

Лобунець Ю.М.



Лобунець Ю.М.

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

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛООБМІННОГО ТИПУ

Здійснено аналіз характеристик термоелектричного генератора, інтегрованого в компактний пластинчастий теплообмінник. Визначено залежності техніко - економічних характеристик генератора від режимних і геометричних параметрів. Наведено рекомендації з проектування подібних пристроїв.

Ключові слова: термоелектричний генератор, низькопотенціальне джерело.

Performance analysis of a thermoelectric generator integrated into a compact plate heat exchanger is performed. The dependences of the generator technical and economic characteristics on the regime and geometrical parameters are determined. Design recommendations for such devices are given.

Key words: thermoelectric generator, low-grade heat source.

Вступ

Одним з перспективних напрямків застосування термоелектричних генераторів (ТЕГ) є їх використання для перетворення низькопотенціальної теплової енергії в електричну. У більшості випадків перенесення теплоти низькопотенціальних джерел здійснюється за допомогою рідких теплоносіїв, що зумовлює і відповідний вибір конструкції ТЕГ. Найпоширенішою тепловою схемою для таких ТЕГ є схема, в якій термобатарей оснащуються теплообмінниками з проточним або протитечійним рухом теплоносіїв, що здійснюють підведення і відведення теплоти. Основною вимогою до ТЕГ розглянутого типу є забезпечення мінімальних масо-габаритних характеристик пристрою за максимально можливою ефективністю. Досить перспективною для вирішення цих завдань видається схема ТЕГ, у якій термоелектричні батареї інтегровані в конструкцію компактного пластинчастого теплообмінника, [1]. У цій конструкції роль пластин теплообмінника виконують термобатарей, між якими за допомогою ущільнюючих прокладок утворено канали для проходження теплоносіїв. Така конструкція за рахунок забезпечення високої інтенсивності теплообміну в щільних каналах між термобатарейами і відмови від громіздких і металомістких теплообмінників дає можливість практично на порядок знизити масу і габарити ТЕГ порівнянно з традиційними пристроями.

У пропонованій роботі аналізуються особливості розглянутої конструкції, наводиться оцінка можливих техніко - економічних характеристик подібних ТЕГ.

Постановка задачі

Завдання полягає у створенні математичної моделі пристрою, що коректно описує взаємозв'язок

режимних і геометричних параметрів ТЕГ, а також в аналізі з її допомогою характеристик розглянутої системи. Розрахункову схему задачі показано на рис.1.



Рис. 1. Розрахункова схема ТЕГ.

Гріючий (t_h) і охолоджуючий (t_x) теплоносії, проходячи через щілинні канали між термобатарями, обтікають поверхню останніх, забезпечуючи підтримання перепаду температур (ΔT) на термоелементах. Очевидно, що за рахунок незворотних втрат внаслідок теплообміну, а також за рахунок зміни температур теплоносіїв уздовж термобатарей робочий перепад температур на термоелементах буде завжди менший від наявного перепаду:

$$\Delta T < d_{t_0} = t_{h_0} - t_{x_0}. \quad (1)$$

Тут t_{h_0} та t_{x_0} – початкові температури теплоносіїв; індекси h і x стосуються гарячого та холодного теплоносіїв, відповідно.

Крім того, частина енергії, що генерується ТЕГ, витрачається на привід циркуляційних насосів для прокачування теплоносіїв. Необхідно мінімізувати ці втрати і визначити умови, за яких корисна потужність ТЕГ досягає максимальних значень за наявних обмежень.

Як відомо з теорії теплообміну, за протічійного руху теплоносіїв з однаковою масовою теплоємністю різниця температур між теплоносіями залишається постійною уздовж поверхні теплообміну

$$dt = t_h - t_x = const. \quad (2)$$

Оскільки для режиму ТЕГ впливом тепла Пельтьє на розподіл температур в теплоносіях можна знехтувати, в першому наближенні температура між теплоносіями можна також вважати постійним і визначити як [2]

$$dt = \frac{dt_0}{1 + \frac{KF}{W}}, \quad (3)$$

де $W = Gc_p$ – теплоємність масової витрати (водяний еквівалент) теплоносія, Вт /К, F – площа поверхні теплообміну, см²;

$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_x} + \frac{1}{\alpha_h} + \frac{h}{\lambda}}$ – коефіцієнт теплопередачі, Вт/см²К, α_x і α_h – ефективні коефіцієнти

тепловіддачі з холодного і гарячого боку, які враховують щільність упаковки термоелементів у модулі і наявність керамічних теплопереходів :

$$\alpha_x = \frac{S_m}{S_t} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{x_0}} + \frac{\delta}{\lambda_k}}; \quad \alpha_h = \frac{S_m}{S_t} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{h_0}} + \frac{\delta}{\lambda_k}};$$

α_{x_0} і α_{h_0} – коефіцієнти тепловіддачі на поверхні термобатареї з холодного та гарячого боку;

S_m – площа модуля;

S_t – площа перерізу термоелементів у модулі;

h – висота термоелементів, см;

λ – коефіцієнт теплопровідності термоелектричного матеріалу, Вт/смК;

δ – товщина керамічного теплопереходу, см;

λ_k – коефіцієнт теплопровідності кераміки, Вт/смК.

Вираз (3) дає можливість визначити температурні умови для задання граничних умов у розрахунку ТЕГ. Залежність температурного напору dt від витрати теплоносія (W) і умов теплообміну (KF) ілюструє рис.2. Як випливає з рисунка, температурний напір прагне до свого граничного значення, $dt \rightarrow dt_o$, із зростанням витрат теплоносія це обумовлено зменшенням зміни температури теплоносія вздовж каналу. Інтенсифікація теплообміну (зростання KF), з одного боку, призводить до зниження втрат температурного напору при теплообміні, а з іншого – до зростання теплових потоків і відповідно до більш різкої зміни температур теплоносія уздовж термобатарей. Останній фактор має істотний вплив на зменшення температурного напору.

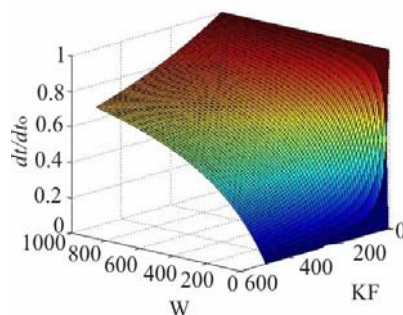


Рис. 2. Вплив умов теплообміну на температурний напір dt .

У той же час зі збільшенням витрат теплоносія зростають гідравлічні втрати в каналах, внаслідок чого знижується корисна потужність генератора. Тобто можна допустити, що є оптимальні співвідношення режимних (витрата теплоносія, режим навантаження ТЕГ) і геометричних параметрів (розміри каналів, кількість і розміри модулів у термобатареях), які забезпечують найкращі техніко-економічні показники ТЕГ. Це припущення добре ілюструє рис.3, на якому показано залежність корисної потужності ТЕГ як функція витрат теплоносія і площі термобатареї (площа батареї виражена через кількість модулів n , розташованих вздовж потоку теплоносія).

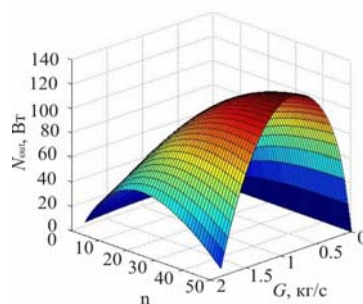


Рис. 3. Залежність корисної потужності ТЕГ від витрати теплоносія (G) і площі термобатареї (n).

Математична модель ТЕГ

Для отримання розрахункових даних використовувалася математична модель ТЕГ, що включає
- рішення задачі теплоелектропереносу в термоелементах за граничних умов III роду у вигляді [3-5]

$$\theta(J, H) = C_1 + C_2 Y - \frac{J^2}{2I_0} Y^2, \quad (4)$$

де

$$C_1 = \frac{(b_2 Bi_x \theta_x - b_1)}{(J - Bi_x + b_2(J + Bi_x))},$$

$$C_2 = C_1(J + Bi_x) - Bi_x \theta_x - \frac{J^2(J - Bi_x)}{2I_0}$$

$$b_1 = \frac{J^2}{I_0} + Bi_x \theta_x,$$

$$b_2 = J - Bi_x - 1;$$

тут $\Theta = \frac{T}{t_0}$ – безрозмірна температура термоелементів,

$\theta_{x,e} = \frac{t}{t_0}$ – безрозмірна температура теплоносія,

$Y = \frac{y}{h}$ – безрозмірна координата,

$J = \frac{jeh}{\lambda}$ – безрозмірна щільність струму,

$Bi = \frac{ah}{\lambda}$ – критерій Біо,

$I_0 = zt_0$ – критерій Іоффе,

$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}$ – термоелектрична добротність матеріалу,

h – висота термоелемента,

$t_0 = 300 K$ – визначальна температура.

– критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів тепловіддачі [2]

$$Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.43} \quad (5)$$

і коефіцієнтів тертя при протіканні рідини в пласкому каналі :
для ламінарного режиму течії ($Re > 2300$)

$$\xi = \frac{96}{Re}; \quad (6)$$

для турбулентного режиму течії ($Re > 2300$)

$$\xi = \frac{\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0.333}}{1.82 \log(Re - 1.64)}; \quad (7)$$

Тут $Nu = \alpha d / \lambda$ – критерій Нуссельта,
 $Re = Vd / \nu$ – критерій Рейнольдса,
 Pr – критерій Прандля,
 d – еквівалентний діаметр каналу.

Оскільки властивості теплоносіїв істотно залежать від температури, у розрахунку коефіцієнтів перенесення здійснювалася інтерполяція табличних даних за допомогою кубічних сплайнів. Система рівнянь (2–7) дає можливість розрахувати розподіл температур в термоелементах і теплоносіях і, відповідно, визначити характеристики ТЕГ як функцію основних режимних та геометричних параметрів при заданих властивостях термоелектричного матеріалу і теплоносіїв. У загальному вигляді потужність ТЕГ дорівнює:

$$N = \frac{E^2}{R} \frac{m}{(m+1)^2}. \quad (8)$$

Тут $E = ne\Delta T$ – ЕРС ТЕГ,
 n – кількість послідовно з'єднаних пар,
 R – внутрішній опір ТЕГ,
 m – коефіцієнт навантаження.

Корисна потужність ТЕГ дорівнює:

$$N_{out} = N - N_{pump}, \quad (9)$$

де $N_{pump} = \frac{G_x dP_x}{0.9 \rho_x} + \frac{G_h dP_h}{0.9 \rho_h}$ – витрати енергії на прокачування;

$$dP = \zeta \frac{L \rho V^2}{d} \frac{1}{2} \text{ – втрати тиску в каналах,}$$

L – довжина каналу,

$\rho_{x,h}$ – щільність теплоносіїв,

$$V = \frac{G}{f} \text{ – швидкість теплоносіїв,}$$

f – площа перерізу каналів.

ККД перетворення ТЕГ і загальний ККД генератора дорівнюють відповідно

$$\eta = \frac{N}{Q}, \quad (10)$$

$$\eta_{out} = \frac{N_{out}}{Q}, \quad (11)$$

де $Q = KSdt$ – тепловий потік через батареї генератора; S – ефективна площа термобатарей ТЕГ.

Результати аналізу

Основними параметрами задачі, що впливають на характеристики ТЕГ, є розміри і кількість термоелектричних модулів, їх властивості, витрата і температури теплоносіїв, розміри каналів між термобатареями. Можливості варіювання більшості з цих параметрів обмежені. До незалежних

змінних розглянутої задачі, що допускають зміну в досить широких межах, можна віднести витрати теплоносіїв G , розміри каналів h_k і, меншою мірою, висоту термоелементів h .

З точки зору забезпечення ефективності ТЕГ інтерес в першу чергу представляє вплив цих змінних на розподіл температур в системі. Очевидно, що метою оптимізації параметрів ТЕГ в першому наближенні є забезпечення максимально можливого робочого перепаду температур на термоелементах. Гранична зміна температур в системі обмежена розташованим перепадом $dt_0 = t_{h0} - t_{x0}$. Тому для надання спільності результатам в аналізі оцінюються зміни визначальних температур щодо максимально можливого перепаду dt_0 . Вплив режимних параметрів на температурний режим ТЕГ ілюструє рис. 4. Інтервали зміни режимних параметрів відповідають області визначення розглянутої задачі. У даному конкретному випадку розглядався ТЕГ, що включає термобатареї розміром 150x800 мм. Батареї складаються з трьох поздовжніх рядів по 16 модулів, всього 48 стандартних модулів розміром 40x40 мм.

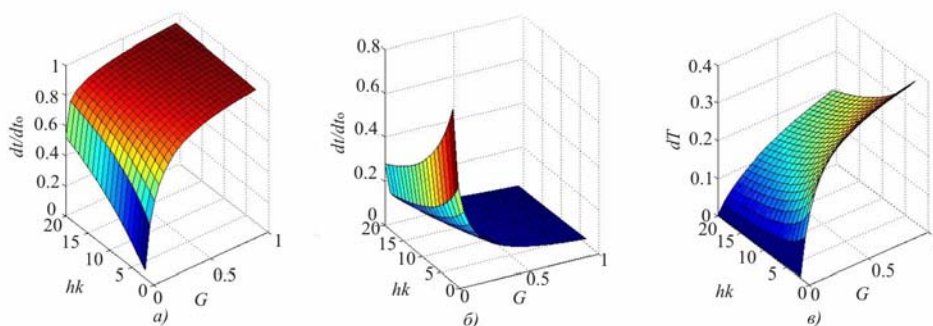


Рис. 4. Вплив режимних параметрів на температурний режим ТЕГ.

- а – температурний напір між теплоносіями,
б – перепад температур вздовж каналу,
в – перепад температур на термоелементах.*

Для заданого інтервалу температур теплоносіїв (вода), що становить $t_{x0} = 5^\circ \text{C}$; $t_{h0} = 95^\circ \text{C}$, допустимий інтервал витрат теплоносія становить $G = 0...1$ кг / сек. Висота каналу варіюється в межах $h_k = 1...20$ мм. За зазначених умов відносний температурний напір між теплоносіями змінюється в межах

$$dt = (0.22...0.97)dt_0;$$

втрати температурного напору уздовж каналу становлять

$$t_{in} - t_{out} = (0.03...0.78)dt_0;$$

перепад температур на термоелементах варіюється в межах

$$\Delta T = (0.002...0.79)dt_0.$$

Корисний перепад температур ΔT монотонно зростає з ростом витрат G і зменшенням висоти каналу h_k , бо при цьому зростає швидкість потоку і знижується перепад температур уздовж каналу; одночасно інтенсифікується теплообмін і зменшуються втрати температурного напору між теплоносіями і спаями термоелементів. Однак зі зростанням швидкості потоку зростають і витрати енергії на прокачування теплоносіїв, що зумовлює наявність оптимальних значень параметрів G і h_k , що забезпечують досягнення максимуму потужності і ККД ТЕГ. Вплив режимних параметрів на потужність і ККД ТЕГ ілюструють рис. 5 і рис. 6.

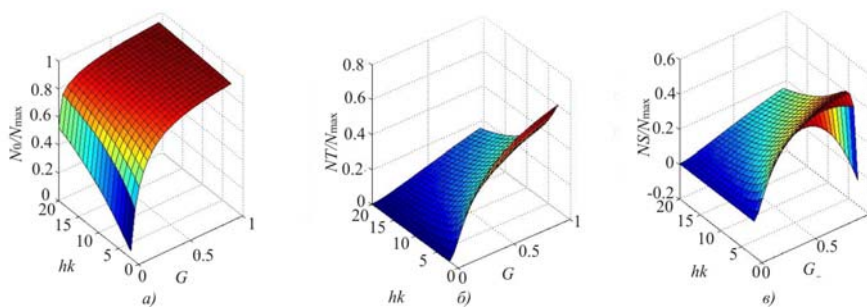


Рис. 5. Вплив режимних параметрів на потужність ТЕГ.

а – температурний напір між теплоносіями,

б – перепад температур вздовж каналу,

в – перепад температур на термоелементах.

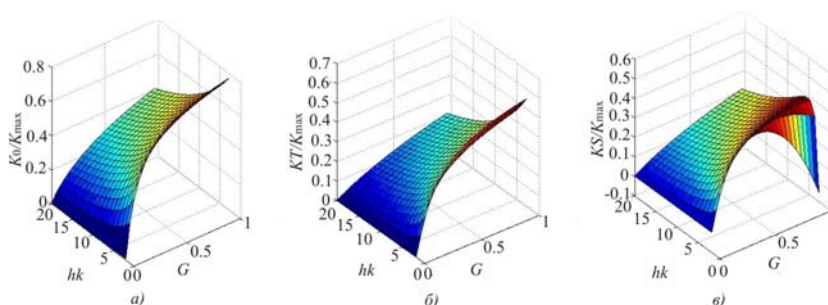


Рис. 6. Вплив режимних параметрів на потужність ККД ТЕГ.

а – температурний напір між теплоносіями,

б – перепад температур вздовж каналу,

в – перепад температур на термоелементах.

Втрати потужності через незворотності теплообміну між теплоносієм і спаями термоелементів становлять близько 7%; втрати від зниження температурного напору уздовж каналу можуть досягати 30%; втрати на прокачування теплоносія становлять 15% ... 20% від максимально можливої потужності генератора. У підсумку максимальна корисна потужність ТЕГ становить близько 40% від теоретично можливої.

Зниження ККД через розглянуті втрати в сумі становить близько 60% порівнянно з теоретичним ККД для наявного перепаду температур. Оптимальна висота каналу для заданих умов дорівнює $h_k \approx 5$ мм, оптимальна витрата теплоносія $G = 0.9$ кг/сек. Залежності потужності і ККД ТЕГ від висоти термоелементів за оптимальних G і h_k показано на рис.7.

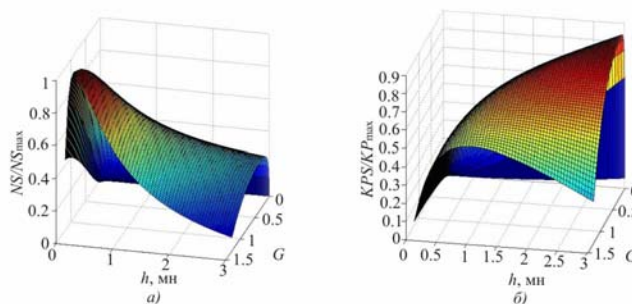


Рис. 7. Вплив висоти термоелементів на характеристики ТЕГ.

а – безрозмірна потужність ТЕГ,

б – відносний ККД ТЕГ.

Як видно з наведених даних, є оптимальне значення h , що забезпечує максимум потужності ТЕГ (у розглянутому випадку $h_{opt} \approx 0.3$ мм). ККД ж генератора зі зростанням h зростає монотонно. Звідси випливає, що оптимальне з точки зору забезпечення максимальної економічності пристрою значення h необхідно вибирати з урахуванням вартісних характеристик як генератора, так і джерела теплової енергії.

Висновки

Показано математичну модель термоелектричного генератора теплообмінного типу, яка забезпечує можливість розрахунку та оптимізації параметрів подібних пристроїв.

Проведено аналіз характеристик ТЕГ, інтегрованого в конструкцію пластинчастого теплообмінника, конкретизовано область визначення завдання, отримано оцінки оптимальних параметрів ТЕГ.

Література

1. Лобунець Ю.М. Термоелектричний генератор / Ю.М. Лобунець // Патент України №8357 від 27.08.2013р.
2. Исаченко В.П. Теплопередача. – / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел // М.: Энергия. – 1969. – 440 с.
3. Лобунець Ю.Н. Методы расчета и проектирования термоэлектрических преобразователей энергии. – / Ю.Н. Лобунець // К.: Наук. думка, 1989. – 176 с.
4. Лобунець Ю.М. Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричним перетворювачем енергії / Ю.М. Лобунець // Термоелектрика.- 2013. – № 1. – С. 62 – 67.
5. Лобунець Ю.М. Сонячний ставок з термоелектричним перетворювачем енергії / Ю.М. Лобунець // Термоелектрика. – 2013. – № 2. – С. 95 – 99.

Надійшла до редакції 15.01.2014