

Константинович І.А. канд. фіз-мат. наук, доцент
Кузь Р.В. канд. фіз-мат. наук
Маханець О.М. доктор фіз-мат. наук, професор
Черкез Р.Г. доктор фіз-мат. наук, професор

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна,
e-mail: i.konstantynovych@chnu.edu.ua

СЕКЦІЙНІ ГЕНЕРАТОРНІ ТЕРМОЕЛЕМЕНТИ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ

За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі секційних термоелементів у магнітному полі. Визначено температурні залежності ККД секційних гіротропних термоелементів. Встановлено, що ККД генераторних секційних гіротропних термоелементів залежить від кількості секцій. Бібл. 14, рис. 4.

Ключові слова: термомагнітна добротність, коефіцієнт Нернста-Еттінгсгаузена, секційний гіротропний термоелемент, гіротропний матеріал, термомагнітна добротність, ККД.

Вступ

Сьогодні термоелектричні пристрої та системи використовуються в багатьох галузях промисловості, включаючи медичну, космічну, військову, енергетичну, холодильну та приладобудівну. Для подальшого розвитку важливо досліджувати відомі та створювати нові типи термоелектричних матеріалів та термоелементів на їх основі, зокрема, для генерації електроенергії в магнітних полях при наявності перпендикулярного до них градієнта температур [1 – 14].

Відомо, що гіротропні генераторні термоелементи мають ряд переваг над класичними, таких як безпаяність з'єднання і тим самим можливість регулювання величини необхідної напруги, що гарантує надійність і технологічність гіротропних термоелементів та перетворювачів в цілому. Гіротропні термоелементи у якості сенсорів, також можуть підвищувати свою чутливість та час оклику через конструктивні рішення і можуть бути ефективно використовуються у вимірювальній техніці.

Тому дослідження ефективності гіротропних матеріалів та термоелементів на їх основі є важливим та актуальним для їх подальшого використання в загальній вимірювальній та приладобудівній техніці. При цьому метою даної роботи є розрахунок основних параметрів секційних гіротропних термоелементів та оцінка ефективності їх використання.

Результати комп'ютерного моделювання

Для дослідження параметрів гіротропних термоелементів необхідно розв'язати наступне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами:

$$\kappa \Delta T + \rho_0 j^2 + 2\alpha_a \left(j_y \frac{\partial T}{\partial x} - j_x \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

де T – температура; κ – коефіцієнт теплопровідності гіротропного середовища; ρ_0 – питомий електричний опір; x, y – координати; j, j_x, j_y – модуль та проекції вектора густини електричного струму; $\alpha_{\perp} = Q_{\perp} B$ – асиметрична частина тензора термоЕРС; Q_{\perp} – поперечний коефіцієнт Нернста-Еттінгсгаузена; B – індукція магнітного поля.

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \alpha_a & 0 \\ -\alpha_a & \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де α_0, α_{\perp} – діагональні компоненти тензора термоЕРС.

$$Z_Q = \frac{Q_{\perp}^2 B^2(r)}{\kappa \rho}. \quad (3)$$

Для проведення подальшого моделювання було розглянуто низку гіротропних матеріалів, визначено найперспективніші з них. Далі використовуючи експериментальні дані було побудовано залежності термомагнітної добротності від температури для *InSb* та *InAs*, також отримані поліноми, які у подальшому використовуються для побудови розподілів температур та розрахунку ККД гіротропних термоелементів. На рис. 1 наведено температурні залежності термомагнітної добротності для матеріалів *InSb* та *InAs*. Видно, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є *InSb*, що узгоджується з експериментальними результатами, приведеними в роботі [1, 11, 12].

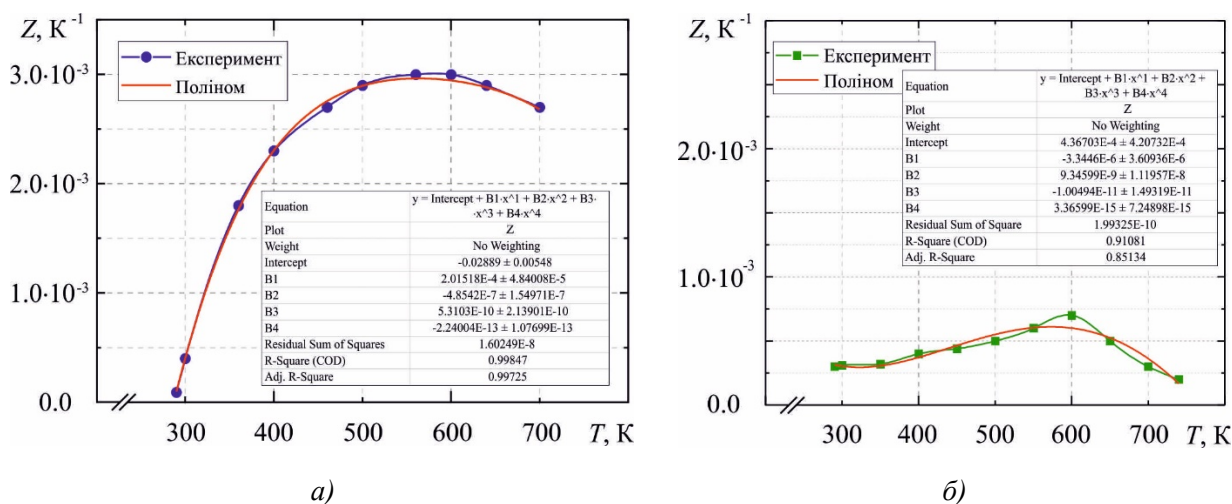


Рис. 1. Залежність термомагнітної добротності від температури для матеріалів *InSb* (а) та *InAs* (б)

У подальшому для побудови комп'ютерних моделей секційних гіротропних термоелементів використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics 6.2. Розрахунок розподілів температур в гіротропних термоелементах здійснювався методом скінченних

елементів. За допомогою комп'ютерного моделювання було визначено розподіли температур для матеріалу *InSb* в інтервалі температур 300 – 700 К та магнітному полі з індукцією $B = 1.4$ Тл (рис. 2).

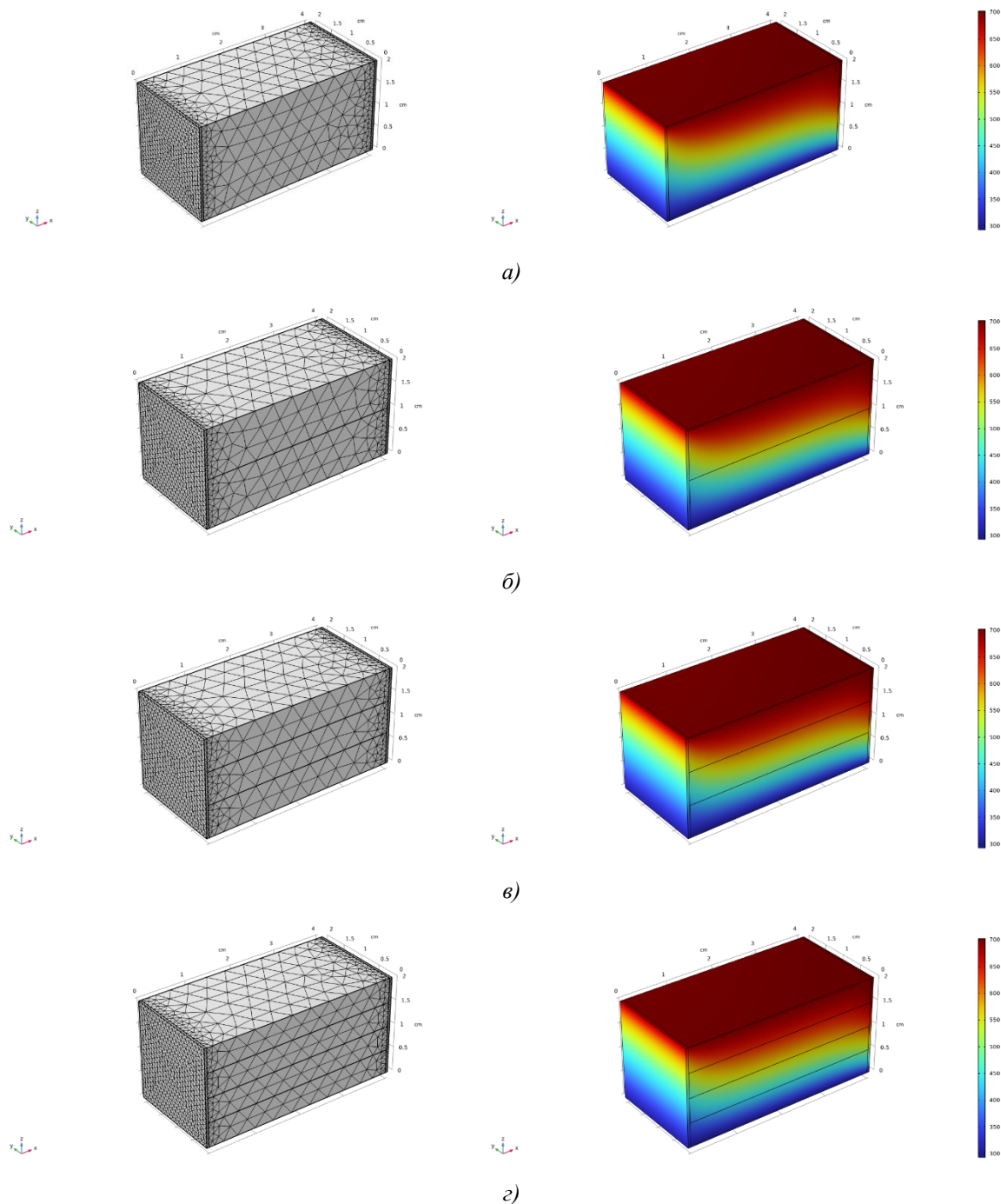


Рис. 2. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (з ліва) та розподілу температур (з права) в одно та багатосекційних гіротропних термоелементах прямокутної форми з врахуванням електричних контактів (де а – 1 секція, б – 2 секції, в – 3 секції, г – 4 секції)

Варто зазначити, що на гранях враховано контактні електричні опори, які зазвичай знижують очікуваний позитивний ефект від використання секційних віток.

Далі на рис. 3 представлено залежності ККД одно та багатосекційних термоелементів від температури гарячої сторони для матеріалу *InSb* та *InAs*.

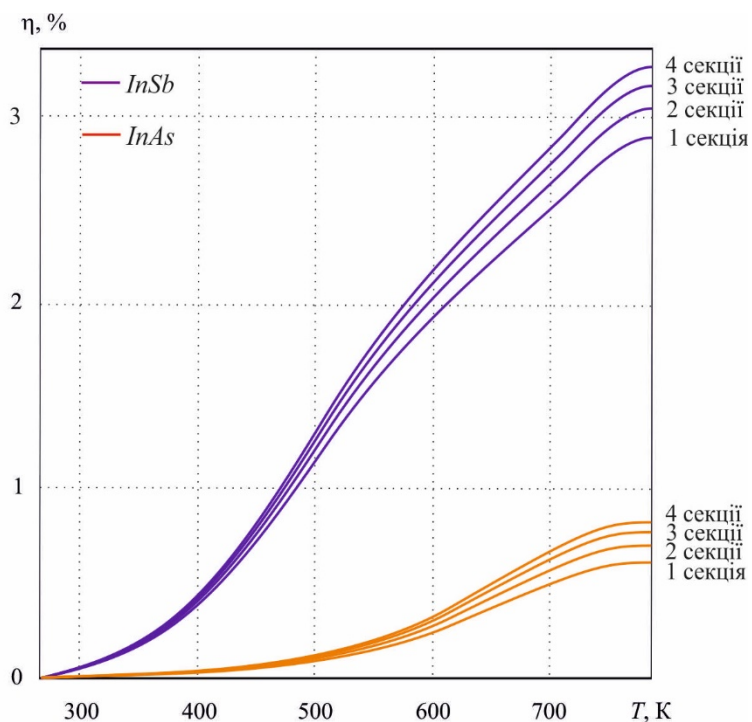


Рис. 3. Залежність ККД від температури секційних гіротронних генераторних елементів

З рис. 3 видно, що для матеріалу *InSb* ККД секційного термоелемента становить приблизно 3.35 %, для інтервалу температур 280 – 780 К та індукції магнітного поля 1.4 Тл, що майже в 1.2 рази більше ніж для звичайного термоелемента прямокутної форми. На рис. 4 представлена залежність максимального ККД від кількості секцій *N* для *InSb* та *InAs*).

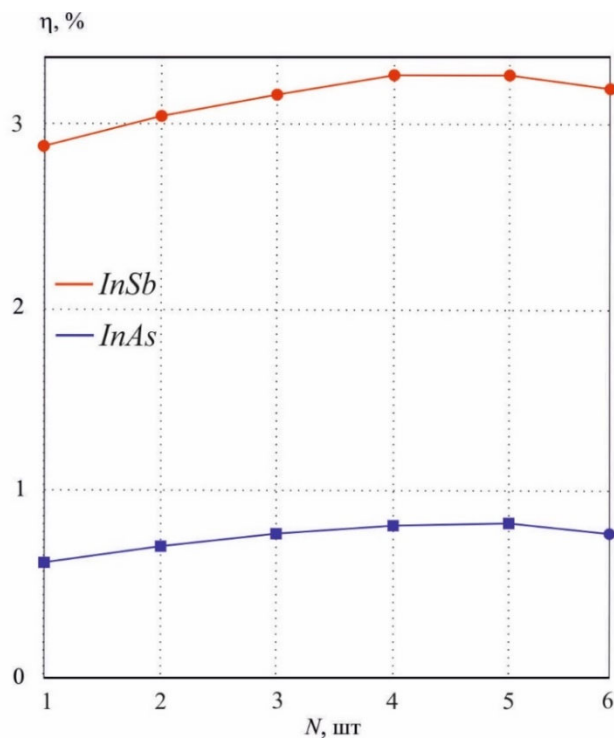


Рис. 4. Залежність максимального ККД η від кількості секцій *N* (верхня крива – *InSb*, нижня крива – *InAs*)

З рис. 4 видно, що зі збільшенням кількості секцій ефективність термоелемента падає через вплив контактних явищ, які стають більш суттєвими у цьому випадку.

Висновки

1. Застосовуючи методи комп'ютерного моделювання, було проведено дослідження розподілів температур у генераторних термоелементах прямокутної форми одно та багатосекційних, виготовлених з термоелектричних матеріалів *InSb* та *InAs*.
2. Було порівняно температурні залежності ККД секційних гіротропних генераторних термоелементів для різної кількості секцій. Встановлено, що для 4-ох секційного термоелемента ККД становить приблизно 3.35 %, для інтервалу температур 280 – 780 К та індукції магнітного поля 1.4 Тл, що майже в 1.2 рази більше ніж для звичайного термоелемента прямокутної форми для матеріалу *InSb*.

Література:

1. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskiie preobrazovatelu energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric energy converters]*. Kyiv, Chernivtsi: Naukova Dumka.
2. Harman T.G., Honig J.M. (1967). *Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications*. New York, Mc. Graw - Hill.
3. Samoilovich A.G. (2006). *Termoelektricheskiie i termomagnitnyie metody preobrazovaniia energii [Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion]*. Chernivtsi: Ruta.
4. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. (1997). Low-temperature thermoelectric cooling under optimal legs inhomogeneity in the optimal nonuniform magnetic field. In: *Proc.of the 16 International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, August 26 – 29, 1997).
5. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Fedoruk Ya.G., Shinkaruk S.M. (2004). Eddy thermoelectric currents in a gyrotropic medium with radial temperature distribution. *J. Thermoelectricity*, 1, 19 - 24.
6. Luste O.Ya., Fedoruk Ya.G. Gyrotropic thermocouple in an non-uniform magnetic field // *Thermoelectricity*. – 2006. – №1. – P. 16 – 22.
7. Константинович І.А., Рендигевич О.В. Про ефективність гіротропних термоелементів в режимі генерації // *Термоелектрика*. – № 1. – 2016. – С. 69-74.
8. Константинович І.А. Про ефективність гіротропних термоелементів в режимі охолодження // *Термоелектрика*. – № 3. – 2016. – С. 49-54.
9. Захарчук Т.В., Константинович І.А, Константинович А.В., Форбатюк А.В. Про ефективність спіральних гіротропних термоелементів у режимі охолодження// *Термоелектрика* №1. 2019. – С. 63-68.
10. Годованець Н.А., Константинович І.А., Константинович А.В., Шугані С.Д. Гіротропні термоелементи в однорідному та неоднорідному магнітних полях // *Термоелектрика* №2. 2020. – С. 35-42.
11. Nakamura H., Ikeda K. and Yamaguchi S. (1998). Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. Research report. *NIFS series (Nagoya, Japan)*.
12. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, Satarou Yamaguchi. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. (1997). *Proc. of XVI International conference on Thermoelectrics*. (Dresden, Germany, August 26 – 29, 1997).
13. Luste O.J., Fedoruk Ya.G. (2008). Optimization of materials for gyrotropic thermoelements. *J. Thermoelectricity*, 4, 21 –26.

14. Baransky P.I., Gaidar G.P. (2014). Anisotropy of thermoelectric properties of multi-valley semiconductors of cubic symmetry under the influence of external directional effects. *J. Thermoelectricity*, 1, 13.

Надійшла до редакції 24.02.2023.

I.A. Konstantynovych, *Ph.D PhD (Phys and Math)*,
R.V. Kuz, *Ph.D PhD (Phys and Math)*,
O.M. Makhanets, *DSc. (Phys & Math)*,
R.G. Cherkez, *D.Sc (Phys and Math)*.

Chernivtsi National University named after Yu. Fedkovych,
St. 2 Kotsyubynskogo, Chernivtsi, 58012, Ukraine
e-mail: i.konstantynovych@chnu.edu.ua

SECTIONAL GENERATORS THERMOELEMENTS IN A MAGNETIC FIELD

With the help of computer simulation, temperature distributions in the working body of sectional thermocouples in a magnetic field were determined. The temperature dependence of the efficiency of sectional gyrotropic thermoelements was determined. It was established that the efficiency of generator sectional gyrotropic thermocouples depends on the number of sections. Bible 14, fig. 4.

Key words: thermomagnetic factor, Nernst-Ettingshausen coefficient, sectional gyrotropic thermocouple, gyrotropic material, thermomagnetic factor, efficiency.

REFERENCES

1. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskiie preobrazovatelnu energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric energy converters]*. Kyiv, Chernivtsi: Naukova Dumka.
2. Harman T.G., Honig J.M. (1967). *Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications*. New York, Mc. Graw - Hill.
3. Samoilovich A.G. (2006). *Termoelektricheskiie i termomagnitnyie metody preobrazovaniia energii [Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion]*. Chernivtsi: Ruta.
4. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. (1997). Low-temperature thermoelectric cooling under optimal legs inhomogeneity in the optimal nonuniform magnetic field. In: *Proc.of the 16 International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, August 26 – 29, 1997).
5. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Fedoruk Ya.G., Shinkaruk S.M. (2004). Eddy thermoelectric currents in a gyrotropic medium with radial temperature distribution. *J. Thermoelectricity*, 1, 19 - 24.
6. Luste O.Ya., Fedoruk Ya.G. Gyrotropic thermocouple in an non-uniform magnetic field // *Thermoelectricity*. – 2006. – №1. – P. 16 – 22.
7. Konstantynovych I.A., Rendigevich O.V. (2016). On the efficiency of gyrotropic thermoelements in generation mode. *J. Thermoelectricity*, 1, 69 – 74.

8. Konstantinovich I.A. (2016). On the efficiency of gyrotropic thermoelements in cooling mode. *J. Thermoelectricity*, 3, 46 – 50.
9. Zakharchuk T.V, Konstantinovich I.A., Konstantinovich A.V, Forbatyuk A.V. (2019). On the efficiency of spiral gyrotropic thermoelements in cooling mode. *J. Thermoelectricity*, 1, 55 – 61.
10. Godovanets N.A, Konstantinovich I.A., Konstantinovich A.V., S.D. Shugani (2020). Gyrotropic thermoelement in uniform and non-uniform magnetic fields *J. Thermoelectricity*, 2, 25 – 32.
11. Nakamura H., Ikeda K. and Yamaguchi S. (1998). Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. Research report. *NIFS series (Nagoya, Japan)*.
12. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, Satarou Yamaguchi. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. (1997). *Proc. of XVI International conference on Thermoelectrics*. (Dresden, Germany, August 26 – 29, 1997).
13. Luste O.J., Fedoruk Ya.G. (2008). Optimization of materials for gyrotropic thermoelements. *J. Thermoelectricity*, 4, 21 – 26.
14. Baransky P.I., Gaidar G.P. (2014). Anisotropy of thermoelectric properties of multi-valley semiconductors of cubic symmetry under the influence of external directional effects. *J. Thermoelectricity*, 1, 13.

Submitted 24.02.2023.