

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>

УДК 621.3.082.62:629.1.04

## ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ МОДУЛІ З РІЗНИМИ СПОСОБАМИ КОНТАКТНОГО З'ЄДНАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ

Кириченко О.С.

## THERMOELECTRIC MODULES WITH DIFFERENT METHODS OF CONTACT CONNECTION OF SEMICONDUCTOR THERMOELEMENTS

Kyrychenko O.S.

У статті проаналізовано термоелектричні модулі з різними способами контактної з'єднання напівпровідникових термоелектричних елементів. Наведено деякі основні області застосування термоелектричних модулів, наприклад, в загальнопромислових блоках та вузлах, загальнопромисловій і суднової енергетиці, на транспорті, у вимірювальній техніці, в медичній техніці і харчовій промисловості. Широта та специфіка застосування термоелектричних модулів зумовлюють необхідність подальших пошукових досліджень по підвищенню термоелектричних ефектів та зменшенню термічних напружень в них.

Створено тривимірні геометричні моделі двох термоелектричних модулів, в яких застосовано різні способи контактної з'єднання напівпровідникових термоелектричних елементів. При цьому термоелектричні елементи обох модулів представляли собою ланцюг з формою «П-подібної змійки». Термоелектричний модуль зі способом класичного з'єднання напівпровідникових термоелементів мав габаритні розміри 25,5×30×7 мм (без врахування товщини ізоляційного шару), а термоелектричний модуль зі способом короткого з'єднання мав габаритні розміри 35,5×42×9 мм (без врахування товщини ізоляційного шару). Кожен з двох розглянутих термоелектричних модулів складався з 39 напівпровідникових термоелектричних пар та містив 20 напівпровідників Р-типу, 20 напівпровідників N-типу і 41 мідну контактну комутаційну пластину.

На базі тривимірних геометричних моделей було створено розрахункові моделі, сам розрахунок проводився чисельним методом. В результаті розрахунку отримано розподіл основних робочих параметрів по моделям термоелектричних модулів при силі струму 2,5 А. Побудовано функціональні залежності для температури, джоулевого нагріву, густини теплового потоку, густини струму, напруги та напруженості електричного поля для моделей термо-

електричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелектричних елементів при зміні робочого струму в діапазоні від 0 до 2,5 А. Встановлено, що з'єднання напівпровідникових термоелектричних елементів способом короткого контактної з'єднання в ланцюг з формою «П-подібної змійки» для створення термоелектричного модуля призводить до утворення нерівномірності стаціонарного температурного поля на його гарячій стороні. При цьому температура в місцях «П-подібних поворотів змійки» знижується, а ефективність термоелектричного ефекту в таких термоелектричних модулях буде зменшеною.

**Ключові слова:** термоелектричні модулі, спосіб контактної з'єднання, напівпровідникові термоелементи, термоелектричний ефект.

**Вступ.** Пристрої з термоелектричними модулями знаходять своє використання в різних галузях промисловості та на транспорті [12, 13]. Основною характерною особливістю таких термоелектричних модулів є їхня висока надійність, максимальна ефективність та стабільність параметрів [1, 2, 14]. Також, вони можуть експлуатуватися в умовах високих температур і підвищеної вологості, за необхідності можуть швидко змінювати режим охолодження на термоелектричне нагрівання.

Розглянемо деякі основні області застосування термоелектричних модулів:

- загальнопромислові блоки та вузли;
- загальнопромислового та суднової енергетика;
- транспортні засоби;
- вимірювальна техніка;
- медична техніка;
- харчова промисловість.

В загальнопромислових блоках та вузлах термоелектричні модулі використовують в шафах і стійках з обладнанням; процесорах і швидкодіючих пристроях; складних оптичних приладах; лазерах.

На транспортних засобах термоелектричні модулі використовують для локального кондиціонування в кабінах транспортних засобів; для нагрівання/охолодження сидінь автомобілів і інших видів транспорту; в пристроях опріснення води [12, 13]; в холодильниках і охолоджувачах їжі та напоїв.

В технологічному устаткуванні термоелектричні модулі застосовують для рідинного охолодження і прецизійної термостабілізації робочих зон технологічних ліній з виробництва мікросхем, дисплеїв та ін.; прецизійного підтримання робочих температур у технологічних ваннах (гальванічних, травлення, промивання та ін.); в термокамерах для випробування електронних компонентів та вузлів на вплив кліматичних, у тому числі циклічних впливів; в пристроях для закріплення деталей для прецизійної механічної обробки за допомогою локального заморожування.

У вимірювальній техніці для осушення проб газу в газоаналізаторах; для температурної стабілізації стандартів «чорного тіла»; в датчиках точки роси; у вимірювачах теплових потоків і температури.

Необхідно зазначити, що окрім перелічених є і інші важливі області та сфери застосування термоелектричних модулів.

Широта та специфіка застосування термоелектричних модулів зумовлюють необхідність подальших пошукових досліджень по підвищенню ефективності термоелектричних ефектів. Крім того, наприклад, під час експлуатації транспортного термоелектричного обладнання в ньому можуть виникати термічні напруження внаслідок одночасного теплового розширення та холодного стискання електротехнічних матеріалів термоелектричних модулів. Особливості моделювання стаціонарних температурних полів електричного обладнання розглянуто в [3], а питання термічних напружень проаналізовано в [4, 12, 13].

У зв'язку з цим виникає завдання проаналізувати термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання його напівпровідникових термоелектричних елементів щодо ефективності термоелектричного ефекту та термічних напружень.

**Основний матеріал.** Дослідження термоелектричних пристроїв в конкретного випадку

зручно провести з використанням аналітичних або чисельних методів розрахунку. ТермоЕРС термоелектричного елемента можна представити наступним математичним виразом [1, 2]:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} (\alpha_1(T) - \alpha_2(T)) dT, \quad (1)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти термоЕРС першого та другого матеріалів термоелектричного елемента відповідно;

$T_1, T_2$  – температури гарячої і холодної комутаційних пластин відповідно.

Математично тепловий потік через холодний спай термоелектричного елемента спрощено можна описати виразом [1, 2]:

$$Q_0 = (\alpha_1 - \alpha_2) T_0 I - \frac{1}{2} I^2 l \left( \frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (x_1 s_1 + x_2 s_2), \quad (2)$$

а через гарячий спай

$$Q_w = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I + \frac{1}{2} I^2 l \left( \frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (x_1 s_1 + x_2 s_2). \quad (3)$$

В даному дослідженні було створено тривимірні геометричні моделі двох термоелектричних модулів (рис. 1), в яких застосовано різні способи контактного з'єднання напівпровідникових термоелектричних елементів. При цьому термоелектричні елементи обох модулів представляли собою ланцюг з формою «П-подібної змійки».

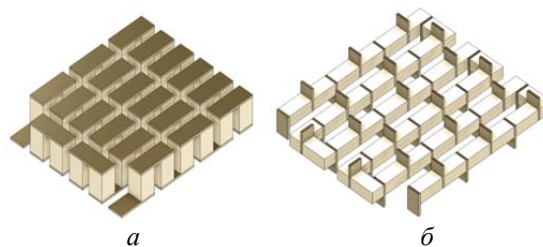


Рис. 1. Геометричні моделі термоелектричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелементів:  
а – спосіб класичного з'єднання;  
б – спосіб короткого з'єднання

Термоелектричний модуль з класичним способом з'єднання напівпровідникових елементів на рис. 1, а мав габаритні розміри 25,5×30×7 мм (без врахування товщини ізоляційного шару), складався з 39 напівпровідникових термоелектричних пар та містив 20 напівп-

ровідників  $P$ -типу, 20 напівпровідників  $N$ -типу і 41 мідну контактну комутаційну пластину. Іноді термоелектричні елементи з'єднуються в термоелектричний модуль таким чином, що робочий струм проходить по ним не змінюючи свого напрямку (рис. 1, б). Комутаційні пластини, що слугують ребрами, виводяться на різні сторони для гарячих і холодних спаїв відповідно. Подібна схема дозволяє зменшувати втрати від виділення тепла в контактних комутаційних пластинках, оскільки довжина струму в цьому випадку буде мінімальною. Термічні напруження виникнуть, що виникають від різного розширення гарячої та стискання холодної сторони термоелектричного модуля, які бувають досить значними при класичному контактному з'єднанні термоелектричних елементів (рис. 1, а), в цьому випадку відсутні. Термоелектричний модуль з коротким способом з'єднання напівпровідникових елементів на рис. 1, б мав габаритні розміри  $35,5 \times 42 \times 9$  мм (без врахування товщини ізоляційного шару), проте також складався з 39 напівпровідникових термоелектричних пар та містив 20 напівпровідників  $P$ -типу, 20 напівпровідників  $N$ -типу і 41 мідну контактну комутаційну пластину.

В двох термоелектричних модулях, що розглядались, напівпровідники обох типів геометрично представляли собою паралелепіпеди  $3 \times 3 \times 6$  мм (рис. 1). Контактні комутаційні пластини в двох термоелектричних модулях, також, геометрично були паралелепіпедами, проте різного розміру:  $3 \times 0,5 \times 7,5$  мм (рис. 1, а) і  $3 \times 0,5 \times 6$  мм (рис. 1, б). Розрахункові моделі двох термоелектричних модулів показано на рис. 2. Розмір сітки кожної розрахункової моделі повинен бути достатнім для забезпечення потрібної точності чисельного розрахунку, проте одночасно збалансованим щодо його тривалості [5]. Тому розрахункові моделі, наприклад, як моделі на рис. 2, можуть налічувати десятки тисяч вузлів і декілька тисяч кінцевих елементів.

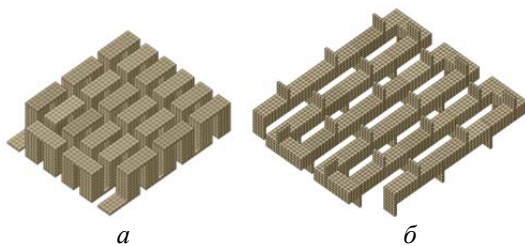


Рис. 2. Розрахункові моделі термоелектричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелементів:  
а – спосіб класичного з'єднання;  
б – спосіб короткого з'єднання

Розрахунок проводився за наступних фізичних властивостей електротехнічних матеріалів [11], задіяних в ньому. Мідні контактні комутаційні пластини: ізотропний питомий опір  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м; ізотропна теплопровідність  $k = 400$  Вт/(м·°С); ізотропний січний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha = 1,8 \cdot 10^{-5}$  1/°С; модуль Юнга  $E_{\text{Young's}} = 1,2 \cdot 10^{11}$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,38$ . Напівпровідники  $P$ -типу: ізотропний питомий опір  $\rho = 9,8 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; ізотропний термоелектричний коефіцієнт  $S_P = 2,1 \cdot 10^{-4}$  В/°С; ізотропна теплопровідність  $k = 1,2$  Вт/(м·°С); ізотропний січний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-6}$  1/°С; модуль Юнга  $E_{\text{Young's}} = 8 \cdot 10^{10}$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,28$ . Напівпровідники  $N$ -типу: ізотропний питомий опір  $\rho = 1,1 \cdot 10^{-5}$  Ом·м; ізотропний термоелектричний коефіцієнт  $S_N = -1,7 \cdot 10^{-4}$  В/°С; ізотропна теплопровідність  $k = 1,2$  Вт/(м·°С); ізотропний січний коефіцієнт теплового розширення  $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-6}$  1/°С; модуль Юнга  $E_{\text{Young's}} = 8 \cdot 10^{10}$  Па; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,28$ .

Граничні умови розрахунку було прийнято наступними: нульовий електричний потенціал  $\phi_0 = 0$  В на крайній торцевій поверхні контактної комутаційної пластини, останньої в термоелектричному ланцюзі; нульова початкова температура  $t_0 = 0$  °С на всіх нижніх поверхнях холодних контактних комутаційних пластин; зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізованими; крайні торцеві поверхні першої і останньої комутаційної пластини прийнято нерухомими; всі електротехнічні матеріали вважались ізотропними.

На основі розрахункових моделей термоелектричних модулів отримано розподіл основних робочих параметрів та їх функціональні залежності при різних варіаціях робочого струму  $I$ .

**Результати досліджень.** Результати розрахунку представлено у вигляді картин розподілу деяких основних робочих параметрів на рис. 3-4 і функціональними залежностями на рис. 5-6.

За деякими даними вважається, що при короткому контактному комутаційному з'єднанні термоелектричних елементів наявні значні втрати від перетікання тепла з гарячої сторони на холодну сторону термоелектричного модуля по теплоізоляції навколо термоелектричних елементів. Також, більш довгий шлях для теплового потоку уздовж контактної комутаційної пластини, при меншому поперечному перерізі для однакових комутаційних пластин призводить до підвищеного перепаду температур в

порівнянні зі звичайною схемою при класичному контактному з'єднанні термоелектричних елементів.

На рис. 3 зображено картини розподілу стаціонарного температурного поля  $t$  та джоулевого нагріву  $J$ , а на рис. 4 наведено картини розподілу еквівалентного стресу  $\sigma$  та величини деформацій  $\epsilon$ .

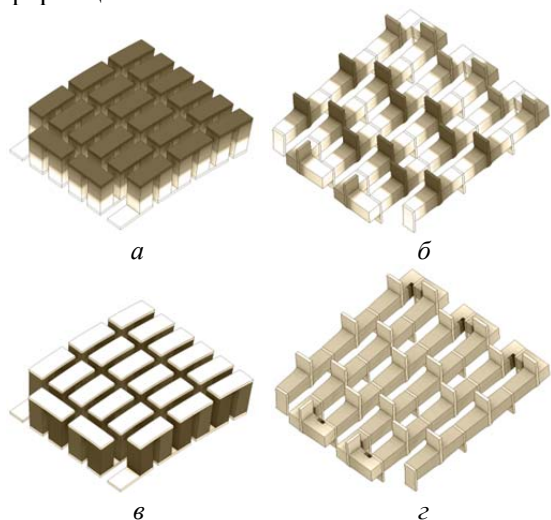


Рис. 3. Результати розподілу стаціонарного температурного поля  $t$  [°C] (а, б) та джоулевого нагріву  $J$  [Вт/м<sup>3</sup>] (в, г) по моделям термоелектричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелементів при амперажі  $I=2,5$  А: а, в – спосіб класичного з'єднання,  $t$  [0; 111,7],  $J$  [0; 8,2·10<sup>3</sup>]; б, г – спосіб короткого з'єднання,  $t$  [0; 113,1],  $J$  [0; 2,3·10<sup>6</sup>]

В роботах [6, 7] було показано, що обидва способи контактного з'єднання напівпровідникових термоелектричних елементів дають однакову ефективність термоелектричного ефекту Пельтьє у випадку прямих ланцюгів (без поворотів). Проте при утворенні термоелектричного модуля з термоелектричних елементів з коротким способом контактного з'єднання термоелектричних елементів у ланцюг з формою «П-подібної змійки» стаціонарне температурне поле стає нерівномірно розподіленим.

Температура  $t$ , джоулевий нагрів  $J$ , густина теплового потоку  $q$ , густина струму  $j$ , напруга  $U$  та напруженість  $E$  електричного поля в обох термоелектричних модулях (рис. 5) зростають прямо пропорційно збільшенню сили робочого струму  $I$  в досліджуваному діапазоні від 0 до 2,5 А. Стаціонарне температурне поле для термоелектричного модуля зі способом звичайного класичного з'єднання його напівпровідникових термоелектричних елементів є рівномірним (крива 1 на рис. 5, а).

В термоелектричному модулі зі способом короткого з'єднання напівпровідникових термомпар стаціонарне температурне поле втрачає рівномірність, а значення температур в різних місцях модуля стають різними (криві 2-4 на рис. 5, а). На більшості гарячих контактних комутаційних пластин в термоелектричному ланцюзі з формою «П-подібної змійки» температура практично така сама (крива 2 на рис. 5, а), як і в попередньому модулі. Проте на гарячих контактних комутаційних пластинах в місцях поворотів ланцюга з формою «П-подібної змійки» температура зменшилась (криві 3 і 4 на рис. 5, а відповідно для двох і шести гарячих пластин, розташованих ліворуч і праворуч на даному рисунку).

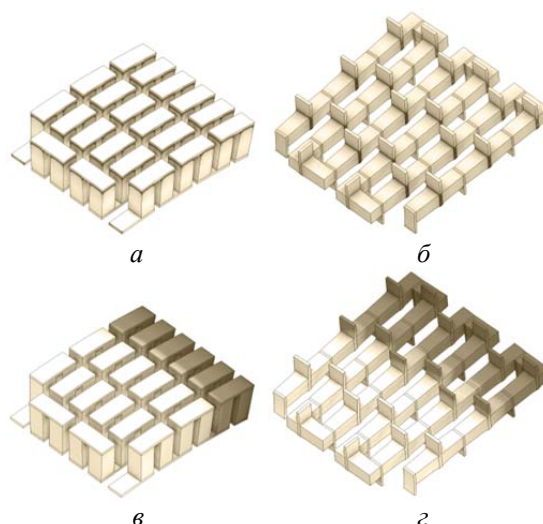


Рис. 4. Результати розподілу еквівалентного стресу  $\sigma$  [Па] (а, б) та величини деформацій  $\epsilon$  [м] (в, г) по моделям термоелектричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелементів при амперажі  $I=2,5$  А: а, в – спосіб класичного з'єднання,  $\sigma$  [2,1·10<sup>5</sup>; 1,6·10<sup>8</sup>],  $\epsilon$  [0; 2,1·10<sup>-4</sup>]; б, г – спосіб короткого з'єднання,  $\sigma$  [1,2·10<sup>5</sup>; 2,4·10<sup>8</sup>],  $\epsilon$  [0; 2,4·10<sup>-3</sup>]

Джоулевий нагрів  $J$  в досліджуваному діапазоні робочого струму  $I$  від 0 до 2,5 А менший в термоелектричному модулі зі способом звичайного класичного з'єднання його напівпровідникових термоелектричних елементів (рис. 5, б). Густина теплового потоку  $q$ , густина струму  $j$  та напруженість  $E$  електричного поля в розглядуваному діапазоні струмів, також, менші при такому класичному з'єднанні (рис. 5, в-г). Електрична напруга  $U$  в термоелектричному модулі зі способом звичайного класичного з'єднання його напівпровідникових термоелектричних елементів при зростанні струму  $I$ , навпаки, стає дещо більшою (рис. 5, д).



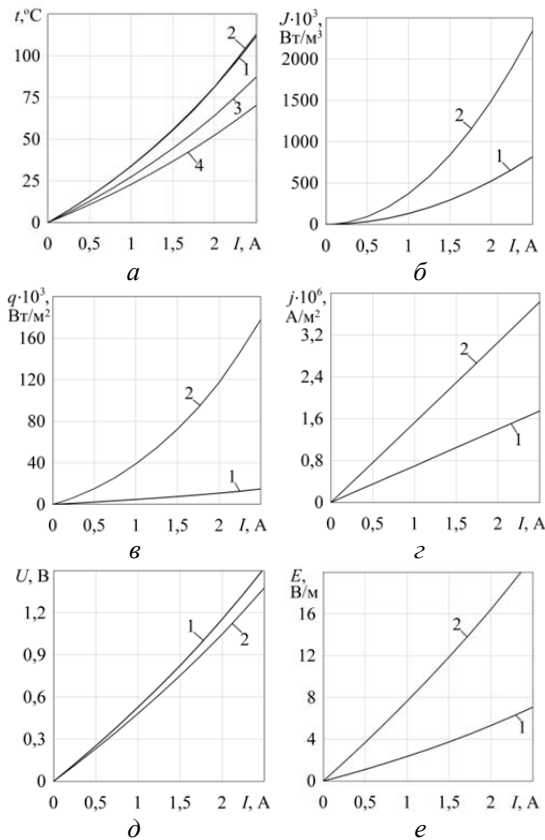


Рис. 5. Функціональні залежності  $t(I)$ ,  $J(I)$ ,  $q(I)$ ,  $j(I)$ ,  $U(I)$ ,  $E(I)$  температури  $t$  (а), джоулевого нагріву  $J$  (б), густини теплового потоку  $q$  (в), густини струму  $j$  (г), напруги  $U$  (д) та напруженості  $E$  (е) електричного поля для моделей термоелектричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелементів при різному амперажі  $I$ :  
 1 – спосіб класичного з'єднання;  
 2, 3, 4 – спосіб короткого з'єднання

Функціональні залежності  $\sigma(I)$ ,  $\epsilon(I)$  еквівалентного стресу  $\sigma$  та величини деформацій  $\epsilon$  для напівпровідників термоелектричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелементів при зміні робочого струму  $I$  від 0 до 2,5 А наведено на рис. 6.

Еквівалентний стрес  $\sigma$  при зміні робочого струму  $I$  від 0 до 2,5 А в напівпровідникових термоелектричних елементах при їх короткому способі контактного з'єднання (рис. 6, а) дещо нижчий ніж в напівпровідникових термоелектричних елементах зі звичайним класичним способом їх з'єднання. Також, виявлено екстремальну точку біля значення сили струму 1,25 А, після якої еквівалентний стрес  $\sigma$  в обох термоелектричних модулях стрімко зростає. Деформація  $\epsilon$  при зміні робочого струму  $I$  від 0 до 2,5 А в напівпровідникових термоелектричних елементах при різних способах їх контактного з'єднання відбувається по різному. Для модуля

зі способом класичного контактного з'єднання його напівпровідникових термоелектричних елементів деформація  $\epsilon$  стрімко зростає прямо пропорційно збільшенню сили робочого струму  $I$ . В той же час, для модуля з коротким способом контактного з'єднання його напівпровідникових термоелементів деформація  $\epsilon$  в досліджуваному діапазоні амперажу повільно знижується до значення сили струму 1 А, після цього вона починає повільно зростати.

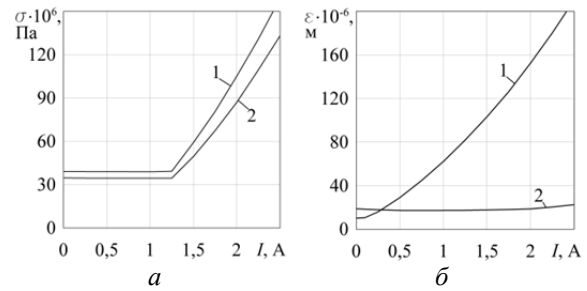


Рис. 6. Функціональні залежності  $\sigma(I)$ ,  $\epsilon(I)$  еквівалентного стресу  $\sigma$  (а) та величини деформацій  $\epsilon$  (б) для напівпровідників термоелектричних модулів з різним контактним з'єднанням напівпровідникових термоелементів при різному амперажі  $I$ :  
 1 – спосіб класичного з'єднання;  
 2 – спосіб короткого з'єднання

Також, для читача можуть представляти науковий і академічний інтерес робота [9] та результати подібних розрахунків інших конструкцій термоелектричних модулів, викладених в [8, 10].

**Висновки.** Проаналізовано два термоелектричні модулі при способах класичного та короткого контактного з'єднання їх напівпровідникових термоелектричних елементів. Встановлено, що з'єднання напівпровідникових термоелектричних елементів способом короткого контактного з'єднання в ланцюг з формою «П-подібної змійки» для створення термоелектричного модуля призводить до утворення нерівномірності стаціонарного температурного поля на його гарячій стороні. При цьому температура  $t$  в місцях «П-подібних поворотів змійки» знижується, а ефективність термоелектричного ефекту в таких термоелектричних модулях буде зменшеною.

### Література

1. Анатычук Л.И. Термоэлектрические преобразователи энергии. Термоэлементы. Элементная база термоэлектричества. Т. 2.: монография / ред. Л.Н. Вихор, О.Я. Лусте. Киев-Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 376 с.

2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. К.: Наукова думка, 1979. 768 с.
3. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Приступа С.В., Пастух О.В., Голубєва С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. К.: ДУІТ, 2021. – Випуск 3 (34). – С. 13-21.
4. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Приступа С.В., Пастух О.В. Термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною для установок і пристроїв суднової енергетики. Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання-2021». К.: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного ДУІТ. 2021. С. 88-92.
5. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.
6. Кириченко О.С. Термоелектричні модулі з різним типом комутаційного з'єднання напівпровідникових термопар. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції "Modern methods of applying scientific theories". Лісабон: ISG, 2023. С. 459-462. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.10>
7. Кириченко О.С. Температурні режими термоелектричних ланцюгів з напівпровідниками класичних форм при різному комутаційному з'єднанні. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Actual issues of the development of science and ensuring the quality of education". Флоренція: ISG, 2023. С. 395-398. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.12>
8. Кириченко О.С. Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – Київ: ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2023. Том 34 (73). № 1. – С. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
9. Кириченко О.С. Критерії формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання. Освітологічний дискурс: наукове електронне видання. Київ. 2017. № 3-4 (18-19). С. 296-308.
10. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бугрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. К.: ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2018. Том 29 (68). Ч.1. №6. С. 58-63.
11. Леонтьєв В.О., Бєвз С.В., Видмиш В.А. Електротехнічні матеріали. Вінниця: ВНТУ, 2013. 122 с.
12. Манасян Ю.Г. Судовые термоэлектрические устройства. Л.: Судостроение, 1968. 283 с.
13. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladyshev D., Hnat H. – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 464 r. Available at: DOI – 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
14. H. Julian Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / H. Julian Goldsmid. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 2016. – 278 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7

#### References

1. Anatyichuk L.I. Termoelektricheskie preobrazovateli energii. Termoelementyi. Elementnaya baza termoelektrichestva. T. 2.: monografiya / red. L.N. Vihor, O.Ya. Luste. Kiev-Chernovtsy: Institut termoelektrichestva, 2003. 376 s.
2. Anatyichuk L.I. Termoelementyi i termoelektricheskie ustroystva: Spravochnik. K.: Naukova dumka, 1979. 768 s.
3. Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Kolesnyk V.V., Kostiuhenko V.I., Pristupa S.V., Pastukh O.V., Holubieva S.M. Modeliuvannia statsionarnoho teplovoho polia strumoprovodnykh shyn sudnovykh HRSshch. Vodnyi transport. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. K.: DUIT, 2021. – Vypusk 3 (34). – S. 13-21.
4. Taranenko S.V., Kyrychenko O.S., Kolesnyk V.V., Pristupa S.V., Pastukh O.V. Termoelektrychnyi element z kompensovanoi komutatsiinoiu plastynoiu dlia ustanovok i prystroiv sudnovoї enerhetyky. Materialy II mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Dniprovskii chytannia-2021». K.: vyd-vo Kyivskoho instytutu vodnoho transportu imeni hetmana Petra Konashevycha-Sahaidachnoho DUIT. 2021. S. 88-92.
5. Karvatskyi A.Ia. Metod skinchennykh elementiv u zadachakh mekhaniky sutsilnykh seredovyshch. Prohramna realizatsiia ta vizualizatsiia rezultativ. K.: NTUU «KPI», 2015. 391 s.
6. Kyrychenko O.S. Termoelektrychni moduli z ryznym typtom komutatsiinoho ziednannia napivprovodnykovykh termopar. Materialy X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Modern methods of applying scientific theories". Lisabon: ISG, 2023. S. 459-462. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.10>
7. Kyrychenko O.S. Temperaturni rezhymy termoelektrychnykh lantsiuhiv z napivprovodnykamy klasychnykh form pry

- riznomu komutatsiinomu ziednanni. Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Actual issues of the development of science and ensuring the quality of education". Florentsiia: ISG, 2023. S. 395-398. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.12>
8. Kyrychenko O.S. Porivnialnyi analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznyimi heometrychnymi formamy napivprovodnykiv dlia elektroobladnannia transportu. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. – Kyiv: TNU im. V.I. Vernadskoho, 2023. Tom 34 (73). № 1. – S. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
  10. Kyrychenko O.S. Kryterii formuvannia hotovnosti do profesiinoi diialnosti inzheneriv na osnovi 3D-modeliuвання. Osvitolohichni dyskurs: naukovе електронне vydannia. Kyiv. 2017. № 3-4 (18-19). S. 296-308.
  11. Kyrychenko O.S., Biliuk I.S., Shareiko D.Iu., Fomenko A.M., Havrylov S.O., Buhrim L.I. Chyselne trymirne modeliuвання termoelektrychnoho okholodzhuvacha vymiriuvalnoho електростаткування avtomatychnykh system. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. K.: TNU im. V.I. Vernadskoho, 2018. Tom 29 (68). Ch.1. №6. S. 58-63.
  12. Leontiev V.O., Bevz S.V., Vydmysh V.A. Elektrotekhnichni materialy. Vinnytsia: VNTU, 2013. 122 s.
  13. Manasyan Yu.G. Sudovyye termoelektricheskie ustroystva. L.: Sudostroenie, 1968. 283 s.
  14. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph / Hladysh D., Hnat H. – etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2023. – 464 r. Available at: DOI – 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1
  15. H. Julian Goldsmid. Introduction to Thermoelectricity. Second Edition / H. Julian Goldsmid. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 2016. – 278 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49256-7

**Kyrychenko O.S. Thermoelectric modules with different methods of contact connection of semiconductor thermoelements**

*The article analyzes thermoelectric modules with various methods of contact connection of semiconductor thermoelectric elements. Some main areas of applica-*

*tion of thermoelectric modules are given, for example, in general industrial blocks and units, general industrial power engineering and ship power engineering, in transport, in measuring equipment, in medical engineering and food industry. The breadth and specifics of the use of thermoelectric modules necessitate further exploratory research to improve thermoelectric effects and reduce thermal stresses in them.*

*Three-dimensional geometric models of two thermoelectric modules were created, in which different methods of contact connection of semiconductor thermoelectric elements were applied. At the same time, the thermoelectric elements of both modules represented a chain with the shape of a "II-shaped snake". The thermoelectric module with the method of classical connection of semiconductor thermoelements had dimensions of 25.5×30×7 mm (excluding the thickness of the isolation layer), and the thermoelectric module with the method of short connection had dimensions of 35.5×42×9 mm (excluding the thickness of the isolation layer). Each of the two considered thermoelectric modules consisted of 39 semiconductor thermoelectric pairs and contained 20 P-type semiconductors, 20 N-type semiconductors and 41 copper contact connection plates.*

*On the basis of three-dimensional geometric models, calculation models were created, the calculation itself was carried out using a numerical method. As a result of the calculation, the distribution of the main operating parameters for thermoelectric module models at 2.5 A current was obtained. Functional dependences for temperature, Joule heating, heat flux density, current density, voltage and electric field strength were constructed for thermoelectric module models with different contact by the connection of semiconductor thermoelectric elements when the operating current changes in the range from 0 to 2.5 A. It has been established that the connection of semiconductor thermoelectric elements by the method of short contact into a chain with the shape of a "II-shaped snake" to create a thermoelectric module leads to the formation of irregularities in the stationary temperature field on its hot side. At the same time, the temperature in the places of "II-shaped turns of the snake" decreases, and the efficiency of the thermoelectric effect in such thermoelectric modules will be reduced.*

**Keywords:** *thermoelectric modules, method of contact connection, semiconductor thermoelements, thermoelectric effect.*

**Кириченко О.С.** – к.т.н., доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, м. Київ, [oskyrychenko@gmail.com](mailto:oskyrychenko@gmail.com)

Стаття подана 05.02.2023.