

УДК 621.565.83

DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-104-116

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ОХОЛОДЖУВАЧІВ ЕЛЕКТРОННОГО  
ОБЛАДНАННЯ МОРСЬКИХ ВІЙСЬКОВИХ КОМПЛЕКСІВ**

**А.Ю. Букарос**

к.т.н., доцент

доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання  
та засобів автоматики»

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**В.В. Сергєєв**

к.т.н., доцент

професор кафедри «Електротехніка  
та системи ракетно-артилерійського озброєння»

**К.Д. Коньков**

викладач кафедри «Електротехніка  
та системи ракетно-артилерійського озброєння»

**Л.Г. Гордішевський**

викладач кафедри «Ракетно-артилерійське озброєння»

**Л.В. Лебедєва**

викладач кафедри «Інженерна механіка»

*Військова академія, Одеса, Україна*

***Анотація.** В роботі розглядаються динамічні властивості термоелектричних елементів Пельтьє у якості охолоджувачів спеціального електронного обладнання корабельних систем.*

*На основі рівняння теплопровідності отримана передатна функція термоелементу Пельтьє як об'єкту керування. Проведено дослідження та верифікація моделі термоелементу Пельтьє на основі Ві-Те сплавів.*

***Ключові слова:** термоелемент Пельтьє, передатна функція, динамічні властивості, імітаційна модель.*

UDC 621.565.83

DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-104-116

**STUDING THE DYNAMIC PROPERTIES OF THERMOELECTRIC COOLERS  
OF NAVAL MILITARY COMPLEXES ELECTRONIC EQUIPMENT**

**A. Bukaros**

Ph.D., Ass. Professor

Department of «Operation of Ship Electrical Equipment and Means of Automation»

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**V. Sergeiev**

Ph.D., Ass. Professor

Department of «Electrical Engineering and Systems of Missile and Artillery Weapons»

**K. Konkov**

Lecturer

Department of «Electrical Engineering and Systems of Missile and Artillery Weapons»

**L. Hordishevskiy**

Lecturer

Department of «Missile and Artillery Weapons»

**L. Lebedieva**

Lecturer

Department of «Engineering Mechanics»

*Military Academy, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The paper examines the dynamic properties of thermoelectric Peltier elements as coolers for special electronic equipment of ship systems.*

*Based on the thermal conductivity equation, the transfer function of the Peltier thermoelement as a control object was obtained. Research and verification of the Peltier thermoelement model based on Bi-Te alloys has been carried out.*

**Keywords:** *Peltier thermoelement, transfer function, dynamic properties, simulation model.*

**Вступ.** Стратегія національної безпеки України [1] передбачає оснащення Збройних Сил України високотехнологічними зразками озброєння і військової техніки (ОВТ). Складові перспективних і існуючих зразків ОВТ (безкіпажні морські комплекси, апаратні приміщення радіолокаційних комплексів, морські автономні системи озброєння, бойові пости та інформаційні системи кораблів

тощо) використовують високочастотне мікропроцесорне обладнання і силову електроніку. Існуючі централізовані корабельні системи охолодження і кондиціонування недосконалі: мають низькі енергетичні показники, створюють шуми і вібрації, використовують застарілі принципи керування і стабілізації параметрів, не завжди забезпечують необхідні режими охолодження, що унеможливило високоефективне використання ОВТ у складних експлуатаційних умовах.

Крім цього, слід зазначити, що у процесі інтенсивного розвитку сучасних технологій озброєння є умова збереження розмірів систем з високою щільністю розміщення електронного обладнання. Тому виникає проблема значного надлишкового тепловиділення, що потребує застосування спеціальних систем охолодження, зокрема, за допомогою термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) [2]. Існує протиріччя і запит практики – підвищення тактико-технічних характеристик морських високотехнологічних зразків ОВТ, при умові гарантованого виконання ними основного технологічного завдання, безпечного використання і екологічності, майже неможливе при одночасному підвищенні рівня енергоефективності, боєздатності, швидкодії, надійності функціонування, зменшення шумів, вібрацій. Вирішення цієї проблеми додатково ускладнюється тим, що існуючі системи охолодження ОВТ не завжди забезпечують необхідну якість стабілізації параметрів охолоджувальних об'єктів, що пов'язано із недостатньою вивченістю динамічних властивостей, моделей, методик розрахунку та використаних принципів охолодження і керування такими системами.

**Метою статті** є розробка імітаційної моделі термоелементів Пельтьє, яка дозволить відносно просто визначати їх динамічні властивості для подальшого використання у якості ТЕО у складі систем стабілізації температури суднового електронного обладнання.

**Аналіз досліджень і публікацій** щодо проблематики створення систем охолодження високопродуктивного електронного обладнання загального та спеціального призначення за допомогою ТЕО не дозволяє з упевненістю заявляти про вирішення поставленої проблеми. У роботі [3] описані проблеми, тенденції та перспективні напрямки досліджень у галузі створення систем охолодження високопродуктивного електронного обладнання загального та спеціального призначення. Показано, що дослідження таких систем популярні у застосуваннях від персональних комп'ютерів до автономних багатоцільових машин подвійного призначення. Наголошується, що керування теплопередачею у розглянутих системах повинно суттєво відрізнятися від «традиційних» принципів завдяки екстремальним коливанням теплового навантаження та жорстким вимогам щодо енергетичної ефективності і рівням шумів, але яким чином – не визначено. У роботі [4] розглядаються альтернативи парокompресійним системам охолодження, зокрема, доводяться переваги застосування ТЕО для електронного обладнання в обмеженому об'ємі, при цьому не надаються будь-які рекомендації стосовно покращення динамічних показників та надійності ТЕО. Авторами робіт [5; 6] розроблені універсальні моделі складових ТЕО, проте дані моделі не враховують динамічні властивості термоелементів. Також слід зазначити, що незважаючи на

використання ТЕО в судновій техніці, про що свідчать наявні патенти [7; 8] та публікації [9] на сайтах фірм-виробників систем охолодження, методики моделювання, розрахунку, проектування та оптимізації цих систем є комерційною тайною та невідомі широкому загалу науковців.

**Постановка задачі дослідження.** Для дослідження системи стабілізації температури, де у якості виконавчого пристрою застосовуються термоелементи Пельтьє, необхідно знати динамічні властивості термоелементів як об'єкту керування. Такі динамічні властивості повною мірою визначаються передатною функцією, яка у даному випадку уявляє собою відношення операторних зображень температури холодної поверхні термоелементу  $T$  до споживаного струму  $I$

$$W(s) = \frac{L\{T(l,t)\}}{L\{I(t)\}}, \quad (1)$$

де  $L$  – оператор Лапласа.

Отже, виникає задача визначення передатної функції термоелементу.

**Виклад основного матеріалу.** Об'єктом дослідження є термоелемент Пельтьє, термоелектричні процеси в якому описуються диференціальними рівняннями параболічного типу з нестандартними крайовими умовами. Конструктивно термоелементи об'єднують у термоелектричний модуль (каскад), де вони з'єднуються послідовно в електричне коло та паралельно по відношенню до теплового потоку. Кожен термоелемент складається з двох напівпровідникових гілок  $n$ - та  $p$ -типу (рис. 1), на одні кінці яких (гарячий спай) подається напруга, а інші кінці електрично з'єднуються (холодний спай).

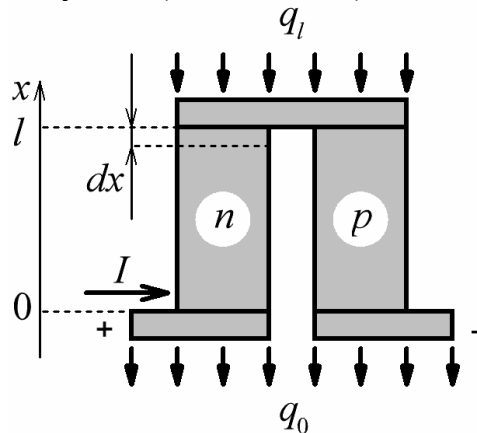


Рис. 1. Термоелемент Пельтьє

Урахування всіх факторів, що впливають на термоелектричні властивості термоелементу, надзвичайно складне, тому для якісної оцінки його динамічних параметрів будемо розглядати модель термоелементу з наступними припущеннями.

1. Термоелемент замінюється однією гілкою ( $n$ - або  $p$ -типу), яка уявляє собою однорідний стрижень довжиною  $l$ , площиною перерізу  $A$ , об'ємною теплоємністю  $c$ , питомою теплопровідністю  $k$  та питомим опором  $\rho$ . Така заміна можлива, оскільки гілки термоелементу зазвичай виготовляються на основі одного сплаву (наприклад, Ві-Те), мають однакові геометричні розміри та схожі термічні та електричні властивості [10].

2. Відведення тепла від бокових поверхонь термоелемента відсутнє. Таке припущення справедливе, оскільки у реальних модулях Пельтьє бокові поверхні зазвичай термічно ізолювані та мають відносно малі розміри у порівнянні з робочими поверхнями. За цієї умови градієнт температури у термоелементі можна вважати одновимірним та направленим вздовж довжини гілок.

3. Температура гарячої поверхні модуля Пельтьє незмінна та дорівнює температурі навколишнього середовища  $T_a$ . Таке припущення дозволяє значно спростити розв'язання поставленої задачі та може бути прийняте за умови контрольованого теплообміну гарячої поверхні з навколишнім середовищем.

4. Відведення тепла від холодної поверхні модуля Пельтьє відсутнє, модуль працює на холостому ході. Таке припущення справедливе при складанні передатної функції термоелементу Пельтьє як окремого об'єкту керування. При розгляді властивостей термоелементу у складі системи стабілізації температури отримана модель доповнюється передатними функціями охолоджуваного об'єкту, датчиків зворотних зв'язків, регулятора тощо.

5. Термоелектричний ефект Томпсона у термоелементі відсутній. Таке припущення справедливе для невеликих діапазонів зміни температури на кінцях термоелементу та при слабкій температурній залежності коефіцієнту термоелектрорушійної сили.

З урахуванням наведених припущень рівняння теплопровідності термореlementу Пельтьє запишеться як

$$c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \rho \cdot \left( \frac{I(t)}{A} \right)^2 \quad (2)$$

з початковою умовою

$$T(x,0) = T_a. \quad (3)$$

Крайові умови для поставленої задачі будуть мати наступний вигляд:

– для гарячої поверхні, враховуючи припущення 3:

$$T(0,t) = T_a, \quad (4)$$

– для холодної поверхні, враховуючи припущення 4 та розглянувши тепловий баланс в об'ємі  $A \cdot dx$  (рис. 1):

$$c \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k \cdot A \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \frac{\rho \cdot dx}{A} \cdot I^2(t) - \alpha \cdot T(l,t) \cdot I(t), \quad (5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт термоелектрорушійної сили (Зеебека).

У правій частині виразу (5) перший доданок відповідає тепловому потоку на границях виділеного елементарного об'єму  $A \cdot dx$  за законом Фур'є, другий доданок враховує виділення тепла Джоуля в цьому об'ємі, третій – поглинання тепла Пельтьє. Якщо спрямувати  $dx \rightarrow 0$  та перейти до границі, то, остаточно, друга крайова умова набуде вигляду

$$-k \cdot A \cdot \frac{\partial T(l,t)}{\partial x} - \alpha \cdot T(l,t) \cdot I(t) = 0. \quad (6)$$

Для знаходження передатної функції термоелементу Пельтьє застосуємо інтегральне перетворення Лапласа для рівняння (2) з крайовими умовами (4), (6). При цьому, як це прийнято у класичній теорії автоматичного керування, початкові умови вважаємо нульовими. В результаті отримаємо

$$\frac{\partial^2 T(x,s)}{\partial x^2} - \frac{c}{k} \cdot s \cdot T(x,s) + \frac{\rho}{k \cdot A^2} \cdot I^2(s) = 0, \quad (7)$$

$$T(0,s) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(l,s)}{\partial x} + \frac{\alpha \cdot T(l,s)}{k \cdot A} \cdot I(s) = 0, \quad (9)$$

де  $s$  – змінна Лапласа,  $T(x, s)$  – зображення по Лапласу температури  $T(x, t)$ :

$$L\{T(x,t)\} = \int_0^{\infty} T(x,t) \cdot e^{-st} dt = T(x,s), \quad (10)$$

$\frac{\partial T(l,s)}{\partial x}$  – зображення по Лапласу похідної за координатою  $x$  температури холодної поверхні  $T(l, t)$ :

$$L\left\{\frac{\partial T(l,t)}{\partial x}\right\} = \int_0^{\infty} \frac{\partial T(l,t)}{\partial x} \cdot e^{-st} dt = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} T(l,t) \cdot e^{-st} dt = \frac{\partial T(l,s)}{\partial x}, \quad (11)$$

$\frac{\partial^2 T(x,s)}{\partial x^2}$  – зображення по Лапласу другої похідної за координатою  $x$  температури  $T(x, t)$

$$L \left\{ \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \right\} = \int_0^{\infty} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \cdot e^{-st} dt = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^{\infty} T(x,t) \cdot e^{-st} dt = \frac{\partial^2 T(x,s)}{\partial x^2}, \quad (12)$$

$s \cdot T(x, s)$  – зображення по Лапласу похідної за часом температури  $T(x, t)$

$$L \left\{ \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \right\} = \int_0^{\infty} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \cdot e^{-st} dt = s \cdot \int_0^{\infty} T(x,t) \cdot e^{-st} dt = s \cdot T(x, s), \quad (13)$$

$I(s)$  – зображення по Лапласу струму  $I(t)$

$$L \{ I(t) \} = \int_0^{\infty} I(t) \cdot e^{-st} dt = I(s), \quad (14)$$

$I^2(s)$  – зображення по Лапласу квадрату струму  $I^2(t)$  відповідно до теореми про згортку

$$L \{ I^2(t) \} = \int_0^{\infty} I^2(t) \cdot e^{-st} dt = I^2(s). \quad (15)$$

Загальний розв'язок рівняння (7) шукаємо у вигляді

$$T(x, s) = C_1 \cdot e^{x\sqrt{\frac{c}{k} \cdot s}} + C_2 \cdot e^{-x\sqrt{\frac{c}{k} \cdot s}} + \frac{\rho}{s \cdot c \cdot A^2} \cdot I^2(s) = 0. \quad (16)$$

Для визначення сталих  $C_1$  і  $C_2$  підставимо вираз (16) у крайові умови (8), (9). В результаті після елементарних перетворень отримаємо наступну систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = -\frac{\rho}{s \cdot c \cdot A^2} \cdot I^2(s) \\ C_1 \cdot e^{l\sqrt{\frac{c}{k} \cdot s}} \cdot \sqrt{\frac{c}{k} \cdot s} - C_2 \cdot e^{-l\sqrt{\frac{c}{k} \cdot s}} \cdot \sqrt{\frac{c}{k} \cdot s} = -\frac{\alpha \cdot T(l, s)}{k \cdot A} \cdot I(s). \end{cases} \quad (17)$$

Розв'язавши систему рівнянь (17), підставивши отримані значення сталих  $C_1$  і  $C_2$  у загальний розв'язок (16), та уводячи гіперболічні функції, отримаємо наступний розв'язок операторного рівняння (7) щодо зображення температури холодної поверхні

$$T(l,s) = \left[ 1 - \cosh^{-1} \left( l \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \right) \right] \frac{\rho}{s \cdot c \cdot A^2} \cdot I^2(s) - \frac{\alpha \cdot T(l,s) \cdot I(s)}{k \cdot A \cdot \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \cdot \coth \left( l \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \right)} \quad (18)$$

Для переходу від гіперболічних функцій до дробово-раціональних виразів застосуємо розкладання гіперболічного косинуса та котангенса у степеневі ряди:

$$\begin{aligned} \cosh \left( l \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \right) &= 1 + \frac{l^2 \cdot c}{2 \cdot k} \cdot s + \frac{l^4 \cdot c^2}{24 \cdot k^2} \cdot s^2 + \dots \\ \coth \left( l \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \right) &= \frac{1}{l} \sqrt{\frac{k}{c \cdot s}} + \frac{l}{3} \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s - \frac{l^3}{45} \left( \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \right)^3 + \dots, 0 < \left| l \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \right| < \pi \end{aligned} \quad (19)$$

Проведемо оцінку значення аргументу наведених гіперболічних функцій. Для цього скористаємося параметрами широко поширених модулів Пельтьє на основі Ві-Те сплавів [11]: висота модуля  $l = 0,14$  см, об'ємна теплоємність гілок  $c = 1,4$  Дж/(см<sup>3</sup>·К), питома теплопровідність гілок  $k = 0,014$  Вт/(см·К). Для оцінки величини змінної Лапласа  $s$  застосуємо інтегральне перетворення Фур'є  $s = j\omega$  та зазначимо, що в системах стабілізації температури смуга пропускання не перевищує 0,1 Гц. Отже,  $s \leq j3,14$ .

Таким чином, неважко визначити, що для модулів Пельтьє з наведеними параметрами аргумент функцій (19)

$$l \sqrt{\frac{c}{k}} \cdot s \leq 1,11, \quad (20)$$

і степеневий ряд гіперболічного котангенса збігається.

Оскільки вираз (20) приблизно дорівнює одиниці, то при розкладанні гіперболічних функцій у степеневі ряди достатньо обмежитися першими двома членами, при цьому похибка не буде перевищувати 4 %.

Таким чином, підставивши розкладені гіперболічні функції (19) у вираз (18) після елементарних перетворень отримаємо остаточний розв'язок рівняння (7)



$$T(l, s) = \frac{\frac{\rho \cdot l^2}{2 \cdot k \cdot A^2} \cdot I^2(s)}{\frac{c \cdot l^2}{2 \cdot k} \cdot s + 1} - \frac{\frac{\alpha \cdot l}{k \cdot A} \cdot T(l, s)}{\frac{c \cdot l^2}{3 \cdot k} \cdot s + 1} \cdot I(s), \quad (21)$$

Отриманий вираз (21) дозволяє вивести передатну функцію термоелемента Пельтьє

$$W(s) = \frac{T(l, s)}{I(s)} = \frac{K_J}{\tau_J \cdot s + 1} \cdot I(s) - \frac{K_P}{\tau_P \cdot s + 1} \cdot T(l, s). \quad (22)$$

Як видно, наведена передатна функція складається з двох елементарних динамічних ланок першого порядку з коефіцієнтами передачі  $K_J$ ,  $K_P$  та сталими часу  $\tau_J$ ,  $\tau_P$

$$K_J = \frac{\rho \cdot l^2}{2 \cdot k \cdot A^2} = \frac{R}{2 \cdot K}, \quad \tau_J = \frac{c \cdot l^2}{2 \cdot k}, \quad K_P = \frac{\alpha \cdot l}{k \cdot A} = \frac{\alpha}{K}, \quad \tau_P = \frac{c \cdot l^2}{3 \cdot k}, \quad (23)$$

де  $R$  – електричний опір, Ом,  $K$  – теплопровідність гілки термоелемента, Вт/К. Слід зауважити, що вирази для сталих часу (23) мають розмірність в секундах. Аналіз передатної функції (22) показує, що перша ланка моделює динамічний процес виділення тепла Джоуля в об'ємі термоелемента та додатково потребує приведення вхідної величини  $I(s)$  до квадрату, друга ланка моделює процес поглинання тепла Пельтьє та містить внутрішній зворотний зв'язок за температурою холодної поверхні  $T(l, s)$ .

Верифікацію отриманої передатної функції можна здійснити, розглянувши статичний режим після закінчення перехідних процесів, що відповідає часу  $t \rightarrow \infty$  та змінній Лапласа  $s \rightarrow 0$ . Виходячи з цього, перепишемо рівняння (21) та врахуємо початкову умову (3)

$$T(l, 0) = \frac{R}{2 \cdot K} \cdot I^2(0) - \frac{\alpha}{K} \cdot T(l, 0) \cdot I(0) + T_a. \quad (24)$$

Після елементарних перетворень отримаємо

$$\alpha \cdot T(l, 0) \cdot I(0) - 0,5 \cdot R \cdot I^2(0) - K \cdot [T_a - T(l, 0)] = 0. \quad (25)$$

Рівняння (25) уявляє собою не що інше, як рівняння теплового балансу холодної поверхні термоелемента Пельтьє [10] за умови відсутності теплообміну з навколишнім середовищем (припущення 4). Отже, підтверджується вірність передатної функції (22) в статичному режимі.

Для верифікації запропонованої передатної функції в динамічному режимі скористаємося засобами імітаційного моделювання. Структурна схема імітаційної моделі термоелементу Пельтьє, яка відповідає передатній функції (22), наведена на рис. 2.

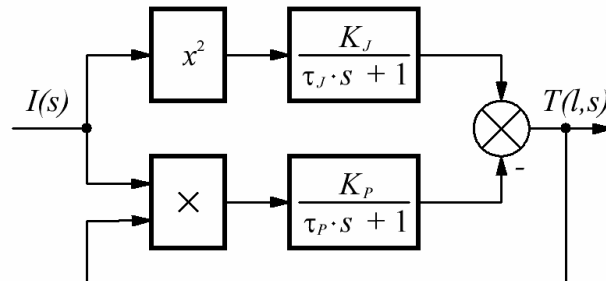


Рис. 2. Структурна схема моделі термоелементу Пельтьє

Верифікацію проведемо шляхом порівняння результатів моделювання в середовищі Matlab/Simulink з результатами досліджень [11]. Для цього додатково до відомих параметрів термоелементу, використаних при оцінці аргументу гіперболічних функцій (19), використаємо наступні величини [11]: питомий опір  $\rho = 0,0015$  Ом·см, коефіцієнт Зесбека  $\alpha = 240 \cdot 10^{-6}$  В/К, площа поперечного перетину  $A = 0,01$  см<sup>2</sup>, початкова температура  $T_a = 300$  К.

В результаті моделювання були отримані часові залежності температури холодної поверхні при живленні термоелементу постійним струмом (рис. 3). Для порівняння на рис. 3 пунктирними лініями наведені аналогічні залежності, отримані в [11].

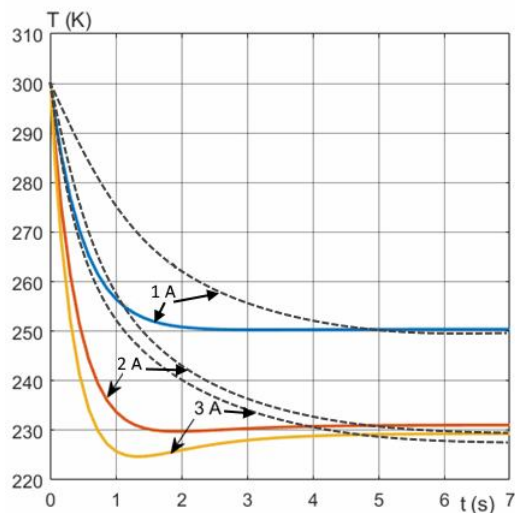


Рис. 3. Часові залежності температури холодної поверхні термоелементу

Аналіз рис. 3 дозволяє стверджувати про відносно невисокий рівень співпадіння кривих температурних залежностей від часу, отриманих відповідно до моделі на рис. 2 та в роботі [3], в динамічному режимі. Слід зазначити, що в моделі на рис. 2, на відміну від роботи [11], не враховані величини контактної опору в місцях з'єднання термоелементів з робочими поверхнями, теплоємності ізоляційних пластин, теплообміну холодної поверхні з навколишнім середовищем тощо. При цьому загальний вигляд перехідних процесів схожий. Статична помилка для всіх кривих не перевищує 6 %. Максимальне відхилення в динаміці спостерігається для кривої 3 А та не перевищує 35 %.

**Висновки.** Зазначені похибки та верифікація передатної функції в статичному режимі свідчать про працездатність запропонованої методики створення динамічної моделі термоелементу Пельтьє та відносну адекватність моделі реальному об'єкту.

Отримана модель дозволяє на її основі легко розрахувати та оптимізувати параметри налаштування систем автоматичної стабілізації температури електронного обладнання морських військових комплексів.

З метою покращення точності моделі в динамічному режимі необхідно її удосконалення шляхом урахування: контактної опору в місцях з'єднання термоелементів з робочими поверхнями, теплоємності ізоляційних пластин, теплообміну холодної поверхні з навколишнім середовищем, температурної залежності термоелектричних параметрів термоелементу, ефекту Томпсона тощо.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 вересня 2020 року «Про Стратегію національної безпеки України»: Указ Президента України від 14.09.2020 р. №392/2020. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/3922020-35037> (дата звернення: 11.04.2023).
2. Sulaiman, A.C., Amin, N.A. M., Basha, M.H., Majid, M.S.A., bin Mohd Nasir, N.F., & Zaman, I. (2018). Cooling performance of thermoelectric cooling (TEC) and applications: a review. In *MATEC Web of Conferences*. Vol. 225. P. 03021. EDP Sciences.
3. Iradukunda, A. C., Huitink, D. R., Luo, F. (2019). A review of advanced thermal management solutions and the implications for integration in high-voltage packages. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 8 (1). 256-271.
4. Barrubeeah, M., Rady, M., Attar, A., Albatati, F., Abuhabaya, A. (2021). Design, modeling and parametric optimization of thermoelectric cooling systems for high power density electronic devices. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3), 1060-1076.
5. Zaykov, V., Mescheryakov, V., Zhuravlov, Y. (2021). Comparative analysis of means to control the thermal regime of a cooling thermoelement while minimizing the set of basic parameters. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 5/8 (113), 38-50.

6. Zaykov, V., Mescheryakov, V., Zhuravlov, Y. (2020). *Developing a model to control the thermal mode of thermoelectric cooling devices by minimizing the set of three basic parameters. Eastern-European journal of enterprise technologies. 5/8 (107), 63-73.*
7. *Thermoelectric-vacuum shipping container: nam. US3823567A USA: МПК6 F25B21/02. № 348183; заявл. 05.04.73; опубл. 16.07.74, 6 с.*
8. *Portable cooler: nam. US11162716B2 USA: МПК6 F25B21/02. № 17/094098; заявл. 10.11.20; опубл. 02.11.21, 55 с.*
9. *Customized Thermoelectric Cooling Systems Tough Enough for Military Warships. URL: <https://www.eicsolutions.com/success-stories/customized-thermoelectric-cooling-systems-tough-enough-military-warships/> (дата звернення 11.04.2023).*
10. *Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. Черновцы: Прут, 1992. 263 с.*
11. *Коцур М.П., Наконечный А.Г. Оптимальное управление нестационарным режимом каскадного термоэлектрического охладителя. Кибернетика и вычислительная техника. 2015. Вып. 180. С. 66-82.*

#### REFERENCES

1. *Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 14 veresnia 2020 roku «Pro Stratehiiu natsionalnoi bezpeky Ukrainy» : Ukaz Prezidenta Ukrainy vid 14.09.2020 r. №392/2020. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/3922020-35037> (in Ukrainian).*
2. *Sulaiman, A.C., Amin, N.A.M., Basha, M.H., Majid, M.S.A., bin Mohd Nasir, N.F., & Zaman, I. (2018). Cooling performance of thermoelectric cooling (TEC) and applications: a review. In MATEC Web of Conferences. Vol. 225. P. 03021). EDP Sciences (in English).*
3. *Irudukunda, A.C., Huitink, D.R., Luo, F. (2019). A review of advanced thermal management solutions and the implications for integration in high-voltage packages. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8(1), 256-271 (in English).*
4. *Barrubeeah, M., Rady, M., Attar, A., Albatati, F., Abuhabaya, A. (2021). Design, modeling and parametric optimization of thermoelectric cooling systems for high power density electronic devices. International Journal of Low-Carbon Technologies, 16(3), 1060-1076 (in English).*
5. *Zaykov, V., Mescheryakov, V., Zhuravlov, Y. (2021). Comparative analysis of means to control the thermal regime of a cooling thermoelement while minimizing the set of basic parameters. Eastern-European journal of enterprise technologies. 5/8 (113), 38-50 (in English).*

6. Zaykov, V., Mescheryakov, V., Zhuravlov, Y. (2020). *Developing a model to control the thermal mode of thermoelectric cooling devices by minimizing the set of three basic parameters. Eastern-European journal of enterprise technologies. 5/8 (107), 63-73 (in English).*
7. *Thermoelectric-vacuum shipping container: pat. US3823567A USA: F25B21/02. № 348183; fil. 05.04.73; publ. 16.07.74, 6 p.*
8. *Portable cooler : pat. US11162716B2 USA: F25B21/02. № 17/094098; fil. 10.11.20; publ. 02.11.21, 55 p. (in English).*
9. *Customized Thermoelectric Cooling Systems Tough Enough for Military Warships. URL: <https://www.eicsolutions.com/success-stories/customized-thermoelectric-cooling-systems-tough-enough-military-warships> (in English).*
10. Anatyчук L. I., Semenjuk V. A. (1992) *Optimal'noe upravlenie svojstvami termojelektricheskikh materialov i priborov. Chernovcy: Prut. 263 p. (in Russian).*
11. Kocur M.P., Nakonechnyj A.G. (2015) *Optimal'noe upravlenie nestacionarnym rezhimom kaskadnogo termojelektricheskogo ohladitelja. Kibernetika i vychislitel'naja tehnika. № 180. P. 66-82 (in Russian).*

*Стаття надійшла до редакції 15.03.2022*

**Посилання на статтю: Букарос А.Ю., Сергєєв В.В., Коньков К.Д., Гордішевський Л.Г., Лебедєва Л.В.** Дослідження динамічних властивостей термоелектричних охолоджувачів електронного обладнання морських військових комплексів // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 1 (68). С. 104-116. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-1-104-116.

*Article received 15.03.2022*

**Reference a journalartic: Bukaros A., Sergeiev V., Konkov K., Hordishevskiy L., Lebedieva L.** Studing the dynamic properties of thermoelectric coolers of naval military complexes electronic equipment // Herald of the Odessa national maritime university. Coll. scient. works, 2023. № 1 (68). 104-116. DOI 10.47049/ 2226-1893-2023-1-104-116.