

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-315-322](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-315-322)

УДК 621.36

**Дмитро Геннадійович Алексієвський<sup>1</sup>, Віктор Олександрович Баранов<sup>2</sup>,  
Костянтин Олегович Туришев<sup>3</sup>, Сергій Леонідович Шмалій<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення  
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [lasian2017@ukr.net](mailto:lasian2017@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5787-6092>

<sup>2</sup>студент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення  
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [victorbaranov339@gmail.com](mailto:victorbaranov339@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-8406-6747>. ResearcherID: [PQW-9523-2026](https://orcid.org/PQW-9523-2026)

<sup>3</sup>старший викладач кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення  
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [k\\_turyshev@ukr.net](mailto:k_turyshev@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2938-9710>

<sup>4</sup>доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення  
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [es.feeit@gmail.com](mailto:es.feeit@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6399-0310>. ResearcherID: [PHN-1947-202](https://orcid.org/PHN-1947-202)

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА БАЗІ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ

*У роботі здійснено синтез мультифізичної візуально-блочної моделі елемента Пельтьє, яка описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси. Модель синтезована за допомогою методу візуально-блочного моделювання. Результати моделювання та їх порівняльний аналіз з експериментом дозволяє зробити висновок про високий ступінь адекватності отриманої моделі. Універсальний характер даної моделі дозволяє застосувати її в подальшому для дослідження та проектування термоелектричних джерел електричної енергії. Важливою властивістю отриманої моделі є досить адекватний опис її динамічних характеристик як елемента електричної схеми, що дозволяє вирішувати питання щодо проектування джерел електроживлення елементів Пельтьє та систем автоматичного керування на їхній основі.*

**Ключові слова:** ефект Пельтьє; математична модель; термоелектричні процеси; візуально-блочне моделювання.

Рис. 5. Бібл.: 8.

**Актуальність теми дослідження.** Елементи Пельтьє, або термоелектричні перетворювачі, знаходять дедалі ширше застосування в різних галузях промисловості – від систем охолодження до автономних рішень для генерації енергії. За останні десятиріччя була проведена значна кількість досліджень, спрямованих на підвищення ефективності та точності моделювання елементів Пельтьє. Наявність математичних моделей даних пристроїв дозволяє значно полегшити процедури розробки та оптимізацію параметрів і характеристик пристроїв на їхній основі. Ця робота була присвячена розробці математичної моделі елемента Пельтьє, що дозволяє говорити про актуальність теми.

**Постановка проблеми.** Математичне моделювання складних технічних об'єктів є ключовим та важливим елементом наукової та інженерної практики. Однак, в деяких випадках, виникає проблема взаємодії результатів теоретичних досліджень з реальною інженерною практикою. У інженерів-практиків часто виникає проблема доступності технологічних та зручних методів аналізу та розрахунку складних технічних об'єктів. Додатковим фактором, що обумовлює складність інженерного використання математичного моделювання є мультидисциплінарність об'єкта моделювання. Прикладом такого об'єкта можна вважати елемент Пельтьє. Одним із засобів подолання цих проблем є застосування візуально-блочного моделювання (ВБМ), як методології синтезу математичних моделей складних технічних систем, що базується на спеціальній нотації та процедури синтезу. Приклад синтезу моделі було розглянуто в [1]. Високий рівень формалізації, що застосовується, забезпечує значне скорочення трудоемності процедури синтезу, зменшує вимоги до квалі-

фікації інженерного працівника, як розробника математичних моделей. В основі ВБМ лежить декомпозиція системи, при якій вона представляється у вигляді структури енергетичного тракту, що складається з замкненого набору елементів. Застосування даного підходу потребує наявності відповідної бібліотеки елементів ВБМ. У цьому контексті актуалізується потреба в розробці компонента бібліотеки візуально-блочного моделювання, яка б відображала складну взаємодію фізичних процесів в елементі Пельтьє, зокрема й перехідні процеси, що є важливим при проєктуванні складних технічних систем де елемент Пельтьє виступає елементом.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Синтезу математичних моделей термоелектричного модуля Пельтьє (ТЕМП), до теперішнього часу, було присвячено багато наукових досліджень. У більшості випадків в основу побудови моделі було покладено електричну аналогію. У роботі [2] синтезована статична модель ТЕМП, за допомогою якої було проведено дослідження впливу характеристик матеріалів на ефективність термоелектричного перетворення. У роботі [3] була запропонована методологія визначення параметрів математичної моделі з параметрів та характеристик, що надають виробники ТЕМП. Особливістю запропонованої моделі була її придатність до отримання передавальних функцій вузла для використання, в подальшому, у процедурі синтезу автоматичних систем керування температурою. У роботі [4] була продовжена тема розробки математичної моделі [3], але вже з урахуванням структури з розподіленими параметрами. Робота [5] була присвячена створенню алгоритму розрахунку статичних характеристик ТЕМП з використанням даних виробників. У роботі [6] було синтезовано тривимірну математичну модель ТЕМП, у якій було враховано зв'язок між електричними процесами у напівпровідниках та термодинамічними процесами у вузлі. Модель враховує ефект Томсона, ефект Пельтьє, теплопровідність Фур'є та джоулеве нагрівання. Робота [7] була присвячена синтезу моделі ТЕМП та перевірці її адекватності шляхом проведення порівняльного аналізу результатів модельного та фізичного експерименту. У роботі [8] була зроблена оцінка точності відтворення характеристик запропонованою математичною моделлю ТЕМП для гарячої та холодної сторони модуля. Слід зазначити, що у роботах [3], [4], [6], [7], [8] розглядалися саме динамічні моделі ТЕМП.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Поширені підходи до синтезу моделі, які базуються на електричній аналогії, загалом придатні для організації обчислювального потоку, але опосередковано відображають причинно-наслідкові зв'язки які існують в реальному фізичному об'єкті такому як ТЕМП. Тобто, вони достатньо адекватно вирішують завдання розрахунку параметрів та характеристик, але не дуже добре сприяють розумінню. Це є дуже важливим не тільки з погляду розуміння процесу дослідником, але і для освітнього процесу. Розв'язання цієї проблеми можливе шляхом створення каузальної візуально-блочної моделі ТЕМП, яка візуалізує реально існуючі причинно-наслідкові зв'язки у фізичному об'єкті. Крім того, такий принцип побудови математичної моделі природно вписується у методіку синтезу візуально-блочного моделювання [1]. Який дозволяє будувати мультифізичні моделі системи. Це значно розширює діапазон використання даної каузальної моделі.

**Мета статті.** Створення мультифізичної візуально-блочної моделі елемента Пельтьє, яка описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси з урахуванням його динамічних властивостей. Потенційними сферами застосування моделі є проєктування систем автоматичного керування, розробка ефективних джерел живлення для елементів Пельтьє.

**Виклад основного матеріалу.** Математична модель в нотації візуально-блочного моделювання (ВБМ) [1] має вигляд (рис. 1).

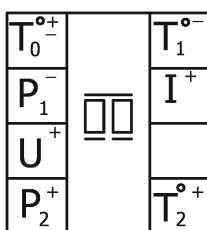


Рис. 1. Загальний вигляд елемента бібліотеки ВБМ для ТЕМП (представлення елемента у вигляді «чорного ящика»)

Зліва розташовані параметри що є входами з погляду причинно-наслідкових зв'язків (причини), праворуч – параметри які є виходами (наслідки). Зображений елемент має входи:  $T_0^{o+}$  – температура навколишнього середовища;  $P_1^-$  та  $P_2^+$  – потужність, що відбирається від гарячої та приймається холодною стороною, відповідно;  $U^+$  – вхідна напруга. Виходи:  $T_1^-$  та  $T_2^+$  – температура на гарячій та холодній стороні, відповідно;  $I^+$  – вхідний струм.

Індекси «+» та «-» вказують на напрям потоку потужності в системі. Відповідно «+» вказує на те, що параметр характеризує вхідний потік потужності, «-» – вихідний потік. Слід зазначити, що параметр, який позначає температуру зовнішнього середовища « $T_0^{o+}$ » як вхідний потік, для холодної сторони елемента Пельтьє, так і вихідний потік для гарячої сторони. Тому він позначається подвійним індексом «+ -»

Внутрішня структура моделі ВБМ зображена на рис. 2.

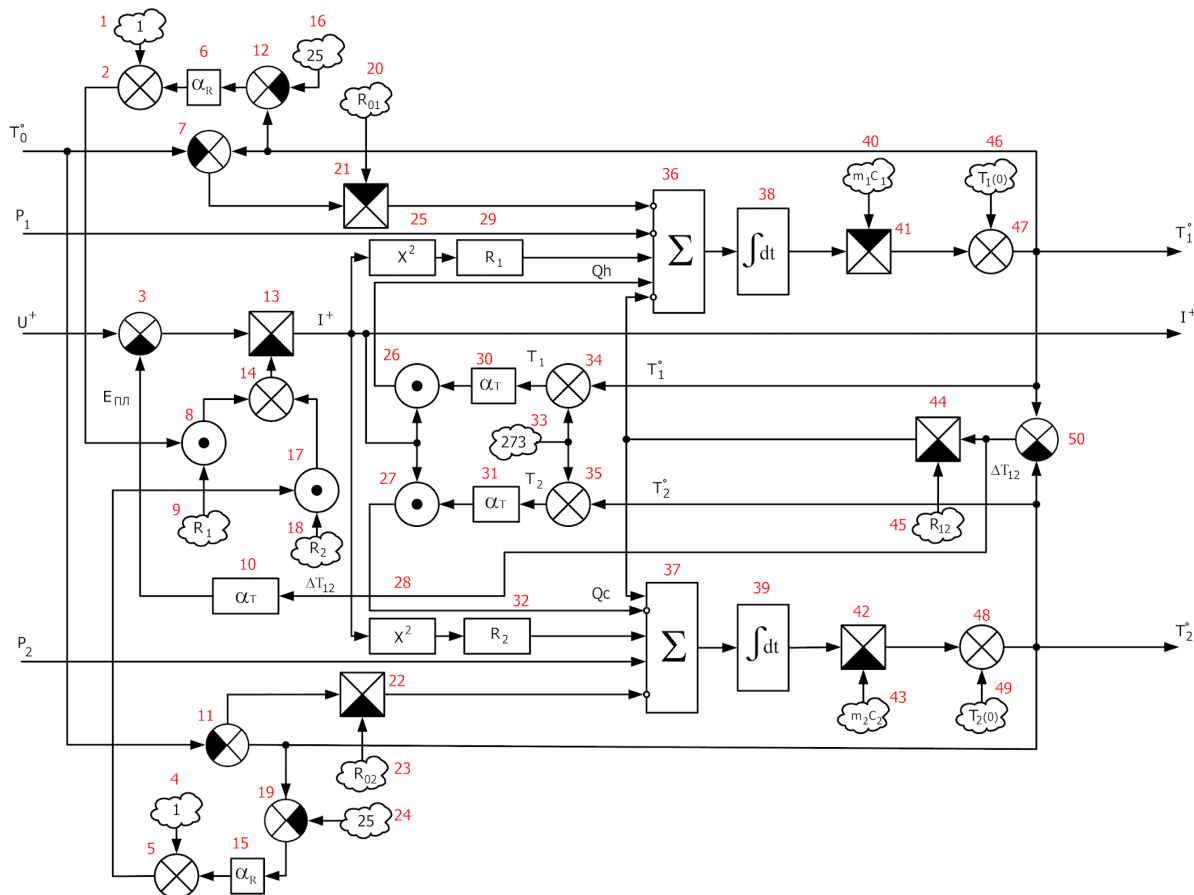


Рис. 2. Модель елемента Пельтьє

Температури сторін визначаються інтегральними рівняннями (1) та (2), для гарячої та холодної сторони, відповідно. Вони враховують питому теплоємність сторін, їх масу, та початкову температуру.

$$T_1^-(t) = \frac{1}{m_1 c_1} \int_0^t \Delta P_1(t) dt + T_1^-(0), \quad (1)$$

$$T_2^+(t) = \frac{1}{m_2 c_2} \int_0^t \Delta P_2(t) dt + T_2^+(0), \quad (2)$$

Ці рівняння реалізовані за допомогою блоків: 36, 38, 40, 41, 46, 47 для гарячої сторони, а для холодної сторони за допомогою блоків: 37, 39, 42, 43, 48, 49.

Електрична підсистема моделі реалізує закон Ома, закон Джоуля-Ленца, ефект Зеебека. Вхідна напруга  $U^{+'}$ , з урахуванням термоЕРС, за ефектом Зеебека, визначається за допомогою рівняння (3).

$$U^{+'} = U^+ - \Delta T \cdot \alpha, \quad (3)$$

де  $U^+$  – вхідна напруга, В;  $\Delta T$  – різниця температур між сторонами, К;  $\alpha$  – коефіцієнт Зеебека, В/К.

Рівняння (3) реалізується блоками 3, 10, 50. Струм крізь ТЕМП розраховується за допомогою рівняння (4).

$$I^+ = \frac{U^{+'}}{R'_1 + R'_2}, \quad (4)$$

де  $I^+$  – вхідний струм, А; В;  $R'_1, R'_2$  – електричний опір гарячої та холодної сторони, відповідно, з урахуванням впливу температури на опір, Ом.

Рівняння (4) реалізується блоками 14, 13. Опори  $R'_1, R'_2$  розраховуються у рівняннях (12), (13). Потужність, що розсіюється на сторонах ТЕМП, відповідно до закону Джоуля-Ленца, описується рівнянням (5) для гарячої сторони, та (6) для холодної сторони.

$$P_1 = I^2 \cdot R'_1, \quad (5)$$

$$P_2 = I^2 \cdot R'_2, \quad (6)$$

Рівняння (5) реалізується блоками 25, 29. Рівняння (6) реалізується блоками 28, 32.

Термічний опір середовище-сторона  $R_{01}$  визначає потік теплової енергії до навколишнього середовища через термічний опір середовище-гаряча сторона у виразі (7), та потік потужності крізь термічний опір середовище-холодна сторона  $R_{02}$  у виразі (8).

$$P_1 = \frac{T_1^- - T_0^\pm}{R_{01}}, \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{T_2^+ - T_0^\pm}{R_{02}}. \quad (8)$$

Рівняння (7) реалізовано блоками 7, 20, 21. Рівняння (8) реалізовано блоками 11, 22, 23.

Термічний опір між гарячою та холодною сторонами визначає витік потужності між сторонами крізь термічний опір  $R_{12}$  за рівнянням (9),

$$P = \frac{T_1^- - T_2^+}{R_{12}}. \quad (9)$$

Рівняння (9) реалізується блоками 44, 45, 50. Отримана потужність додається до холодної сторони та віднімається від гарячої.

Потужність виділення чи поглинання тепла за ефектом Пельтьє розраховується за рівняннями (10), (11).

$$P_1 = \alpha \cdot T_1^- \cdot I, \quad (10)$$

$$P_2 = \alpha \cdot T_2^+ \cdot I, \quad (11)$$

Рівняння (10), (11) розглядають абсолютну температуру у градусах Кельвіна (К). Рівняння (10) реалізується блоками 26, 30, 33, 34. Рівняння (11) реалізується блоками 27, 31, 33, 35.

Температурний коефіцієнт опору для гарячої та холодної сторони реалізується за рівняннями (12), (13).

$$R^{1'} = R_{(0)}^1 \cdot \left(1 + \alpha_R(T_1^- - T_{1(0)}^-)\right), \tag{12}$$

де  $R^{1'}$  – опір за температури  $T_1^-$ , Ом;  $R_{(0)}^1$  – опір за температури  $T_{1(0)}^-$ , Ом;  $\alpha_R$  – температурний коефіцієнт опору, 1/К;  $T_1^-$  – поточна температура гарячої сторони, К;  $T_{1(0)}^-$  – температура гарячої сторони при якій вимірний опір  $R_{(0)}^1$ , К.

$$R^{2'} = R_{(0)}^2 \cdot \left(1 + \alpha_R(T_2^- - T_{2(0)}^-)\right), \tag{13}$$

Рівняння (12) реалізується блоками 1, 2, 6, 8, 9, 12, 16. Рівняння (13) реалізується блоками 4, 5, 15, 17, 18, 19, 24.

Адекватність отриманої математичної моделі було перевірено шляхом порівняння динамічних характеристик, що були отримані в результаті моделювання та фізичного експерименту.

Вони були розраховані за допомогою даних отриманих з експерименту.

Проведення модельного експерименту було здійснено за допомогою ВБМ. Структура ВБМ наведена на рис. 3.

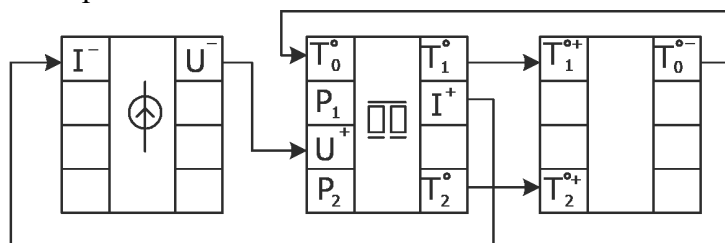


Рис. 3. Структура візуально-блочної моделі

На рис. 4 показані динамічні характеристики в режимі запуску системи. Під час моделювання був виявлений значний вплив температурного коефіцієнта опору (ТКО) на роботу ТЕМП. Включення опису цього впливу до моделі дозволив збільшити її адекватність.

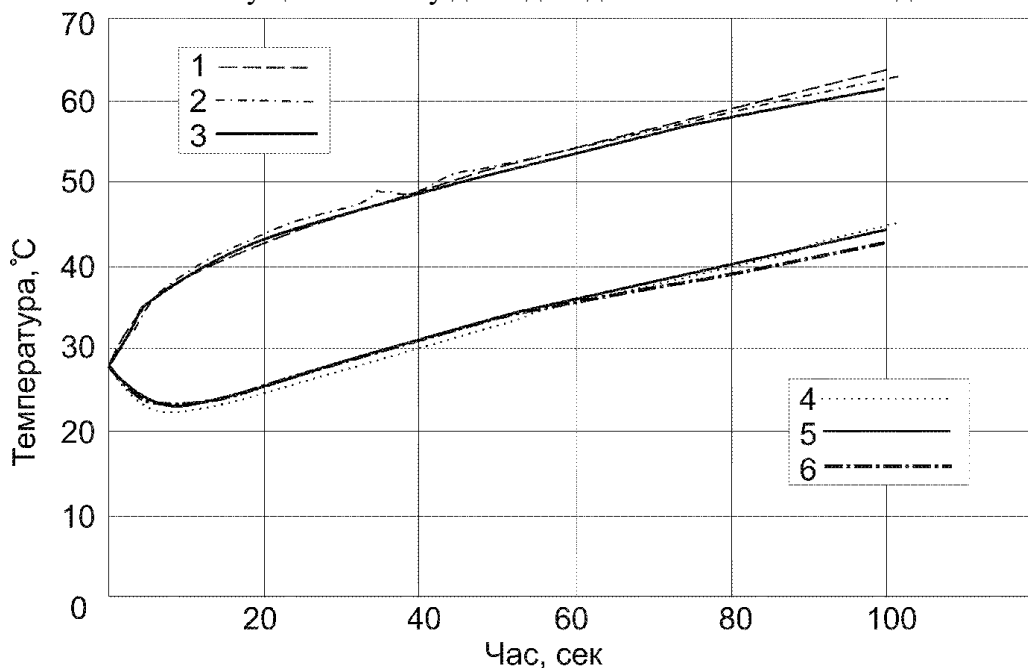


Рис. 4. Порівняльний аналіз температури сторін ТЕМП в режимі пуску при модельному та фізичному експерименті

Цифрою 1 – температура гарячої сторони моделювання, 2 – позначена температура гарячої сторони експерименту, 3 – температура гарячої сторони моделювання без урахування температурного коефіцієнта опору (ТКО), 4 – температура холодної сторони експерименту, 5 – температура холодної сторони моделювання, 6 – температура холодної сторони моделювання без урахування ТКО.

Вплив ТКО добре видно на перехідному процесі напруги на ТЕМП, що зображено на рис. 5. Цифрою 1 позначено результат експерименту, 2 – моделювання, 3 – моделювання без урахування ТКО.

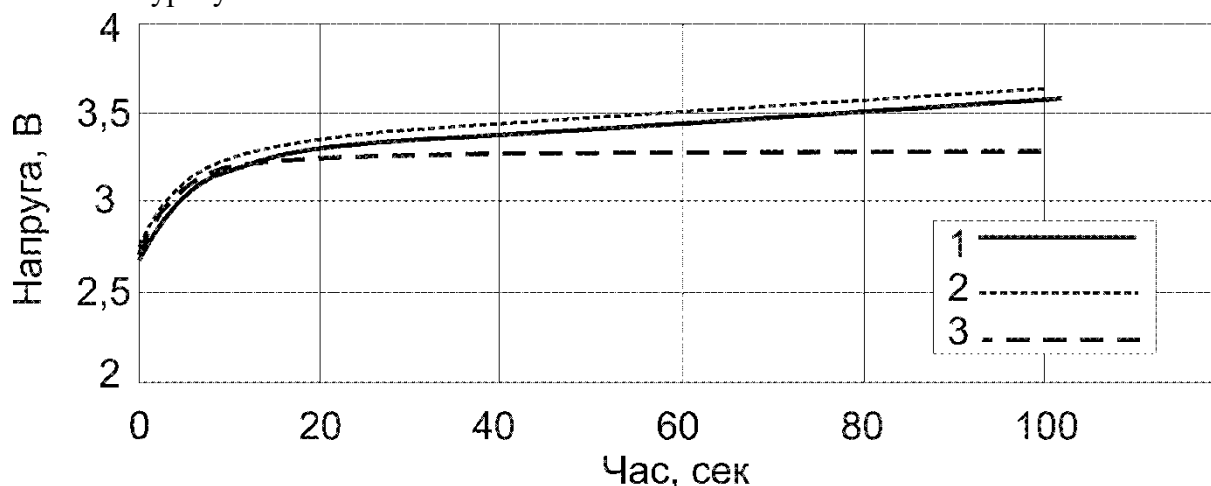


Рис. 5. Порівняльний аналіз напруги на ТЕМП в режимі пуску при модельному та фізичному експерименті

Результати моделювання добре збігаються з експериментом, з похибкою менше ніж 3%, що свідчить про високий ступінь адекватності моделі.

Для проведення модельного експерименту було потрібно отримати вхідні дані констант моделі. У [3; 4; 7] запропонована методика розрахунку використовуючи дані з технічної документації. Була розроблена методика розрахунку основних параметрів з даних фізичного експерименту. Коефіцієнт Зеєбека для випадку живлення від джерела струму розраховується відповідно рівняння (14)

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T}. \quad (14)$$

Для здійснення розрахунку обирається така ділянка перехідного процесу, при якій присутня значна різниця температур між сторонами, але середня температура сторін не значно змінюється, щоб приріст напруги від ТКО не додав похибки. Для перехідного процесу, який зображено на рис. 4 та 5 цим вимогам відповідає період часу 0 - 10 с.

Для розрахунку температурного коефіцієнта опору використовується період часу коли різниця температур між сторонами постійна, а середня температура сторін змінюється. Для рис. 4, 5 це період 40 - 100 с. ТКО був розрахований за рівнянням (15)

$$\alpha_R = \frac{\frac{V_2}{I} - \frac{V_1}{I}}{\frac{V_1}{I} (T_2 - T_1)}. \quad (15)$$

У розглянутому варіанті ТЕМП ТКО склав 0,386 %/К.

**Висновки і пропозиції.** У роботі було розроблено мультифізичну візуально-блочну модель елемента Пельтьє, яка комплексно описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси з урахуванням його динамічних властивостей. Запропонований підхід дозволяє адекватно відтворювати перехідні та усталені режими роботи термоелектричного модуля.

Перевірка адекватності моделі шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показала високу адекватність. Максимальна відносна похибка становила 5 %. Висока точність роботи моделі підтверджує коректність фізичних уявлень покладених в її основу.

Також було запропоновано методику визначення ключових параметрів елемента Пельтьє для параметризації моделі.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні систем автоматичного керування, розробці ефективних джерел живлення, а також у практичних системах охолодження і термостатування на базі елементів Пельтьє.

### Список використаних джерел

1. Alekseevskiy, D., Pankova, O., & Khrestin, R. (2018). Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9–96).
2. Mitrani, D., Salazar, J., Turo, A., García, M. J., & Chávez, J. A. (2008). Lumped and distributed parameter SPICE models of TE devices considering temperature-dependent material properties. *International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.0801.1037>.
3. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2005). Analysis of thermoelectric coolers by a SPICE-compatible equivalent-circuit model. *IEEE Power Electronics Letters*, 3(2), 63–66. <https://doi.org/10.1109/lpel.2005.846822>.
4. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2007). Modeling and analysis of thermoelectric modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(2), 505–512. <https://doi.org/10.1109/tia.2006.889813>.
5. Belovski, I., Staneva, L., Aleksandrov, A., & Rahnev, P. (2017). Mathematical model of thermoelectric Peltier module. *Journal of Communication and Computer*, 14(2). <https://doi.org/10.17265/1548-7709/2017.02.002>.
6. Meng, J.-H., Wang, X.-D., & Zhang, X.-X. (2013). Transient modeling and dynamic characteristics of thermoelectric cooler. *Applied Energy*, 108, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.051>.
7. Alaoui, C. (2011). Peltier thermoelectric modules modeling and evaluation. *International Journal of Engineering*, 5, 114–121. <https://www.researchgate.net/publication/228865590>.
8. Chavez, J. A., Ortega, J. A., Salazar, J., Turo, A., & Garcia, M. J. (б. д.). SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects. *У 17th IEEE instrumentation and measurement technology conference*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/imtc.2000.848895>.

### References

1. Alekseevskiy, D., Pankova, O., & Khrestin, R. (2018). Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9–96).
2. Mitrani, D., Salazar, J., Turo, A., García, M. J., & Chávez, J. A. (2008). Lumped and distributed parameter SPICE models of TE devices considering temperature-dependent material properties. *International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.0801.1037>.
3. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2005). Analysis of thermoelectric coolers by a SPICE-compatible equivalent-circuit model. *IEEE Power Electronics Letters*, 3(2), 63–66. <https://doi.org/10.1109/lpel.2005.846822>.
4. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2007). Modeling and analysis of thermoelectric modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(2), 505–512. <https://doi.org/10.1109/tia.2006.889813>.
5. Belovski, I., Staneva, L., Aleksandrov, A., & Rahnev, P. (2017). Mathematical model of thermoelectric Peltier module. *Journal of Communication and Computer*, 14(2). <https://doi.org/10.17265/1548-7709/2017.02.002>.
6. Meng, J.-H., Wang, X.-D., & Zhang, X.-X. (2013). Transient modeling and dynamic characteristics of thermoelectric cooler. *Applied Energy*, 108, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.051>.
7. Alaoui, C. (2011). Peltier thermoelectric modules modeling and evaluation. *International Journal of Engineering*, 5, 114–121. <https://www.researchgate.net/publication/228865590>.

8. Chavez, J. A., Ortega, J. A., Salazar, J., Turo, A., & Garcia, M. J. (б. д.). SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects. *У 17th IEEE instrumentation and measurement technology conference*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/imtc.2000.848895>.

Дата першого надходження статті до видання: 15.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.12.2025

UDC 621.36

***Dmytro Hennadiiovych Aleksiiivskiy<sup>1</sup>, Viktor Oleksandrovych Baranov<sup>2</sup>,  
Kostiantyn Olehhovych Turyshev<sup>3</sup>, Serhii Leonidovych Shmalii<sup>4</sup>***

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

**E-mail:** [lasian2017@ukr.net](mailto:lasian2017@ukr.net). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5787-6092>

<sup>2</sup>Student of the Department of Electronics, Information Systems and Software  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

**E-mail:** [victorbaranov339@gmail.com](mailto:victorbaranov339@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0009-8406-6747>. **ResearcherID:** [PQW-9523-2026](https://orcid.org/PQW-9523-2026)

<sup>3</sup>Senior Lecturer of the Department of Electronics, Information Systems and Software  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

**E-mail:** [k\\_turyshev@ukr.net](mailto:k_turyshev@ukr.net). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2938-9710>

<sup>4</sup>Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

**E-mail:** [es.feeit@gmail.com](mailto:es.feeit@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6399-0310>. **ResearcherID:** [PHN-1947-202](https://orcid.org/PHN-1947-202)

**MATHEMATICAL MODEL OF A THERMOELECTRIC CONVERTER  
BASED ON THE PELTIER EFFECT**

*The work presents the synthesis of a detailed multiphysics visual-block model of a Peltier element, which comprehensively describes the thermodynamic, thermoelectric, and electrical processes occurring during its operation. Unlike simplified approaches, the model covers the full spectrum of physical phenomena, including heat losses, the mutual influence of temperature gradients on electrical parameters, and the effects related to thermal conductivity and the internal resistance of the material. The model was developed using a visual-block modeling method, which ensures clarity, ease of further modification, and the possibility of integration into more complex systems.*

*The simulation made it possible to obtain both dynamic and steady-state characteristics of the Peltier element under various operating conditions, including variable thermal loads, changes in supply polarity, and nonstandard thermal regimes. A comparative analysis of the simulation results with experimental data demonstrates the high degree of adequacy of the proposed model. In particular, the deviation between the experimental and computed values of temperature and electrical parameters in dynamic modes does not exceed acceptable limits, which confirms the correctness of the applied mathematical dependencies and modeling approaches.*

*The universal nature of the developed model allows it to be used for further research and design of thermoelectric energy sources, including optimization of the device structure, selection of operating modes, and evaluation of energy efficiency. The model can serve as a basis for creating digital twins of thermoelectric systems, opening opportunities for automated optimization of parameters in complex thermal and electrical environments.*

*An important property of the model is its ability to accurately reproduce the dynamic characteristics of the Peltier element as part of an electrical circuit. This enables solving engineering problems related to the design of high-efficiency power supplies for thermoelectric modules, predicting their dynamic behavior in control systems, and optimizing algorithms for automatic temperature regulation. Thus, the developed model is a reliable tool for engineers and researchers working in the field of thermoelectrics and energy systems.*

**Keywords:** Peltier effect, mathematical model, thermoelectric processes, visual-block modeling