

ТЕОРІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОНИКНИХ ГЕНЕРАТОРНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Подана теорія розрахунку та результати комп'ютерного проектування проникних термоелементів у режимі генерації електричної енергії. Показано можливості істотного підвищення ККД таких термоелементів для випадку, коли матеріал гілок n -типу провідності – тверді розчини $\text{Bi}_2(\text{TeSe})_3$, а для гілки p -типу провідності – $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$.

Calculation theory and computer design results for permeable thermoelements in electric energy generation mode are presented. Possibilities for essential increasing the efficiency of such thermoelements for the case when solid solutions $\text{Bi}_2(\text{TeSe})_3$ serve as material for n -type legs, and solid solutions $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ serve as material for p -type legs are indicated.

Вступ

В останні десятиріччя можливості підвищення ефективності термоелектричного перетворення енергії за рахунок поліпшення добротності матеріалів стали мало ефективними [1]. Тому виникає необхідність шукати інші напрямки підвищення ефективності перетворення енергії.

Виокремимо два шляхи. По-перше, перехід від термоелектричного середовища з різко вираженою неоднорідністю (класична термopара, в якій процеси термоелектричного перетворення енергії відбуваються тільки в контактних областях) до середовищ з просторовою неоднорідністю, яка викликає появу та практичне використання об'ємних термоелектричних ефектів [2]. Другий напрямок полягає у використанні більш загальних фізичних моделей – перетворювачів енергії, в яких теплові стоки та витоки не тільки не локалізовані в місцях неоднорідностей, а також є просторовими функціями координат [3,4]. Варіантами реалізації таких моделей є проникні термоелементи, які є термоелектричними матеріалами з каналами (порами), по яких переноситься теплоносій (рідина або газ). Було встановлено, що використання таких просторових розподілів джерел тепла і стоків дозволяє підвищити ефективність термоелектричних перетворювачів енергії.

У даній роботі наведені результати досліджень впливу колективної дії двох напрямків підвищення ефективності термоелектричних перетворювачів енергії: за рахунок використання функціонально-градієнтних термоелектричних

матеріалів та за рахунок використання фізичних моделей термоелементів із просторово розгалуженими джерелами і стоками тепла.

Фізична модель та її математичний опис

Фізична модель проникного термоелемента з функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ), який працює в режимі генерації електричної енергії, наведена на рис. 1. Вона містить гілки n - і p -типів провідності, властивості матеріалу яких змінюються з координатою x внаслідок їх залежності від температури $T(x)$ і від неоднорідності розподілу концентрації носіїв струму в матеріалі $\xi(x)$. Температура теплоносія, що підводиться до термоелемента, дорівнює T_m , температура холодних спаїв термоелемента T_c . У моделі враховується також наявність контактних опорів r_0 у місцях контакту комутаційних пластин із гілками термоелемента. Теплоносій прокачується від гарячих спаїв до холодних. Тепло від теплоносія

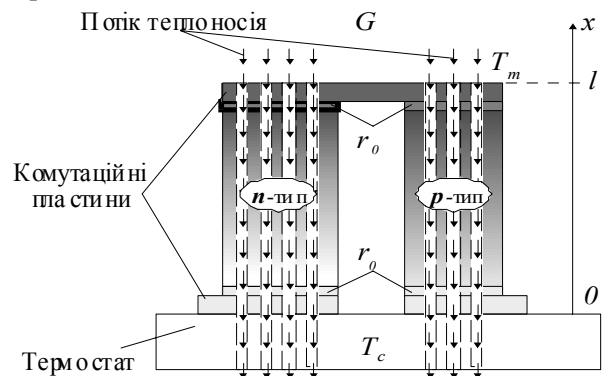


Рис. 1. Модель проникного генераторного термоелемента

передається матеріалу термоелемента каналів гілок.

Стаціонарний одновимірний розподіл температур у матеріалі гілок $T(x)$ і теплоносії $t(x)$ можна знайти з розв'язку системи диференціальних рівнянь [5]

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left(\kappa(T, \xi(x)) \frac{dT}{dx} \right) + i^2 \rho(T, \xi(x)) - \\ - T \cdot i \frac{d\alpha(T, \xi(x))}{dx} + \frac{\alpha_e}{(S - S_K)l} (t - T) = 0, \quad (1) \\ \frac{dt}{dx} = \frac{\alpha_e}{Gc_p} (t - T), \end{cases}$$

де $\alpha_{n,p} = \alpha_{n,p}(T(x), \xi_{n,p}(x))$, $\kappa_{n,p} = \kappa_{n,p}(T(x), \xi_{n,p}(x))$, $\rho_{n,p} = \rho_{n,p}(T(x), \xi_{n,p}(x))$ – коефіцієнти термоЕРС, теплопровідності і питомий електричний опір матеріалу гілки n - і p -типів залежать від розподілу концентрації носіїв струму $\xi_{n,p}(x)$ і температури $T(x)$, $x = x/l$ – безрозмірна координата, $\alpha_e = \alpha_T \Pi_K^1 N_K l$ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, α_T – коефіцієнт тепловіддачі, Π_K^1 – периметр каналу, N_K – кількість каналів, l – висота гілок термоелемента, S_K – площа перетину всіх каналів, S – перетин вітки разом з каналами, t – температура теплоносія в точці x , T – температура гілки в точці x , $i = I/(S - S_K)$ – густина струму, G – витрата теплоносія, c_p – теплоємність теплоносія.

Нами проводився пошук таких узгоджених оптимальних розподілів концентрації носіїв струму в матеріалі гілок $\xi_{n,p}(x)$, витрати теплоносія G і густини струму i , за яких досягається максимальний ККД для заданих температур холодних спаїв T_c і теплоносія T_m за умови теплової ізоляції гарячих спаїв. Тоді граничні умови для системи диференціальних рівнянь (1) мають вигляд

$$\begin{aligned} T_{n,p}(0) &= T_c, \quad t_{n,p}(1) = T_m, \\ q_n(1) + q_p(1) &= 0, \quad T_n(1) = T_p(1). \end{aligned} \quad (2)$$

ККД визначається співвідношенням

$$\eta = W / Q_p, \quad (3)$$

де $W = \sum_{n,p} \{ Gc_p (T_m - t(0)) + (q(0) + ir_0) i (S - S_K) \}$ –

електрична потужність, що генерується термоелементом, $Q_p = \sum_{n,p} Gc_p (T_m - T_c)$ – наявна тепло-

ва енергія теплоносія, $q(x)$ – питомий тепловий потік.

Результати розрахунків

Для розв'язку такої задачі використано методи математичної теорії оптимального керування, в основі яких лежить принцип максимуму Понтрягіна, що дало можливість отримати необхідні умови оптимальності.

Застосування чисельних методів із реалізацією їх в комп'ютерних програмах дозволяє знайти оптимальні функції неоднорідності матеріалу гілок, густин струмів, витрати теплоносія, що надають ККД термоелемента максимального значення [5].

Проведено комп'ютерне проектування проникного термоелемента з висотою гілок 1см, площею поперечного перерізу $S - S_K = 1 \text{ см}^2$, інтервал температур 300–600 К при температурі холодних спаїв $T_c = 300 \text{ К}$, матеріали гілок – тверді розчини $\text{Bi}_2(\text{TeSe})_3$ n -типу провідності і $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ для гілки p -типу провідності. Залежності α , σ і κ цих матеріалів від концентрації носіїв струму й від температури були отримані з літературних джерел [6]. Дані оброблені у вигляді функціональних залежностей, які використані як обмеження на властивості матеріалів, що накладаються при оптимальному керуванні.

Встановлено залежність ККД проникного термоелемента від коефіцієнта теплообміну між теплоносієм і матеріалом гілок. З ростом коефіцієнта теплообміну збільшення ККД досягає насичення (рис. 2). При цьому температура теплоносія на виході з термоелемента близька до температури навколишнього середовища, що свідчить на користь повного використання теплової енергії теплоносія.

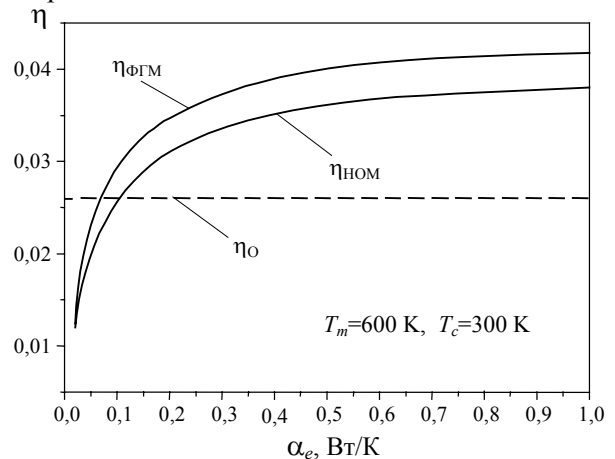


Рис. 2. Залежність оптимального ККД від ефективного коефіцієнта теплообміну α_e . $\eta_{\text{ФГМ}}$ – оптимально неоднорідний матеріал гілок, $\eta_{\text{НОМ}}$ – оптимально однорідний матеріал, η_0 – непроникний термоелемент

Розроблені методи дозволяють як нульове наближення одержати значення ККД для проникного термоелемента з однорідного матеріалу при врахуванні температурної залежності властивостей матеріалу і вибору такої величини концентрації носіїв струму для електронів і дірок, при яких досягається найкраще значення ККД у заданому інтервалі температур. Для цього ж випадку однорідної речовини визначаються й оптимальні значення густини струму i , а також витрати G , що забезпечують максимальні значення ККД.

Результати порівнювалися з отриманими раніше результатами ККД проникного термоелемента з однорідних матеріалів (рис. 2). З рис. 2 видно, що залежності ККД при використанні однорідних матеріалів подібні до залежностей для функціонально-градієнтних матеріалів. Однак, як і слід було очікувати, значення ККД при використанні функціонально-градієнтного матеріалу більше, ніж при використанні однорідного матеріалу. На рис. 2 також наведені результати розрахунку граничної величини ККД для непроникного однорідного матеріалу η_0 . Отже, зростання ККД при використанні проникних однорідних матеріалів порівняно з непроникними досягає 1,4, а порівняно з проникними з функціонально-градієнтних матеріалів – у 1,6 рази.

Висновки

Показано, що ККД проникних генераторних термоелементів перевищує ККД класичних термоелементів із монолітних матеріалів, при цьому максимальне значення ККД має місце при оптимальних швидкостях теплоносія і таких значеннях інтенсивності теплообміну, при яких ККД досягає насичення. Для проникних термоелементів із однорідних матеріалів на основі Bi-Te максимальний ККД перевищує ККД класичних термоелементів у 1,3–1,4 рази.

Визначені оптимальні функції неоднорідності матеріалів та відповідні залежності коефіцієнтів термоЕРС, електропровідності і теплопровідності для матеріалу гілок проникних генераторних термоелементів на основі Bi-Te, при яких досягається максимальне значення ККД. Показано, що застосування таких ФГМ забезпечує додаткове зростання ККД проникних термоелементів на 10–20% порівняно з ККД проникних термоелементів з однорідних матеріалів. Результати розрахунків свідчать про перспективність практичного використання проникних генераторних термоелементів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Anatychuk L.I.* Thermoelectric materials with programmable inhomogeneity // In Modern science of materials the 21st century. – Kyiv, 1998. – P. 411-432.
2. *Anatychuk L.I., Vikhor L.N., Cherkez R.G.* Computer simulation of functionally graded materials for thermoelectricity // Journal of Thermoelectricity. – 1997. – No. 3. – P.43-61.
3. *Echigo R.* An extended analysis on thermodynamic cycle of advanced heating/cooling method by porous thermoelectric conversion device// Presented at 12th ICT. – Yokohama, Japan, 1993.
4. *Anatychuk L.I., Vykhov L.N.* Physics and methods of FGTM design // Proc. of the XXII Intern. Conf. on thermoelectrics. – La Grande Motte, France, 2003.
5. *Anatychuk L.I., Cherkez R.G.* On the Properties of Permeable Thermoelements // Proc. of XXII International conference on thermoelectrics. – Montpellier, France, 2003. – P.480-483.
6. *Булат В.П.* Вихревые термоэлектрические токи в неоднородных средах и неоднородные термоэлементы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Черновцы, 1990.