зон і типів ґрунту перепад температури $\Delta T$ у діяльному шарі мало відрізняється від $\Delta T$ у системі «ґрунт-повітря». Більш того, теплові процеси, що відбуваються в ґрунті, відрізняються більшою стабільністю. На них менше впливають динамічні зміни умов навколишнього середовища на поверхні ґрунту. Поглиблений аналіз і експериментальні дослідження теплових процесів, що відбуваються у ґрунті зі зміною умов теплообміну на його поверхні, дав можливість врахувати особливості формування теплових потоків у ґрунті у виборі й дослідженні фізичної моделі ґрунтового термоелектричного генератора (ГТЕГ) перетворюючого енергію дієвого шару ґрунту, рис. 1. Модель являє собою ГТЕГ циліндричної форми висотою $H$ і діаметром $D$, теплосприймаюча поверхня якого розташована на глибині $h$ від поверхні ґрунту. Під час дослідження моделі прийнято такі позначення: $k_0$ – теплопровідність ґрунту, $r$ і $Z$ – циліндричні координати, $T_1$ і $T_н$ – температури робочих поверхонь ГТЕГ.

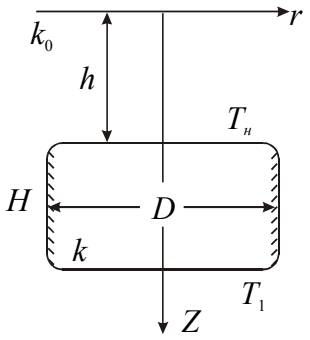


*Рис. 1. Схематичне зображення фізичної моделі ГТЕГ.*

Шляхом використання багатофакторного комп'ютерного проектування й методу джерел і стоків Ранкіна знайдено розподіл температури $\Delta T$ і теплового потоку $q$ у ґрунті з розміщенням у ньому ТЕГ. Аналітичний вираз для $\Delta T$ і $q$ мають вигляд

$$\Delta T = \frac{q_0}{k_0}\exp(-\gamma h)F\left(k, \frac{H}{D}\right) \tag{1}$$

$$q = q_0 \exp(-\gamma h)kF\left(k, \frac{H}{D}\right), \tag{2}$$

де $q_0$ – амплітуда питомого теплового потоку на поверхні ґрунту, $k$ – відношення теплового опору ТЕГ до теплового опору еквівалентного об'єму ґрунту, $H/D$ – фактор форми ТЕГ, $F$ – складна функція власних аргументів, $y = \sqrt{w/2x}$, $w$ – циклічна частота питомого теплового потоку на поверхні ґрунту, $x$ – температуропровідність ґрунту.

Отримано також вираз для визначення електричної потужності ТЕГ $W$ з урахуванням залежності від його геометричних розмірів і глибини розташування в ґрунті:

$$W = Vq_0^2 \frac{\exp(-2\gamma h)}{\sqrt{2}} Z^* kF^2(k, \frac{H}{D}). \tag{3}$$

Тут $V$ – об'єм ТЕГ, $Z^*$ – термоелектрична ефективність.

З (3) випливає, що вихідна потужність $W$ лінійно залежить від об'єму ТЕГ $V$, квадратично від амплітуди теплового потоку $q_0$ на поверхні ґрунту, по експоненті зменшується із глибиною розташування ТЕГ у ґрунті, немонотонно залежить від параметра $k$ і фактора форми ТЕГ $H/D$.

Умовою оптимального вибору теплового опору ТЕГ для конкретного типу ґрунту й

фактора форми *H/D* є співвідношення, що має вигляд

$$k_{опт} = \frac{4}{\pi}\frac{H}{D} \approx 1.3\frac{H}{D}. \quad (4)$$

Співвідношення (4) дає можливість здійснювати оптимізацію ТЕГ за його теплофізичними характеристиками і аналогічними характеристиками ґрунту для досягнення найкращих характеристик ґрунтового ТЕГ (ГТЕГ).

Результатом досліджень стало створення фізичних основ термоелектричних приладів прямого перетворення теплової енергії ґрунту в електричну [7, 8].

## Експериментальні дослідження зі створення ГТЕГ

Низкопотенціальний характер теплових процесів у ґрунті висуває особливі вимоги до основного конструктивного елемента ГТЕГ – його багатоелементної термоелектричної батареї. Багатоелементність термобатареї є одним з визначальних факторів у конструкції ГТЕГ працюючого за малих $\Delta T$ і $q$, що наявні у ґрунті.

Дослідження показали, що для виготовлення термобатареї оптимальним є застосування термоелектричних матеріалів на основі $Bi_2Ti_3$. З такого матеріалу можна виготовити вітки термоелементів перерізом порядку $0.15 \div 0.25$ мм. Згаданий матеріал у діапазоні температур, характерному для роботи ГТЕГ ($250 \div 330$ К), має кращу термоелектричну ефективність $Z^*$.

В Інституті термоелектрики створена технологія виготовлення багатоелементних термобатарей з мініатюрними вітками термоелементів, розрахованих на ресурс роботи не менший як $25 \div 30$ років. З використанням таких термобатарей створено уніфіковану конструкцію ГТЕГ, яка використовується як базова у дослідженні впливу різних факторів на її працездатність. Комплексні дослідження роботи ГТЕГ підтвердили добовий і сезонний характери змін його вихідних характеристик. Отримані результати добре узгодяться з літературними даними про характер теплових потоків у ґрунтах [5]. Характерний хід зміни вихідної потужності й електрорушійної сили ε ГТЕГ упродовж доби для кліматичних умов помірного клімату (м. Чернівці, Україна) показано на рис. 2 і рис. 3.

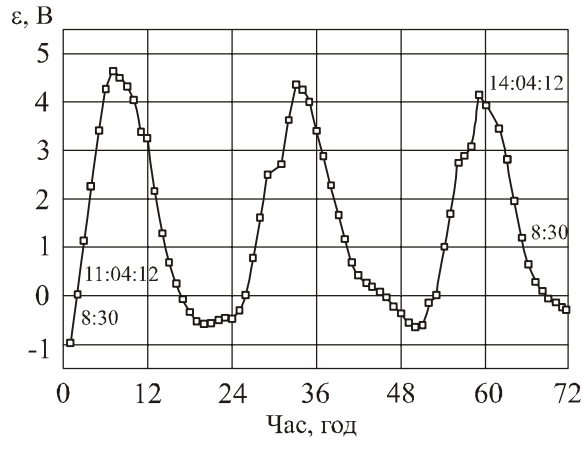


*Рис. 2. Характер добових змін термоЕРС ГТЕГ.*

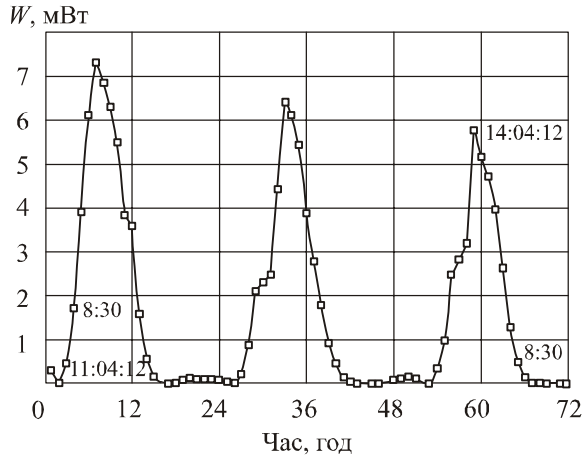


*Рис. 3. Динаміка добових змін вихідної потужності ГТЕГ.*

З рисунків 2 і 3 видно, що динаміка змін вихідних характеристик ГТЕГ характеризується різким максимумом в обідній час (12 – 15 годин дня). У нічний час вона зменшується. Причому, у зв'язку зі зміною напрямку теплового потоку на протилежний у нічний час може мати місце зміна полярності струму, який виробляє ГТЕГ.

Упродовж року, рис. 4, найменша кількість електроенергії виробляється ГТЕГ у березні й жовтні, а максимальна – у червні-серпні. Для інших кліматичних зон ці показники можуть мати інший залежний від конкретних кліматичних умов характер.

Дослідження показали, що ефективність роботи ГТЕГ суттєво залежить від глибини розташування в ґрунті його теплосприймаючої поверхні. Максимальні значення *W*, характерні для її розташування в поверхні ґрунту. За більш глибокого розташування ГТЕГ у ґрунті ефективність роботи по експоненті зменшується із глибиною, рис. 5.

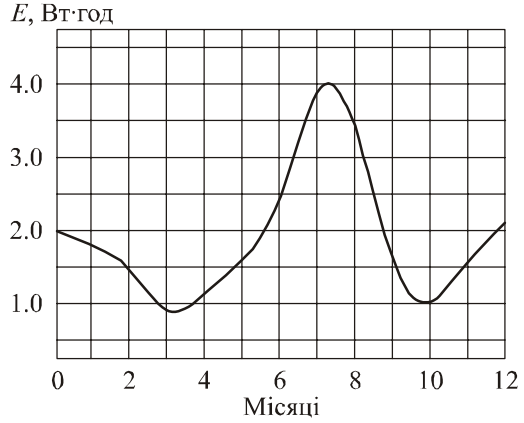


*Рис. 4. Електроенергія, яку виробляє ГТЕГ, упродовж року.*

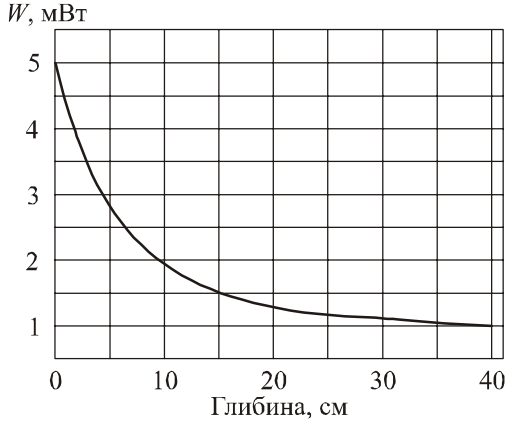


*Рис. 5. Залежність вихідної потужності ГТЕГ від глибини його розташування в ґрунті.*

У цілому результати досліджень підтвердили теоретичні передумови про можливість створення ГТЕГ і його придатність для використання в різних кліматичних зонах, а також дали можливість виробити практичні рекомендації з оптимального розташування ГТЕГ у ґрунті з урахуванням кліматичних умов їх застосування й створити параметричний ряд, що не має аналогів, ГТЕГ з вихідною напругою 3, 6, 12 В і ресурсом роботи 30 років,

## Раціональні області застосування ГТЕГ

Широкі можливості застосування ГТЕГ обумовлені насамперед тим, що сучасні електронні пристрої мають низький рівень енергоспоживання, сумісним з потужністю, яку виробляє ГТЕГ. Ще однією перевагою ГТЕГ є його максимальна наближеність до споживача, адже він може бути встановлений у ґрунт у будь-якому необхідному місці. Повна автономність, екологічна чистота, ресурс роботи 25 – 30 років суттєво розширюють сферу можливих застосувань ГТЕГ.

Така унікальна особливість ГТЕГ як відсутність демаскуючих факторів, робить можливим особливо ефективно використовувати такі джерела живлення для елементів систем охоронної сигналізації: датчиків руху, охоронних сигналізаторів, систем виявлення, датчиків охорони периметра й ін., основні параметри енергоспоживання яких наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, елементи охоронних систем споживають менше ніж 0.5 Вт електричної енергії. Необхідне для них електроживлення забезпечується застосуванням вищезгаданих хімічних джерел або застосуванням залежних від централізованих ліній енергопостачання спеціальних джерел живлення.

Охоронні пристрої в основному функціонують у режимі очікування, який для більшості хімічних джерел є неефективним і навіть згубним, тому що призводить до прискореного саморозряду й швидкого зменшення ресурсу роботи, тоді як для ГТЕГ робота в режимі

очікування є сприятливою. Крім того, для забезпечення необхідної напруги потрібно використовувати батареї хімічних джерел, що складаються зі значної їх кількості. Усі вони вимагають постійної підзарядки. Природньо, що про автономність і великий термін служби в цьому випадку не може бути й мови, так само як і з використанням спеціальних джерел живлення.

*Таблиця*

| п/п | Тип охоронної системи | Споживана напруга, В | Споживаний струм, мА | Споживана потужність, Вт | $S_{пр}$ ГТЕГ, м$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Датчик руху SPR-600 | 7.8 – 16 | 9 | 0.07 – 0.14 | 0.014 – 1.025 |
| 2. | Датчик руху (Crow) SPR-100 | 7.8 – 16 | 8 – 14 | 0.062 – 0.22 | 0.0124 – 0.044 |
| 3. | Сигналізатор охоронний «Стриж» | 10 – 15 | <`12 | 0.12 – 0.18 | 0.024 – 0.036 |
| 4. | Сигналізатори «Жук»-1.2 | 12 – 24 | <`27 | 0.32 – 0.64 | 0.064 – 0.128 |
| 5. | Сигналізатор охоронний акустичний «Соло» | 10÷15 | <`25 | 0.25 – 0.375 | 0.05 – 0.075 |
| 6. | Сигналізатор оптико-електронний «Рух» | 10÷15 | <`25 | 0.25 – 0.375 | 0.05 – 0.075 |
| 7. | Охоронний сигналізатор «Дует» | 10.2 – 15 | <`30 | 0.31 – 0.45 | 0.062 – 0.09 |
| 8. | Сигналізатор охорони периметра «Бар'єр-300т» | 12 | 40 | 0.48 | 0.096 |
| 9. | Система виявлення вібрації SL-3 | 12 | 35 | 0.42 | 0.084 |
| 10. | Сигналізатор ІК, пасивні ІД 40-70 | 8 – 28 | 16 | 0.128 – 0.45 | 0.026 – 0.09 |

У той же час нами було показано [8], що навіть для кліматичних умов помірного клімату шляхом використання ГТЕГ можна одержувати до 5 Вт електричної потужності з 1 м$^2$ ґрунту. У таблиці наведено розміри площ теплоприймальних майданчиків ГТЕГ ($S_{пр}$ ГТЕГ), які можуть забезпечити електричним живленням відповідні типи охоронних систем замість хімічних джерел живлення. Причому, застосуванням ГТЕГ у якості джерел живлення для охоронних систем можливості їх використання не обмежують.

У наш час широкого поширення набули мікросистеми, що здійснюють обробку сигналу з перетворенням фізичних величин [9]. За допомогою подібних систем створюються різні засоби виявлення й розпізнавання об'єктів. В основі засобів виявлення використовується сейсмічний принцип, суть якого – аналіз сейсмічних збурень ґрунту, викликаних рухом. Такі сейсмодатчики відрізняються мініатюрним виконанням, малими рівнями енергоспоживання, роботою в режимі очікування. Наприклад, сейсмодатчики серій СД і СДГ споживають усього 0.4 мА за напруги 5 В. Точковий вібродатчик серії ВД споживає всього 0.11 мА за напруги 5 В.

Реєстратори сейсмічних сигналів «Байкал – ACN» живляться від джерела постійного струму з номінальною напругою 12 В за сили струму 25 мА. Наведені типи сейсмодатчиків споживають електричну потужність навіть меншу, ніж охоронні системи, зазначені в таблиці. Тому застосування ГТЕГ для забезпечення живлення сейсмодатчиків також обґрунтовані.

Ефективним є застосування ГТЕГ для живлення сигнальних пристроїв і трасування доріг на віддалених і пустельних ділянках. Особливо при розташуванні ГТЕГ під асфальтовим покриттям, коефіцієнт поглинання сонячної енергії якого становить 89%.

За допомогою ГТЕГ можна здійснити постійний моніторинг за метеоумовами для метео- й агрономічних досліджень, який є досить витратним для віддалених і важкодоступних територій.

Очевидно, що можливості застосування ГТЕГ не вичерпуються зазначеними напрямками їх застосування, визначеними з позиції сьогоднішнього дня.

## Висновки

1. Підтверджено можливість і доцільність створення автономних джерел живлення малої потужності з ресурсом роботи 25 – 30 років, що використовують принцип термоелектричного перетворення теплової енергії діяльного шару ґрунту.
2. Визначено перспективні області застосування ГТЕГ. Підкреслена перспективність використання ГТЕГ у системах охоронної сигналізації.

## Література

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник / Л.И. Анатычук. – К.: Наук. думка, 1979. – 767 с.
2. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв / А.Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
3. Нерпин С.В. Физика почвы / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский. – М.: Наука, 1967. – С. 12 – 237.
4. Шульгин А.Н. Температурный режим почвы / А.Н. Шульгин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1957. – С. 19 – 33.
5. Димо В.Н. Тепловой режим почв / В.Н. Димо. – М.: Колос, 1972. – С. 16 – 61.
6. Нерпин С.В. Энерго- и массообмен в системе “растение – почва – воздух” / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – С. 23 – 86.
7. Микитюк П.Д. О термоэлектрическом преобразовании тепловых потоков в почвах / П.Д. Микитюк // Термоэлектричество. – 2003. – №1. – С. 88 – 93.
8. Анатычук Л.И. Термогенераторы, использующие тепловые процессы в почвах / Л.И. Анатычук, П.Д. Микитюк // Термоэлектричество. – 2003. – №3. – С. 91 – 100.
9. Малашевич Н.И. Микросхема для обработки низкочастотного сигнала с сейсмодатчика / Н.И. Малашевич, А.С. Росляков и др. // Известия вузов. Электроника. – 2010. – №61 (86). – С. 29 – 32.

Надійшла до редакції 15.11.2012.