

Анатичук Л.І., Кузь Р.В.



Анатичук Л.І.

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

**ВПЛИВ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ
НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СЕКЦІЙНОГО
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА
ДЛЯ АВТОМОБІЛЯ
З БЕНЗИНОВИМ ДВИГУНОМ**



Кузь Р.В.

У роботі розглянуто фізичну модель секційного термогенератора (ТЕГ) для бензинового двигуна з системою відводу тепла від ТЕГ, що містить повітряно-рідинний теплообмінник і електричний вентилятор. Здійснено моделювання роботи ТЕГ для бензинового двигуна потужністю 70 кВт. Знайдено оптимальні гарячі температури секцій генератора й оптимальні потужності вентилятора, за яких досягається максимальний реальний ККД ТЕГ з урахуванням витрат на живлення вентилятора за температур навколишнього середовища в інтервалі $-40...+50^{\circ}\text{C}$. Наведено порівняння ККД секційного генератора з раніше отриманими значеннями для односекційного ТЕГ. Показано, що реальний ККД секційного ТЕГ з системою відводу тепла в 1.2 – 1.4 рази вищий, ніж для односекційного. Показано, що витрати на живлення системи тепловідводу можуть сягати 20...30% від потужності ТЕГ.

Ключові слова: рекуперація тепла, термоелектричний генератор, двигуни внутрішнього згорання.

The paper is concerned with a physical model of sectional thermoelectric generator (TEG) for a petrol engine with a system of heat removal from TEG comprising an air-to-liquid heat exchanger and an electric fan. Computer simulation of TEG operation for a 70 kW petrol engine is performed. The optimal hot temperatures of the generator sections and the optimal fan powers whereby maximum real TEG efficiency is attained with regard to the costs of power supply to the fan for ambient temperatures in the range of $-40...+50^{\circ}\text{C}$ are found. A comparison of sectional generator efficiency to the previously obtained values for one-section TEG is made. It is shown that a real efficiency of sectional TEG with a heat removal system is 1.2 – 1.4 times higher than that of one-section TEG. It is shown that the costs of power supply to heat removal system can reach 20...30% of TEG power.

Keywords: heat recovery, thermoelectric generator, internal combustion engines.

Вступ

Незмінним залишається інтерес до використання термоелектричних генераторів (ТЕГ) для утилізації тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання. Аналіз матеріалів міжнародних термоелектричних конференцій показує, що кількість робіт, присвячених автомобільним застосуванням термоелектрики невідомо зростає [1], створюються окремі секції, присвячені цій тематиці [2]. Це вказує на незмінну актуальність даного напрямку.

Метою застосування ТЕГ в автомобілі є економія палива за рахунок використання відходів тепла двигуна для генерації електричної енергії.

Наявність термоелектричного генератора у складі автомобіля викликає додаткові завдання, пов'язані з роботою ТЕГ. Одна з них – забезпечення ефективного відводу тепла від термоелектричного генератора. Оптимізацію витрат на тепловідведення від односекційного термоелектричного генератора для автомобілів з різними типами двигунів проведено у роботах [3, 4]. У роботі [5] виконано оптимізацію 3-секційного ТЕГ з системою тепловідводу для дизельного двигуна. Дослідження показують, що затрати на відвід тепла від ТЕГ можуть досягати 15-25% від виробленої ТЕГ електричної енергії за оптимального проектування системи тепловідводу. Актуальним є подальше дослідження з метою встановлення аналогічних закономірностей для секційних ТЕГ для бензинових двигунів, тому що, як відомо [4, 5], використання секційних ТЕГ для бензинових двигунів забезпечує вищу ефективність рекуперації скидного тепла.

Мета цієї роботи – оцінити ефективність застосування секційного ТЕГ для автомобіля з бензиновим двигуном з урахуванням витрат енергії на відвід тепла від ТЕГ.

Фізична модель

Роботу секційного ТЕГ в складі автомобіля можна показати схемою, зображеною на рис. 1. Вихлопний газ з тепловою потужністю Q_{in} та температурою T_{in} з двигуна 1 надходить у гарячий теплообмінник 3 секційного термоелектричного генератора 2. Від гарячого теплообмінника частина тепла передається термоелектричним батареям 4, які перетворюють його в електричну енергію. ТЕГ виробляє загальну електричну потужність W_{TEG} за ККД η_{TEG} . Частина цієї електричної потужності W_{cool} витрачається на роботу системи охолодження 6, яка відводить від холодного теплообмінника 5 теплову потужність Q_{TEG} . Температура холодного теплообмінника вважається постійною.

Детально таку фізичну модель та її математичний опис розглянуто в [5]. Відмінністю моделі в даній роботі є те, що температура вихлопних газів у бензинових двигунів є вищою (~800°C). Це призводить до необхідності використання у секціях ТЕГ різних термоелектричних матеріалів, оптимізованих на потрібний інтервал температур.

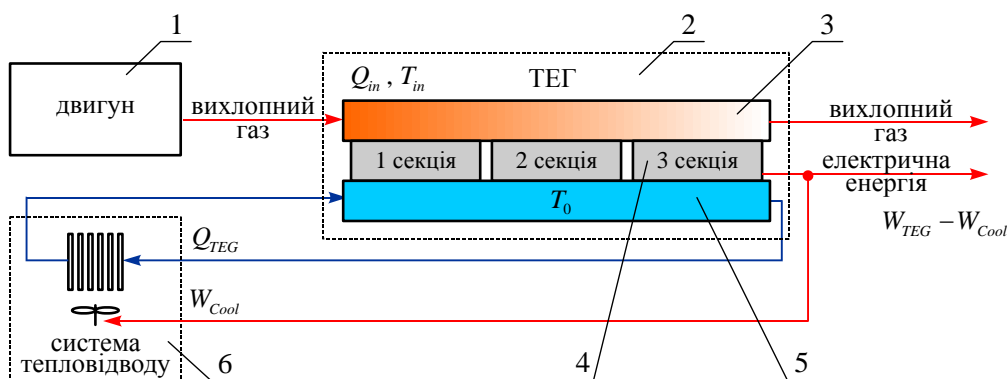


Рис. 1. Модель роботи ТЕГ у складі автомобіля

з урахуванням витрат електричної енергії на відвід тепла від термогенератора.

1 – двигун; 2 – секційний ТЕГ; 3 – гарячий теплообмінник; 4 – термоелектричні батареї; 5 – холодний теплообмінник, 6 – система тепловідводу.

Як і раніше, розрахунок максимальної ефективності секційного термоелектричного генератора здійснювався за методикою [5] за допомогою комп'ютерного моделювання [6] на двовірній сітці скінченних елементів. Коротко вона полягає в тому, що спочатку проводиться оптимізація гарячих температур секцій варіацією теплових опорів секцій для досягнення максимального ККД ТЕГ:

$$\eta_{TEG} = \frac{W_{TEG}}{Q_H^{in}}. \quad (1)$$

Для оптимізації системи тепловідводу вводиться функція ефективності повітряно-рідинного теплообмінника

$$Q_{cool} = f(W_{cool}, T_L, T_A), \quad (2)$$

де Q_{cool} – теплова потужність системи тепловідводу, W_{cool} – електрична потужність живлення системи тепловідводу, T_L – температура рідини, T_A – температура повітря. З допомогою цієї функції розраховується оптимальна потужність живлення системи тепловідводу.

Ефективний ККД ТЕГ знаходиться з виразу:

$$\eta_{ef} = (W_{TEG} - W_{cool}) / Q_{in}. \quad (3)$$

Приклад розрахунку параметрів ТЕГ з системою охолодження

Для прикладу здійсимо оптимізацію секційного ТЕГ з системою охолодження для серійного бензинового двигуна УМЗ-3318 потужністю 70 кВт з температурою вихлопних газів $\sim 790^\circ\text{C}$. Для розрахунку ККД та потужності такого ТЕГ було обрано термоелектричні матеріали $n\text{-PbTe}$ і $p\text{-TAGS}$, які є одними із кращих за добротністю у високотемпературному діапазоні. Для секцій, які працюють за нижчих температур, обрано матеріали на основі Bi-Te . [7]. Величину ZT модулів з таких матеріалів наведено на рис. 2 [7].

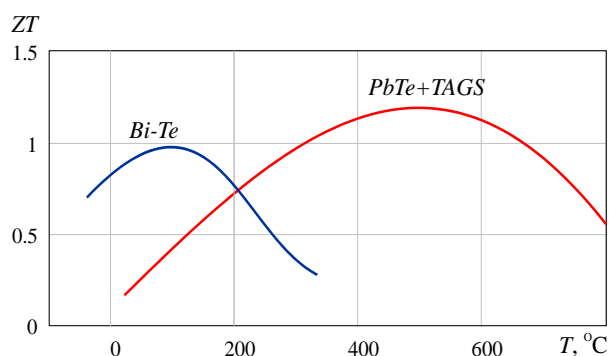


Рис. 2. Температурна залежність ZT модулів з матеріалів на основі Bi-Te та $\text{PbTe} + \text{TAGS}$.

Оптимізація гарячої температури ТЕГ. Спочатку проводився розрахунок та оптимізація гарячих температур секцій ТЕГ за методикою [5]. На рис. 3 наведено приклад розрахованого комп'ютерним моделюванням двовірною температурного поля в секціях ТЕГ. На рис. 4-5 наведено значення оптимальних гарячих температур та ККД секцій залежно від їх холодної температури.

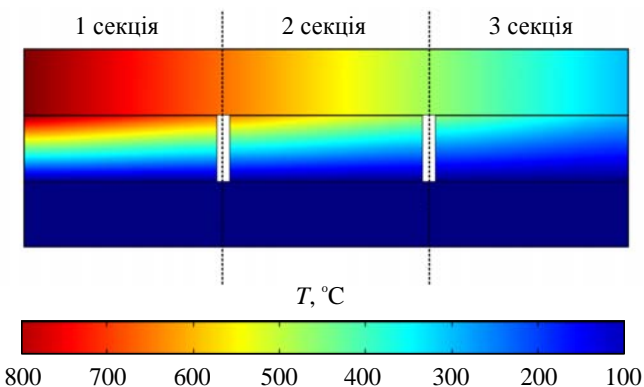


Рис. 3. Розподіл температури в секціях ТЕГ.

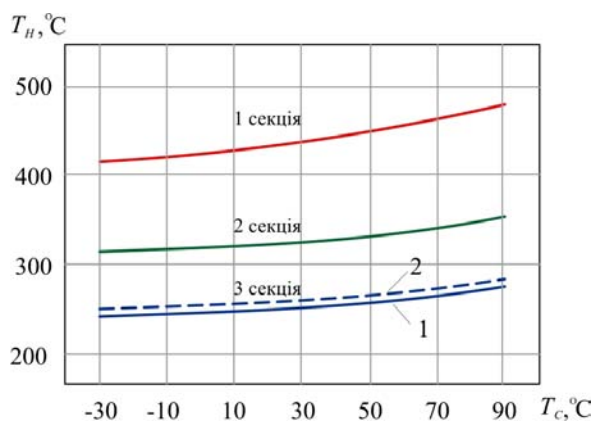


Рис. 4. Залежність оптимальної гарячої температури секцій ТЕГ від їх холодної температури. 1 – для модулів з *Bi-Te*, 2 – для модулів з *n-PbTe* і *p-TAGS*.

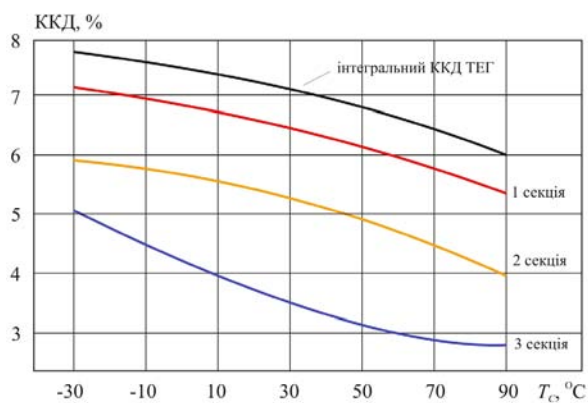


Рис. 5. Залежність ККД секцій та інтегрального ККД ТЕГ від температури холодної сторони ТЕГ.

Як видно з рис. 4, оптимальна гаряча температура третьої секції не підіймається вище 280°C . Тому для цієї секції доцільніше використовувати батареї з матеріалів на основі *Bi-Te* (рис. 2). Температури перших двох секцій є достатньо високими для використання в них термогенераторів з матеріалів *n-PbTe* і *p-TAGS*. Подальші розрахунки буде виконано саме для такої моделі.

Оптимізація системи тепловідводу. Розрахунок оптимальних витрат на відвід тепла від секцій ТЕГ проводився за методикою [3, 4]. Необхідні для розрахунків характеристики повітряно-рідинного теплообмінника взято з роботи [3]. На рис. 6 наведено величину теплової потужності, яку необхідно відводити від ТЕГ, залежно від холодної температури ТЕГ.

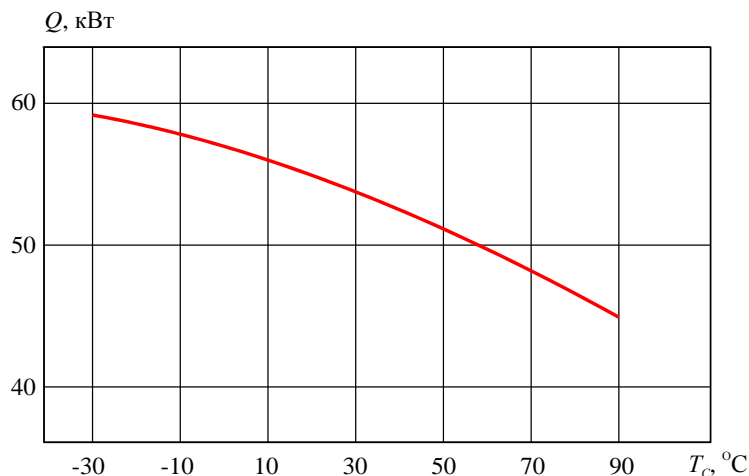


Рис. 6. Залежність теплової потужності, яку потрібно відводити від ТЕГ, від холодної температури ТЕГ.

На рис. 7 наведено результати оптимізації системи «ТЕГ-система охолодження» для різних температур навколишнього середовища. Тут подано величини оптимальних потужностей вентилятора системи охолодження. Вони становлять $\sim 20\% \dots 30\%$ від потужності термогенератора. На рис. 8 показано залежність електричної потужності ТЕГ з урахуванням витрат на тепловідвід.

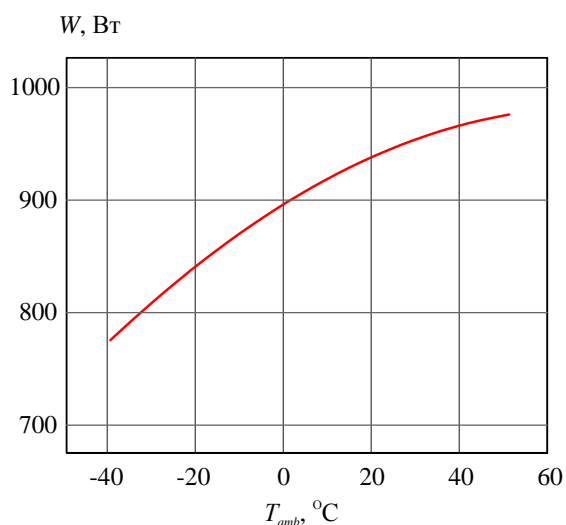


Рис. 7. Залежність оптимальної електричної потужності системи охолодження ТЕГ від температури навколишнього середовища.

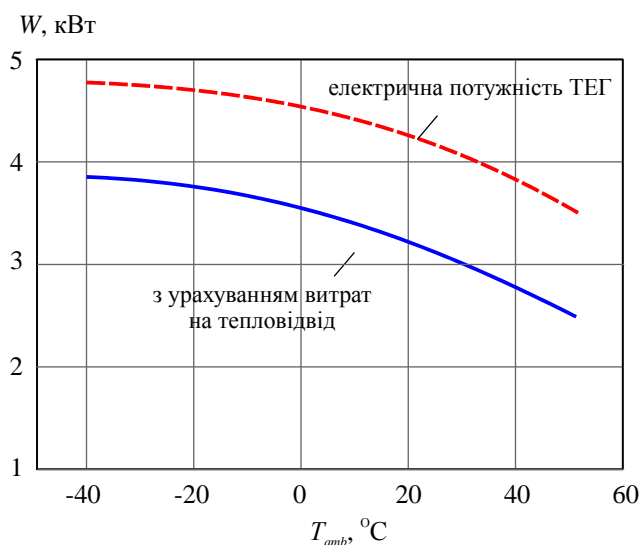


Рис. 8. Залежність електричної потужності ТЕГ від температури навколишнього середовища.

На рис. 9 наведено порівняння ККД односекційного ТЕГ [5] та трисекційного ТЕГ, проаналізованого в цій роботі, а також ТЕГ для дизельного двигуна, проаналізовані в роботах [3, 5].

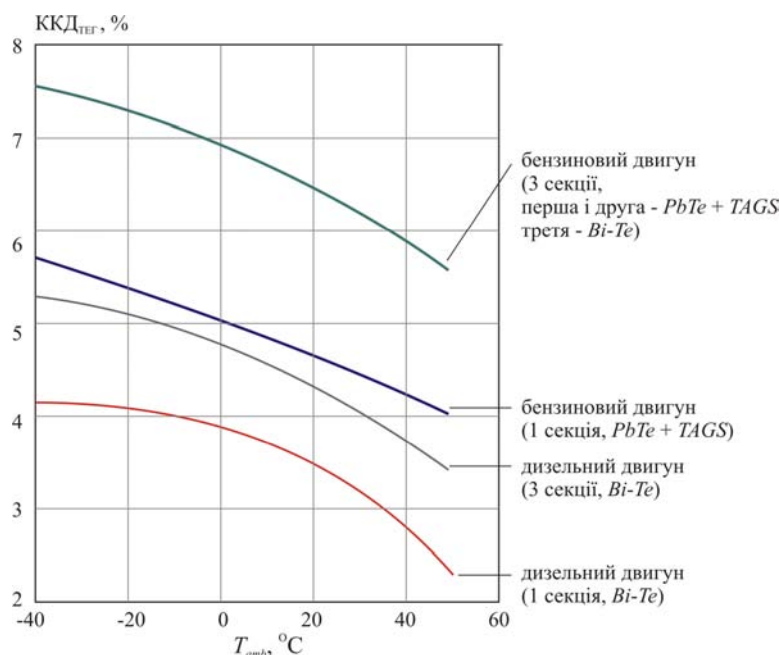


Рис. 9. Залежність ККД ТЕГ від температури навколишнього середовища.

Видно, що використання секцій у генераторі за однакових інших умов дає кращі показники ККД. Використання секцій дає можливість забезпечити в 1.2 -1.3 рази вищу ефективність ТЕГ. Порівняно з ТЕГ для дизельного двигуна, ТЕГ для бензинового двигуна дає кращі показники як по ККД, так і по його стабільності залежно від температури навколишнього середовища.

Висновки

1.3 допомогою комп'ютерного моделювання проаналізовано фізичну модель трисекційного

- термоелектричного генератора для автомобіля з бензиновим двигуном. Ефективність комп'ютерного моделювання продемонстровано на конкретному варіанті генератора для автомобіля з бензиновим двигуном потужністю 70 кВт.
- Отримано оптимальні гарячі температури секцій в залежності від холодної температури ТЕГ в інтервалі $-30...+90^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що за підвищенням холодної температури ТЕГ оптимальні гарячі температури також зміщуються в область вищих значень.
 - Здійснено оптимізацію системи тепловідводу. Знайдено оптимальні витрати електричної енергії на відвід тепла. Встановлено, що ці витрати зростають від 770 Вт до 940 Вт за збільшенням температури навколишнього середовища від -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$.
 - Визначено потужність ТЕГ залежно від температури навколишнього середовища. Встановлено, що найвище значення потужності (~ 4.7 кВт) досягається за $T_{amb} = -40^{\circ}\text{C}$ і зменшується до 3.5 кВт за $T_{amb} = +50^{\circ}\text{C}$. Частина цієї енергії витрачається на забезпечення відводу тепла від ТЕГ. З урахуванням цих витрат потужність генератора за $T_{amb} = -40^{\circ}\text{C}$ становить 3.8 кВт і зменшується до 2.6 кВт при $T_{amb} = +50^{\circ}\text{C}$.
 - Порівняння ККД односекційного генератора з трисекційним демонструє зростання ККД з використанням 3-х секцій від 5.8% до 7.5% за $T_{amb} = -40^{\circ}\text{C}$. ККД трисекційного генератора залишається вищим і за більш високих температур навколишнього середовища. За $T_{amb} = +50^{\circ}\text{C}$ ККД трисекційного ТЕГ становить 5.63%, в той час як ККД односекційного ТЕГ становить всього 4%. В цілому проведені дослідження демонструють переваги трисекційного ТЕГ щодо електричної потужності та ККД в 1.2...1.4 рази.
 - Система тепловідводу від 3-секційного ТЕГ споживає значну кількість електричної енергії. Ці витрати можуть становити 20...30% від загальної потужності ТЕГ.
 - В інтервалі температур навколишнього середовища $-40...+60^{\circ}\text{C}$ ККД ТЕГ для бензинового двигуна спадає на $\sim 14\%$. В той же час ККД ТЕГ для дизельного двигуна спадає на 45%. Це свідчить про доцільність використання ТЕГ для дизельних двигунів тільки за понижених температур навколишнього середовища. Оскільки ККД ТЕГ для бензинового двигуна менше залежить від температури оточуючого середовища, його можна використовувати у широкому діапазоні зазначених температур.

Література

- <http://web.ornl.gov/sci/theory/ict2014/schedule.pdf>.
- http://ectmadrid2014.com/wp-content/uploads/EC2014_Schedule.pdf.
- Анатичук Л.І. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора дизельного автомобіля / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь // Термоелектрика. – №2 – 2014 – С.60-67.
- Анатичук Л.І. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора бензинового автомобіля / Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь // Термоелектрика. – №3 – 2014 – С.87-91.
- Л.І. Анатичук, Р.В. Кузь. Вплив повітряного охолодження на ефективність секційного термоелектричного генератора для автомобіля з дизельним двигуном // Термоелектрика – №3 – 2014 – С. 81-87.
- Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>.
- Anatychuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.

Надійшла до редакції 17.10.2014