

Анатичук Л.І., Кузь Р.В.

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



Анатичук Л. І.



Кузь Р. В.

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

*У роботі розглянуто фізичну модель термогенератора (ТЕГ) для бензинового двигуна з системою відводу тепла від ТЕГ, що містить повітряно-рідинний теплообмінник і електричний вентилятор. Наведено математичний і комп'ютерний описи моделі. Розглянуто комп'ютерне моделювання для бензинового двигуна потужністю 70 кВт. Знайдено оптимальні гарячі температури генератора й оптимальні потужності вентилятора, за яких досягається максимальна корисна потужність і відповідно максимальний реальний ККД ТЕГ з урахуванням витрат на живлення вентилятора для температур навколишнього середовища в інтервалі  $-40...+50^{\circ}\text{C}$ . Наведено порівняння таких ККД з раніше отриманими для дизельного двигуна. Показано, що реальний ККД ТЕГ з теплообмінником для бензинового двигуна в 1.3 – 1.5 рази вищий, ніж для дизельного двигуна такої ж потужності.*

**Ключові слова:** рекуперация тепла, термоелектричний генератор, двигуни внутрішнього згоряння.

*The paper is concerned with a physical model of a 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. A mathematical and computer description of the model is presented. Computer simulation of the model for a 70 kw petrol engine is considered. Optimal hot side temperatures of the generator and optimal powers of the fan are found whereby maximum net power is attained and, accordingly, maximum real efficiency of TEG with regard to expenditures on the fan supply for ambient temperatures in the range of  $-40...+50^{\circ}\text{C}$ . A comparison of such efficiencies to those previously obtained for a diesel engine is made. It is shown that a real efficiency of TEG with a heat exchanger for a petrol engine is 1.3 – 1.5 fold higher than for a diesel engine of the same power.*

**Key words:** heat recovery, thermoelectric generator, internal combustion engines.

## Вступ

Використання відходів тепла від двигунів внутрішнього згоряння – одна з найбільш обговорюваних тем у практичних застосуваннях термоелектрики. Кінцева мета такого застосування – економія палива за рахунок використання відходів тепла двигуна для генерації електричної енергії [1, 2].

Як відомо, наявність термоелектричного генератора в складі автомобіля суттєво впливає на його роботу. Негативними чинниками є, наприклад, додатковий опір руху газів у вихлопній системі автомобіля; додаткові витрати потужності двигуна на транспортування самого ТЕГ; витрати, викликані необхідністю відводити тепло від термоелектричного генератора. У роботах

[3-5] розглядаються деякі із цих впливів. Показано, що для легкових автомобілів ці витрати іноді можуть перевищувати корисну роботу ТЕГ.

Витрати на тепловідвід від ТЕГ для автомобіля з дизельним двигуном розглянуто в роботі [6]. Визначено величини цих витрат для двигуна потужністю 75 кВт. Встановлено, що витрати на відвід тепла від односекційного ТЕГ можуть досягати 15-25% від виробленої ТЕГ електричної енергії, або орієнтовно 6-12% від потужності ТЕГ у вигляді механічної енергії двигуна. Загалом показано, що для дизельного двигуна застосування ТЕГ з урахуванням витрат на відвід тепла дає додатково 1.5-4% до потужності двигуна у вигляді електричної енергії, що відповідно може дати близько 2-6% економії палива за відмови від динамомашини.

Цікаво визначити аналогічні закономірності для бензинових двигунів, оскільки, як відомо, температура вихлопного газу в них значно вища порівняно з дизельними, що може дати більш оптимістичні показники економії палива.

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

### Фізична модель і комп'ютерне проектування ТЕГ для автомобіля

Роботу термоелектричного генератора в складі автомобіля можна показати схемою, зображеною на рис. 1.

Вихлопний газ з тепловою потужністю  $Q_{in}$  із двигуна 1 надходить у термоелектричний генератор 2 з тепловим опором  $R_t$  за температури  $T_{in}$  й залишає генератор за температури  $T_{out}$ . ТЕГ виробляє електричну енергію  $W_{TEG}$  за ККД  $\eta_{TEG}$ . Розглядається випадок, коли частина цієї електричної енергії  $W_{cool}$  витрачається на роботу системи охолодження 4, яка відводить від ТЕГ теплову потужність  $Q_{TEG}$ . Температура навколишнього середовища  $T_{amb}$ .

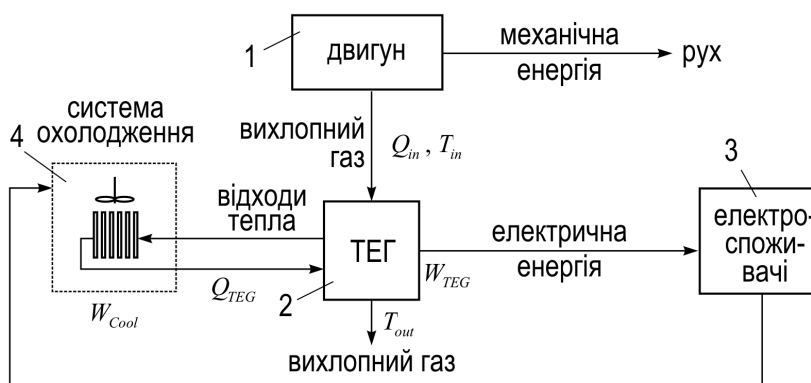


Рис. 1. Модель роботи ТЕГ у складі автомобіля з урахуванням витрат електричної енергії на відвід тепла від термогенератора.

Комп'ютерну модель і методи проектування для цієї моделі наведено в роботі [6]. Основні співвідношення для розрахунків такі:

$$T_{out}(R_t) = \left( Q_{in} \left( 1 + \frac{T_{amb}}{T_{in} - T_{amb}} \right) + \frac{T_0}{R_t} \right) / \frac{1}{R_t} + \frac{Q_{in}}{T_{in} - T_{amb}}, \quad (1)$$

$$\eta_{TEG}(R_t) = \frac{T_{out} - T_0}{T_{out}} \frac{M - 1}{M + T_0 / T_{out}}, \quad (2)$$

де

$$M = \sqrt{1 + Z \frac{(T_{out} + T_0)}{2}}. \quad (3)$$

Ефективний ККД ТЕГ вводиться виразом

$$\eta_{ef} = (W_{TEG} - W_{cool}) / Q_{in}. \quad (4)$$

Вони нічим суттєво не відрізняються від методів проектування для дизельного двигуна. Відмінністю є більш високі температури вихлопних газів ( $\sim 800^\circ\text{C}$ ) і застосування інших термоелектричних матеріалів, що підходять для роботи за більш високих температур.

У такій моделі є дві величини, які підлягають оптимізації – температура гарячої сторони ТЕГ і електрична потужність, що витрачається на роботу системи охолодження.

### Приклад розрахунків параметрів ТЕГ для бензинового двигуна

Для прикладу розрахуємо основні параметри ТЕГ для серійного бензинового двигуна УМЗ-3318 потужністю 70 кВт у безперервному режимі роботи. За таких умов температура вихлопних газів становить близько  $790^\circ\text{C}$ .

Для такого ТЕГ було обрано матеріали *n-PbTe* і *p-TAGS*, які є одними із кращих за добротністю в робочому діапазоні температур. Величину *ZT* модуля з такої пари наведено на рис. 2 [8]. Необхідні для розрахунків характеристики повітряно-рідинного теплообмінника взято з роботи [6].

**Оптимізація гарячої температури ТЕГ.** Спочатку було проведено оптимізацію по ККД гарячої температури ТЕГ, яка за постійної теплової потужності вихлопних газів залежить від теплового опору ТЕГ. На рис. 3 наведено результат такої оптимізації. Видно, що оптимальні температури змінюються незначно. Це дає можливість без істотних втрат ККД використовувати в термогенераторі один усереднений термічний опір термобатареї.

На рис. 4 наведено значення ККД і електричної потужності ТЕГ залежно від гарячої температури за різної холодної температури ТЕГ. Видно, що зі зниженням холодної температури максимум ККД і потужності зміщується у бік більш низьких температур, як на рис. 3, а значення ККД при цьому трохи зростає (рис. 5) через комбінований вплив термодинамічного ККД і температурної залежності *ZT* модулів.

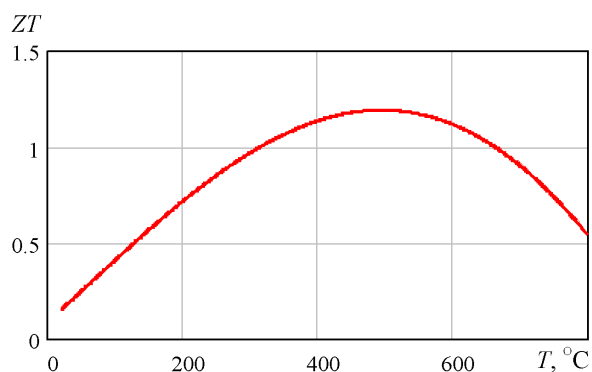


Рис. 2. Температурна залежність *ZT* модуля з матеріалів на основі *n-PbTe* і *p-TAGS*.

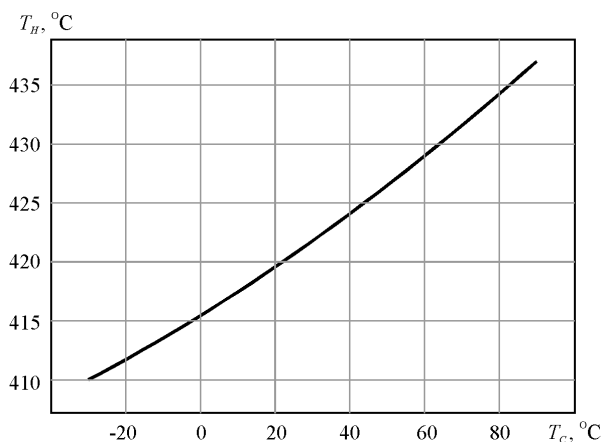


Рис. 3. Залежність оптимальної гарячої температури ТЕГ від його холодної температури.

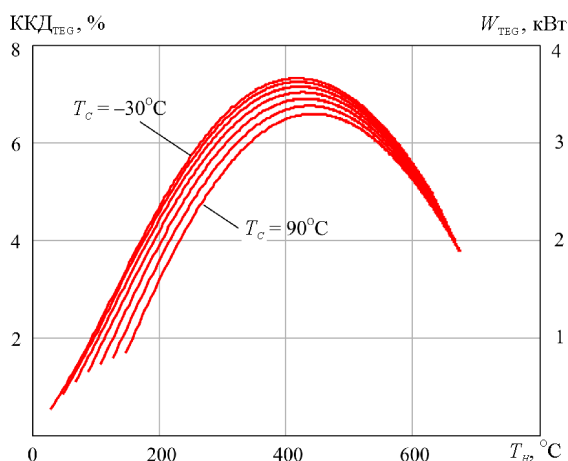


Рис. 4. Залежність ККД і електричної потужності ТЕГ від температури його гарячої сторони.  $T_c$  змінюється від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ .

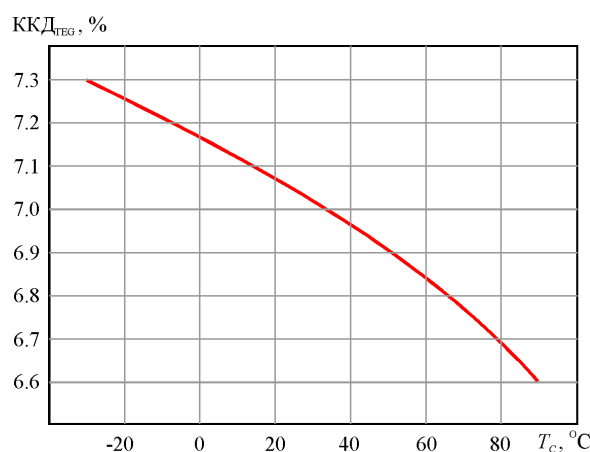


Рис. 5. Залежність ККД ТЕГ від його холодної температури.

Розрахунки екстремальних ККД і потужності ТЕГ з урахуванням того, що частина його електричної енергії витрачається на забезпечення роботи системи тепловідводу, здійснювалися за допомогою комп'ютерного моделювання згідно з рівняннями (1-4).

На рис. 6 наведено результат оптимізації системи «ТЕГ-система охолодження» для різних температур навколишнього середовища.

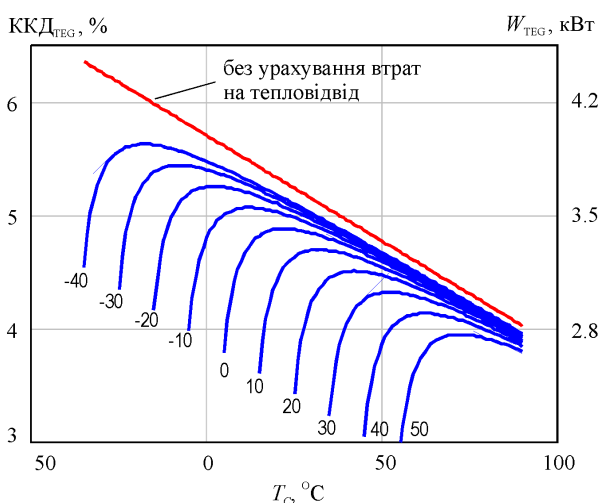


Рис. 6. Залежності ефективних ККД і електричної потужності ТЕГ від температури його холодної сторони. (Біля графіків зазначено температуру навколишнього середовища,  $^{\circ}\text{C}$ ).

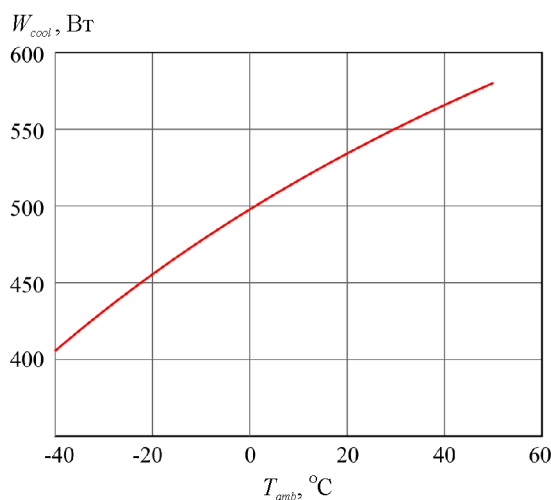


Рис. 7. Залежність оптимальної електричної потужності живлення системи охолодження від температури навколишнього середовища.

З графіків видно наявність яскраво виражених оптимальних режимів роботи системи охолодження ТЕГ. Величини оптимальних потужностей вентилятора системи охолодження наведено на рис. 7. Вони становлять  $\sim 10\% \dots 20\%$  від потужності термогенератора.

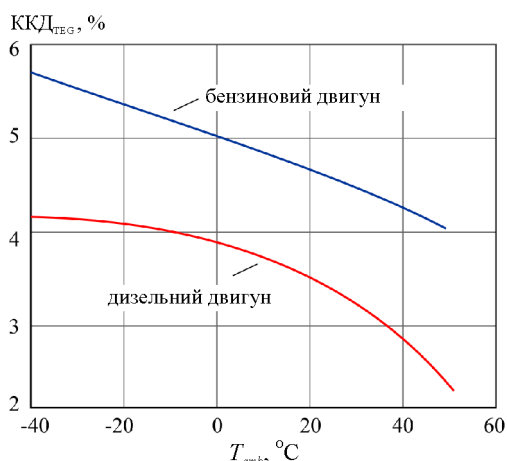


Рис. 8. Залежність ККД ТЕГ для різних типів двигунів від температури навколишнього середовища.

На рис. 8 наведено порівняння ККД ТЕГ з системою відводу тепла для дизельного [6] і бензинового двигунів. Як видно, застосування ТЕГ з бензиновим двигуном дає кращі показники: ККД менше залежить від температури навколишнього середовища; він може забезпечити в  $\sim 1.3-1.5$  разів більший ККД і електричну потужність, та відповідно економію палива близько 4 – 6.5%.

### Висновки

1. Комп'ютерним моделюванням встановлено суттєву залежність ефективності застосування ТЕГ у автомобілі з бензиновим двигуном від затрат електричної потужності генератора на відвід тепла від нього.

2. Також встановлено, що екстремальні значення ККД і потужності досягаються за оптимізації ТЕГ по гарячій температурі і по електричній потужності, що витрачається для живлення вентилятора в системі відводу тепла від термогенератора.

3. Комп'ютерне моделювання ТЕГ з системою відводу тепла для бензинового двигуна потужністю 70 кВт, температурах навколишнього середовища  $-40...+50^{\circ}\text{C}$  і застосуванні в батареях ТЕГ матеріалів на основі  $PbTe$  і  $TAGS$  дало наступні результати: оптимальні гарячі температури генератора  $410 - 435^{\circ}\text{C}$ ; ККД генератора з урахуванням витрат на тепловідвід 4 - 6.5%; електрична потужність 2.8 – 4.5 кВт; затрати на відвід тепла 400 – 550 Вт; покращення ККД і потужності генератора для бензинового двигуна порівняно з дизельним у 1.3 – 1.5 разів; очікувана економія палива 4 – 6.5%.

### Література

1. Л.И. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Эффективность термоэлектрических рекуператоров тепла выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания // Термоэлектричество. – 2011. – №4. – С. 80-85.
2. Л.И. Анатичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Термоэлектрический генератор для бензинового двигателя // Термоэлектричество. – 2012, – №2, – С. 97-104.
3. Min G., Rowe D.M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22. – P. 528-534.
4. Sacr K.M., Mansour M.K., Mussa M.N. Thermal design of automobile exhaust based on thermoelectric generators: Objectives and challenges // Thermoelectricity. – 2008. – № 1. – p. 64-73.
5. Zhang X., Chau K.T., Chan C.C. Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles // Journal of Asian Electric Vehicles. – 2008. – Vol. 6, № 2. – P. 1119-1124.
6. Л.И. Анатичук, Р.В. Кузь. Влияние воздушного охлаждения на эффективность термоэлектрического генератора дизельного автомобиля // Термоэлектричество. – 2014. – №2. – С. 61-69.
7. PTC Mathcad – Engineering Calculations Software. www.ptc.com.
8. Anatychuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.

Надійшла до редакції 15.06.2014