



Дудаль В.О.

Дудаль В.О.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

ПРО ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ПІД АСФАЛЬТОВИМ ПОКРИТТЯМ

Наведено схему та принцип дії термоелектричного перетворювача теплової енергії ґрунтів. Розглянуто описи фізичних та математичних моделей термогенератора, що використовує якості концентратора теплової енергії сонячного випромінювання асфальтове покриття, і термогенератора у ґрунті. Створено комп'ютерні моделі для таких випадків. Проведено аналіз результатів моделювання та показано перспективність застосування термоелектричних генераторів під асфальтовим покриттям як малопотужних джерел електрики.

Ключові слова: термоелектричний генератор, асфальтове покриття, малопотужне джерело живлення.

This paper presents the schematic and operating principle of thermoelectric converter of thermal energy of soils. The physical and mathematical models of thermal generator using asphalt pavement as a concentrator of solar radiation thermal energy and those of soil thermal generator have been described. Computer models for such cases have been created. Analysis of simulation results has been made and a promising outlook for using thermoelectric generators under asphalt pavement as low-power supplies has been shown.

Key words: thermoelectric generator, asphalt pavement, low-power supply.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Досягнення суттєвих змін в енергозбереженні – один з ключових завдань економічної політики переважної більшості країн світу. За умов зростання цін на енергоресурси застосування сучасних енергоефективних технологій дає відчутні економічні вигоди і конкурентні переваги.

Рівень енергоспоживання багатьох сучасних електронних пристроїв (сенсорні датчики, світлодіодні лампи та ін.) становить від десятків міліват до кількох ват, що призводить до пошуку ефективних джерел живлення малої потужності.

Одним із варіантів розв'язання такого завдання є застосування термоелектричних джерел живлення, що використовують теплову енергію ґрунту [1, 2].

Фізичні основи створення таких ґрунтових термоелектричних генераторів (ГТЕГ) розроблено в Інституті термоелектрики [3]. З урахуванням результатів теоретичних досліджень розроблено і виготовлено зразки ГТЕГ [3]. Один із варіантів ГТЕГ показано на рис. 1.

Потужності, генеровані ґрунтовими термоелектричними генераторами, стають співзмірними із енергоспоживанням малопотужних електронних пристроїв.

Зважаючи на низку відомих переваг ГТЕГ їх застосування як джерел живлення з ресурсом роботи до 30 років стає все більш привабливим [3, 4].

У роботах [5, 6] наведено опис систем акумулювання та перетворення теплової енергії в електричну, які можуть бути встановлені на поверхні дорожнього покриття і використовуватись для живлення різноманітних сенсорних датчиків, підсвітки дорожніх знаків та інше.



Рис. 1. Зовнішній вигляд ГТЕГ Алтек-8027.

Мета пропонованої роботи – дослідження можливості покращення термоелектричних генераторів з концентратором теплової енергії сонячного випромінювання, в якості якого розглянуто асфальтове покриття.

Фізична модель ТЕГ у ґрунті

Фізичну модель та схему принципу дії термоелектричного генератора, що використовує теплову енергію ґрунту, показано на рис. 2.

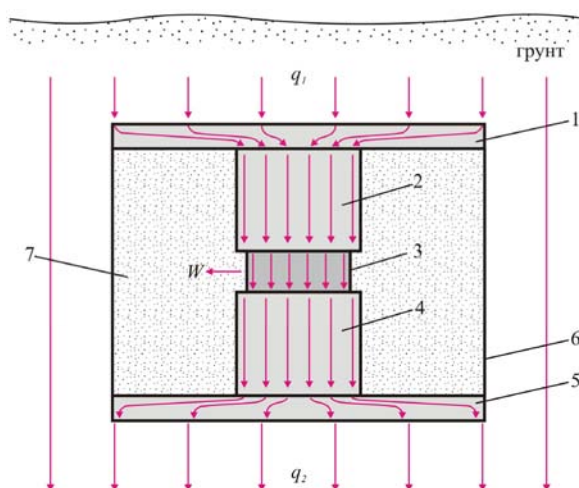


Рис. 2. Фізична модель термогенератора, розташованого в ґрунті.

Термоелектричний генератор, розташований у ґрунті, складається з теплоприймального колектора 1, теплопроводу 2, високоефективної багатоелементної батареї 3, тепловідводу 4, радіатора 5, корпусу 6 і теплоізоляції 7. Принцип дії термогенератора полягає ось у чому: тепловий

потік q , наявний у ґрунті, потрапляє на теплоприймальну площадку 1, теплопроводом 2 підводиться до гарячих спаїв термобатарей 3, теплопроводом 4 відводиться до радіатора 5 і розсіюється у нижні шари ґрунту. Для зменшення теплових втрат корпус 6 термогенератора заповнено теплоізоляційним матеріалом. Із проходженням тепла через термобатарейку на ній створюється градієнт температури, що зумовлює генерацію електричної потужності W . Слід зазначити, що впродовж доби напрямку руху теплового потоку може змінюватися на протилежний. Тому конструктивні елементи 1, 2 і 4, 5 генератора можуть функціонально замінювати один одного. В цій моделі розглядається квазістаціонарний випадок, за якого динамічні процеси у ґрунті вважаються повільними. В цих умовах нехтується теплоємністю джерела електрики.

Математичний опис фізичної моделі ТЕГ у ґрунті

Розглянемо ґрунтовий термогенератор циліндричної форми висотою H і діаметром D , теплоприймальна площадка якого розташована на глибині h під поверхнею ґрунту [3].

З метою спрощення математичного опису фізичної моделі термогенератора у ґрунті розглядатимемо нашу модель в циліндричній системі координат r, z , у якій вісь z спрямована від поверхні в глибину ґрунту.

Для знаходження розподілу температур $T(r, z)$ та теплового потоку q у ґрунті за наявності ГТЕГ необхідно спочатку розв'язати рівняння теплопровідності

$$\frac{1}{\chi} \frac{\partial T(r, z)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} \quad (1)$$

із граничними умовами

$$-k_0 \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = q_0, \quad z = 0, \quad (2)$$

$$T(h, r < D/2) = T_n, \quad (3)$$

$$T(H + h, r < D/2) = T_l, \quad (4)$$

$$-k_0 \int_s \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} dS = \frac{1}{R_{ГТЕГ}} (T_n - T_l), \quad z = h, \quad (5)$$

$$-k_0 \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} = 0, \quad h < z < h + H, \quad r = D/2, \quad (6)$$

де q_0 – величина питомого теплового потоку на поверхні; T_n, T_l – невідомі температури прийомної площадки і нижнього торця ГТЕГ, що підлягають визначенню; $R_{ГТЕГ}$ – тепловий опір ГТЕГ.

Наведені вище граничні умови мають такий фізичний зміст: умова (2) задає тепловий потік на поверхні ґрунту; (3), (4) виражають умови ізотермічності торців циліндричного ГТЕГ, (5) є умовою теплового балансу приймальної площадки ГТЕГ, а (6) – умова адіабатичної ізоляції його бічної поверхні. Розподіл температур $T(r, z)$ у ґрунті в цьому випадку є розв'язком зовнішньої крайової задачі для рівняння (1).

Вихідну електричну потужність ГТЕГ в загальному вигляді можна записати так:

$$W = f \left[T(r, z), k_0(r, z), \sum_{i=1}^N B_i, Z^*, L(r, z) \right], \quad (7)$$

де $T(r, z)$ – розподіл температури в ґрунті з розташованим у ньому ГТЕГ; $k_0(r, z)$ – коефіцієнт теплопровідності ґрунту; $\sum_{i=1}^N B_i$ – алгебраїчна сума N компонентів теплового балансу в ґрунті; Z^* – термоелектрична ефективність термобатареї в ГТЕГ; $L(r, z)$ – просторова координата розташування ГТЕГ у ґрунті, що характеризує його геометричні розміри.

Комп'ютерне моделювання ТЕГ у ґрунті

Для дослідження роботи термоелектричного генератора у ґрунті в стаціонарному режимі (температура на поверхні ґрунту становить 300 К, а на глибині 55 см – 285 К) було створено тривимірну комп'ютерну модель такого генератора. Для побудови комп'ютерної моделі використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [7], який дає можливість здійснювати моделювання теплофізичних процесів, що відбуватимуться у ґрунті та ТЕГ.

Розрахунок розподілів температур та густин теплових потоків у термоелектричному генераторі та ґрунті здійснювався методом скінченних елементів (рис. 3), суть якого полягає в тому, що досліджуваний об'єкт розбивається на велику кількість скінченних елементів і в кожному з них шукається значення функції, яке задовольняє заданим диференціальним рівнянням другого порядку з відповідними граничними умовами. Точність розв'язання поставленої задачі залежить від рівня розбиття і забезпечується використанням великої кількості скінченних елементів [7].

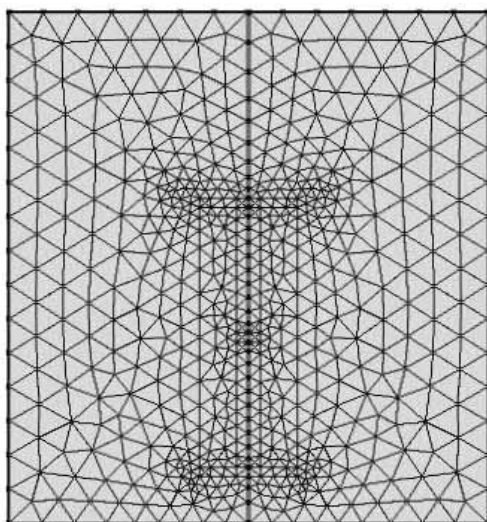


Рис. 3. Сітка методу скінченних елементів.

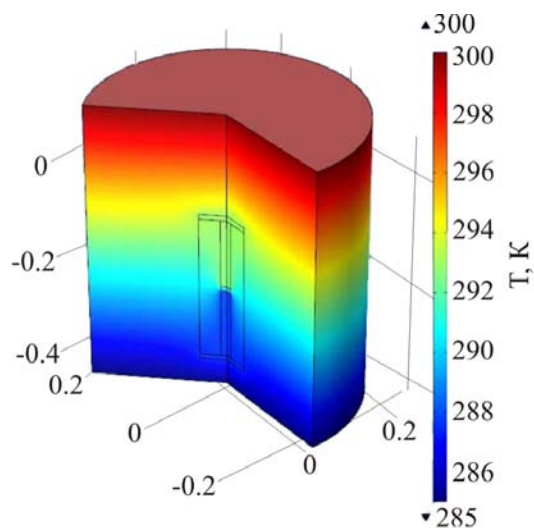


Рис. 4. Розподіл температури в ТЕГ та ґрунті

За допомогою об'єктно-орієнтованого комп'ютерного моделювання отримано розподіли температури (рис. 4) в термоелектричному генераторі у ґрунті в стаціонарному режимі.

Фізична модель ТЕГ під асфальтовим покриттям

Одним із найпростіших варіантів підвищення ефективності роботи ГТЕГ видається його

розміщення під асфальтом, який має значно кращий коефіцієнт поглинання сонячної енергії.

Фізичну модель термоелектричного генератора під асфальтовим покриттям показано на рис. 5.

Згідно з фізичною моделлю ділянка дорожнього покриття являє собою структуру із п'ятьох шарів (асфальтове покриття 1, бетонне покриття 2, шар щебеню 3, шар піску 8, ґрунт 9), що характеризуються теплофізичними характеристиками (теплопровідністю κ , густиною ρ) та товщинами шарів наведеними в таблиці 1.

Ґрунтовий термоелектричний генератор являє собою циліндричний брусок, що складається з теплосприймального колектора 4, теплоізоляції 5, термоелектричної батареї 6 та теплорозсіюючого радіатора 7. Розміри генератора: $\text{Ø}10 \times 30$ (см).

Колектор і радіатор ГТЕГ виготовлені з алюмінію та складаються з теплосприймальної (теплорозсіюючої, відповідно) пластин розмірами $\text{Ø}10 \times 1$ (см) і теплопроводу розміром $\text{Ø}2.256 \times 13.48$ (см). Як теплоізоляція використовується мінеральна вата з коефіцієнтом теплопровідності $\kappa_{\text{ізол}} = 0.032 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

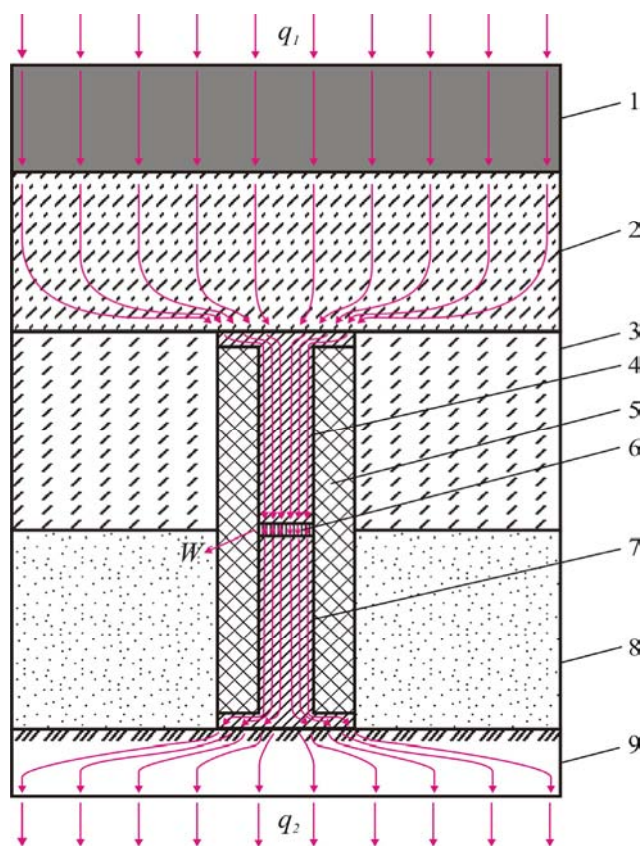


Рис. 5. Фізична модель ГТЕГ під асфальтом:

- 1 – асфальтове покриття, 2 – бетонне покриття, 3 – шар щебеню,
4 – теплосприймаючий колектор, 5 – теплоізоляція, 6 – термоелектрична батарея,
7 – теплорозсіюючий радіатор, 8 – шар піску, 9 – ґрунт.

Як відомо, основний вплив на значення ЕРС термоелектричної батареї здійснює перепад температур ΔT між її гранями. Тому для досягнення поставленої в цій роботі мети як батарею був розглянутий монолітний однорідний зразок з наівпровідникового матеріалу Bi_2Te_3 з теплопровідністю $\kappa_6 = 1.8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Термоелектричний перетворювач являє собою циліндричний брусок з геометричними розмірами $\text{Ø}2.256 \times 1.04$ (см).

Таблиця 1

Теплофізичні властивості елементів фізичної моделі

	Теплопровідність κ (Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹)	Густина, ρ (кг·м ⁻³)	Товщина шару, м
Асфальтове покриття	1.05	2100	0.08
Бетонне покриття	1.51	2400	0.12
Щебінь	0.064	2000	0.15
Пісок	0.35	1600	0.15
Ґрунт	0.4	1800	0.05

У цій фізичній моделі асфальтове та бетонне покриття, щебінь, пісок і ґрунт вважатимемо однорідними середовищами та знехтуємо тим, що їхня теплопровідність змінюється залежно від зовнішніх умов, а саме від вологості, температури, будови матеріалу та ін. Вважається, що теплові процеси є повільними, тому розглядається квазістаціонарний режим, за якого нехтується теплоємністю ТЕГ.

Математичний опис фізичної моделі ТЕГ під асфальтовим покриттям

Кількість тепла, яке проходить крізь асфальтове покриття (Q_1), є різницею кількості тепла, що надходить на поверхню асфальту (Q_0), і теплом, яке відбивається від неї. Коефіцієнт відбивання асфальтового покриття становить 7 %, тому вираз для визначення Q_1 матиме такий вигляд:

$$Q_1 = 0.93 \cdot Q_0. \quad (8)$$

Теплові потоки, що проходять крізь асфальт (Q_2), бетон (Q_3) і алюмінієвий теплопровід (Q_4) задаються виразами

$$Q_2 = \kappa_{asf} \cdot \frac{S_{asf}}{L_{asf}} \cdot (T_2 - T_1), \quad Q_3 = \kappa_{bet} \cdot \frac{S_{bet}}{L_{bet}} \cdot (T_3 - T_2), \quad Q_4 = \kappa_{Al} \cdot \frac{S_{Al}}{L_{Al}} \cdot (T_4 - T_3), \quad (9)$$

де S_{asf} , S_{bet} , S_{Al} , L_{asf} , L_{bet} , L_{Al} , κ_{asf} , κ_{bet} , κ_{Al} – площі теплосприймальних площадок, товщина шару і теплопровідність асфальту, бетону та алюмінієвого теплопроводу відповідно; T_1 , T_2 , T_3 , T_4 – температури теплосприймальної площадки асфальту, контакту «асфальт-бетон», контакту «бетон-теплосприймальна площадка алюмінієвого теплопроводу», контакту «теплосприймальна площадка алюмінієвого теплопроводу-термоелектричний перетворювач» – відповідно.

Теплові потоки на гарячій $Q_{теб}$ і холодній $Q_{стеб}$ сторонах термоелектричного перетворювача для випадку однорідного ізотропного матеріалу –

$$Q_{теб} = \alpha_{теб} \cdot T_4 \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \sigma_{теб} \cdot \frac{L_{теб}}{S_{теб}} - \kappa_{теб} \cdot \frac{S_{теб}}{L_{теб}} \cdot (T_4 - T_5), \quad (10)$$

$$Q_{стб} = \alpha_{теб} \cdot T_5 \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \sigma_{теб} \cdot \frac{L_{теб}}{S_{теб}} - \kappa_{теб} \cdot \frac{S_{теб}}{L_{теб}} \cdot (T_4 - T_5), \quad (11)$$

де $\alpha_{теб}$, $\sigma_{теб}$, $\kappa_{теб}$ – коефіцієнти термоЕРС, електропровідності і теплопровідності термоелектричного перетворювача відповідно; I – струм, що генерується перетворювачем; $S_{теб}$, $L_{теб}$ – площа та висота перетворювача відповідно; T_4 , T_5 – температури «гарячої» і «холодної» сторін термоелектричного перетворювача відповідно.

За відомих температур гарячої і холодної сторін термоелектричного перетворювача можна отримати величини теплових потоків на цих сторонах. А через відомі потоки можна обрахувати потужність (W) перетворювача за таким співвідношенням:

$$W = Q_{гтеб} - Q_{стб}. \quad (12)$$

Комп'ютерне моделювання ТЕГ під асфальтовим покриттям

Для дослідження роботи термоелектричного генератора під асфальтовим покриттям в стаціонарному режимі (температура на поверхні ґрунту становила 300 К, а на глибині 55 см – 285 К) створено тривимірну комп'ютерну модель за допомогою пакета прикладних програм Comsol Multiphysics.

Комп'ютерне моделювання дало можливість одержати розподіли температури (рис. 6) в термоелектричному генераторі під асфальтовим покриттям у стаціонарному режимі.

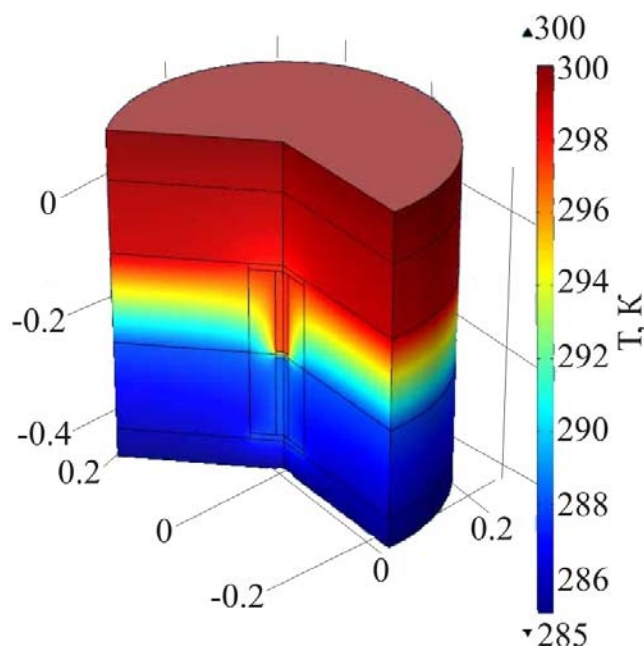


Рис. 6. Розподіл температури в ТЕГ під асфальтовим покриттям.

Результати моделювання та їх обговорення

На рис. 7, рис. 8 наведено одержані за допомогою комп'ютерного моделювання лінії ізотерм для термоелектричного генератора у ґрунті та під асфальтовим покриттям.

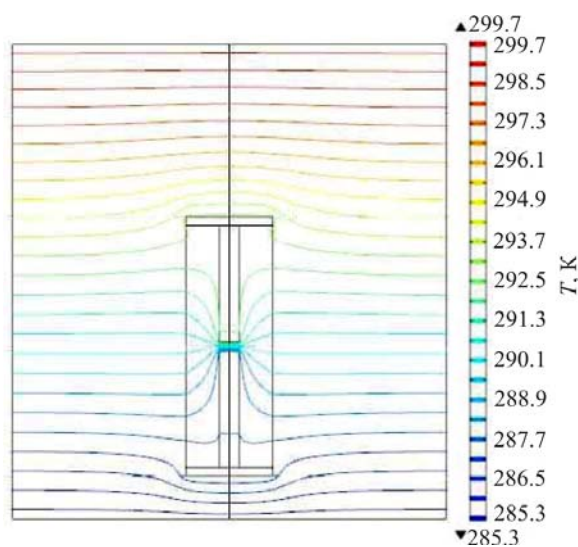


Рис. 7. Лінії ізотерм для термоелектричного генератора у ґрунті.

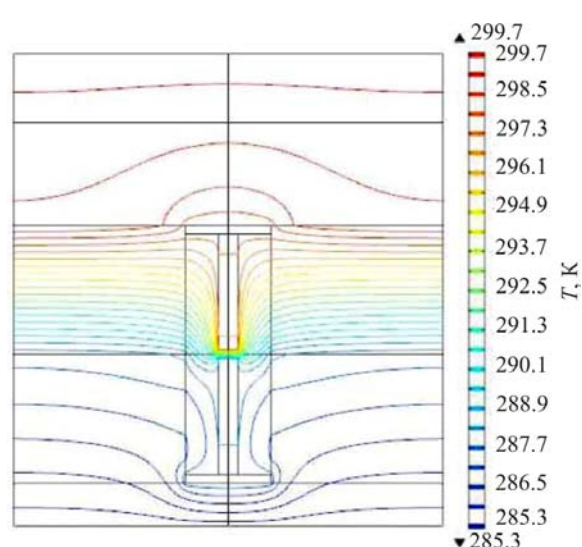


Рис. 8. Лінії ізотерм для термоелектричного генератора під асфальтовим покриттям.

З аналізу рис. 7-8 видно, що наявність асфальтового покриття призводить до зростання концентрації ізотермічних ліній, які проходять крізь термоелектричний перетворювач. Таким чином досягається більше значення перепаду температури, що дає можливість одержати вищі значення термоЕРС генератора. Так, величина перепаду температури на перетворювачі термогенератора під асфальтовим покриттям склала $\Delta T = 7.73$ К (за загального перепаду в 15 К), а у термоелектричного генератора у ґрунті за ідентичних умов – $\Delta T = 4.43$ К. Як відомо, величина генерованої електричної потужності термоелектричного перетворювача прямо пропорційна величині його термоЕРС, що задається співвідношенням

$$E = \alpha \cdot \Delta T, \quad (13)$$

α – коефіцієнт термоЕРС, ΔT – перепад температури між верхньою та нижньою гранями термоперетворювача.

Таким чином, величина електричної потужності термоелектричного генератора під асфальтовим покриттям становить 1.55 мВт, що майже вдвічі більше електричної потужності генератора у ґрунті (≈ 0.8 мВт) в аналогічних умовах.

Отже, використання на поверхні теплосприймальної площадки ГТЕГ теплоконцентруючих матеріалів, таких як асфальт, робить можливим значно збільшити його потужність, що є важливим для живлення малопотужної електронної апаратури. Встановлення таких генераторів відкриває перспективи для їх використання в дорожньому асфальтовому покритті з метою живлення різноманітних сенсорних датчиків, світлодіодних ламп дорожнього освітлення, підсвітки дорожніх знаків та ін.

Висновки

1. Розроблені фізична модель та комп'ютерне моделювання у стаціонарному режимі термоелектричного генератора, що використовує перепади температур у ґрунті, для випадку розташування генератора під асфальтовим покриттям.
2. На прикладі конкретного варіанта генератора Алтек-8027 підтверджено, що наявність асфальтового покриття покращує енергетичні параметри генератора, напругу та потужність

орієнтовно в 1.9 раза.

Література

1. Анатичук Л.І. Термогенератори, що використовують теплові потоки в ґрунтах / Анатичук Л.І., Микитюк П.Д. // Термоелектрика. – 2003. – №3. – С. 86-95.
2. Микитюк П.Д. Термоелектричне джерело живлення, що використовує тепло ґрунту / Микитюк П.Д., Петренко Н.С. // Термоелектрика. – 2003. – №2. – С. 73-80.
3. Микитюк П.Д. Прилади термоелектричного перетворення теплової енергії ґрунту: Дисертація кандидата фізико-математичних наук: 01.04.01. Ч. 2004 р.
4. Анатичук Л.І. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник / Л.И. Анатичук. – К.: Наук. думка, 1979. – 767 с.
5. Guangxi Wu, Xiong (Bill) Yu Thermal energy harvesting system to harvest thermal energy across pavement structure // International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 5, № 5, 2012. – P. 311-316.
6. Kanghwi Lee, Seunghoon Kim, Jaejun Lee, Cheolmin Baek Fundamental study of apply energy harvesting technology in asphalt pavement.
7. Comsol Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції 09.12.2014