

УДК 536



Кузь Р.В.

Кузь Р. В. канд. фіз.-мат. наук

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com

ТЕОРІЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ВІДХОДИ ТЕПЛА НА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

У роботі наводяться результати аналізу теоретичних робіт, що стосуються використання термоелектричних генераторів для транспортних засобів з метою отримання додаткової електричної енергії і, відповідно, економії палива. Розглянуто тенденції розвитку і сучасний стан розробки таких генераторів. Бібл. 21.

Ключові слова: термоелектричний генератор, двигун внутрішнього згорання, утилізація тепла.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Застосування термоелектричних генераторів (ТЕГ) для утилізації тепла двигунів внутрішнього згорання з метою отримання електричної енергії протягом останніх трьох десятиріч залишається предметом підвищеного інтересу з боку автомобільної індустрії та спеціалістів, що займаються термоелектрикою.

Метою роботи є аналіз існуючих досягнень у проектуванні та створенні термоелектричних генераторів для автотранспорту і визначення перспектив у розвитку та проектуванні таких генераторів.

Основні теорії проектування ТЕГ для транспортних засобів

Число публікацій, що містять інформацію з теорії проектування і оптимізації термоелектричних генераторів для транспортних засобів становить незначну частину від загального числа робіт, присвячених термоелектричним генераторам для транспортних засобів. Нижче наведено основні результати теоретичних досліджень.

U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory [1, 2]

Дослідження, виконане Хендріксом і Лустбадером для різного класу вантажівок. Допущення моделі: розглянуто одновимірну модель ТЕГ; температура гарячих вихлопних газів – 700°C. Зроблено спробу оптимізації компонентів системи шляхом врахування контактних теплових і електричних опорів у елементах ТЕГ. Проаналізовано питому вартість термогенератора у залежності від його електричної потужності. Показано, що вона зменшується при збільшенні вихідної потужності ТЕГ завдяки зниженню питомої вартості системи відводу тепла і у розглянутій моделі прямує до величини 10 \$/W.

Інститут ім. Байкова, Росія [3]

Проведено ряд теоретичних робіт, де аналізуються причини неефективності термоелектричного генератора (ТЕГ) для двигуна внутрішнього згорання. Розглядається конфлікт системи «двигун-ТЕГ». Робляться висновки про нульову ефективність ТЕГ зокрема через наявність додаткового зворотнього тиску у системі, додаткової маси та необхідності у додатковій системі охолодження ТЕГ. У розглянутій моделі економічна ефективність ТЕГ є нульовою через зниження ККД самого двигуна при встановленні ТЕГ.

Технологічний університет Chalmers, Швеція [4]

Розглянуто комп'ютерну тривимірну нестационарну модель термоелектричного генератора для дизельного двигуна. В моделі детально розраховуються потоки вихлопного газу в генераторі та потоки охолоджуючої рідини. Пропонується використання даної моделі для оптимізації конструкції теплообмінників, підбору оптимальних термоелектричних матеріалів, визначення впливу генератора на роботу двигуна. У даній роботі про не зроблено висновків економічну ефективність ТЕГ.

Department of Mechanical Engineering, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ, USA [5]

Метою роботи було визначити вплив наступних параметрів на ефективність ТЕГ: довжини гілок термоелементів, розмірів каналів теплоносіїв, співвідношення електропровідності і теплопровідності матеріалів; чисел Рейнольдса, Нуссельта й Прандтля Re , Nu , Pr ; безрозмірної термоелектричної добротності матеріалів термоелементів ZT .

Використані наближення теорії. Модель одномірна. Потоки тепла уздовж напрямку руху теплоносіїв не враховувалися, фізичні властивості матеріалів передбачалися не залежними від температури. Втрати тепла в елементах конструкції, у комутації, на перехідних термічних опорах не враховувалися. Не враховувалися також втрати в електричній комутації. Масова витрата обох теплоносіїв передбачалася однаковою.

Модель не підтверджена, так як давала розбіжність теоретичних розрахунків і експериментальних вимірів на 40-50%.

Університет North China Electric Power, Китай [6]

Багатопараметрична модель включає гарячий та холодний теплообмінники та термоелектричні модулі. Фактично змодельовані джерело тепла вихлопних газів і водяного охолодження радіатора. Акцент зроблений на нерівномірності різниці температур на термоелектричних блоках уздовж потоку газів.

Зроблено висновки про можливість зменшення об'єму термоелектричного матеріалу при оптимізації конструкції ТЕГ.

Через значні допущення й спрощення отримані результати мало придатні для проектування генераторів. Модель не дає можливості зробити висновки про економічну доцільність генератора.

Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, USA [7]

У роботі Крейна й Джексона розглянуто схему ТЕГ з перпендикулярними напрямками потоків теплоносіїв у гарячому повітряному й холодному рідинному контурах теплообмінника. Рідинний контур використовує рідину системи охолодження двигуна автомобіля.

Метою роботи була одночасна оптимізація геометрії теплообмінника й термоелектричних модулів. Процедура оптимізації містила: теоретичне моделювання на основі загальновідомих теорій конвективного теплообміну та термоелектричного перетворення енергії; чисельний аналіз, експериментальну перевірку й остаточну оптимізацію на рівні всієї системи за вартістю одиниці електричної потужності.

Використані такі допущення. Площини посередині перегородок між сусідніми каналами є адіабатичними границями для потоків тепла. Це дозволило провести аналіз усього теплообмінника на основі розгляду одного каналу. Тепло Томсона, як і в моделі Бетанкура, приймається нехтовно малим. Фізичні властивості матеріалів не залежні від температури. Ураховувався тільки конвективний теплообмін теплоносіїв з теплообмінником. В енергетичному балансі ТЕГ враховані потужності вентилятора, повітряного контуру й рідинного насоса. Передбачалося, що в термоелектричних модулях використаний матеріал Bi_2Te_3 .

Основні результати роботи. Одномірна модель Бетанкура узагальнена на випадок непаралельних потоків теплоносіїв. Показана можливість одержання питомої потужності 40 Вт/літр гарячої рідини й максимальної вартості 1.1 кВт/\$10000.

Clarkson University, Potsdam, NY, USA [8]. Керрі розробив і досліджував модель ТЕГ, що використовує тепло вихлопних газів. В основу моделі покладене використання модулів Ni-Z 20. Гарячий теплоносій – вихлопні гази, холодний – вода контуру радіатора автомобіля.

Математично модель описується системою чотирьох нелінійних рівнянь, що розв'язуються комп'ютерними засобами. Отримані результати досить точні, однак не дають інформацію щодо оптимізації ТЕГ. Моделювання зводиться до одержання значень, які більш точно можуть бути знайдені експериментальним шляхом. Модель не дає результатів економічної ефективності генератора.

Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology Rochester, NY, USA [9]

Моделі Бетанкура, Керрі, Крейна й Джексона були використані й удосконалені в роботі Сміта.

Смітом проаналізовано більш складну схему секційного ТЕГ. Потік гарячого теплоносія створює перепади температур у термоелектричних модулях трьох секцій. У моделі передбачається, що кожна секція має різне число модулів. Такі секційні ТЕГ досліджено з модулями Ni-Z і Melcoг шляхом комп'ютерного моделювання й оптимізації.

Розглянуто 32 комбінації числа секцій (від 1 до 3) і числа модулів у секції. Враховувалися температурні залежності параметрів модулів, задані емпіричними лінійними функціями середньої температури модуля.

Результати моделювання перевірялися експериментально на макеті ТЕГ.

Експерименти відрізнялися від результатів комп'ютерного моделювання на 30-40 %, що знижує цінність такого моделювання. Вартість генератора у даній моделі оцінюється біля 10 \$/W.

Інститут термоелектрики, Україна [10 – 21]

Проведено ряд комплексних досліджень термоелектричних генераторів для автотранспорту, що впливають із опису фізики термоелектричного генератора і дають головне – інформацію для визначення оптимальних моделей термоелектричних генераторів.

Найперші розрахунки виконано на моделі ТЕГ з зосередженими параметрами. Вона дозволяє виявити найбільш загальні закономірності ТЕГ. Ця модель містить локальний теплообмінник нескінченної теплопровідності і з нескінченно великим коефіцієнтом теплообміну. За такої умови газ входить в теплообмінник і залишає його при температурі, яка дорівнює температурі теплообмінника. З теплообмінника тепло переноситься в термоелектричний перетворювач, гаряча температура якого дорівнює температурі газу. Це означає, що в моделі не враховуються втрати тепла при його перенесення з теплообмінника до термоелектричного перетворювача і при передачі тепла від газу до теплообмінника. У термоелектричному перетворювачі тепла енергія частково перетворюється в електричну, а інша частина передається до термостата. Важливим висновком є те, що максимальне значення ККД ТЕГ досягається при певному оптимальному значенні температури теплообмінника, яка складає половину різниці температур гарячого газу і холодного термостата. Це є головний висновок, який дозволяє проводити оптимальне проектування термоелектричного генератора для автомобіля. Виходячи з температур вихлопних газів для різних типів двигунів можна зробити оцінку температури термоелектричного перетворювача. Проаналізувавши середні температури вихлопних газів для бензинового та дизельного двигунів зроблено висновок, що найбільш прийнятна величина температури для бензинового двигуна на гарячій стороні термоелектричного модуля складає всього 300-350°C, а для дизельного двигуна тільки 200-250°C.

Такі результати є зрозумілими, оскільки вони є наслідком двох конкуруючих факторів – покращення ККД модулів при зростанні гарячої температури та зменшення ККД при збільшенні теплової потужності, що проходить через ТЕГ внаслідок спаду гарячої температури.

Отримані результати спростовують загальноприйнятну думку про те, що в автомобільних термоелектричних генераторах слід використовувати високотемпературні матеріали, а також обмежують перелік матеріалів, відомих у даний час, придатних для використання в автомобільних термоелектричних генераторах.

Наступним важливим кроком є аналіз секційних генераторів. У такій моделі секції послідовно відбирають тепло від вихлопного газу. Секції оптимізовані по температурних умовах та конкретних використаних матеріалах у секціях. З аналізу такої моделі отримано наступну важливу інформацію: кількість секцій раціонально застосовувати не більше трьох; використання секцій може збільшити ефективність ТЕГ в 1.3 – 1.4 рази. Тому використання секцій має бути предметом аналізу в кожному конкретному випадку, оскільки секційний генератор набагато складніший по конструкції, і, відповідно, дорожчий.

Неведені вище результати відносяться до стаціонарного режиму роботи ТЕГ, коли вихлопний газ стабільний по температурі та тепловій потужності. Насправді в автомобілях в реальних режимах експлуатації ці умови не виконуються. Ще одним важливим результатом, отриманим в Інституті термоелектрики, є аналіз роботи ТЕГ у нестационарних режимах роботи. Комп'ютерне моделювання реальних теплових умов показує, що усереднена потужність генераторів орієнтовно у 4 рази нижча по відношенню до максимальної.

Висновки

1. Проектування автомобільних термоелектричних генераторів у більшості випадків є емпіричним. Проектування засноване на переборі різних варіантів компонентів моделі з метою знаходження найкращого. Однак, такі підходи не виявляють загальних

закономірностей, якими описуються ТЕГ, що знижує можливості знаходження оптимальних конструкцій.

2. Усі теоретичні моделі розрахунку потужності ТЕГ для транспортних засобів дають похибку біля 30-40 %, що змушує шукати нові підходи до проектування таких ТЕГ.
3. Питома вартість ТЕГ для транспортних засобів до цього часу залишається високою. Надія на їх впровадження залишається тільки за умови значного їх здешевлення.
4. Необхідним є комплексний підхід до проектування термоелектричного генератора, який буде

Література

1. T. J. Hendricks and J. A. Lustbader, "Advanced Thermoelectric Power System Investigations for Light-Duty and Heavy Duty Applications: Part 1," in 21st International Conference on Thermoelectrics, 2002, pp. 381-386.
2. T. J. Hendricks, "Optimum Design Parameters in Two-Stage Thermoelectric Generators," Proceedings of 23rd Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference, Denver, CO, Vol. 1, pp. 339-345, 1988.
3. М.А. Korzhuev, Т.Е. Svechnikova. Thermodynamic restrictions for the net power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport // Journal of Thermoelectricity №3, 2013.
4. Olle Hugblom, Ronnie Andersson. CFD Modeling of Thermoelectric Generators in Automotive EGR-coolers. // 9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc. 1449, 497-500 (2012); doi: 10.1063/1.4731602.
5. A. Bethancourt, R. Echigo, and H. Yoshida, "Thermoelectric Conversion Analysis in a Counter-flow Heat Exchanger," AIP Conference Proceedings, vol. 316, pp. 299-304, 1995.
6. Jing-Hui Meng, Xiao-Dong Wang, Wei-Hsin Chen. Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery // Energy Conversion and Management 120 (2016) 71–80.
7. D. T. Crane and G. S. Jackson, "Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery," Energy Conversion and Management, vol. 45, pp. 1565-82, 06 2004.
8. M. Karri, "Modeling of an Automotive Exhaust Thermoelectric Generator," in Mechanical Engineering. vol. Masters of Science Potsdam, NY: Clarkson University, 2005, p. 163.
9. Kevin D. Smith. An Investigation into the Viability of Heat Sources for Thermoelectric Power Generation Systems: Thesis for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering: February 2009. Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology.
10. 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, 2011.
11. L.I. Anatyshuk and R.V. Kuz, Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. Thermoelectrics goes automotive. (Berlin: Expert Verlag, 2011).
12. L.I. Anatyshuk and R.V.Kuz, Materials for vehicular thermoelectric generators. Journal of Electronic Materials, Volume 41, Number 6 (2012).
13. Л.І. Анагичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Ефективність термоелектричних рекуператорів тепла вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання // Термоелектрика, №4. - 2011. - С. 78-83.
14. Л.І. Анагичук, Р.В. Кузь, Ю.Ю. Розвер. Термоелектричний генератор для бензинового двигуна // Термоелектрика, №2. - 2012. - С. 93-100.

15. Кузь Р.В. Система моніторингу параметрів движущогося автомобіля // Термоелектричество, №4. - 2012. - С. 89-94.
16. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора дизельного автомобіля // Термоелектрика, №2. - 2014. - С. 60-67.
17. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність термоелектричного генератора автомобіля з бензиновим двигуном // Термоелектрика, №3. - 2014. - С. 87-91.
18. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність секційного термоелектричного генератора для автомобіля з дизельним двигуном // Термоелектрика, №4. - 2014. - С. 81-87.
19. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Вплив повітряного охолодження на ефективність секційного термоелектричного генератора для автомобіля з бензиновим двигуном // Термоелектрика, №5. - 2014. - С. 49-54.
20. L.I. Anatyshuk, R.V. Kuz. / Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876 / Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876. (ECT-2014), Madrid.
21. Анагичук Л.І., Кузь Р.В. Термоелектричний генератор для вантажівок // Термоелектрика, №3. - 2016. - С. 5-10.

Надійшла до редакції 01.04.2020

Кузь Р.В. канд. физ.-мат. наук

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatysh@gmail.com

ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОТХОДЫ ТЕПЛА НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

В работе приводятся результаты анализа теоретических работ, касающихся использования термоэлектрических генераторов для транспортных средств с целью получения дополнительной электрической энергии и, соответственно, экономии топлива. Рассмотрены тенденции развития и современное состояние разработки таких генераторов. Библ. 21.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, двигатель внутреннего сгорания, утилизация тепла.

Kuz R.V. cand. phys. - math. Sciences

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatysh@gmail.com

THEORY AND DESIGN OF THERMOELECTRIC GENERATORS USING WASTE HEAT ON VEHICLES

The paper presents the results of the analysis of theoretical works concerning the use of thermoelectric generators for vehicles in order to obtain additional electricity and, accordingly, fuel saving. The trends and current state of development of such generators are considered. Bibl. 29.

Key words: thermoelectric generator, internal combustion engine, heat recovery.

References

1. Hendricks T.J. and Lustbader J.A. (2002). Advanced thermoelectric power system investigations for light-duty and heavy duty applications: Part 1," in *21st International Conference on Thermoelectrics*, 381-386.
2. Hendricks T.J. (1988). Optimum design parameters in two-stage thermoelectric generators. *Proc. 23rd Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference* (Denver, CO), Vol. 1, 339-345.
3. Korzhuev M.A., Svechnikova T.E. (2013). Thermodynamic restrictions for the net power of automotive thermoelectric generators and prospects of their use in transport. *J. Thermoelectricity*, 3.
4. Hugblom Olle, Andersson Ronnie (2012). CFD modeling of thermoelectric generators in automotive EGR-coolers. *9th European Conference on Thermoelectrics AIP Conf. Proc.* 1449, 497-500; doi: 10.1063/1.4731602.
5. Bethancourt A., Echigo R., and Yoshida H. (1995). Thermoelectric conversion analysis in a counter-flow heat exchanger. *AIP Conference Proc.*, vol. 316, 299-304.
6. Mewng Jing-Hui, Wang Xiao-Dong, Chen Wei-Hsin (2016). Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 120, 71-80.
7. Crane D.T. and Jackson G.S. (2004). Optimization of cross flow heat exchangers for thermoelectric waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 45, 1565-82.
8. Karri M.M. (2005). Modeling of an automotive exhaust thermoelectric generator. *Mechanical Engineering. vol. Masters of Science Potsdam*. NY: Clarkson University.
9. Kevin D. Smith (2009). An investigation into the viability of heat sources for thermoelectric power generation systems: *Thesis for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering*. Department of Mechanical Engineering Rochester Institute of Technology.
10. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Kuz R.V. (2011). Theoretical and experimental studies of thermoelectric generator for vehicles. *J. Electronic Materials*, 40(5).
11. Anatyshuk L.I. and Kuz R.V. (2011). Computer designing and test results of automotive thermoelectric generator. *Thermoelectrics goes automotive*. (Berlin: Expert Verlag, 2011).
12. Anatyshuk L.I. and Kuz R.V. (2012). Materials for vehicular thermoelectric generators. *J. Electronic Materials*, 41 (6).
13. Анатичук L.I., Kuz R.V. Rozver Yu.Yu (2011). Efficiency of thermoelectric recuperators of exhaust gas heat from internal combustion engines. *J. Thermoelectricity*, 4, 78-83.
14. Anatyshuk L.I., Kuz R.V., Rozver Yu.Yu. (2012). Thermoelectric generator for petrol engine. *J. Thermoelectricity*, 2, 93-100.
15. Kuz R.V. (2012). Moving vehicle parameters monitoring system. *J. Thermoelectricity*, 4, 89-94.
16. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of thermoelectric generator in a diesel engine car. *J. Thermoelectricity*, 2, 60-67.
17. Anatyshuk L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of thermoelectric

- generator in a car with a petrol engine. *J.Thermoelectricity*, 3, 87-91.
18. Anatyчук L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of sectional thermoelectric generator in a car with a diesel engine. *J.Thermoelectricity*, 4, 81-87.
 19. Anatyчук L.I., Kuz R.V. (2014). Effect of air cooling on the efficiency of sectional thermoelectric generator for a car with a petrol engine. *J.Thermoelectricity*, 5, 49-54.
 20. Anatyчук L.I., Kuz R.V. Materials Today: Proceedings 2 (2015) 871 - 876 (*ECT-2014*), Madrid.
 21. Anatyчук L.I., Kuz R.V. (2016). Thermoelectric generator for trucks. *J.Thermoelectricity*, 3, 5-10.

Submitted 01.04.2020