

УДК 537.32



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І.^{1,2}, Кузь Р.В.¹

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
²Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна



Кузь Р.В.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВАНТАЖІВОК

Наведено результати комп'ютерного моделювання термоелектричних генераторів (ТЕГ), що використовують відходи тепла двигунів внутрішнього згорання вантажівок. Моделювання здійснено з урахуванням динамічних режимів роботи двигуна на основі реальних записів системи моніторингу з використанням реальних параметрів термоелектричних модулів.

Ключові слова: термоелектричний генератор, двигуни внутрішнього згорання.

The results of computer simulation of thermoelectric generators (TEG) using the exhaust heat of internal combustion engines were presented. The simulation was done with regard to dynamic modes of engine operation on the basis of real records of monitoring system with the use of real parameters of thermoelectric modules.

Key words: thermoelectric generator, internal combustion engines.

Вступ

Використання відходів тепла від двигунів внутрішнього згорання – актуальне завдання термоелектрики. Світові виробники автомобілів, а також компанії, що займаються термоелектрикою, приділяють багато уваги розробці ефективних автомобільних термоелектричних генераторів [1 – 8]. Мета цього – підвищення економії палива до 10 % за рахунок використання відходів тепла двигуна для генерації електричної енергії.

Найбільшими компаніями, які ставлять перед собою завдання створення промислових зразків генераторів і їх серійного виробництва, – компанії Hi-Z, BSST і General Motors у США. У Японії найдокладніше питаннями створення генераторів для автомобілів займаються компанії Komatsu, Nissan і Shiroki. У Німеччині свої розробки термоелектричних автомобільних генераторів показали компанія Volkswagen, а також спільно компанія BMW і DLR (аерокосмічний центр Німеччини).

Причина відсутності широкого застосування ТЕГ для автомобілів – недостатньо високий коефіцієнт корисної дії генераторів. ККД генератора суттєво залежить від режиму роботи двигуна. Динамічні режими роботи двигуна за реальної їзди накладають досить складні вимоги до проектування й оптимізації автомобільних генераторів, які повною мірою нині ще не вдається розв'язати. Однією зі складових оптимізації ТЕГ є його проектування для конкретного типу двигуна і переважного режиму його роботи. Особливу увагу привертають вантажівки з потужними двигунами і відповідно значною кількістю теплових відходів.

Мета пропонованої праці – проектування термоелектричного генератора, який утилізує тепло вихлопних газів вантажівки.

Оптимізація термоелектричного генератора здійснюється комп'ютерним проектуванням [9], яке полягає в наступному.

Методика комп'ютерного проектування

Розглянемо фізичну модель термоелектричного генератора (ТЕГ), показану на рис. 1. У загальному випадку ТЕГ складається із N секцій, з'єднаних послідовно відносно потоку гарячого газу й холодного теплоносія.

Кожна секція ТЕГ складається з таких елементів (рис. 1): гарячий теплообмінник (1), термоелектрична батарея (3) з тепловим опором $R_t^{(i)}$ і коефіцієнтом корисної дії η (T_H, T_0); холодний теплообмінник (4) з температурою T_0 ; тепловий опір між гарячим теплообмінником і термоелектричною батареєю $R_i^{(i)}$ (2), яким обмежується температура гарячої сторони модулів. Термоелектричні батареї кожної із секцій замкнені на узгоджене електричне навантаження R_i (5).

Вхідний потік гарячого газу характеризується температурою T_H^{in} і тепловою потужністю Q_H^{in} . Гарячий газ віддає частину тепла $Q_H^i(x)$ за температури $T_{hot}^{(i)}(x)$ гарячому теплообміннику. На виході ТЕГ температура газу T_H^{out} й тепла потужність Q_H^{out} . З гарячого теплообмінника через тепловий опір $R_i^{(i)}$ тепло передається термоелектричній батареї, нагріваючи її гарячу сторону до температури $T_H^{(i)}(x)$.

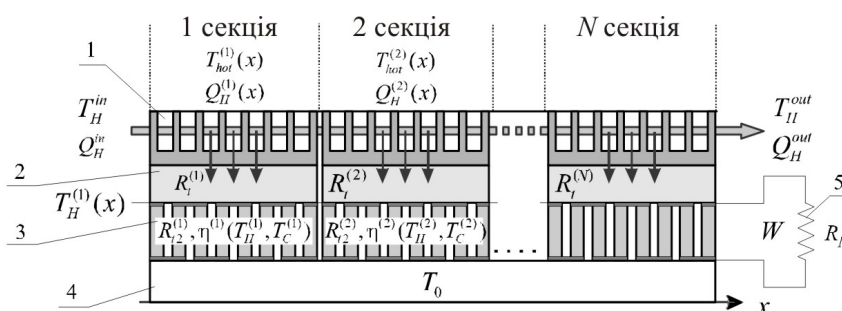


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного генератора:
1 – гарячий теплообмінник; 2 – тепловий опір між гарячим теплообмінником і термоелектричною батареєю; 3 – термоелектрична батарея;
4 – холодний теплообмінник; 5 – узгоджене електричне навантаження.

Для запобігання перегріву термоелектричних модулів доповнимо фізичну модель байпасом, через який буде відводитися надлишок вихлопного газу таким чином, щоб підтримувати температуру модулів на максимально припустимому рівні.

Для оптимізації ТЕГ необхідно знайти розподіл температур і теплових потоків у термоелектричних батареях кожної із секцій. Такий розрахунок для цієї моделі здійснено шляхом застосування чисельних комп'ютерних методів.

Для розрахунків електричної потужності ТЕГ використовуємо рівняння балансу енергії у вигляді

$$W = \sum_{i=1}^N \left[\int (Q_H^{(i)}(x) - Q_C^{(i)}(x)) dx \right]. \quad (1)$$

Необхідні температури й теплові потоки визначаються з рівняння теплопровідності

$$-\nabla(\kappa_{TE}(T)\nabla T) = Q_J, \quad (2)$$

де κ_{TE} – ефективна теплопровідність термоелектричної батареї, Q_J – тепло Джоуля, яке виділяється в об'ємі термоелектричної батареї.

Граничні умови для (2) будуть мати вигляд

$$Q_H^{in(1)} = Q_H^{in}, \quad Q_H^{in(i+1)} = Q_H^{out(i)}, \quad Q_H^{out(N)} = Q_H^{out}, \quad (3)$$

$$Q_H^{(i)}(x) = (T_H^{(i)}(x) - T^{(i)}(x)) / R_t^{(i)}, \quad (4)$$

$$Q_C^{(i)}(x) = (T_0(x) - T^{(i)}(x)) / R_{t2}^{(i)}. \quad (5)$$

Сукупність співвідношень (1) – (5) дає можливість визначити розподіл температур $T_H^{(i)}(x)$ і теплових потоків $Q_H^{(i)}(x)$ на кожній із секцій.

Для обмеження гарячої температури модуля тепловий опір $R_t^{(i)}$ між гарячим теплообмінником і термоелектричним модулем визначається з рівняння (4).

Потужність кожної секції й загальний ККД ТЕГ можна визначити з рівнянь

$$W^{(i)} = \int Q_H^{(i)}(x) \eta(T_H^{(i)}(x), T_0) dx, \quad (6)$$

$$\eta_{TEG} = \frac{1}{Q_H^{in}} \sum_{i=1}^N W^{(i)}. \quad (7)$$

Система рівнянь (1) – (5) розв'язується чисельними методами на двомірній сітці кінцевих елементів [10].

Результати комп'ютерного проектування

Проектування термоелектричного генератора в динамічному режимі роботи виконано з використаннями вхідних параметр вихлопного газу (температура і витрата) отримані на вихлопній системі вантажівки CAT 775F для двигуна Navistar 13L [11] потужністю 330 кВт для різних режимів роботи двигуна:

- 1 – виконання стандартних завдань вантажівки;
- 2 – робота двигуна вантажівки за навантаження, близького до номінального (оберти – 1500 RPM, крутний момент – 1100 Н·м).

На рис. 2 наведено температуру вихлопного газу, на рис. 3 – витрату вихлопного газу для випадку роботи двигуна за номінального навантаження.

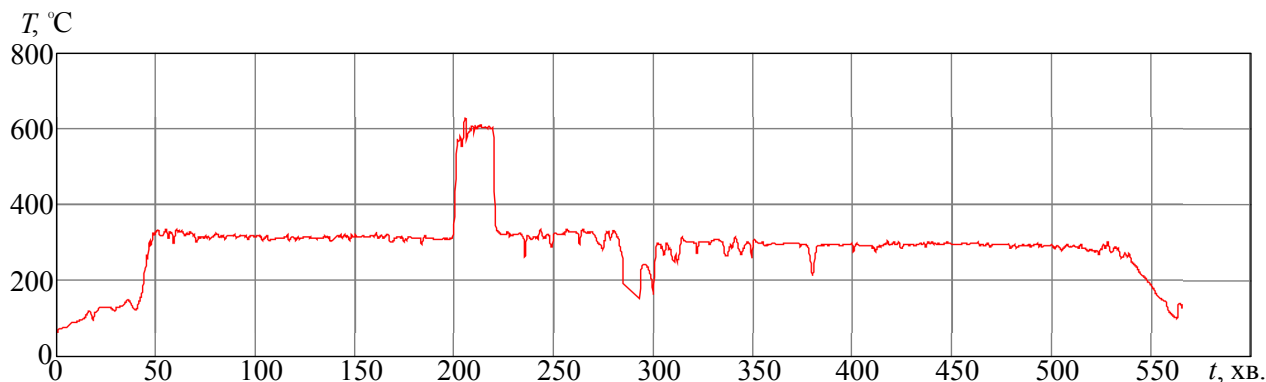


Рис. 2. Температура вихлопного газу за номінальної роботи двигуна.

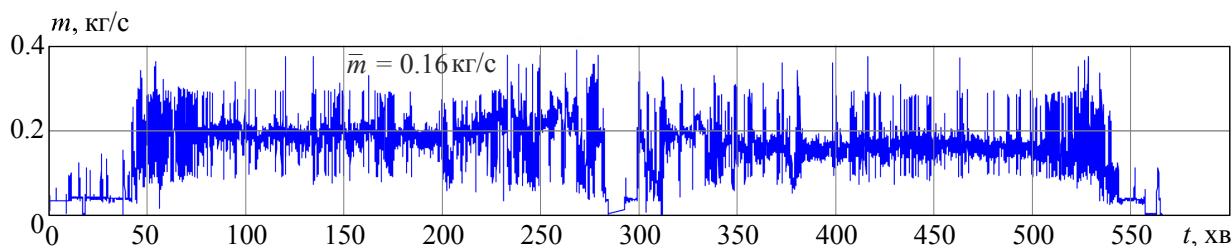


Рис. 3. Витрата вихлопного газу за номінальної роботи двигуна.

Для проектування генератора було обрано термоелектричні модулі Altec-1061 [10] на основі $Bi-Te$, які за своїми характеристиками перевищують відомі світові аналоги.

Оптимізація конструкції генератора складалася у визначенні мінімальної кількості модулів N , необхідних для досягнення генератором максимальної середньої електричної потужності W за робочий цикл, представлений на рис. 2, рис. 3. На рис. 4 наведено результати такої оптимізації.

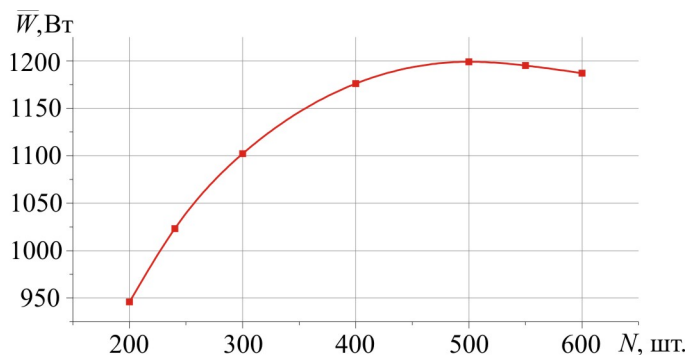


Рис. 4. Залежність середньої електричної потужності ТЕГ від кількості модулів.

Можна побачити, що для поставленої задачі оптимальна кількість модулів становить ~ 500 . З відхиленням від оптимального значення в менший бік можливо підняти гарячу температуру модулів до вищих значень, але сумарна електрична потужність ТЕГ падає через малу кількість модулів. Падіння електричної потужності ТЕГ спостерігається й за відхилення від оптимальної кількості модулів у більший бік. Це пов'язано зі зменшенням загального теплового опору термоелектричної батареї і, як наслідок, зменшенням перепаду температур на модулях.

На рис. 5 наведено залежності температури гарячої сторони модулів від часу. Температура холодної сторони прийнята $T_0 = 60$ °С.

На рис. 6 показано залежність електричної потужності ТЕГ від часу. Середня електрична потужність за весь цикл становила ~ 1200 Вт.

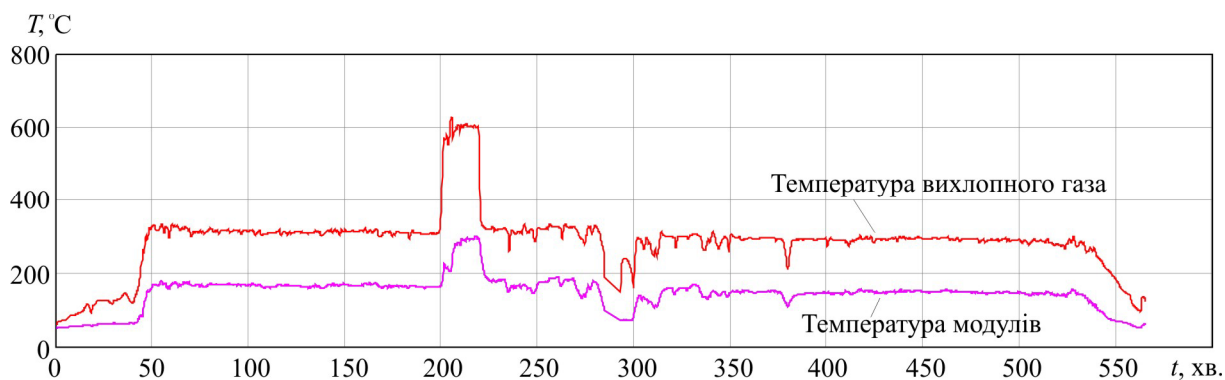


Рис. 5. Залежність гарячої температури модулів від часу для номінальної роботи двигуна.

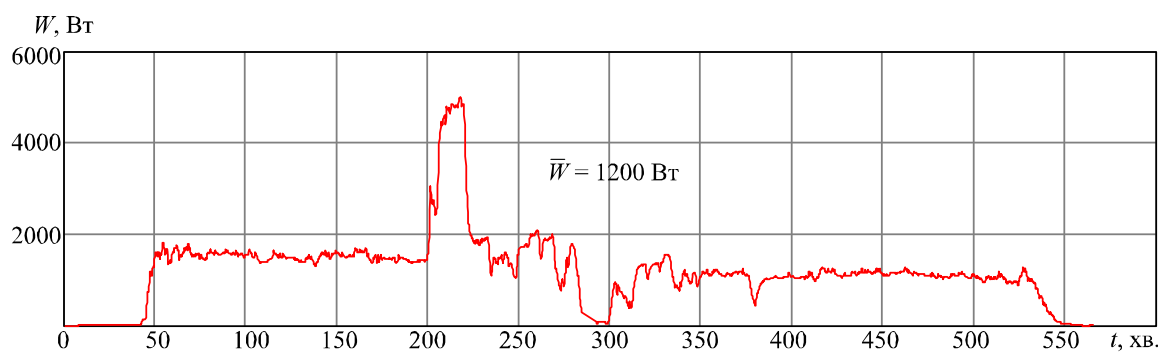


Рис. 6. Залежність електричної потужності ТЕГ від часу для номінальної роботи двигуна.

При цьому середній коефіцієнт корисної дії термоелектричного генератора за цикл становить 2.2 %.

Оптимізація генератора на інший режим роботи – виконання стандартних завдань вантажівки – дала такі результати.

На рис. 7 наведено результат оптимізації середньої електричної потужності ТЕГ за робочий цикл.

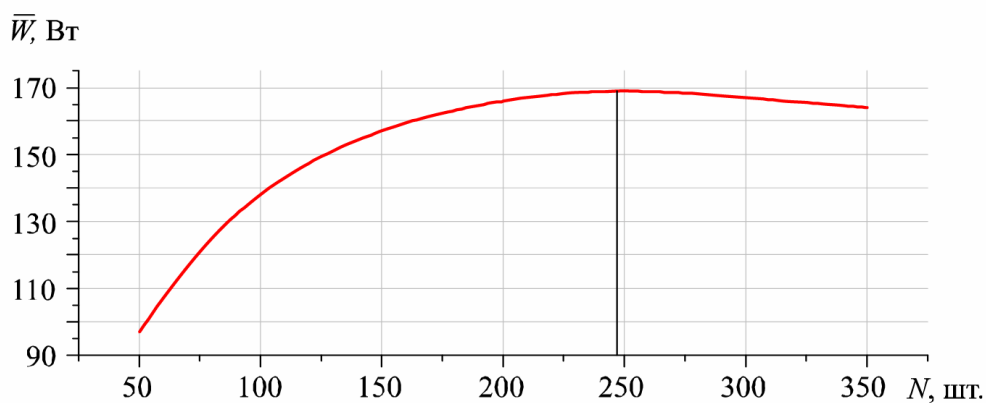


Рис. 7. Залежність середньої електричної потужності ТЕГ від кількості модулів.

На рис. 8 показано залежності температури гарячої сторони модулів від часу при виконанні вантажівкою стандартних завдань. Температура холодної сторони прийнята $T_0 = 60$ °С. На рис. 9 наведено електричну потужність ТЕГ в цьому режимі роботи.

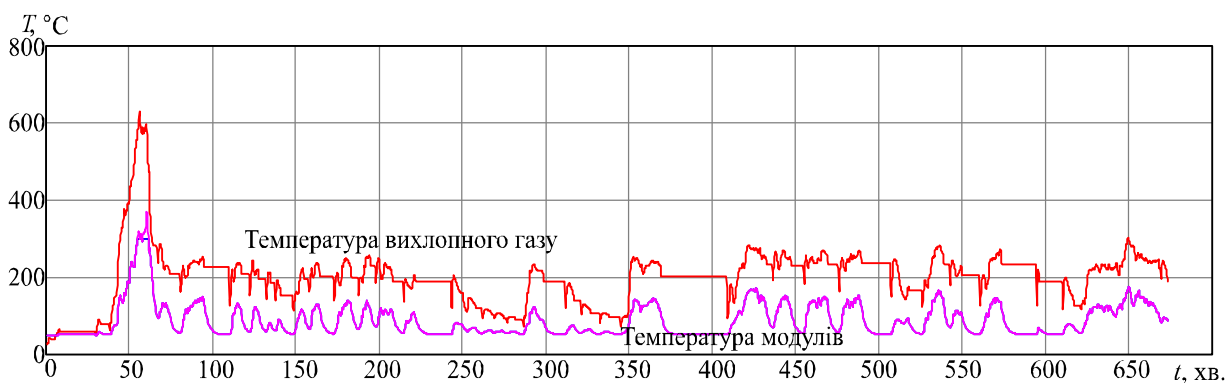


Рис. 8. Залежність температури газу та гарячої температури модулів від часу.

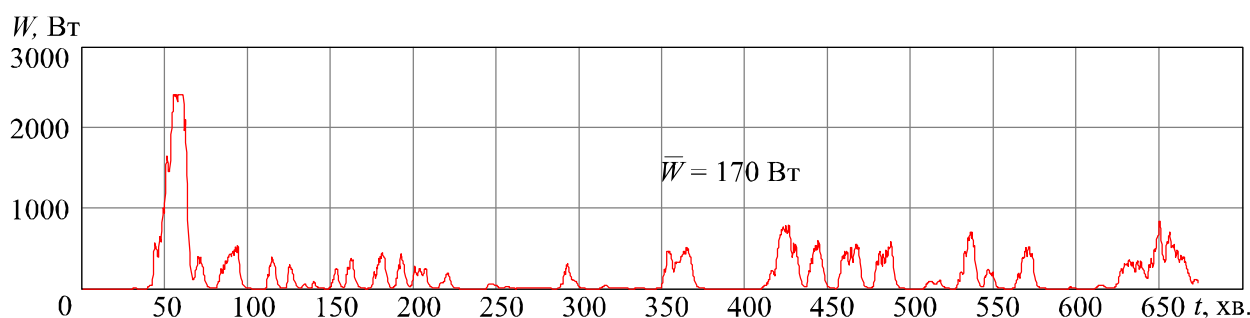


Рис. 9. Залежність електричної потужності ТЕГ від часу.

ТЕГ, оптимізований на даний режим роботи, містить ~ 250 термоелектричних модулів і розвиває середню електричну потужність 170 Вт. ККД ТЕГ при цьому становить 1.7 %. Таке низьке значення обумовлене низькими температурами вихлопного газу.

Висновки

1. Здійснено проектування термоелектричного генератора для дизельного двигуна вантажівки потужністю 330 кВт для режиму номінального навантаження двигуна та для режиму виконання стандартних завдань вантажівки.
2. Для режиму номінального навантаження двигуна показано можливість отримання в середньому ~ 1200 Вт електричної енергії від ТЕГ за ККД 2.2 %.
3. При виконанні стандартних завдань вантажівки ТЕГ розвиває середню електричну потужність 170 Вт за ККД 1.7 відсотка. Низькі значення потужності та ККД зумовлені невисокою температурою вихлопних газів вантажівки.

Література

1. Kajikawa T. and Onishi T. "Development for advanced thermoelectric conversion systems" // Proc. of 26th international conference on thermoelectrics. – 2007. – P. 353 – 361
2. Min G., Rowe D.M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22. – P. 528 – 534.
3. 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.
4. 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.
5. Crane D., Bell L. Progress Towards Maximizing the Performance of a Thermoelectric Power Generator. // Proc. ICT '06, 25th International Conference on Thermoelectrics. – Vienna (Austria). – P. 11 – 16.
6. L.I. Anatyshuk and R.V. Kuz, Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. (Berlin: Expert Verlag, 2011).
7. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // Journal of Electronic Materials. – 2011. – Vol. 40. – Issue 5. – P. 1326 – 1331.
8. Anatyshuk L.I., Kuz' R.V. Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator // Proc. of "Thermoelectrics goes automotive", Berlin, 2010.
9. Comsol multiphysics. <http://www.comsol.com>.

10. L.I. Anatyhuk and R.V.Kuz, Materials for vehicular thermoelectric generators. Journal of Electronic Materials, Volume 41, Number 6 (2012).
11. <http://www.navistar.com>.

Надійшла до редакції 20.06.2016