

УДК 537.32

Анатычук Л.И.<sup>1,2</sup>, Кузь Р.В.<sup>1</sup>



Анатычук Л.И.

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;  
<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет им. Юрия Федыковича, ул. Коцюбинського, 2, Черновцы, 58012, Украина



Кузь Р.В.

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ГРУЗОВИКОВ

---

*Приведены результаты компьютерного моделирования термоэлектрических генераторов (ТЭГ), использующих отходы тепла двигателей внутреннего сгорания грузовиков. Моделирование проведено с учетом динамических режимов работы двигателя на основе реальных записей системы мониторинга с использованием параметров действующих термоэлектрических модулей.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, двигатели внутреннего сгорания.

*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.

#### Введение

Использование отходов тепла от двигателей внутреннего сгорания является актуальной задачей. Мировые производители автомобилей, а также компании, занимающиеся термоэлектричеством, уделяют много внимания разработке эффективных автомобильных термоэлектрических генераторов [1 – 8]. Цель этого – повышение экономии топлива до 10 % за счет использования отходов тепла двигателя для генерации электрической энергии.

Самыми большими компаниями, ставящими перед собой задачу создания промышленных образцов генераторов и их серийного производства, являются компании Hi-Z, BSST и General Motors в США. В Японии подробно вопросами создания генераторов для автомобилей занимаются компании Komatsu, Nissan и Shiroki. В Германии свои разработки термоэлектрических автомобильных генераторов представили компания Volkswagen, а также совместно компания BMW и DLR (аэрокосмический центр Германии).

Причиной отсутствия широкого применения ТЭГ для автомобилей является недостаточно высокий коэффициент полезного действия генераторов. КПД генератора существенно зависит от режима работы двигателя. Динамические режимы работы двигателя при реальной езде налагают довольно сложные требования к проектированию и оптимизации автомобильных генераторов, которые в полной мере еще не удается решить в настоящее время. Одна из составных оптимизации ТЭГ – его проектирование для конкретного типа двигателя и

преобладающего режима его работы. Особое внимание привлекают грузовики с мощными двигателями и, соответственно, значительным количеством тепловых отходов.

Цель предлагаемой работы состоит в проектировании термоэлектрического генератора, утилизирующего тепло выхлопных газов грузовика. Оптимизация термоэлектрического генератора осуществляется компьютерным проектированием [9], которое состоит в следующем.

### Методика компьютерного проектирования

Рассмотрим физическую модель термоэлектрического генератора (ТЭГ), показанную на рис. 1. В общем случае ТЭГ состоит из  $N$  секций, соединенных последовательно относительно потока горячего газа и холодного теплоносителя.

Каждая секция ТЭГ состоит из таких элементов: горячий теплообменник 1; термоэлектрическая батарея 3 с тепловым сопротивлением  $R_t^{(i)}$  и коэффициентом полезного действия  $\eta(T_H, T_0)$ ; холодный теплообменник 4 с температурой  $T_0$ ; тепловое сопротивление между горячим теплообменником и термоэлектрической батареей  $R_i^{(i)}$  2, которым ограничивается температура горячей стороны модулей. Термоэлектрические батареи каждой из секций замкнуты на согласованную электрическую нагрузку  $R_i$  5.

Входной поток горячего газа характеризуется температурой  $T_H^{in}$  и тепловой мощностью  $Q_H^{in}$ . Горячий газ отдает часть тепла  $Q_H^i(x)$  при температуре  $T_{hot}^{(i)}(x)$  горячему теплообменнику. На выходе ТЭГ температура газа  $T_H^{out}$  и тепловая мощность  $Q_H^{out}$ . Из горячего теплообменника через тепловое сопротивление  $R_i^{(i)}$  тепло передается термоэлектрической батарее, нагревая ее горячую сторону до температуры  $T_H^{(i)}(x)$ .

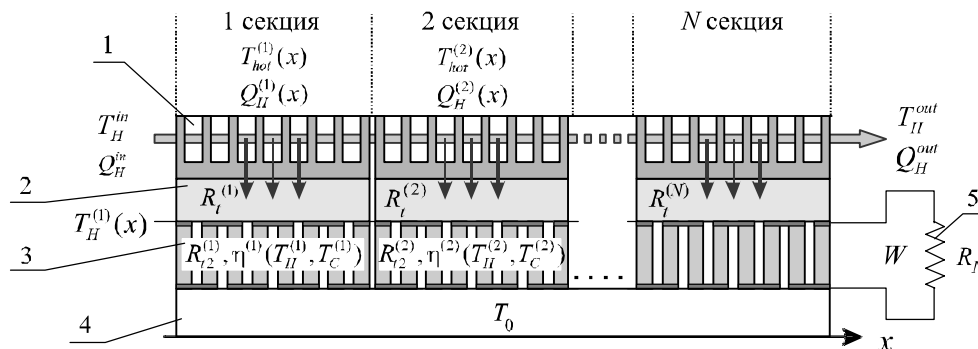


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрического генератора:

- 1 – горячий теплообменник; 2 – тепловое сопротивление между горячим теплообменником и термоэлектрической батареей; 3 – термоэлектрическая батарея;
- 4 – холодный теплообменник; 5 – согласованная электрическая нагрузка.

Для предотвращения перегрева термоэлектрических модулей дополним физическую модель байпасом, через который будет отводиться излишек выхлопного газа таким образом, чтобы поддерживать температуру модулей на максимально допустимом уровне.

Для оптимизации ТЭГ необходимо найти распределение температур и тепловых потоков в термоэлектрических батареях каждой из секций. Такой расчет для данной модели осуществлен путем применения численных компьютерных методов.

Для расчетов электрической мощности ТЭГ используем уравнение баланса энергии в виде

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

Необходимые температуры и тепловые потоки определяются из уравнения теплопроводности

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

где  $\kappa_{TE}$  – эффективная теплопроводность термоэлектрической батареи;  $Q_J$  – тепло Джоуля, которое выделяется в объеме термоэлектрической батареи.

Граничные условия для (2) будут иметь вид

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

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

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

Совокупность соотношений (1) – (5) дает возможность определить распределение температур  $T_H^{(i)}(x)$  и тепловых потоков  $Q_H^{(i)}(x)$  на каждой из секций.

Для ограничения величины горячей температуры модуля тепловое сопротивление  $R_t^{(i)}$  между горячим теплообменником и термоэлектрическим модулем определяется из уравнения (4).

Мощность каждой секции и общий КПД ТЭГ можно определить из уравнений

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

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

Система уравнений (1) – (5) решается численными методами на двухмерной сетке конечных элементов [10].

## Результаты компьютерного проектирования

Проектирование термоэлектрического генератора в динамическом режиме работы выполнено с использованием входных параметров выхлопного газа (температура и расход), полученных на выхлопной системе грузовика CAT 775F для двигателя Navistar 13L [11] мощностью 330 кВт для разных режимов работы двигателя:

- 1 – выполнение стандартных задач грузовика;
- 2 – работа двигателя грузовика при нагрузке, близкой к номинальной (обороты – 1500 RPM, крутящий момент – 1100 Н·м).

На рис. 2 приведена температура выхлопного газа, на рис. 3 – расход выхлопного газа для случая работы двигателя при номинальной нагрузке.

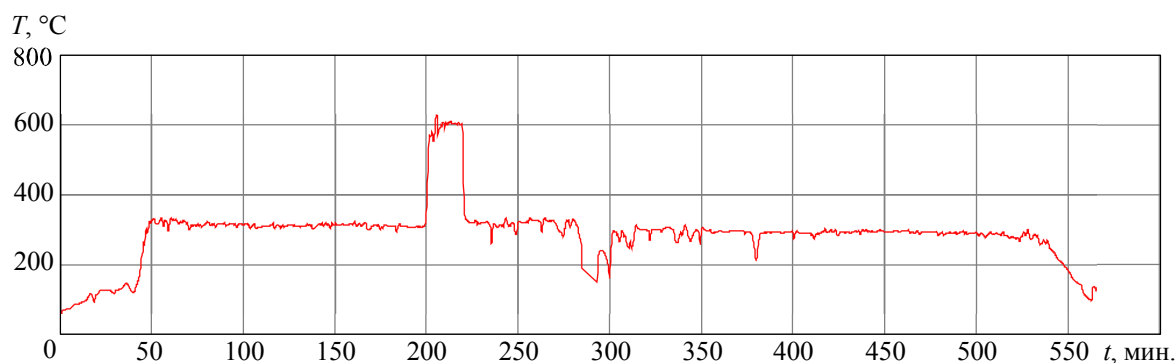


Рис. 2. Температура выхлопного газа при номинальной работе двигателя.

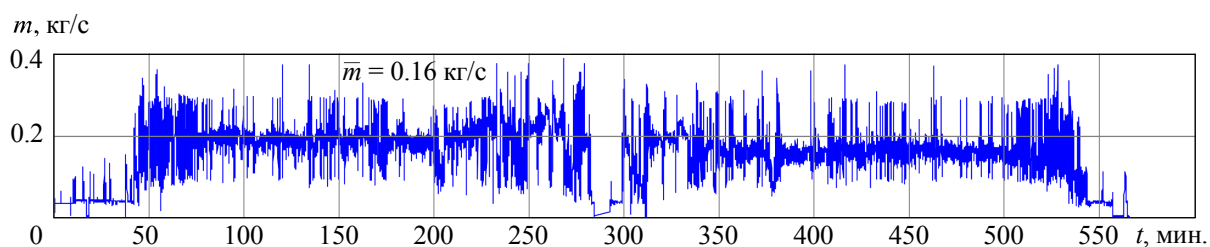


Рис. 3. Расход выхлопного газа при номинальной работе двигателя.

Для проектирования генератора были выбраны термоэлектрические модули Altec-1061 [10] на основе  $Bi-Te$ , которые по своим характеристикам превышают известные мировые аналоги.

Оптимизация конструкции генератора состояла в определении минимального количества модулей  $N$ , необходимых для достижения генератором максимальной средней электрической мощности  $\bar{W}$  за рабочий цикл, представленный на рис. 2, рис. 3. На рис. 4 приведены результаты такой оптимизации.

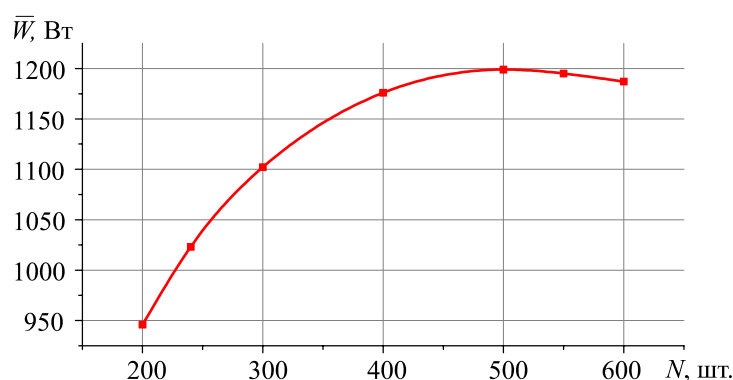


Рис. 4. Зависимость средней электрической мощности ТЭГ от количества модулей.

Можно увидеть, что для решения поставленной задачи оптимальное количество модулей должно составлять  $\sim 500$ . При отклонении от оптимального значения в меньшую сторону возможно поднять горячую температуру модулей до больших значений, но суммарная электрическая мощность ТЭГ уменьшится из-за малого количества модулей. Падение электрической мощности ТЭГ наблюдается и при отклонении от оптимального количества модулей в большую сторону. Это связано с уменьшением общего теплового сопротивления термоэлектрической батареи и, как следствие, уменьшением перепада температур на модулях.

На рис. 5 приведена зависимость температуры горячей стороны модулей от времени. Температура холодной стороны принята  $T_0 = 60$  °С.

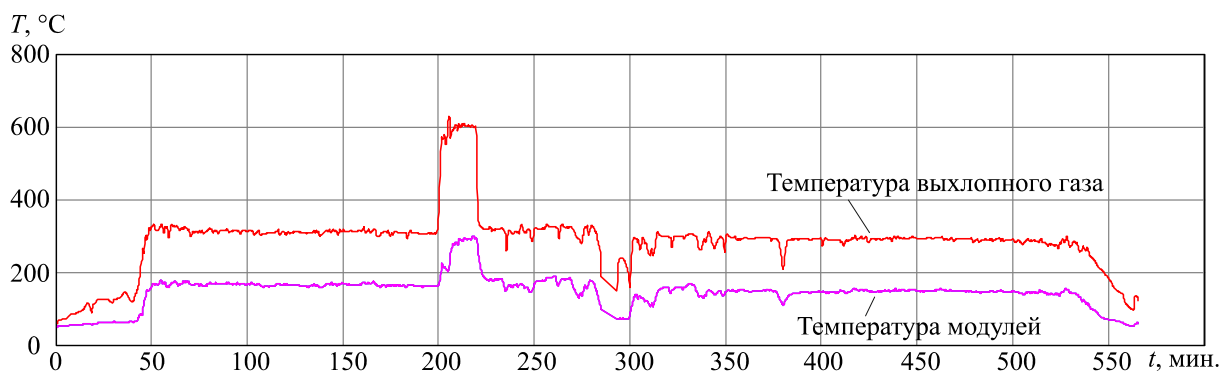


Рис. 5. Зависимость горячей температуры модулей от времени для номинальной работы двигателя.

На рис. 6 показана зависимость электрической мощности ТЭГ от времени. Средняя электрическая мощность за весь цикл составила  $\sim 1200$  Вт.

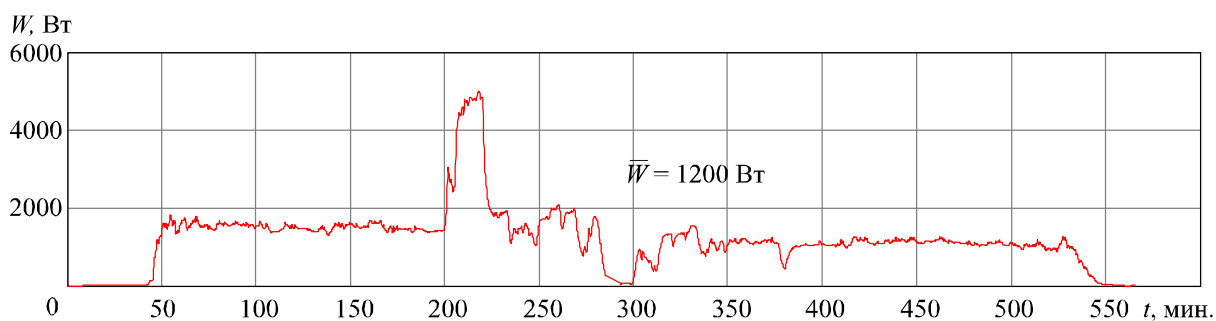


Рис. 6. Зависимость электрической мощности ТЭГ от времени для номинальной работы двигателя.

При этом средний коэффициент полезного действия термоэлектрического генератора за цикл составляет 2.2 %.

Оптимизация генератора для другого режима работы – выполнение стандартных задач грузовика – дала следующие результаты.

На рис. 7 приведен результат оптимизации средней электрической мощности ТЭГ за рабочий цикл.

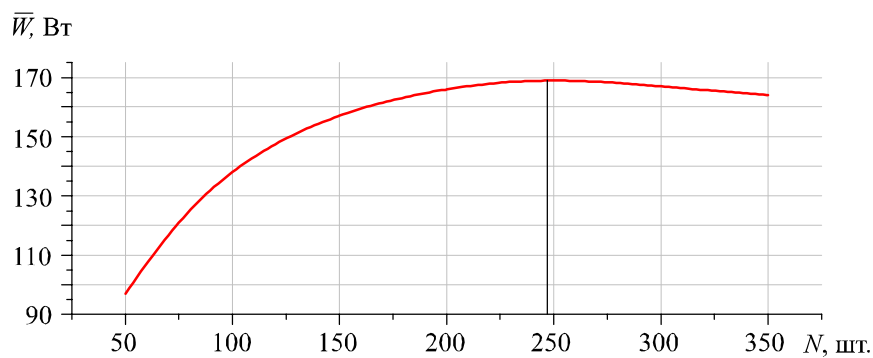


Рис. 7. Зависимость средней электрической мощности ТЭГ от количества модулей.

На рис. 8 приведена зависимость температуры горячей стороны модулей от времени при выполнении грузовиком стандартных задач. Температура холодной стороны принята  $T_0 = 60$  °С. На рис. 9 приведена электрическая мощность ТЭГ в этом режиме работы.

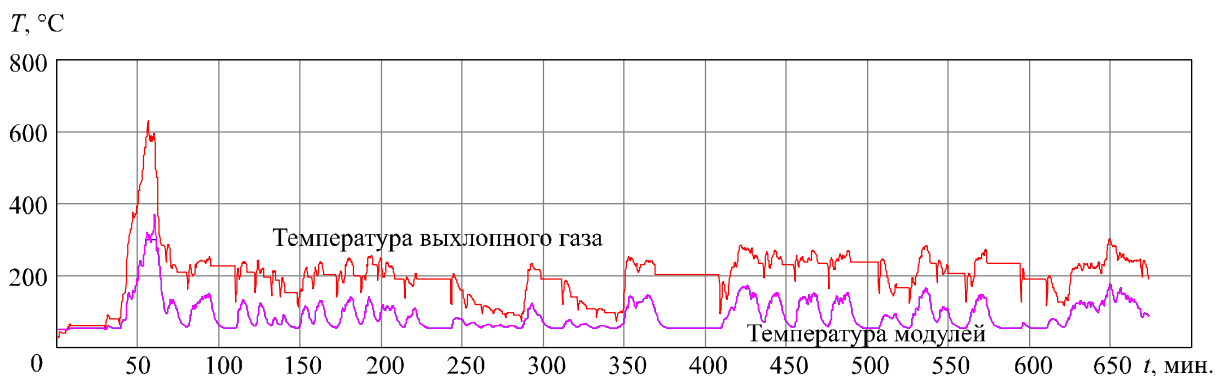


Рис. 8. Зависимость температуры газа и горячей температуры модулей от времени.

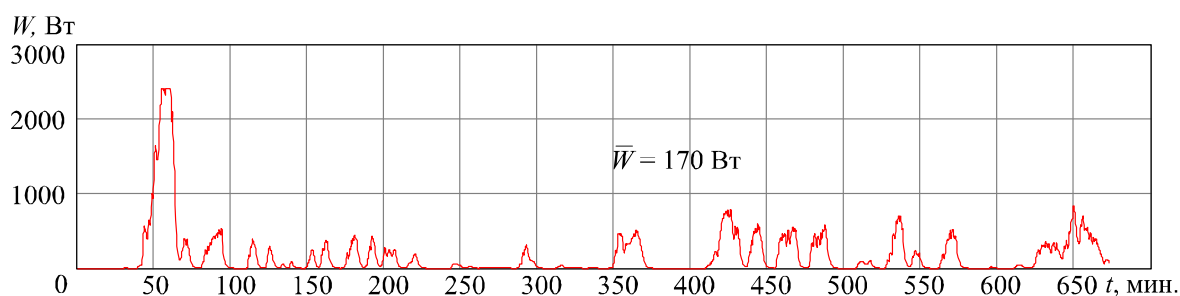


Рис. 9. Зависимость электрической мощности ТЭГ от времени.

ТЭГ, оптимизированный на данный режим работы, содержит ~ 250 термоэлектрических модулей и развивает среднюю электрическую мощность 170 Вт. КПД ТЭГ при этом составляет 1.7 %. Такое низкое значение обусловлено низкими температурами выхлопного газа.

### Выводы

1. Осуществлено проектирование термоэлектрического генератора для дизельного двигателя грузовика, мощностью 330 кВт, для режима номинальной нагрузки двигателя и для режима выполнения стандартных задач грузовика.
2. Для режима номинальной нагрузки двигателя показана возможность получения в среднем ~ 1200 Вт электрической энергии от ТЭГ при КПД 2.2 %.
3. При выполнении стандартных задач грузовика ТЭГ развивает среднюю электрическую мощность 170 Вт при КПД 1.7 процента. Низкие значения мощности и КПД обусловлены невысокой температурой выхлопных газов грузовика.

### Литература

1. Kajikawa T., 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. Anatyshuk L.I., Kuz' R.V. 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. Anatyshuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators. Journal of Electronic Materials, Volume 41, Number 6 (2012).
11. <http://www.navistar.com>.

Поступила в редакцию 20.06.16.