

АЩЕУЛОВ АНАТОЛІЙ

Інститут термоелектрики НАН і МОН України
<https://orcid.org/0000-0002-3195-6342>
e-mail: ashcheulov.anatoly@gmail.com

ДЕРЕВ'ЯНЧУК МИКОЛА

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
<https://orcid.org/0000-0001-7218-1451>
e-mail: m.derevianchuk@ukr.net

РОЖДЕСТВЕНСЬКА МАРГАРИТА

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
e-mail: m.rozhdestvenska@chnu.edu.ua

ОСОБЛИВОСТІ АНІЗОТРОПНОГО БІПОЛЯРНОГО ТЕРМОЕЛЕМЕНТА

Сучасні інфокомунікаційні мережі включають підсистеми моніторингу. Робота підсистем моніторингу базується на роботі різних сенсорів. Серед використовуваних сенсорів, у підсистемах моніторингу, незначну частку займають термоелектричні сенсорні. Для того щоб термоелектричні сенсорні набули більшого поширення необхідно вирішити проблему малого значення термоелектричної ефективності. Вирішення цієї проблеми пропонується здійснити шляхом переходу до сенсорів на основі анізотропних біполярних термоелементів.

У роботі, що представляється, проведено дослідження впливу термоелектричних вихорів з турбулентним характером течії на чутливість сенсорів на основі анізотропних біполярних термоелементів. Визначено залежність величини поперечної термо-ЕРС E_{\perp} цієї структури від коефіцієнта анізотропії K анізотропного біполярного термоелектричного матеріалу. Виявлені відповідні сингулярні точки та межі їх існування. Встановлено залежність напрямків обертання вихорів з турбулентних характером течії від напрямку наближення до цих точок. Проведено оцінки температурної чутливості сенсора на основі анізотропного біполярного термоелемента з монокристалів антимоніду кадмію, як уніполярної так і біполярної характеристик. Результати досліджень показують значне зростання температурної чутливості таких сенсорів на основі анізотропних біполярних термоелементів, що може бути використано у якості теплових сенсорів для моніторингу окремих елементів інфокомунікаційної системи. Такі термоелементи матимуть покращений показник коефіцієнта температурної залежності вольтватної чутливості у порівнянні з анізотропними уніполярними термоелементами. Проведені чисельні розрахунки показують перспективність використання анізотропних біполярних термоелементів у якості сенсорів для моніторингу сучасних інфокомунікаційних систем для збору інформації, як про саму систему, так і навколишнє середовище

Ключові слова: анізотропія, термоелемент, сенсор, вихровий струм, поперечна термо-ЕРС, сингулярність.

ASHCHEULOV ANATOLY

Institute of Thermoelectricity of the National Academy of Sciences and the Ministry of Education and Science of Ukraine
DEREVIANCHUK MYKOLA, ROZHDESTVENSKA MARGARYTA
Chernivtsi National University named after Yuri Fedkovich

FEATURES OF ANISOTROPIC BIPOLAR THERMOELEMENT

Modern information communication networks include monitoring subsystems. The operation of monitoring subsystems is based on the operation of various sensors. Among the sensors used in the monitoring subsystems, thermoelectric sensors occupy an insignificant share. In order for thermoelectric sensors to become more widespread, it is necessary to solve the problem of a small value of thermoelectric efficiency. It is proposed to solve this problem by switching to sensors based on anisotropic bipolar thermoelement.

In the presented work, the influence of thermoelectric vortices with turbulent flow on the sensitivity of sensors based on anisotropic bipolar thermoelements was studied. The dependence of the value of the transverse thermal-EMF E_{\perp} of this structure on the anisotropy coefficient K of the anisotropic bipolar thermoelectric material was determined. Corresponding singular points and limits of their existence are revealed. The dependence of the directions of rotation of vortices with a turbulent nature of the flow on the direction of approach to these points was established. The temperature sensitivity of the sensor based on an anisotropic bipolar thermoelement made of single crystals of cadmium antimonide with both unipolar and bipolar characteristics was evaluated. Research results show a significant increase in the temperature sensitivity of such sensors based on anisotropic bipolar thermoelements, which can be used as thermal sensors for monitoring individual elements of the information communication system. Such thermoelements will have an improved coefficient of temperature dependence of volt-watt sensitivity compared to anisotropic unipolar thermoelements. The conducted numerical calculations show the prospects of using anisotropic bipolar thermoelements as sensors for monitoring modern information and communication systems for collecting information, both about the system itself and the environment.

Keywords: anisotropy, thermoelement, sensor, eddy current, transverse thermo-EMF, singularity.

Постановка проблеми

Існуючі інфокомунікаційні системи можна охарактеризувати, як взаємопов'язану сукупність різних інфокомунікаційних мереж. Ці мережі включають підсистеми моніторингу, які завдяки сенсорам збирають різноманітну інформацію, як про саму систему, так і навколишнє середовище. Станом на сьогодні, серед використовуваних сенсорів, незначну частку займають термоелектричні сенсорні. Широке використання сенсорів, в основі роботи яких лежить термоелектричний ефект, стримується малим значенням термоелектричної ефективності. Розробка нового анізотропного біполярного термоелемента з покращеними показниками термоелектричної ефективності є актуальним завданням. Такі термоелементи матимуть покращений показник коефіцієнта температурної залежності вольтватної чутливості, що у свою чергу приведе

до зменшення відсотка похибки контролю параметрів моніторингу.

Аналіз останніх джерел

У 1852 р. Вільям Томсон створив термодинамічну теорію термоелектрики, ввівши основні параметри, які характеризують термоелектричні властивості тіл. Він вперше ввів таке фундаментальне поняття, як поперечне термоелектричне поле, а у 1882 році отримав вираз поперечної складової термо-ЕРС, що виникає в анізотропних структурах. Пізніше, Г. Бореліус записав значення поперечної термо-ЕРС у залежності від геометричних розмірів анізотропної прямокутної пластини [1]. На початку 60-х років минулого століття Л. Анагичуком було вперше проведено експериментальні дослідження цього явища [2, 3]. Починаючи з середини 90-х років минулого століття розпочалось стрімке зростання публікацій з термоелектрики, які показали його перспективність, що, на жаль, стримується малим значенням термоелектричної ефективності існуючих анізотропних уніполярних термоелектричних матеріалів (АУТМ) [4–6].

Як показали результати наших досліджень, зменшення величини поперечної термо-ЕРС E_{\perp} , а як наслідок і підвищення чутливості сенсорів на їх основі слід очікувати внаслідок впливу вихрових струмів з ламінарним характером течії, що виникають в об’ємі анізотропного уніполярного термоелемента (АУТ) [7]. Наступні дослідження показали, що ситуація зміниться, якщо в об’ємі термоелемента виникатимуть вихрові струми з турбулентним характером течії [8], що у подальшому дозволило запропонувати ряд ефективних перетворювачів енергії. Такі турбулентні вихрові явища виникають у анізотропних біполярних структурах [9]. У цьому випадку спостерігається енергетична взаємодія між об’ємом анізотропних біполярних термоелектричних матеріалів (АБТМ) і зовнішнім середовищем. Метою даної роботи є дослідження особливостей цього явища у випадку анізотропного біполярного термоелемента (АБТ).

Виклад основного матеріалу

Збільшення ефективності АБТ у цьому випадку слід очікувати за рахунок появи термоелектричного вихору з турбулентним характером течії, що виникає в АБТМ. Ця структура являє собою прямокутну пластину розмірами $a \times b \times c$ ($a \approx c \gg b$) виконану з АБТМ, коефіцієнти якої термо-ЕРС $\hat{\alpha}$ є тензором другого рангу, який у головних кристалографічних осях має наступний вигляд [10]

$$\hat{\alpha} = \alpha_0 \begin{vmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{vmatrix}. \tag{1}$$

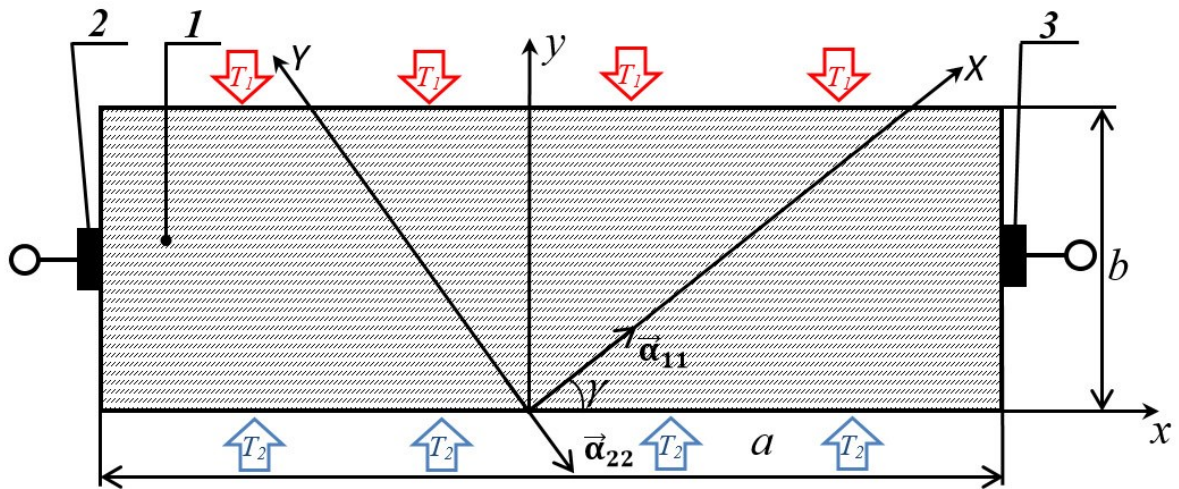


Рис. 1. Структурна схема анізотропного біполярного термоелемента (T_1 – температура гарячої грані пластини, T_2 – температура холодної грані пластини, l – анізотропна пластинка, $2, 3$ – вихідні контакти)

Вибрані кристалографічні осі OX та OY із значеннями α_{11} та $(-\alpha_{22})$ відповідно, розміщені в площині її бічної грані $a \times b$, а вісь OX розташована під деяким кутом γ до довжини ребра a ($0^\circ < \gamma < 90^\circ$) (Рис. 1), дозволяє представити тензор $\hat{\alpha}$ наступним чином [11]:

$$\hat{\alpha} = \alpha_0 \begin{vmatrix} \alpha_{11} \cos^2 \gamma - \alpha_{22} \sin^2 \gamma & (\alpha_{11} + \alpha_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & 0 \\ (\alpha_{11} + \alpha_{22}) \sin \gamma \cos \gamma & \alpha_{11} \sin^2 \gamma - \alpha_{22} \cos^2 \gamma & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{vmatrix}, \tag{2}$$

що характеризується наявністю як поздовжньої (α_{\parallel}), так і поперечної (α_{\perp}) складових

$$\alpha_{\parallel} = \alpha_0 (\alpha_{11} \cos^2 \gamma - \alpha_{22} \sin^2 \gamma), \tag{3}$$

$$\alpha_{\perp} = \alpha_0 (\alpha_{11} + \alpha_{22}) \sin \gamma \cos \gamma. \tag{4}$$

При цьому коефіцієнт перетворення m_{α} такого пристрою, в основі якого знаходиться вищезгадана прямокутна пластинка, має наступний вигляд

$$m_{\alpha} = \frac{\alpha_{\perp}}{\alpha_{\parallel}} = \frac{(\alpha_{11} + \alpha_{22}) \sin \gamma \cos \gamma}{\alpha_{11} \cos^2 \gamma - \alpha_{22} \sin^2 \gamma}. \tag{5}$$

Нехай $K = \alpha_{11}/\alpha_{22}$, тоді (5) матиме вигляд

$$m_\alpha(K, \gamma) = \frac{(K+1) \operatorname{tg} \gamma}{K - \operatorname{tg}^2 \gamma}. \quad (6)$$

Класична формула для поперечної термо-ЕРС без врахування вихрового термоелектричного струму, але із врахуванням особливостей АБТ, набуває наступного вигляду:

$$E_\perp = \frac{1}{2}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) \sin 2\gamma \frac{a}{b} \Delta T. \quad (7)$$

Отриманий вираз (7) є складовою поперечної термо-ЕРС, яка разом із поздовжньою складовою виразу (3) зумовлюють виникнення вихрових струмів з турбулентним характером течії, що далі ведуть, за виконання певних умов, до значного зростання поперечної термо-ЕРС АБТ. Формула (7) із врахуванням вихрових струмів з турбулентним характером течії матиме наступний вигляд:

$$E_\perp^* = E_\perp \cdot m_\alpha = \frac{4\alpha_{22}(K+1)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2} \frac{a}{b} \Delta T}{(K - \operatorname{tg}^2 \gamma)(1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2})}. \quad (8)$$

Проведені чисельні оцінки показують, що при $a \approx c \gg b$ крайовими умовами на торцевих $b \times c$ і на бічних $a \times b$ гранях можна знехтувати [12]. У даному випадку не враховується вплив анізотропії теплопровідності ($\hat{\kappa}$) та електропровідності ($\hat{\sigma}$) АБТМ.

Дослідження функції

$$E_\perp^* = \frac{4\alpha_{22}(K+1)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2} \frac{a}{b} \Delta T}{(K - \operatorname{tg}^2 \gamma)(1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2})}. \quad (9)$$

на екстремум ($\partial E_\perp^* / \partial \gamma = 0$, $\partial^2 E_\perp^* / \partial \gamma^2 < 0$) демонструє, що точки екстремуму функції у випадку, що розглядається – відсутні. Така особливість функції дає можливість варіювати величиною E_\perp^* цього пристрою в широких межах шляхом підбору необхідного кута γ при деяких фіксованих коефіцієнтах анізотропії K .

Представимо на рис. 2, спочатку для випадку $0 < |K| < 1$, у вигляді графіків функціональну залежність $E_\perp^*(K, \gamma)$. На даному рисунку ми можемо спостерігати дві різні точки сингулярності для двох різних значень K . Для $K = -0,1$ точку сингулярності функції можемо спостерігати при куті $17^\circ < \gamma < 18^\circ$, а для $K = -0,8$ точка сингулярності спостерігається при куті $41^\circ < \gamma < 42^\circ$. Провівши аналіз, можемо зробити висновок, що якщо рухатись вздовж осі абсцис зліва на право, до точки сингулярності, то значення функції нескінченно зростає, а при русі справа на ліво – змінюється полярність і функція прямує до від'ємної нескінченності. У даному випадку, при $0 < |K| < 1$, точки сингулярності спостерігаються на осі абсцис в інтервалі $\gamma \in (0^\circ, 45^\circ)$.

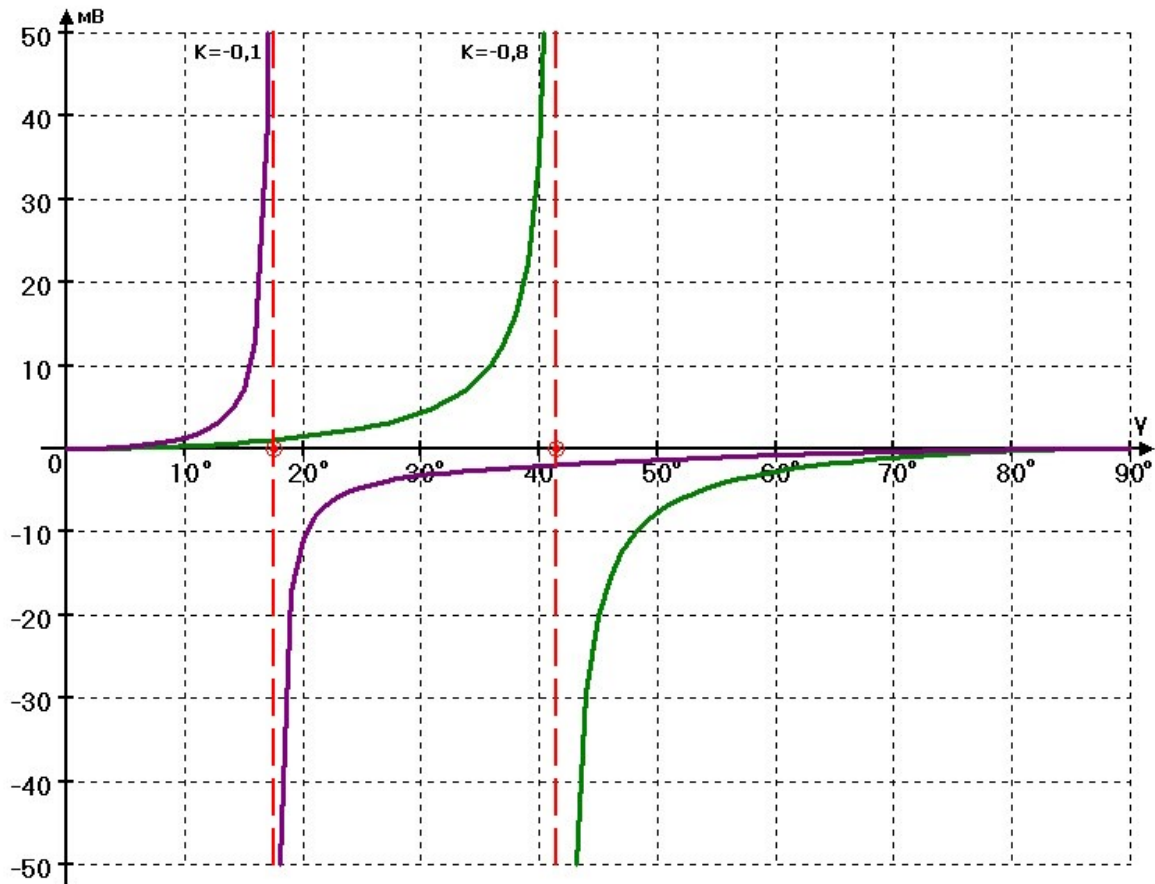


Рис. 2. Залежність $E_\perp^*(K, \gamma)$ для випадку $0 < |K| < 1$

На Рис. 3 представимо функціональну залежність $E_\perp^*(K, \gamma)$ для випадку $1 < |K| < \infty$. На рисунку наведено три графіки для трьох різних випадків $K = -1,5$; -10 ; -60 . Як і у випадку $0 < |K| < 1$ для кожного K існує своя точка сингулярності функції. Для $K = -1,5$ точку сингулярності функції спостерігаємо при куті

$50^\circ < \gamma < 51^\circ$, для $K = -10$ сингулярність виникає при куті $72^\circ < \gamma < 73^\circ$, а для $K = -60$ при $82^\circ < \gamma < 83^\circ$. Легко бачити, що при наближенні до точки сингулярності функція поводиться аналогічно попередньому випадку, при русі зліва направо до точки сингулярності значення функції нескінченно зростає, а при русі справа на ліво – змінюється полярність і функція прямує до від'ємної нескінченності. На відміну від попереднього, для випадку $1 < |K| < \infty$ точки сингулярності розташовуються вздовж осі абсцис в інтервалі $\gamma \in (45^\circ, 90^\circ)$.

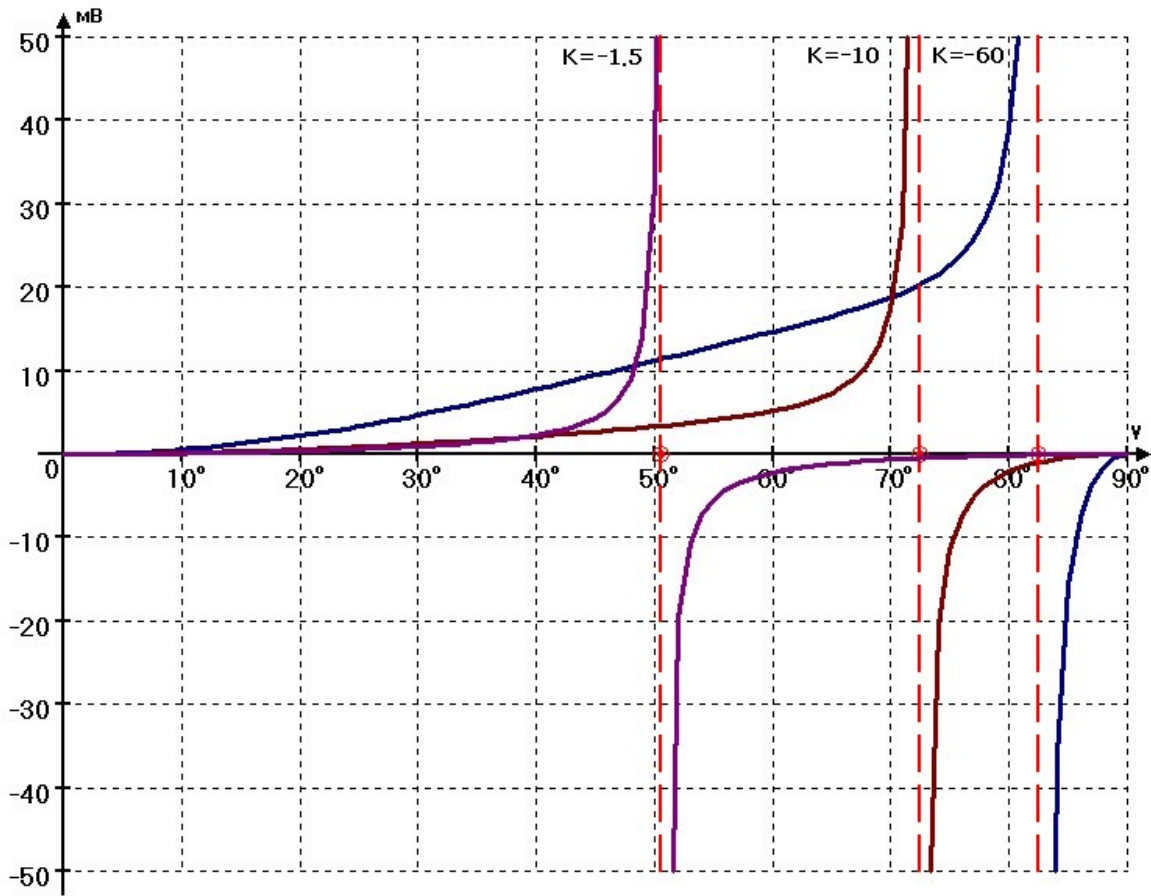


Рис. 3. Залежність $E_{\perp}^*(K, \gamma)$ для випадку $1 < |K| < \infty$

Аналіз графіків функції на рис. 2 та рис. 3 демонструє в обох випадках наявність сингулярних точок. Ці сингулярні точки дають можливість динамічного вибору значення коефіцієнта анізотропії АБТ: в залежності від кута нахилу γ задавати потрібний напрям обертання турбулентного вихору та заданого значення поперечної термо-ЕРС E_{\perp}^* . У першому випадку ($0 < |K| < 1$) внутрішня енергія пластини 1 зменшується, а у другому випадку ($1 < |K| < \infty$) – збільшується.

Із описаного вище випливає, що зростання значення E_{\perp}^* відбувається внаслідок зростання коефіцієнта $|m_{\alpha}| > 1$, як і в роботах [9, 12] це дає можливість зробити аналогічний висновок про енергетичну взаємодію між об'ємом анізотропної пластини 1 із зовнішнім середовищем. Таким чином, у випадку застосування АБТМ термоелемент на його основі характеризується значно вищими показниками E_{\perp}^* , ніж у випадку використання АУТМ.

Найбільш логічне пояснення цього явища можна надати з використанням уявлень вихрової електродинаміки. Якщо верхня грань матиме температуру T_1 , а нижня – T_2 , при цьому $T_1 > T_2$, то в об'ємі пластини виникає поперечна термо-ЕРС E_{\perp}^* .

Аналогічно роботі [12] при виконанні умови

$$\frac{\partial \alpha_{11}}{\partial y} \neq \left| \frac{\partial \alpha_{22}}{\partial x} \right| \tag{10}$$

в об'ємі АБТ виникають вихорі термоелектричного поля з турбулентним характером течії. Зміна характеру вихору з ламінарної течії на турбулентну зумовлена переорієнтацією напрямків відповідних складових векторів термо-ЕРС \vec{a}_{22} . При цьому поздовжня складова \vec{a}_{22} розташовується антипаралельно кристалографічному напрямку осі OY (Рис. 1).

Необхідною умовою існування турбулентного термоелектричного вихору для однорідного й ізотропного по електропровідності, але анізотропного по різнополярних компонентах коефіцієнта термо-ЕРС АБТМ є вихровий характер термоелектричного поля хоча б в одній точці r замкнутої області V

$$\text{rot } E^*(r) \neq 0, r \in V \tag{11}$$

де E^* – напруженість поля зовнішніх сил термоелектричної природи (термоелектричне поле) в об'ємі

АБТМ.

Лівостороннє обертання вихору спостерігається при $0 < |K| < 1$, а правосторонній напрям обертання – при $1 < |K| < \infty$. Ці вихори з турбулентним характером течії є ефективним механізмом, що перекачує енергію між зовнішнім середовищем і, в нашому випадку, об'ємом АБТ. Ця взаємодія відбувається через бічні грані $a \times b$.

Як відзначалось вище, при цьому спостерігається можливість значного збільшення величини поперечної термо-ЕРС E_{\perp}^* за рахунок виникнення в об'ємі АБТ вихорів з турбулентним характером течії.

Обговорення отриманих результатів та їх практичне значення

Термоелектрика, заснована на перетворенні енергії, у наш час набула широкого застосування. Дослідниками відкрито нові термоелектричні ефекти та запропоновано ряд елементів на їх основі [13]. Все ширше термоелектричні елементи використовуються у медицині та різноманітній побутовій техніці. Проте для підвищення ефективності використання таких пристроїв слід перейти від використання АУТ до АБТ.

Для прикладу розглянемо випадок застосування монокристалів антимоніду кадмію, отриманого за технологією, що наведена у [14], на якому спостерігається температурна залежність α_{11} та α_{22} . При цьому $\alpha_{11}(t)$ в інтервалі температур від 270 до 370 K має від'ємні значення, а $\alpha_{22}(t)$ спочатку має від'ємні значення, а при температурі 294 K відбувається ефект інверсії, після чого він набуває від'ємного знаку. Таким чином, цей матеріал у температурному інтервалі 270-297 K є уніполярним, а у інтервалі 297-370 K – біполярним, що дає нам можливість застосовувати його як АУТМ, так і АБТМ. Така поведінка згаданого матеріалу зумовлена технологічними умовами його отримання [14].

Зобразимо на рисунку, у вигляді трьох графіків функції, значення термо-ЕРС для монокристалу антимоніду кадмію: на першому відображено значення, обчислені за класичною формулою (В. Томсона) без врахування вихрових струмів при температурі 280 K, на другому графіку – цей же випадок, але з урахуванням ламінарних вихрових струмів, і на третьому графіку – значення термо-ЕРС у біполярному випадку ($T=320$ K).

На Рис. 4 легко бачити, що графіки 1 та 2 містять по одній точці екстремуму функції, а у біполярному випадку (графік 3) присутня сингулярна точка $57^{\circ} < \gamma < 58^{\circ}$ і точки екстремуму відсутні.

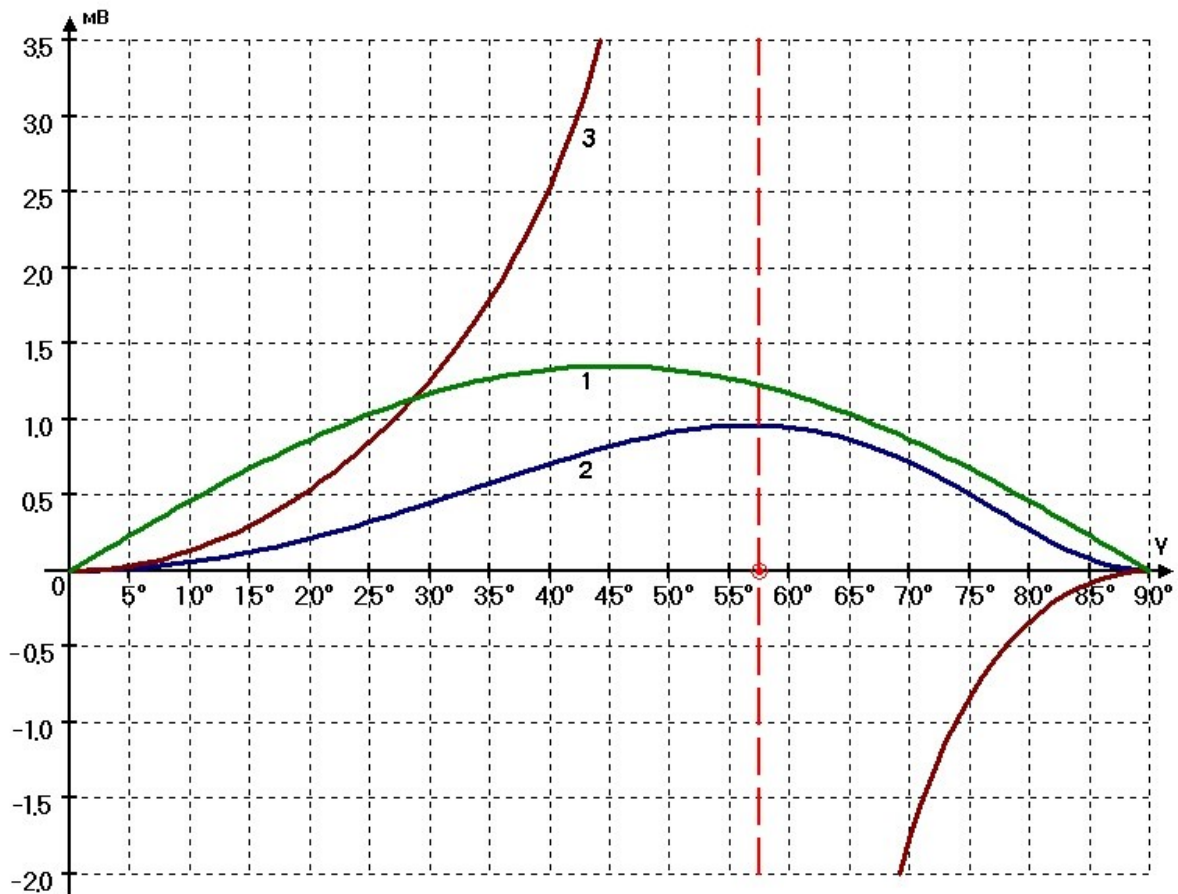


Рис. 4. Залежності $E_{\perp}(K, \gamma)$: 1 – без врахування вихрових струмів ($T=280$ K); 2 – із врахуванням вихрових струмів ($T=280$ K); 3 - $E_{\perp}^*(K, \gamma)$ із врахуванням вихрових струмів ($T=320$ K)

Наведемо у вигляді Таблиці 1 точні розрахункові дані уніполярного та біполярного випадків для 5 різних кутів нахилу $\gamma = 15^{\circ}; 30^{\circ}; 45^{\circ}; 60^{\circ}; 75^{\circ}$.

Таким чином, проаналізувавши графіки на рис. 4 та значення у таблиці 1, можемо зробити висновок, що сенсор на основі АБТ характеризується значно більшим значенням температурної чутливості, ніж на основі АУТ.

Таблиця 1

№ за/п	Матеріал (хімічна формула)	Тип матеріалу	Температура (К)	Коефіцієнт термо-ЕРС (мкВ/К)		Коефіцієнт анізотропії	Кут нахилу (γ)	Значення термо-ЕРС, мкВ
				α_{11}	α_{22}			
1	Антимонід кадмію (<i>CdSb</i>)	уніполярний	280	395	125	3,16	15°	122,98
							30°	447,33
							45°	821,23
							60°	946,75
							75°	505,91
2	Антимонід кадмію (<i>CdSb</i>)	біполярний	320	215	-90	-2,39	15°	298,82
							30°	1257,09
							45°	3721,00
							60°	-12685,23
							75°	-835,73

Висновки

Проведено дослідження поперечної термо-ЕРС, яка виникає в АБТ. Виявлено, що в об'ємі такої анізотропної біполярної термоелектричної структури виникають вихрові термоелектричні явища з турбулентним характером течії, що вступають у взаємодію із зовнішнім середовищем. Проведений аналіз та графічне представлення функціональної залежності показало наявність точок сингулярності, що веде до можливості суттєвого підвищення значення поперечної термо-ЕРС. У кінцевому рахунку, збільшення величини поперечної термо-ЕРС дає можливість підвищити чутливість сенсорів на основі АБТ, що у свою чергу дозволить поширити їх використання у якості сенсорів для окремих елементів існуючих інфокомунікаційних мереж.

Література

1. AL. Chapt 13. William Thomson (Lord Kelvin) and thermoelectricity. In: Collins M, Dougal R, Koenig C, Ruddock I, editors. Kelvin, Thermodynamics and the Natural World. WIT Press; 2015. pp. 337-362. doi: [10.2495/978-1-84564-149-8/014](https://doi.org/10.2495/978-1-84564-149-8/014)
2. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. Vol.1. Physics of Thermoelectricity. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity (1998).
3. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric power converters. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity (2003).
4. Freik D.M., Nykyruy L.I., Krynytskyi O.S. Dosiahnennia i problemy termoelektryky 1. Istorychni aspekty (Ohliad) Fyzyka i khimiiia tverdoho tila. 2012. T. 13, № 2. S. 297-318
5. Anatyshuk L.I. (2016). Pro perspektyvy rozvytku termoelektryky v Ukraini: Za materialamy naukovoi dopovidy na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy 28 veresnia 2016 roku. Visnyk NAN Ukrainy, (11), 23–30. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2016.11.023>
6. Ashcheulov A.A. Anizotropnyi termoelektrychnyi sensor. Patent № 39677 Ukrainy, 2009, biul. № 5.
7. Ashcheulov A.A., Verenko O.S., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.O. (2023) Vplyv vykhrovykh strumiv na parametry anizotropnoho unipoliarnoho termoelementa. Sensorna elektronika i mikrosystemni tekhnologii 2023. T. 20, No 4 s. 45-52. doi: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2023.4.294630>
8. Ashcheulov A., Derevianchuk M., Lavreniuk D. (2022). Anizotropnyi metadielektrychnyi peretvoriuvach. Elektrotehnika ta enerhetyka, (4), 18–27. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-4-2>
9. Ashcheulov A, Derevianchuk M, Lavreniuk D. The method of turbulent transformation of energy. Engineering Reports. 5(7): e12620 (2023). doi: [10.1002/eng2.12620](https://doi.org/10.1002/eng2.12620)
10. Vykhov L.M., Okhrem O.A., Snarskyi A.O. Termoelektrychni ta termomahnitni metody peretvorennia enerhii: Konspekt lektsii profesora A.H. Samoilovycha. Chernivtsi: Ruta, 2006. 228 s.
11. Nye J.F. Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices. Oxford University Press, Oxford (1985).
12. Ashcheulov A. A., Derevianchuk M. Ya., Lavreniuk D. O. (2023). Vykhori z laminarnym ta turbulentnym kharakteramy tehyi v anizotropnykh seredovyshechakh. Tekhnichna inzheneriia, (1(91), 242–248. doi: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-242-248](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-242-248)
13. Ashcheulov A.A., Okhrem V.H., Romaniuk I.S. Novi termoelektrychni efekty ta elementy. Chernivtsi: Vydavnychiy dim «Rodovid», 2015. 228 s.
14. Ashcheulov A.A., Romaniuk I.S. Anizotropni optychni termoelementy na osnovi antymonidu kadmiu ta yikh zastosuvannia. Chernivtsi: Zoloti lytavry, 2012. 228 s.