

**ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР
ДЛЯ БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА**

*Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Розвер Ю.Ю.
(Інститут термоелектрики, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна)*

- *Наведено результати комп'ютерного моделювання термоелектричних генераторів (ТЕГ), що використовують відходи тепла бензинових двигунів внутрішнього згорання. Моделювання проведено з урахуванням динамічних режимів роботи двигуна для реальних температурних залежностей параметрів термоелектричних матеріалів. Наведено результати експериментальних досліджень генератора, в якому використані теплові відходи від автомобільного двигуна об'ємом 1.8 л. Результати випробувань підтверджують комп'ютерне моделювання.*

Вступ

Використання відходів тепла від двигунів внутрішнього згорання в цей час є актуальним завданням термоелектрики [1 – 6]. На цю тематику опубліковано велику кількість праць. З кожним роком на міжнародних конференціях з термоелектрики зростає кількість доповідей, присвячених рекуперації тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання. Також організуються тематичні конференції в США й Німеччині, присвячені цій тематиці.

Світові виробники автомобілів, а також компанії, що займаються термоелектрикою, приділяють багато уваги розробці ефективних автомобільних термоелектричних генераторів. 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, є компанії Hi-Z [7], BSST [8] і General Motors [9] у США. У Японії найдокладніше питаннями створення генераторів для автомобілів займаються компанії Komatsu [10], Nissan [11] і Shiroki [12]. У Німеччині свої розробки термоелектричних автомобільних генераторів показала компанія Volkswagen [13], а також спільно компанія BMW і DLR (аерокосмічний центр Німеччини) [13].

Як відомо, інтерес до створення термогенераторів для автомобілів зростає. Створені дотепер зразки генераторів підтверджують можливість отримання електрики від тепла вихлопних газів, але серед розроблених генераторів ще немає таких, які б могли бути використані для їх виробництва. Причина того – 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 в цей час ще не вдається розв'язати.

В Україні проблеми створення ефективних термоелектричних генераторів для двигунів внутрішнього згорання досліджуються в Інституті термоелектрики [14]. Створено низку термоелектричних генераторів, які використовують тепло вихлопних газів як від стаціонарно працюючих дизельних установок, так і від дизельних двигунів автомобіля [15]. Як відомо, температура вихлопного газу бензинових двигунів набагато вища, ніж у дизельних, і становить близько 500 – 800°C.

Мета пропонованої праці – розробка термоелектричного генератора, який утилізує тепло

вихлопних газів від бензинового двигуна.

Оптимізація термоелектричного генератора робиться комп'ютерним проектуванням [16], 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.

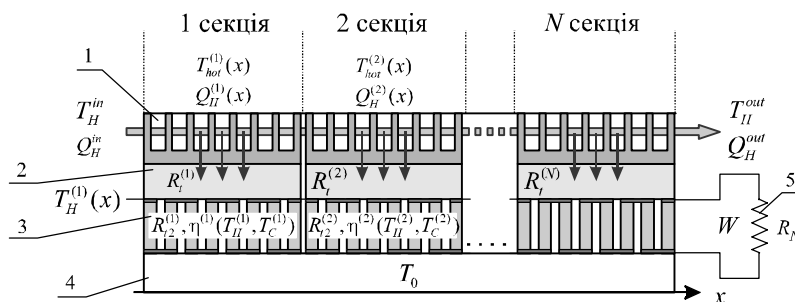


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного генератора:
 1 – гарячий теплообмінник; 2 – тепловий опір між гарячим теплообмінником і термоелектричною батареєю; 3 – термоелектрична батарея;
 4 – холодний теплообмінник; 5 – узгоджене електричне навантаження.

Кожна секція ТЕГ складається з таких елементів (рис. 1): гарячий теплообмінник (1), термоелектрична батарея (3) з тепловим опором $R_i^{(i)}$ і коефіцієнтом корисної дії $\eta(T_H^i, T_0)$; холодний теплообмінник (4) з температурою T_0 ; тепловий опір між гарячим теплообмінником і термоелектричною батареєю $R_i^{(i)}$ (3), 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 $T_H^i(x)$.

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

Для оптимізації ТЕГ необхідно знайти розподіл температур і теплових потоків у термоелектричних батареях кожної із секцій. Такий розрахунок для даної моделі здійснений 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) визначається чисельними методами на двомірній сітці кінцевих елементів [10].

Результати комп'ютерного проектування

Для проектування термоелектричного генератора в динамічному режимі роботи вхідні параметри вихлопного газу (температура і розхід) були отримані на бензиновому двигуні УМЗ-3318 (Росія) об'ємом 1.8 л у режимі роботи, що імітує їзду автомобіля за новим європейським циклом водіння (NEDC) (рис. 2). Цей цикл тривалістю 1220 с складається із двох частин. Перша частина циклу – міський їздовий цикл UDC (Urban Driving Cycle) з максимальною швидкістю руху 50 км/год включає чотири послідовні їздові цикли, які імітують умови руху автомобіля по місту. Друга частина циклу – швидкісний заміський цикл EUDC (Extraurban Driving Cycle) з максимальною швидкістю руху 120 км/год імітує умови руху автомобіля по магістралі.

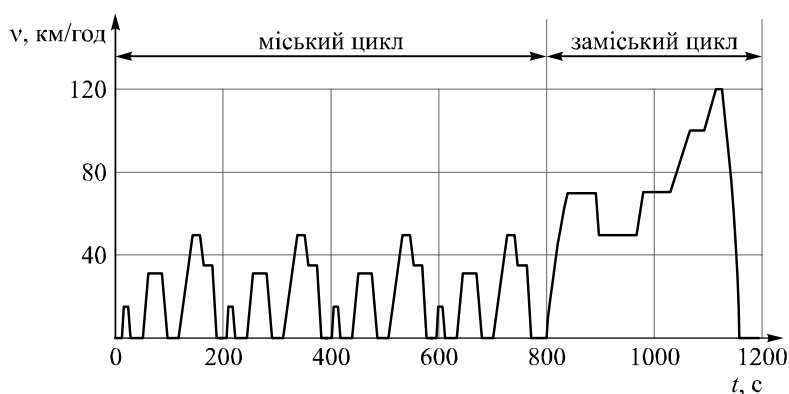


Рис. 2. Новий європейський цикл водіння (NEDC).

Для проектування генератора було обрано термоелектричні модулі Altec-1061 [17] на основі *Bi-Te*, які за своїми характеристиками перевищують відомі світові аналоги.

Оптимізація конструкції генератора складалася у визначенні мінімальної кількості модулів, необхідних для досягнення генератором максимальної середньої електричної потужності за цикл NEDC. На рис. 3. наведено результати такої оптимізації, з яких можна

побачити, що для поставленої задачі оптимальна кількість модулів становить 48. При відхиленні 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 більшу сторону. Це пов'язане зі зменшенням загального теплового опору термоелектричної батареї й, як наслідок, зменшенням перепаду температур на модулях.

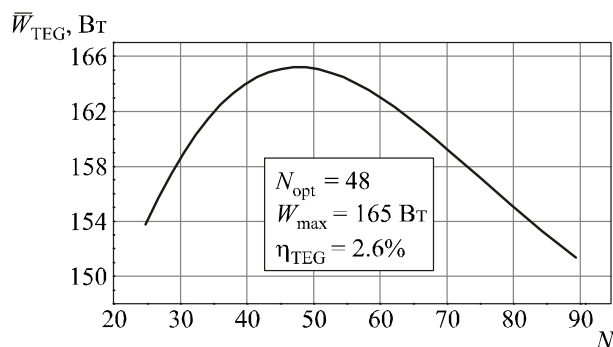


Рис. 3. Залежність середньої електричної потужності ТЕГ від кількості модулів.

На рис. 4 а наведено залежності температури гарячої сторони модулів від часу в момент роботи двигуна за циклом NEDC. Температура холодної сторони прийнята $T_0 = 60^\circ\text{C}$.

На рис. 4 б показано залежність електричної потужності ТЕГ від часу. Як можна бачити з малюнків, у діапазоні часу 1060 – 1160 с температура на модулях досягає максимально допустимого значення і включається байпас, який підтримує температуру на заданому рівні.

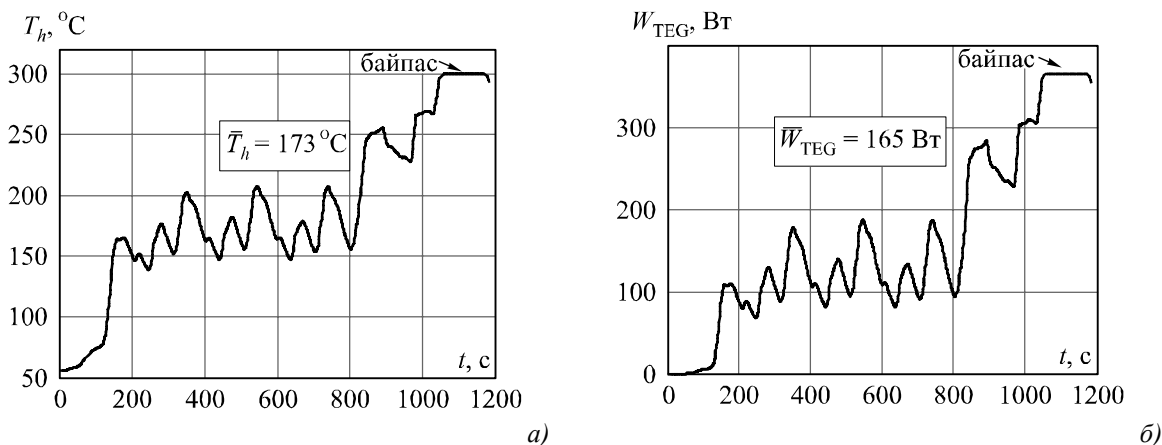


Рис. 4. Залежності температури гарячої сторони модулів (а) і електричної потужності ТЕГ (б) від часу при роботі двигуна за циклом NEDC.

У цей час електрична потужність термогенератора досягає свого максимального значення 365 Вт.

Середня електрична потужність термогенератора під час роботи двигуна за циклом NEDC становить 165 Вт, що цілком достатньо для зарядки акумулятора автомобіля.

При цьому середній коефіцієнт корисної дії термоелектричного генератора за цикл NEDC становив 2.6%.

З рис. 4 видно, що оптимізація генератора на повний цикл NEDC й істотна відмінність у температурах і потужностях газу в міському і заміському циклах водіння призводять до того, що генератор не найбільш ефективним способом перетворює теплову енергію газу в електричну.

Оптимізація генератора окремо на міський або замський цикл водіння дала такі результати. На рис. 5 а наведено залежність електричної потужності ТЕГ, оптимізованого на міський цикл водіння. Такий генератор містить 22 термоелектричних модулі і розвиває середню електричну потужність 110 Вт у міському режимі водіння. У цілому за цикл NEDC такий генератор розвиває середню електричну потужність 138 Вт. Таке низьке значення обумовлене тим, що значна частина теплової енергії йде через байпас у замській фазі циклу. На рис. 5 б наведено залежність електричної потужності ТЕГ, оптимізованого на замський режим водіння. Такий генератор містить 74 модулі й розвиває середню електричну потужність 350 Вт у замському режимі. У цілому в циклі NEDC він розвиває середню електричну потужність 162 Вт. Таке низьке значення, як можна побачити з мал. 5 б, обумовлене неефективною роботою генератора в міській фазі циклу NEDC.

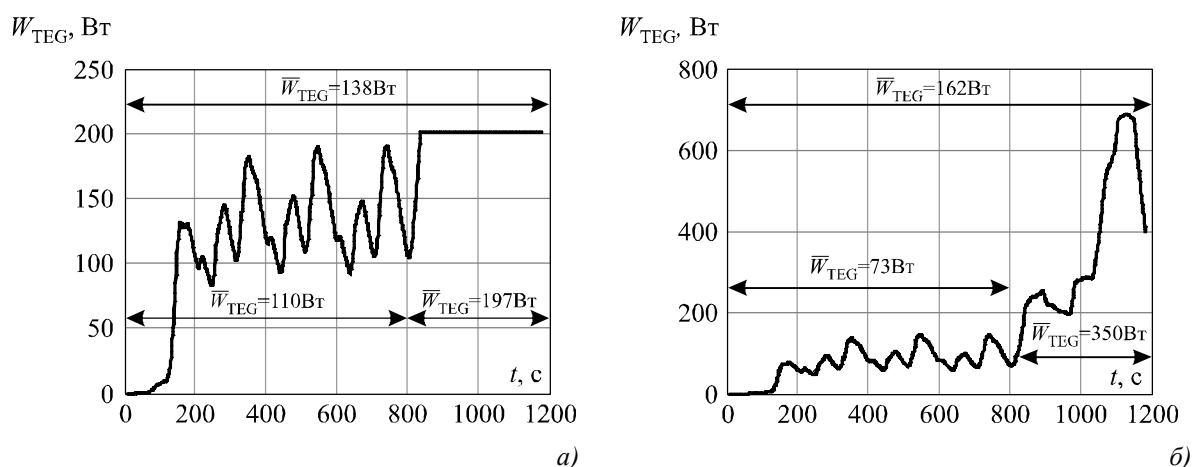


Рис. 5. Залежність електричної потужності генераторів, оптимізованих на міський (а) і замський (б) цикли водіння.

Як випливає із вищесказаного, використання одного генератора з байпасом не є оптимальним варіантом утилізації тепла вихлопних газів двигуна під час його роботи в динамічному режимі. В інтервалі часу $0 \div 800$ с проходження циклу NEDC гаряча температура

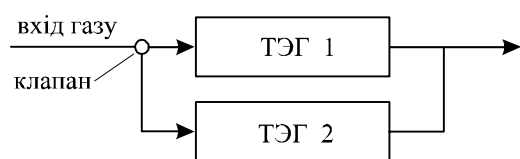


Рис. 6. Модель з двома генераторами.

модулів є значно нижчою від максимально припустимої. Відповідно модулі працюють із низьким коефіцієнтом корисної дії. Звідси можна зробити висновок, що ефективнішою буде модель, що містить 2 генератори, оптимізованих відповідно на роботу в міському й замському циклах (рис. 6). За низьких температур і потужностей вихлопного газу в роботу буде включений тільки ТЕГ 1. З досягненням на модулях ТЕГ максимально допустимої температури за допомогою клапана частина газу буде відведена на ТЕГ 2.

Результати оптимізації такої моделі наведено на рис. 7. Для цього випадку ТЕГ 1 містить 22 термоелектричних модулі, ТЕГ 2 – 52 модулі.

З рис. 7 видно, що у такій моделі гаряча температура модулів ТЕГ 1 знаходиться в області оптимальних температур і ТЕГ 1 працює з максимальною ефективністю. У фазі циклу NEDC, яка відповідає замському режиму, частина вихлопних газів відводиться до ТЕГ 2. Середня електрична потужність такої системи становить 205 Вт, що на 25% більша, ніж для

моделі, у якій використовується один генератор з байпасом. Максимальна потужність генератора становить 675 Вт.

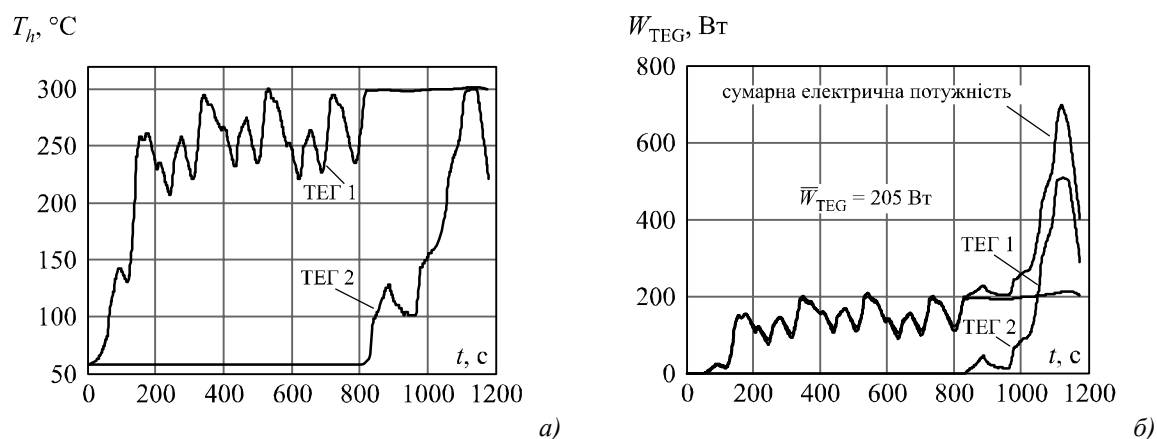


Рис. 7. Залежності температури гарячої сторони модулів (а) і електричної потужності (б) двох генераторів від часу роботи двигуна по циклу NEDC.

Випробування термоелектричного генератора

За результатами комп'ютерного проектування було сконструйовано термоелектричний генератор, що містить 74 термоелектричних модулів Altec-1061, гарячі газові теплообмінники й холодні рідинні теплообмінники.

Для випробувань генератора створено стенд, у якому використано чотирициліндровий бензиновий двигун об'ємом 1.8 л. Подача вихлопного газу від циліндрів у термоелектричний генератор забезпечена спеціальним колектором з нержавіючої сталі.

На стенді реєструється:

- температура вхідних газів у генератор $\pm 5^\circ\text{C}$;
- температура вихідних газів з генератора $\pm 3^\circ\text{C}$;
- температура на поверхні кожного теплообмінника на його початку і кінці $\pm 13^\circ\text{C}$;
- температура вхідної охолодної води;
- температура холодної води, що виходить $\pm 0.3^\circ\text{C}$;
- витрати газу, $\text{к/с} \pm 5\%$;
- тиск газу, що входить в генератор $\pm 5\%$;
- тиск газу, що виходить з генератора $\pm 5\%$;
- число обертів двигуна $100 \div 5300$ об/хв. $\pm 5\%$;
- ЕРС ТЕГ ± 0.1 В;
- електричний струм на узгодженому навантаженні за послідовно включених модулів ± 0.05 А;
- електрична потужність на узгодженому навантаженні за послідовно включених модулів $\pm 0.5\%$;
- електрична потужність на узгодженому навантаженні з використанням електронного перетворювача з виходом 12 В $\pm 1\%$.

Навантажувальними опорами підбирається їх оптимальна величина для досягнення максимальної електричної потужності ТЕГ.

Результати випробувань термоелектричного генератора в стаціонарному режимі роботи на максимальній потужності двигуна наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметр	Значення
Температура вихлопного газу, °С	740 – 770
Витрати вихлопного газу, кг/год	< 200
Теплова потужність вихлопного газу, кВт	< 50
Температура охолодної рідини на вході, °С	+ 60
Температура охолодної рідини на виході, °С	+ 80 ÷ 90
Електрична напруга з перетворенням, В	12 ± 1
Струм, А	51 ± 1
Електрична потужність, Вт	630 ± 20
Електрична потужність із електронним перетворенням, Вт	540 ± 20
Маса, кг	26
Тиск газу на вході генератора, МБар	10
Тиск газу на виході генератора, МБар	7

З отриманих результатів видно, що величина електричної потужності термоелектричного генератора добре узгоджується з результатами, отриманими комп'ютерним моделюванням.

Висновки

1. Здійснено проектування термоелектричного генератора для бензинового двигуна, об'ємом 1.8 л. Для стаціонарного режиму роботи з результатів проектування показано можливість одержання до 675 Вт електричної енергії. Для роботи двигуна за циклом NEDC середня електрична потужність ТЕГ становить ~ 165 Вт для моделі з одним генератором з середнім ККД – 2.6% і 205 Вт з ККД 3.2% для моделі із двома генераторами.

2. Експериментально підтверджено отримані результати проектування. У стаціонарному режимі роботи двигуна здобуто близько 630 Вт електричної енергії. З урахуванням електронного перетворення напруги здобуто 540 Вт електричної енергії.

3. Використання одного термоелектричного генератора не є оптимальним способом перетворення теплової енергії вихлопного газу в динамічному режимі роботи, тому що температура гарячої сторони модулів значно нижча, ніж робоча, що призводить до їх неефективного використання. Для циклу NEDC середня електрична потужність ТЕГ становить близько 45% максимальної потужності генератора.

4. Використання моделі із двома генераторами, оптимізованими на міський і заміський режим водіння, відповідно дає можливість отримати на ~ 25% більше електричної потужності порівняно з моделлю, у якій використовується тільки один генератор.

Література

1. Anatyshuk L.I., Rozver Yu.Yu., Misawa K., Suzuki N. “Thermal generators for waste heat utilization” // in Proc. of 16th International conference on thermoelectrics, 1997, p. 586-587.

2. Kajikawa T. and Onishi T. "Development for advanced thermoelectric conversion systems" // in Proc. of 26th international conference on thermoelectrics, 2007, p. 353-361
3. Clay W. Maranville, Peter Schmitz. Thermoelectrics for Waste Heat Recovery and Climate Control in Automobiles. In Thermoelectrics goes automotive. Expert Verlag, Germany, p. 1-15.
4. Min G., Rowe D.M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Vol. 22. – p. 528-534.
5. 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.
6. 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.
7. Elsner N., Bass J., Ghamaty S., Krommenhoek D., Kushch A., Snowden D. Diesel Truck Thermoelectric Generator. // Advanced Combustion Engine Technologies. – FY 2005 Progress Report. – p. 301-305.
8. 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.
9. Jihui Yang, F. Seker, R. Venkatasubramanian, G.S. Nolas, C. Uher, H. Wang. Developing Thermoelectric Technology for Automotive Waste Heat Recovery // Advanced Combustion Engine Technologies. FY 2006 Progress Report. – p. 227-231.
10. Кадзикава Т. Современное состояние технологии термоэлектрического генерирования энергии в Японии / Т. Кадзикава // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 21 – 31.
11. Ikoma K., Munekiyo M., Furuya K., Kobayashi M., Izumi T., Shinohara K. Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles // Proc. ICT'98. XVII International Conference on Thermoelectrics. – Nagoya (Japan) 1998. – p. 464-467.
12. Takanose E., Tamakoshi H. The Development of thermoelectric generator for passenger car // Proc. 12th International Conference on Thermoelectrics. – Yokohama (Japan). – 1993. – p. 467-470.
13. «Thermoelektrik-Eine Chance Fur Die Atomobillindustrie», Берлин, 2008 г.
14. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles // Journal of Electronic Materials, Vol. 40, Issue 5, p. 1326-1331, 2011.
15. Anatyshuk L.I., Kuz' R.V. Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator // Proc. of "Thermoelectrics goes automotive", Berlin, 2010.
16. Comsol multiphysics. <http://www.comsol.com>.
17. Anatyshuk L.I., Kuz' R.V. Materials for vehicular thermoelectric generators // Proc. of ICT-2011, Michigan, USA.

Надійшла до редакції 02.02.2012.