УДК 629.33:621.362:004.94

В.І. Павлюк, Ю.В. Булік
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У СИСТЕМАХ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Розглянуто особливості застосування термоелектричних модулів типу TEG (Thermoelectric Generator) і TEC (Thermoelectric Cooler) у системах автомобільного транспорту. Проаналізовано основні напрями використання термоелектричних модулів для утилізації теплових втрат, термостабілізації електронних компонентів та підтримання температурних режимів окремих систем транспортного засобу. Застосовано підходи до моделювання теплових та електричних процесів роботи термоелектричних модулів із використанням експериментальних досліджень, цифрових моделей і комп'ютерної симуляції. Визначено перспективи застосування TEG і TEC у системах автомобільного транспорту в умовах підвищення вимог до енергоефективності та розвитку електромобільності.

Ключові слова: *термоелектричний модуль, TEG, TEC, автомобільний транспорт, комп'ютерне моделювання, цифрова модель, енергоефективність, теплові процеси*

The features of applying thermoelectric modules of the TEG (Thermoelectric Generator) and TEC (Thermoelectric Cooler) types in automotive transport systems are considered. The main areas of thermoelectric module application for waste heat recovery, thermal stabilization of electronic components, cooling, and maintaining temperature conditions of individual vehicle systems are analyzed. Approaches to modeling thermal and electrical processes of thermoelectric module operation using experimental studies, digital models, and computer simulation are applied. The prospects for the application of TEG and TEC in automotive transport systems under increasing energy efficiency requirements and the development of electric mobility are determined.

Key words: *thermoelectric module, TEG, TEC, automotive transport, computer modeling, digital model, energy efficiency, thermal processes*

Постановка проблеми у загальному вигляді

Актуальність застосування термоелектричних модулів в автомобільному транспорті зумовлена передусім підвищенням вимог до енергоефективності. Особливістю застосування термоелектричних модулів є потреба у компактних системах. Термоелектричні генератори TEG (Thermoelectric Generator) використовуються для утилізації теплових втрат шляхом їх перетворення в електричну енергію, а модулі типу TEC (Thermoelectric Cooler) – для систем терморегулювання локальних об'єктів. Доцільність використання термоелектричних генераторів на транспортних засобах з двигунами внутрішнього згоряння обумовлена значними тепловими втратами (понад третину) навіть і на автомобілях, обладнаних енергоефективними системами з високим коефіцієнтом корисної дії. Сьогодні, в умовах широкого застосування гібридних систем та інтенсивного розвитку електромобілів, термоелектричні модулі знайшли свою нішу через потребу термостабілізації електрокомпонентів, терморегулювання для керування мікрокліматом тощо. Основною властивістю термогенератора є перетворення теплової енергії в електричну (ефект Зеєбека), а термоелектричного охолоджувача – відведення тепла від об'єкта з використанням електричної енергії (ефект Пельтьє). Крім того, важливою особливістю є зворотність процесів термоелектричних модулів, що дозволяє реалізовувати термостабілізацію локальним охолодженням та нагріванням, здійснюючи керування електроживленням модульного елемента. Основним недоліком, що стримує широке впровадження термоелектричних модулів, на сьогодні лишається низький коефіцієнт корисної дії модулів. Дослідження пристроїв і установок, що містять термоелектричні модулі TEG та TEC, ефективно здійснюються із використанням спеціалізованих програмних комплексів комп'ютерного моделювання та симуляції. Такі програмні середовища містять математичні й цифрові моделі термоелектричних модулів, а окремі з них – бібліотеки поширених типів модулів із закладеними електричними, тепловими та експлуатаційними характеристиками. У деяких випадках програмне забезпечення дозволяє коригувати параметри наявних моделей або задавати власні характеристики для моделювання нових чи експериментальних конструкцій. Разом із тим фактичні характеристики

роботи термоелектричних модулів у реальних умовах експлуатації можуть відрізнятися від даних, наведених виробником у технічній документації. Це пов'язано з особливостями теплообміну, режимами навантаження, якістю теплового контакту, нестабільністю температурного перепаду, а також конструктивними та технологічними відхиленнями конкретних модулів. У зв'язку з цим для підвищення точності комп'ютерного моделювання та достовірності результатів симуляції на початкових етапах розробки доцільно проводити експериментальні дослідження термоелектричних модулів з метою уточнення їх реальних характеристик і параметрів, що надалі використовуватимуться у цифрових моделях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання моделей термоелектричних модулів у складі цифрових компоновок і віртуальних прототипів розроблюваних пристроїв дає можливість отримувати характеристики їх роботи, аналізувати теплові та електричні процеси, визначати розподіл температурних зон, оцінювати режими навантаження та ефективність теплообміну [1, 2]. Це створює передумови для створення альтернативних систем транспортних засобів [2–4], систем цифрової трансформації автомобільного транспорту [5–7], оптимізації конструкції обладнання та удосконалення параметрів функціонування термоелектричних систем і підвищення енергоефективності транспортних засобів [3–5].

У дослідженнях роботи систем з термоелектричними модулями використовується підхід до моделювання теплових та електричних процесів із проведенням експериментальних досліджень, використанням цифрових моделей і здійсненням комп'ютерної симуляції. Для підвищення точності комп'ютерного моделювання користувач інколи має можливість коригувати характеристики за результатами експериментальних досліджень [2], однак під час використання модулів з бібліотеки частина параметрів зазвичай є фіксованою відповідно до datasheet виробника. Для прикладу (рис. 1) наведено характеристики максимальної теплової потужності від температури. Максимальна теплова

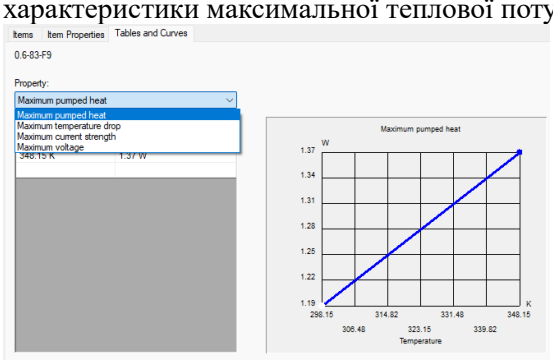


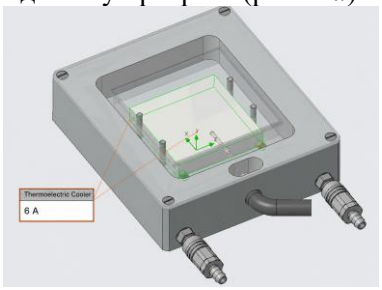
Рисунок 1 – Характеристика максимальної теплової потужності термоелектричного модуля залежно від температури

потужність є однією з характеристик бібліотечного термоелектричного модуля.

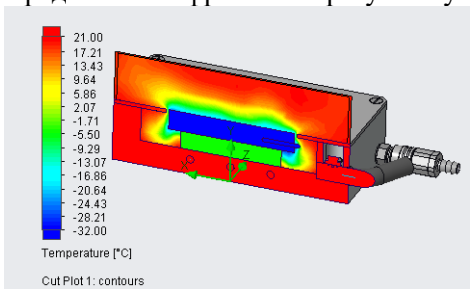
Виклад основного матеріалу дослідження

У роботі проведено дослідження з моделюванням роботи термоелектричного модуля TEC типу за допомогою комп'ютерної симуляції та експериментально визначено характеристики електрорушійної сили (EPC) модуля типу TEG.

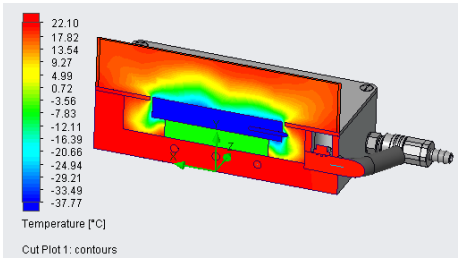
Комп'ютерну симуляцію проведено у середовищі Creo 12. Приклад моделювання роботи термоелектричного модуля TEC (MCPK2-19808AC-S) наведено на рисунку 2 для різних значень сили струму, заданих у програмі (рис. 2 *а*). На рисунках 2 *б–г* представлено фрагменти результату



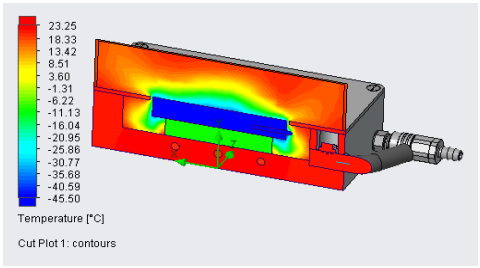
а



б



в



г

Рисунок 2 – Симуляція роботи ТЕС на моделі: інтерфейс встановлення струму живлення (*а*) для відповідних значень струму 3,5А (*б*), 4,5А (*в*), 6А (*г*)

комп'ютерного моделювання температурного поля термоелектричної системи, де відображено розподіл температур у процесі роботи пристрою з термоелектричним модулем в основі.

Крім того, досліджені характеристики впливу різниці температур на поверхнях модуля (температурного перепаду) в інтервалі ΔT=10–80 °C без електричного навантаження на характеристики роботи термоелектричних модулів TEG (SP1848-27145). Слід відзначити високу чутливість системи до зміни температури та стабільність лінійної характеристики ЕРС. Отримані результати добре узгоджуються з наведеними характеристиками у джерелі [8], а для окремих значень різниці температур, наприклад ΔT= 60°C та 80 °C, мають стабільнішу характеристику.

Висновки з цього дослідження

На даному етапі дослідження за допомогою комп'ютерної симуляції проведено моделювання роботи термоелектричних модулів охолодження. Створено модель та отримано характеристики температурного поля термоелектричної системи у інтервалі значень сили струму 3,5–6А.

Досліджено експериментально характеристику електрорушійної сили модуля термогенератора від різниці температур його поверхонь в інтервалі 10–80°C та підтверджено стабільність та лінійність характеристики.

Постійне удосконалення технологій призводить до покращення параметрів і характеристик термоелектричних модулів, появи нових більш ефективних зразків, а масове виробництво сприятиме урізноманітненню сфер їх застосування у системах автомобільного транспорту.

Отримані результати можуть бути використані для уточнення параметрів цифрових моделей термоелектричних систем транспортних засобів.

1. Bringing Thermoelectricity into Reality. Edited by Patricia Aranguren. www.intechopen.com. URL: https://www.intechopen.com/books/6575

2. Павлюк В.І., Булік Ю.В., Дубицький О.С. Моделювання роботи обладнання з термоелектричними модулями в основі. Матеріали XIII-ої Міжнародної науково-технічної інтернетконференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 15-17 квітня 2025 року : збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.] – Вінниця: ВНТУ, 2025. – (PDF, 415 с.) – С. 267–268. / URL : https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/materialy_transport_04_2025.pdf

3. Dolatiasl K. Electric Power Generation Using a Thermoelectric Generator from Coolant Fluid of Internal Combustion Engine of Cars. SIGMA. 2019; 37(2) : 415–22. URL : https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2030503

4. A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles. TELKOMNIKA, Vol.9, No.3, December 2011, pp. 523–530. URL : http://doi.org/10.12928/telkomnika.v9i3.744

5. Optimization of energy flow – in thermal management of electric vehicles based on real vehicle testing and digital twin simulation. URL: https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104607

6. Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access, 8, 108952-108971. URL : https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

7. Булік Ю. В., Павлюк В. І., Онищук В. П., Куць Н. Г. Поліпшення цифрових моделей систем транспортних засобів, обладнаних термоелектричними модулями. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – (PDF, 536 с.). – С. 97–99.

8. SP1848-27145 4.8V Seebeck Thermoelectric Power Generator TEG Peltier Module. URL: https://uploads.envistiamall.com/repository/assets/Envistia_Mall_SP1848_Seebeck_TEG_Peltier_Module_EM-ECOMP-0076.pdf?utm_source=chatgpt.com

ПАВЛЮК Василь Іванович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, ЛНТУ, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua

БУЛІК Юрій Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту, ЛНТУ, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua

PAVLIUK Vasyl – PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles Transport Department, LNTU, e-mail: v.pavliuk@lutsk-ntu.com.ua

BULIK Yurii – PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Automobiles Transport Department, LNTU, e-mail: yurii.bulik@lutsk-ntu.com.ua