

УДК 621.3.082.62

Кириченко О.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Білюк І.С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Шарейко Д.Ю.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Фоменко А.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Гаврилов С.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Бугрім Л.І.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ЧИСЕЛЬНЕ ТРИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті викладено основні результати чисельного тримірного моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. У дослідженні побудовано тримірну математичну модель термоелектричного охолоджувача з габаритними розмірами 23×23 мм, який містить 71 P-N-перехід. На основі тримірної математичної моделі отримано картини розподілу електричного потенціалу, густини струму, напруженості електричного поля, стаціонарного теплового поля та резистивного нагріву з об'єму термоелектричного охолоджувача. Також досліджено вплив матеріалу контактних пластин між напівпровідниками P- та N-типу на ефективність термоелектричного охолодження.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, ефект Пельтьє, напівпровідник, контактна пластина, вимірювальне електроустаткування.

Постановка проблеми. Термоелектричні охолоджувачі широко використовуються в специфічному електроустаткуванні сучасних автоматичних систем. Це пов'язано з повною неможливістю функціонування більшості компресорних систем охолодження в нахиленому або перевернутому стані через особливості геометрії конструкцій багатьох вимірювальних приладів автоматичних систем. Прикладом подібних вимірювальних приладів є віскозиметри, денсиметри, реометри або рефрактометри. Отримані дані з цих вимірювальних приладів використовується як інформація для зворотних зв'язків за відповідними параметрами в автоматичних системах для забезпечення необхідних процесів керування.

Наприклад, сучасні віскозиметри комплектуються вбудованим термоелектричним охолодженням для підтримки часто необхідних температур

20 або 25°C, при цьому можна відмовитись від зовнішнього охолодження шляхом використання віскозиметричних термостатів з вбудованим охолодженням на елементах Пельтьє, які є надзвичайно компактними і економлять простір приміщення. Денсиметри, які використовують у вимірюваннях густини рідин і твердих тіл, також комплектуються вбудованим термостатом на елементах Пельтьє, при цьому температурний діапазон може становити від 15°C до 70°C. Реометри також містять унікальні температурні системи на елементах Пельтьє, що дає змогу швидко і точно контролювати температуру для вимірювань у діапазоні від 0°C до 180°C, завдяки спеціальній комплексній системі повітряного контр-охолодження немає необхідності у зовнішньому рідинному термостаті.

Дослідження термоелектричних охолоджувачів вимірювального електроустаткування автома-

тичних систем дуже часто проводять із використанням систем автоматизованого проектування [1; 2; 9; 12], із використанням чисельних методів розрахунку [4; 10; 11].

Як зазначалось вище, термостати з вбудованими термоелектричними охолоджувачами на тепер набули значного поширення в сучасному вимірювальному електроустаткуванні автоматичних систем, проте термоелектричні охолоджувачі, на яких вони побудовані, продовжують розвиватись шляхом удосконалення або оновлення конструкцій і використання в них різних електротехнічних матеріалів та їх сполук. Цей розвиток супроводжується тим, що наявні математичні моделі або не здатні, або не повною мірою придатні для нових конструкцій термоелектричних охолоджувачів. Тому актуальними залишаються питання чисельного моделювання термоелектричних охолоджувачів вимірювального електроустаткування автоматичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чисельному моделюванню прямого та зворотного термоелектричного ефекту присвячена значна кількість робіт. Дослідження в цих роботах спрямовані на створення нових конструкцій термоелектричних модулів і сполук термоелектричного матеріалу для підвищення ефективності використання термоелектричного ефекту.

У роботі [2] розроблено метод комп'ютерного проектування термоелектричних систем конверсії теплової енергії океану. Ефективність методу продемонстровано на прикладі конкретної фізичної моделі подібної системи. Крім того, визначено оптимальні параметри термоелектричного генератора, за яких досягається максимум генерації потужності з урахуванням втрат на власні потреби.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень датчиків теплового потоку, виготовлених за технологією термоелектричних мікромодулів, наведено в [3]. Проаналізовано вплив термоелектричного матеріалу й параметрів конструкції модулів на основні характеристики подібних датчиків. Розроблено термоелектричні датчики нових серій, які порівняно з відомими мають більш високу абсолютну чутливість, суттєво більш високу, ніж у датчиках на основі диференціальних термопар швидкодію та ін.

У роботі [7] розглянуто основні технологічні операції створення термоелектричних перетворювачів енергії на основі телуриду германію. Проаналізовано використання термоелектричних модулів як термоелектричних холодильників та

підвищення ефективності роботи таких пристроїв у разі використання легованих сполук телуриду свинцю. Також створено дослідний зразок термоелемента та побудовано залежності величини термо-ЕРС від різниці температур.

Узагальнену математичну модель процесу нестационарного термоелектричного охолодження запропоновано в [8]. Сформульовано задачу оптимального керування нестационарним термоелектричним охолоджувачем з довільним числом каскадів, яка полягає у визначенні оптимальної залежності струму живлення від часу, що забезпечує мінімальну температуру охолодження. Запропоновано метод її вирішення та наведено приклади комп'ютерного моделювання оптимальних функцій керування процесом нестационарного охолодження.

В [12] на основі комп'ютерної 3D-моделі проникного термоелемента для охолодження потоків рідин та газів чисельно розраховано енергетичні характеристики термоелемента з елементів на основі Bi-Te-Se-Sb. Досліджено вплив швидкості прокачки теплоносія та напруги живлення термоелемента на перепад температур й характеристики перетворення енергії.

Метою статті є висвітлення результатів чисельного тримірного моделювання термоелектричного охолоджувача, що застосовується у вимірювальному електроустаткуванні автоматичних систем, а також встановлення впливу матеріалу контактних пластин між термоелектричним матеріалом на ефективність термоелектричного охолодження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для опису термоелектричних процесів використовується потужний математичний апарат у вигляді системи диференціальних рівнянь. У загальному випадку основні рівняння для термоелектричних, термомагнітних і гальванотермомагнітних явищ щодо процесів розповсюдження тепла та електрики в кристалах такі [1]:

$$\left. \begin{aligned} E_i^* &= \rho_{ik} j_k + \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \\ q_l &= T \alpha_{kl} j_k - \chi_{lm} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $E_i^* = -\frac{1}{e} \nabla_i \bar{\mu}$ – компонента напруженості електричного поля;

ρ_{ik} – компонента тензора питомого електроопору;

α_{kl} – компонента тензора термоЕРС;

q_l – компонента вектора густини теплового потоку;

j_k – компонента вектора густини електричного струму;

χ_{lm} – компонента тензора теплопровідності;
 φ – електрохімічний потенціал носіїв струму;
 e – заряд носіїв струму;

x_m – декартові координати, індекси i, k, l, m пробігають значення 1, 2, 3, причому по двічі зустрічних індексах ведеться сумування.

У неізотермічному неоднорідному або анізотропному середовищі за наявності градієнта температури напруженість електричного поля E_i^* , згідно з першим рівнянням (1), містить не тільки омичний складник $\rho_{ik}j_k$, але також напруженість поля сторонніх сил неелектричної природи:

$$E_i^* = \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m}, \quad (2)$$

що називається термоелектричним полем.

ТермоЕРС у замкненому контурі C , згідно із загальним визначенням ЕРС, може бути представлена у вигляді:

$$E = \oint_C E_i^* dl = \oint_C \alpha_{im} \frac{\partial T}{\partial x_m} dx_i. \quad (3)$$

Для виконання чисельного тримірного моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем необхідно, по-перше, створити його точну тримірну геометричну модель. При цьому слід зазначити, що геометричне моделювання є складником математичного моделювання. Таке моделювання використовується як на етапах проектування, так і в процесі розробки конструкторської документації в різних галузях промисловості.

Далі, по-друге, необхідно створити реалістичну тримірну модель термоелектричного охолоджувача, яка, окрім зручної зовнішньої візуалізації електротехнічних матеріалів, містить дані про фізичні властивості всіх електротехнічних матеріалів. Створення математичної моделі проводилось з урахуванням досвіду вирішення польових задач електротехніки та електроенергетики, викладених у [4–5]. На рис. 1 показано тримірні моделі термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем.

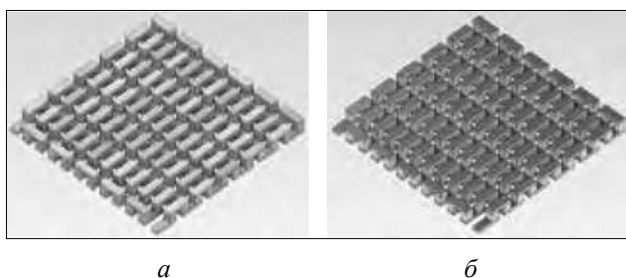


Рис. 1. Геометрична (а) та реалістична (б) тримірні моделі термоелектричного охолоджувача

Тримірна модель термоелектричного охолоджувача складається з напівпровідникових матеріалів Р- та N-типу, кожен напівпровідник має однакову форму куба з довжиною ребра 1 мм. Напівпровідникові матеріали Р- та N-типу з'єднані по чергово між собою металевими контактними пластинами, що мають однакову форму паралелепіпедів розмірами $1 \times 0,5 \times 3$ мм. Перша та остання контактні металеві пластини являють собою контактні виводи для під'єднання проводів електроживлення. Ланцюг з напівпровідникових елементів і їх металевих контактних пластин містить 71 Р-N-перехід і являє собою форму «П-подібної змійки», яку розміщено таким чином, що габаритні розміри спроектованого термоелектричного охолоджувача становлять 23×23 мм товщиною 2 мм (без урахування товщини двох керамічних пластин ізоляційного корпусу). Реалістична тримірна модель термоелектричного охолоджувача призначена для наочної візуалізації, а також містить потрібну для чисельного розрахунку інформацію про фізичні властивості електротехнічних матеріалів, що використано в моделі.

Перед проведенням чисельного розрахунку необхідно задати граничні умови щодо температури та електричного потенціалу. Вважалось, що температура зовнішніх поверхонь нагрітих контактних пластин була незмінною і становила 20°C . Також задано граничну умову про нульову величину електричного потенціалу на крайній торцевій поверхні останньої металеві контактної пластини.

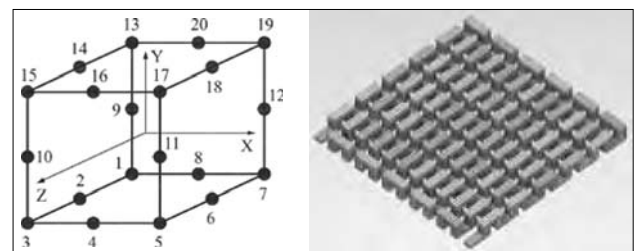


Рис. 2. Кубічний кінцевий елемент (а) та кінцево-елементна тримірна модель (б) термоелектричного охолоджувача

Чисельне вирішення тримірних задач, по-третє, передбачає створення кінцево-елементної моделі, що передбачає подолання суттєвих складностей у роботі з даними. До найбільш часто використовуваних кінцевих елементів відносять тетраедри, гексаедри, а також призматичні елементи. На рис. 2 а показано кубічний кінцевий елемент з двадцятьма вузлами. Функції

форми визначаються різними формулами залежно від розташування вузлів, які можуть знаходитись у вершинах або на сторонах, які паралельні осям [1]. Вибір типу використовуваного елемента залежить перш за все від галузі фізики вирішуваної задачі.

В електротехніці і термодинаміці для врахування зміни констант у переході від одного середовища до іншого часто використовуються лагранжеві елементи. Кінцево-елементна тримірна модель термоелектричного охолоджувача (рис. 2 б) містить 281 просторовий об'єкт, зокрема 143 контактні пластини, 71 напівпровідник P-типу та 71 напівпровідник N-типу. Число вузлів 158403 і число кінцевих елементів 24614 кінцево-елементної моделі потребувало значних обчислювальних потужностей.

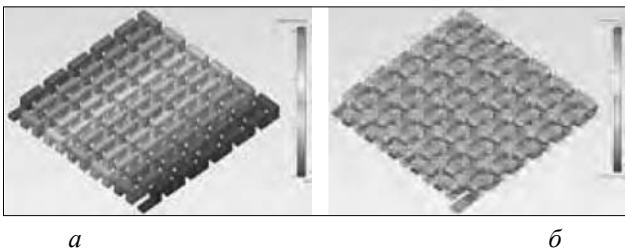


Рис. 3. Картина розподілу електричного потенціалу $\phi(x, y, z)$ (а) та густини струму $j(x, y, z)$ (б) по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили струму 3А

Результати розрахунку містять дані про картину розподілу електричного потенціалу $\phi(x, y, z)$ (рис. 3 а) та густини струму $j(x, y, z)$ (рис. 3 б) по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили постійного струму 3А. При цьому електричний потенціал ϕ розподілено по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача в діапазоні від 0 до приблизно 6,2 В (рис. 3 а). З рис. 3 б видно, що найбільша густина струму $j = 7,2 \cdot 10^6$ А/м² спостерігається в металевих контактних пластинах між P-N-переходами та на крайніх контактних пластинах, це пояснюється геометрією спроектованого термоелектричного охолоджувача, а саме найменшою площею поперечного перерізу в проходженні струму в зазначених місцях пластин.

На рис. 4 а проілюстровано картину розподілу електричного поля по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили постійного струму 3А. При цьому максимальна величина напруженості електричного поля $E = 51,7$ В/м спостерігається в напівпровідникових матеріалах термоелектричного охолоджувача.

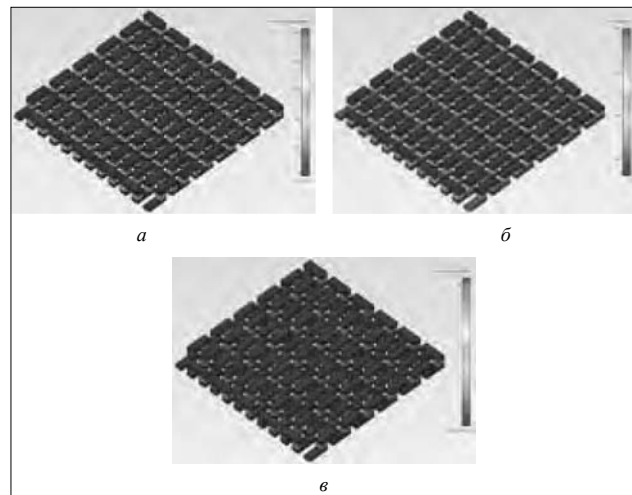


Рис. 4. Картина розподілу електричного поля $E(x, y, z)$ (а), стаціонарного теплового поля $t(x, y, z)$ (б), резистивного нагріву $Q(x, y, z)$ (в) по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили струму 3А

Картину розподілу стаціонарного теплового поля $t(x, y, z)$ по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача приведено на рис. 4 б. Слід зазначити, що чисельні розрахунки температурного поля термоелектричного охолоджувача проводились в адіабатичному режимі. Таким чином оцінювалась верхня межа для температури без урахування конвекції та теплового випромінювання, а отже, отримана картина температурного поля відповідає більш напруженому режиму роботи термоелектричного охолоджувача.

На рис. 4 в наведено картину розподілу резистивного нагріву $Q(x, y, z)$ по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними контактними пластинами за сили постійного струму 3А. Максимальний резистивний нагрів спостерігається в напівпровідниках і становить $Q = 9,5 \cdot 10^7$ Вт/м³.

На основі отриманої чисельної тримірної математичної моделі термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем побудовано графіки залежностей $t(I)$ (рис. 5 а) температури t від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А за застосування різних металів матеріалами контактних пластин. Як видно з графіка (рис. 5 а), в діапазоні струму від нуля до значення 0,8А температурні криві для всіх матеріалів контактних пластин співпадають, у діапазоні струмів понад 0,8А криві різні. Слід зазначити, що найбільший термоелектричний ефект охолодження досягнуто за використання контактних пластин з міді (крива 1 на рис. 5 а). За сили постійного струму 3А зовнішня поверхня холодних

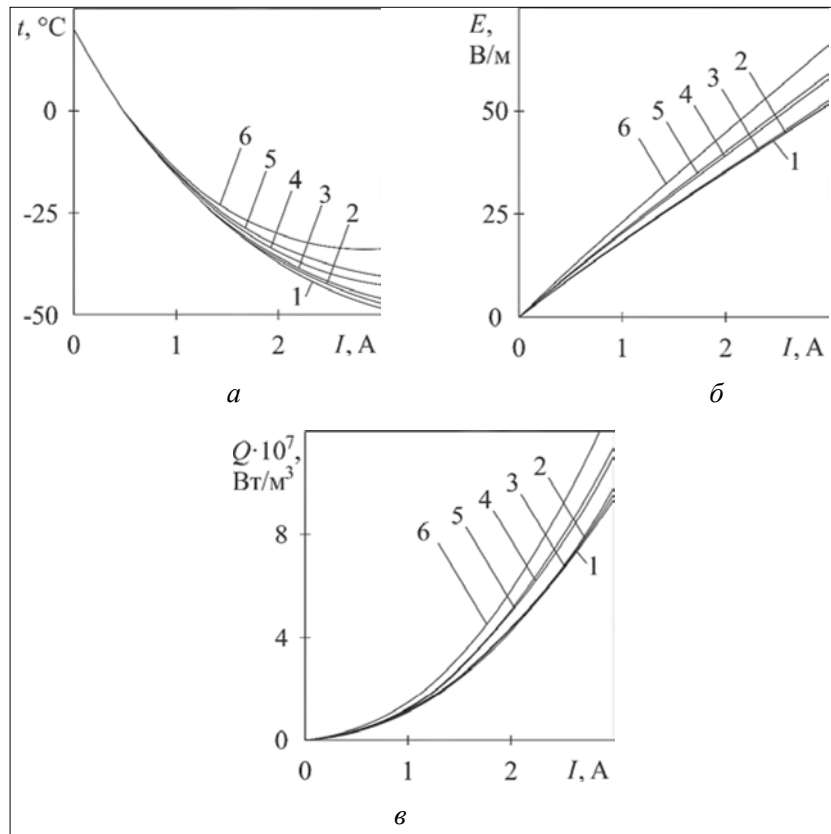


Рис. 5. Графіки залежностей температури $t(I)$ на зовнішній поверхні охолоджених контактних пластин (а), напруженості електричного поля $E(I)$ та резистивного нагріву $Q(I)$ від сили постійного струму I через термоелектричний охолоджувач: 1 – для мідних пластин; 2 – для алюмінієвих пластин; 3 – для нікелевих пластин; 4 – для титанових пластин; 5 – для сталевих пластин; 6 – для вісмутових пластин

контактних пластин з міді охолоджується до температури $-47,6^{\circ}\text{C}$. Значення температури охолодження для зовнішніх поверхонь контактних пластин з алюмінію (крива 2 на рис. 5 а) та нікелю (крива 3 на рис. 5 а) за сили струму 3А становлять відповідно $-47,5^{\circ}\text{C}$ і -47°C .

Температура зовнішніх поверхонь контактних пластин з титану (крива 4 на рис. 5 а), сталі (крива 5 на рис. 5 а) та вісмуту (крива 6 на рис. 5 а) за сили струму 3А становлять відповідно $-42,2^{\circ}\text{C}$, $-41,1^{\circ}\text{C}$, $-33,8^{\circ}\text{C}$. Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок про недоцільність застосування перелічених матеріалів як контактних пластин, оскільки ефективність термоелектричного охолоджувача в разі їх застосування значно зменшується. Порівняно з міддю у разі застосування вісмуту за однакової сили струму 3А в обох випадках температура зовнішніх поверхонь контактних пластин буде меншою на $13,8^{\circ}\text{C}$.

Залежності $E(I)$ максимальної напруженості E електричного поля у напівпровідниках від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А у разі застосування різних металів матеріалами кон-

тактних пластин показано на рис. 5 б. З графіка видно, що ці залежності є лінійними, максимум напруженості електричного поля у напівпровідниках становить $E = 66 \text{ В/м}$ за сили струму $I = 3 \text{ А}$ і застосування контактних пластин з вісмуту.

На рис. 5 в представлено залежності $Q(I)$ резистивного нагріву Q у напівпровідниках від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А у разі застосування різних металів матеріалами контактних пластин. Найбільший резистивний нагрів $Q = 1,323 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$ спостерігається за сили струму $I = 3 \text{ А}$ і застосування контактних пластин з вісмуту.

Висновки.

У роботі створено чисельну тримірну математичну модель термоелектричного охолоджувача з габаритними розмірами $23 \times 23 \text{ мм}$.

Отримано картини розподілу електричного потенціалу $\phi(x, y, z)$, густини струму $j(x, y, z)$, напруженості електричного поля $E(x, y, z)$, стаціонарного температурного поля $t(x, y, z)$ та резистивного нагріву $Q(x, y, z)$ по тримірній моделі термоелектричного охолоджувача з мідними кон-

тактними пластинами за сили струму $I = 3\text{А}$. При цьому картина стаціонарного температурного поля підтверджує ефективність роботи термоелектричного охолоджувача, різниця між нагрітою та охолодженою поверхнями термоелектричного охолоджувача досягла $27,6^\circ\text{C}$.

Досліджено вплив матеріалу металевих контактних пластин між P-N-переходами на ефективність

термоелектричного охолодження. Встановлено, що найбільша ефективність досягається у разі використання контактних пластин з міді, а найменша ефективність за використання вісмутових пластин. Побудовано відповідні залежності для температури $t(I)$, напруженості $E(I)$ електричного поля та резистивного нагріву $Q(I)$ від сили постійного струму I у його варіаціях від 0 до 3А.

Список літератури:

1. Анатичук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник. К.: Наукова думка, 1979. 768 с.
2. Анатичук Л.И., Поляк В.М. Компьютерное проектирование термоэлектрического ОТЕС. *Термоелектрика*: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. К., 2015. № 2. С. 38–49.
3. Громов Г.Г., Глязер С.А., Захарцев Ю.В. Термоелектричні датчики теплового потоку. *Термоелектрика*: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. К., 2015. № 6. С. 82–90.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
5. Кириченко О.С., Костюченко В.І., Захаров Д.О. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю. *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2017. № 1 (6). С. 60–63.
6. Кириченко О.С., Сидорика І.М., Марченко Д.Д. Електротепловий аналіз елементів навчально-дослідного стенду електротехнічної лабораторії. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. Миколаїв, 2017. Вип. 4 (96). С. 168–176.
7. Криськов Ц.А., Рачковський О.М., Оптасюк С.В. Технологія створення віток термоелектричних перетворювачів енергії. *Вісник Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Фізико-математичні науки*. Кам'янець-Подільський: КПНУ ім. Івана Огієнка, 2014. Вип. 7. С. 60–68.
8. Коцур М.П. Математичне моделювання та оптимізація процесу нестаціонарного термоелектричного охолодження. *Технологический аудит и резервы производства*. Харьков, 2016. № 1/2(27). С. 29–34.
9. Кулон Жан-Луи, Сабоннадьер Жан-Клод. САПР в електротехніці. М.: Мир, 1988. 208 с.
10. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.
11. Сабоннадьер Жан-Клод, Кулон Жан-Луи. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 192 с.
12. Черкез Р.Н., Феняк П.П., Дем'янюк Д.Д. Комп'ютерне моделювання проникного термоелемента охолодження. *Термоелектрика*: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. Київ, 2013. № 5. С. 64–74.

ЧИСЛЕННОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В научной статье изложены основные результаты цифрового трехмерного моделирования термоэлектрического охладителя измерительного электрооборудования автоматических систем. В исследовании построена математическая модель термоэлектрического охладителя с габаритными размерами 23×23 мм, который содержит 71 P-N-переход. На основе трехмерной математической модели получены картины распределения электрического потенциала, плотности тока, электрического поля, стационарного теплового поля и резистивного нагрева по объему термоэлектрического охладителя. Также исследовано влияние материала контактных пластин между полупроводниками P- и N-типа на эффективность термоэлектрического охлаждения.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, эффект Пельтье, полупроводник, контактная пластина, измерительное электрооборудование.

NUMERICAL THREE-DIMENSIONAL MODELING OF THERMOELECTRIC COOLER FOR MEASUREMENT ELECTRICAL EQUIPMENT OF AUTOMATIC SYSTEMS

The scientific article presents the main results of numerical three-dimensional modeling of the thermoelectric cooler of measuring electrical equipment of automatic systems. The study built a mathematical model of a thermoelectric cooler with dimensions of 23×23 mm, which contains a 71 P-N-junction. On the basis of a three-dimensional mathematical model, the patterns of electric potential distribution, current density, electric field, stationary thermal field and Joule heat generation over the volume of a thermoelectric cooler are obtained. Also, the influence of the material of contact plates between P and N-type semiconductors on the thermoelectric cooling efficiency has been investigated.

Key words: thermoelectric cooler, Peltier effect, semiconductor, contact plate, electrical measuring equipment.