

А.А. Ащеулов¹, М.Я. Дерев'янчук², Д.О. Лавренюк²

Феномен електроомічного перетворення енергії в анізотропних електропровідних середовищах

*Інститут термоелектрики НАН і МОН України, Чернівці, Україна, ashcheulov.anatoly@gmail.com
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, m.derevianchuk@ukr.net*

Проведено дослідження особливостей перетворення електричного струму анізотропним електропровідним середовищем яке характеризується різними типами провідності (p - та n - типи) у вибраних кристалографічних напрямках в умовах омичного контакту. Установлено, що у випадку протікання зовнішнього електричного струму синусоїдальної форми через пристрій в основі якого є прямокутна пластина із згаданого вище анізотропного матеріалу, в її об'ємі виникають вихори електричного струму. На основі аналізу функції $m(K, \alpha)$ (випадок $|m| > 1$), що визначає коефіцієнт перетворення пристрою, зроблено висновок про енергетичну взаємодію між об'ємом анізотропної пластини і зовнішнім середовищем. Проведені дослідження показали, що використання анізотропного електропровідного біполярного матеріалу призводить до значно вищої ($m > 1$) або нижчої ($m < -1$) величини коефіцієнта перетворення m ніж у випадку уніполярних анізотропних електропровідних матеріалів. До феномену електроомічного перетворення веде поява вихорів електричного поля, які характеризуються турбулентною течією, що представляються виразом $\text{rot } \vec{j} = \pm \omega$, де ω – кругова частота обертання вихору, а знаки «+» та «-» – позначають напрямок його обертання та визначаються величиною коефіцієнта анізотропії $K = \sigma_{11}/\sigma_{22}$. Такі електричні вихори з турбулентним характером течії є ефективним механізмом, що перекачує енергію між зовнішнім середовищем і в нашому випадку, анізотропною пластиною пристрою. Слід відмітити, що в окремих випадках спостерігається аномальне значення згаданого коефіцієнта. Застосування розглянутого методу перетворення електричного струму за допомогою запропонованих пристроїв, в основі роботи яких є пластина виготовлена з анізотропного електропровідного матеріалу, значно розширює галузі альтернативної електроенергетики та інших пов'язаних з ним областей науки та техніки.

Ключові слова: анізотропне середовище; електропровідність; перетворення; електричний струм; коефіцієнт корисної дії; нагрів; охолодження; генерація.

Подано до редакції 14.07.2022; прийнято до друку 13.10.2022.

Вступ

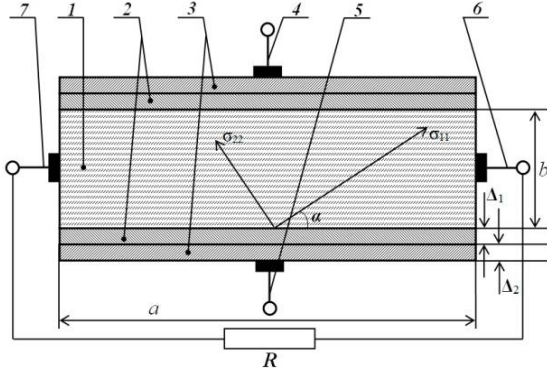
У роботі [1] вперше показано можливість виникнення ефекту трансформації в анізотропних електропровідних уніполярних середовищах. У цьому випадку пристрій який отримав назву анізотропний електроомічний трансформатор являє собою прямокутну пластину довжиною a висотою b та шириною c , що виконано з анізотропних

монокристалічних або шарових електропровідних матеріалів, що характеризується лінійними вольт-амперними характеристиками. Вибрані кристалографічні осі анізотропного матеріалу 1 та 2, що мають значення електропровідності σ_{11} та σ_{22} , які є за знаком уніполярними, розташовані в площині бічної грані $a \times b$ пластини, одна з яких орієнтована під деяким кутом α . На торцевих гранях $b \times c$ та верхній і нижній грані $a \times c$ цієї пластини розташовані вхідні та вихідні електровиводи відповідно.

У випадку протікання змінного електричного струму синусоїдальної форми через торцеві контакти 4 та 5 електричного струму J_{in} через вихідні контакти 6, 7 протікає електричний струм J_{out} , а коефіцієнт трансформації m такого пристрою (Рис. 1) представляється наступним виразом

$$J_{out}/J_{in} = m = p \cdot f \quad (1)$$

де p – коефіцієнт перетворення матеріалу пластини, $f = a/b$ коефіцієнт її форми.



1 – Пластина з анізотропного електропровідного матеріалу; 2 – електроізоляційні шари; 3 – електропровідні шари; 4, 5 – вхідні; 6, 7 – вихідні електровиводи.

Рис. 1. Схематичне зображення конструкції анізотропного трансформатора

При цьому оптимальне значення кута нахилу α визначається із співвідношення

$$\alpha = \arctg \sqrt{K} \quad (2)$$

де $K = \sigma_{11} / \sigma_{22}$ – коефіцієнт анізотропії матеріалу пластини.

Оскільки у розглядуваному випадку виконується умова $\frac{\partial E_{11}}{\partial x} \neq \frac{\partial E_{22}}{\partial y}$ то в об'ємі такої анізотропної пластини виникає вихровий електричний струм який характеризується ламінарною течією [2].

Проведені дослідження показали, що в розглядуваному випадку величина коефіцієнта перетворення не перевищує 1 ($m \leq 1$). Для випадків, як $0 < K < 1$, так і для $1 < K < \infty$. У випадку $K=1, n=0$.

Метод трансформації, що розглянуто в роботах [1,

3] значно відрізняється від існуючих і має ряд відповідних, як переваг так і недоліків.

I. Викладення основного матеріалу і аналіз отриманих результатів

Для покращення показників трансформації перейдемо від анізотропних електропровідних уніполярних середовищ до анізотропного електропровідного середовища яке характеризується різним типом провідності (p - та n - типами провідності) у 1-му та 2-му вибраному кристалографічному напрямках (Рис. 2), при цьому контакт між всіма шарами є омичним [4].

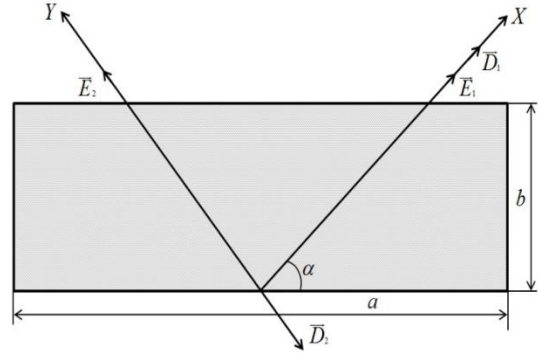


Рис. 2. Орієнтація кристалографічних осей OX, OY та OZ анізотропної електропровідної пластини та розташування векторів електричних полів \vec{E}_1, \vec{E}_2 , та індукції \vec{D}_1, \vec{D}_2 .

Тензор електропровідності такого монокристалічного або штучного анізотропного середовища має наступний вигляд.

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_n & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_p & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n \end{vmatrix} \quad (3)$$

Створення з такого матеріалу прямокутної пластини розмірами $a \times b \times c$ ($a \approx c \gg b$) головні кристалографічні осі OX та OY якої розміщені в площині її бічної грані $a \times b$, а одна з цих осей розташована під деяким кутом α до ребра a ($0 < \alpha < 90^\circ$) (Рис. 2), дозволяє представити тензор $\hat{\sigma}$ наступним чином [5]:

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 \begin{vmatrix} \sigma_{11} \cos^2 \alpha - \sigma_{22} \sin^2 \alpha & (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & \sigma_{11} \sin^2 \alpha - \sigma_{22} \cos^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (4)$$

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

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_0 (\sigma_{11} \cos^2 \alpha - \sigma_{22} \sin^2 \alpha) \quad (5)$$

$$\sigma_{\perp} = \sigma_0 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha \quad (6)$$

При цьому коефіцієнт перетворення m_l пристрою

в основі якого знаходиться вищезгадана прямокутна пластинка має такий вигляд

$$m_l = \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel}} = \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha}{\sigma_{11} \cos^2 \alpha - \sigma_{22} \sin^2 \alpha} \quad (7)$$

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 [2].

Дослідження функції

$$m_1(K, \alpha) = \frac{(K+1) \operatorname{tg} \alpha}{K - \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (8)$$

на екстремум ($\partial m / \partial \alpha = 0, \partial^2 m / \partial \alpha^2 < 0$) демонструє, що точки екстремум функції відсутні.

Це дає змогу варіювати величиною коефіцієнта m цього пристрою в широких межах шляхом підбору відповідного кута α . Таку можливість продемонстровано на Рис. 3. для чотирьох анізотропних електропровідних біполярних матеріалів з коефіцієнтами анізотропії 0.75, 10, 50 і 100. З цього графіка випливає, що завжди існує можливість підбору кута α для заданого m з необхідною величиною і знаком.

У разі кута $\alpha = 45^\circ$ вираз (7) набуває наступного вигляду

$$m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} = \frac{K+1}{K-1} \quad (9)$$

Аналіз цих функцій показує, що значення

коефіцієнта $|m| > 1$ це дає можливість зробити висновок про енергетичну взаємодію між об'ємом анізотропної пластини 1 із зовнішнім середовищем [6]. Таким чином, використання анізотропного електропровідного біполярного матеріалу веде до значно вищої величини коефіцієнта перетворення m ніж у випадку уніполярних анізотропних електропровідних матеріалів (Рис. 4.).

Пояснення цього явища можна представити з використанням уявленнь вихрової електродинаміки. Якщо через пластину пропустити зовнішній електричний струм синусоїдальної форми то в її об'ємі виникають вихори електричного струму, які характеризуються турбулентною течією. [7, 8] У нашому випадку, аналогічно [9, 10] зміна характеру вихору з ламінарною течією на турбулентну обумовлена переорієнтацією напрямків відповідних складових векторів електричного струму та поля. У цьому випадку поздовжня складова вектора електричного струму та поля розташовується антипаралельно кристалографічному напрямку другої вибраної кристалографічної вісі. Напрямок електричного струму у цьому випадку розташовується

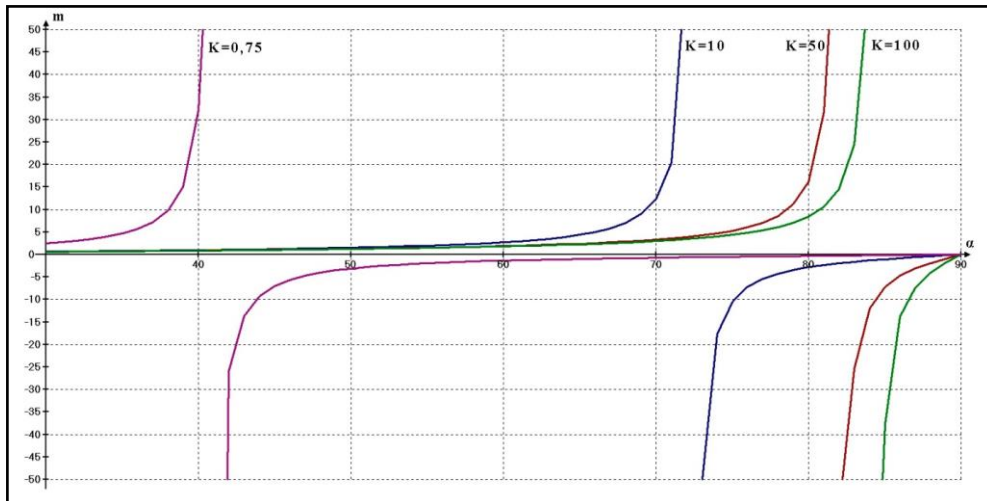
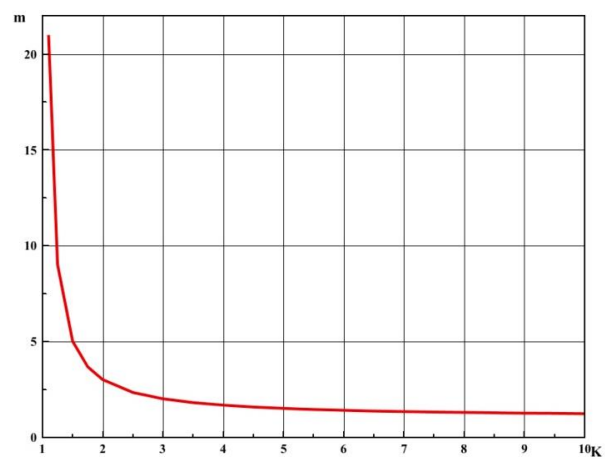
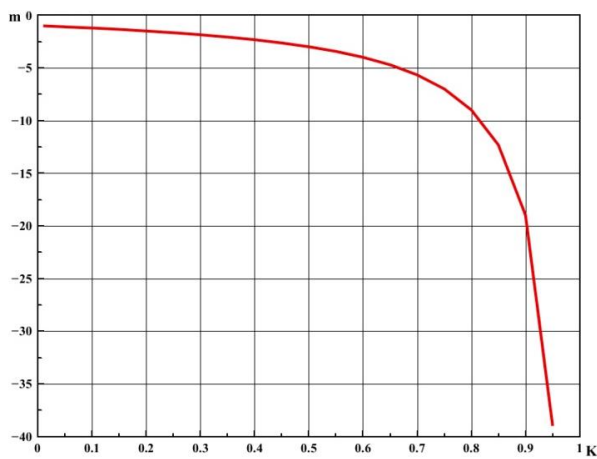


Рис. 3. Залежність коефіцієнта перетворення m від кута α при фіксованих коефіцієнтах анізотропії електропровідного матеріалу $K=0,75; 10; 50; 100$.



a) Залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії при $0 < K < 1$ та куті $\alpha = 45^\circ$;

b) Залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії при $1 < K < \infty$ та куті $\alpha = 45^\circ$.

Рис. 4. Залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії електропровідного матеріалу при $\alpha = 45^\circ$

антипаралельно напрямку електричного поля.

Протікання вхідного електричного струму через торцеві контакти J_{in} викликає появу електричного струму J_{out} на вихідних контактах.

У цьому випадку вихор електричного струму згідно з [11, 12] представляється наступним чином:

$$\text{rot } \vec{j} = -\omega, \text{ для } 0 < K < 1, \quad (10)$$

$$\text{rot } \vec{j} = \omega, \text{ для } 0 < K < \infty \quad (11)$$

де $\omega = F(\sigma_{11}, \sigma_{22}, a, b, c, \alpha)$ – кругова частота обертання електричного вихору, знаки «+» та «-» – позначають напрямок його обертання.

Такі електричні вихори є ефективним механізмом, що перекачують енергію між зовнішнім середовищем і в нашому випадку, об'ємом анізотропної електропровідної чергуваної біполярної пластини.

Представлений механізм енергетичної взаємодії є перспективним для сучасної науки та техніки.

II. Про можливості застосування запропонованого методу перетворення енергії

У загальному випадку вибір конкретної конструкції анізотропного пристрою визначається як призначенням і функціональними особливостями, так і умовами його експлуатації.

У всіх можливих конструкціях такого пристрою основою є прямокутна пластинка 1 з анізотропного матеріалу, який у вибраних кристалографічних осях Ox та Oy характеризується p - та n - типами електропровідності відповідно. При застосуванні штучного анізотропного електропровідного матеріалу він являтиме собою шарувату структуру, що чергується, на основі шарів електропровідного матеріалу 1 товщини τ_1 та електропровідного матеріалу 2 товщини τ_2 . Методика розрахунку цієї структури та її оптимізації аналогічної методики наведеної у [13].

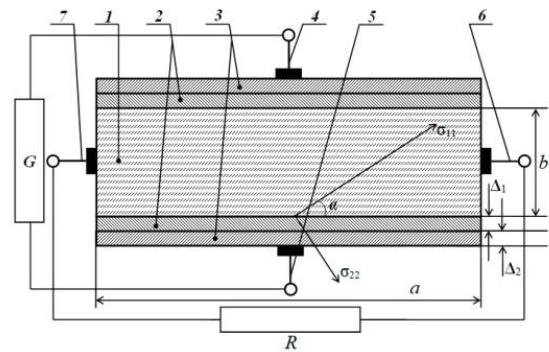
Підбираючи відповідне значення коефіцієнта анізотропії шарів 1 та 2 цієї пластини, а також її геометричні розміри, дає можливість створення необхідних пристроїв та приладів з відповідними параметрами. Розглянемо конструкції конкретних пристроїв на основі вищенаведених анізотропних пластин.

2.1. Анізотропний електроомічний генератор (АЕГ)

У цьому випадку перетворювач – АЕГ в основі якого лежить прямокутна анізотропна пластинка яка характеризується додатнім значенням коефіцієнта перетворення m ($1 < K < \infty$) та орієнтацією кристалографічної осі σ_{11} під деяким обраним кутом α .

Схематична конструкція такого генератора представлена на Рис. 5, яка складається: з пластини 1; шарів 2 – електроізоляційний шар та 3 – електропровідний шар; вхідних електровиводів 4, 5 які підключено до зовнішнього джерела

електроенергії створюваної генератором, що задає; вихідних електровиводів 6, 7, до яких підключено зовнішнє навантаження, опором Z .



1 – Пластинка з анізотропного електропровідного матеріалу; 2 – електроізоляційні шари; 3 – електропровідні шари; 4, 5 – вхідні; 6, 7 – вихідні електровиводи.

Рис. 5. Схематичне зображення конструкції АЕГ.

При подачі деякої потужності $P(t) = P_0 \sin(\omega_1 t)$ у вигляді задаючого генератора на вхід АЕГ, в об'ємі пластини 1 виникають електричні вихори з турбулентною течією, які далі взаємодіють із зовнішнім середовищем. Це веде до виникнення енергетичного потоку спрямованих із цього середовища в об'єм пластини, яка перетворюється у електричну. Це призводить до появи на вихідних електровиводах 6, 7 деякої електричної потужності, P_{out} , яка представляється в наступному вигляді:

$$P_{out} = P_0 \sin(\omega_1 t_0) \frac{(K+1) \text{tg } \alpha}{K - \text{tg}^2 \alpha}, \quad (12)$$

таким чином, правостороннє обертання електричних вихорів з турбулентною течією зумовлює можливість роботи пластини у режимі генерації електричної енергії. Де ω_1 це частота електричного вихору, яка визначається задаючим генератором.

Коефіцієнт корисної дії η_1 у цьому випадку виглядає так:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + P_1/P_2}, \quad (13)$$

де P_1/P_2 – потужності що виділяються в об'ємі, як пластини так і зовнішні навантаження опором Z відповідно.

Максимальне значення електричної потужності P_{max} , яку може генерувати АЕГ, визначається наступним виразом:

$$P_{max} = (s \cdot M \cdot \Delta T) / (P_1/P_2), \quad (14)$$

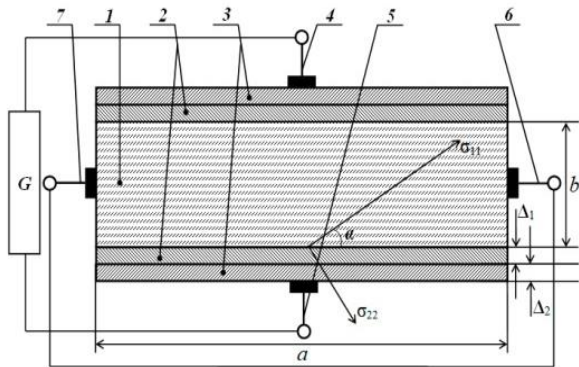
де $M = a \cdot b \cdot c \cdot d$ – маса пластини; d – щільність її матеріалу; s – питома теплоємність матеріалу; T_0 – температура довкілля; T_{max} – гранична робоча температура матеріалу, пластини 1.

Чисельні оцінки, що були приведені показують, що величина ККД запропонованого пристрою знаходиться в межах 0,5÷0,99

Слід зазначити, що при певних умовах АЕГ, що розглядається, також може активно функціонувати в режимі генерації теплової потужності.

2.2. Анізотропний електроомічний нагрівач (АЕН)

Особливістю такого нагрівача у порівнянні із генератором є підвищені значення внутрішнього опору пластини. Схематична конструкція такого АЕН (Рис. 6) аналогічна конструкції вищезгаданого АЕГ з тією різницею, що опір $R=0$



1 – Пластина з анізотропного електропровідного матеріалу; 2 – електроізоляційні шари; 3 – електропровідні шари; 4, 5 – вхідні; 6, 7 – вихідні електроконтакти.

Рис. 6. Схематичне зображення конструкції АЕН.

2.3 Анізотропний електроомічний охолоджувач (АЕО)

На відміну від конструкції АЕГ та АЕН конструкція АЕО складається з анізотропної прямокутної пластини 1 та електроконтактів 4, 5 (Рис. 7). Анізотропія електропровідності матеріалів пластини 1 вибирається з коефіцієнтом $0 < K < 1$.

У цьому випадку прикладання до контактів 4, 5 потужності генератора веде до виникнення в її об'ємі турбулентних вихорів електричного струму з лівостороннім обертанням. Це призводить до зменшення внутрішньої енергії анізотропної пластини, що в кінцевому рахунку веде до відповідного зниження температури T пластини.

При додатному напівперіоді потужності, що подається на вхід такого пристрою частина його внутрішньої енергії поглинається зовнішнім середовищем через одну з бічних граней ($a \times b$), при від'ємному напівперіоді – через протилежну бічну грань ($a \times b$).

У цьому випадку холодопродуктивність Q визначається таким чином [14]:

$$Q = W_{out} \frac{(K+1) \operatorname{tg} \alpha}{K - \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad (15)$$

а різниця температур ΔT між навколишнім середовищем та анізотропним пристроєм, що досягається при адіабатичній ізоляції граней пластини,

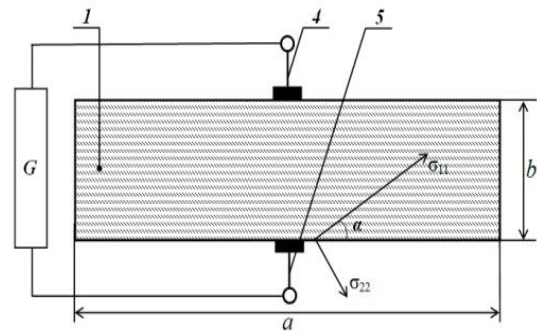
$$\Delta T = (Q - q_{los}) / (s \cdot M), \quad (16)$$

де q_{los} – втрати, зумовлені охолодженням електропровідних та металевих шарів на верхній та нижній гранях перетворювача, s – теплоємність, M – його маса.

Коефіцієнт корисної дії ϑ аналізованого процесу охолодження представляється класичним виразом:

$$\vartheta = (T_1 - T_2) / T_1$$

де T_1 – температура оточуючого середовища, T_2 – температура анізотропної пластини яка досягається при охолодженні.



1 – Пластина з анізотропного електропровідного матеріалу; 4, 5 – вхідні; 6, 7 – вихідні електроконтакти.

Fig. 7. Схематичне зображення конструкції АЕО.

Слід відмітити, що в якості матеріалів для пластини можливе застосування як напівпровідників з вузькою шириною забороненої зони напівпровідників p - та n - провідності, напівметалів та металів також відповідної провідності.

Результати проведених досліджень показують перспективність використання даного пристрою, як високоефективних холодильних елементів. Даний метод дозволяє здійснювати ефективну утилізацію та акумуляцію теплової енергії, що виділяється, як конкретних об'єктів, різних приладів і пристроїв, перекачуючи її в зовнішнє середовище.

Висновки

Вперше запропоновано оригінальну фізичну модель енергетичної взаємодії між вихровим електричним полем пластини з анізотропного електропровідного матеріалу, що характеризується різними типами провідності у вибраних кристалографічних осях та зовнішнім середовищем. Аналіз цієї моделі показує, що в інтервалі $0 < K < 1$ величина коефіцієнта перетворення m характеризується від'ємним значенням, а в інтервалі $1 < K < \infty$ – додатнім. У першому випадку спостерігається ефект охолодження у другому – режим генерації електроенергії та виділення тепла.

Використання монокристалічних та штучно-анізотропних електропровідних матеріалів з різним типами провідності у вибраних кристалографічних осях дає можливість отримати значеннями модуль $m > 1$, яке зумовлене дією вихорів електричного поля з турбулентною течією в об'ємі анізотропної пластини.

Визначено перспективні галузі практичного застосування таких пристроїв у вигляді генераторів електрики, тепла та холоду, отримано розрахункові вирази для їх коефіцієнта корисної дії, що знаходиться в інтервалі $\eta = 0,5 \div 0,98$, а температура охолодження даного пристрою при застосуванні відповідних матеріалів з необхідною температурною залежністю

їх кінетичних коефіцієнтів може досягати температури рідкого гелію.

Запропонована модель сприятиме появі нових науково-технічних напрямків в галузі електрики та усіх напрямках, які пов'язані із нею.

Ашеулов А.А. – д-р техн. наук, професор;
Дерев'янчук М.Я. – аспірант;
Лавренюк Д.О. – інженер.

- [1] A. Ashcheulov, M. Derevianchuk, D. Lavreniuk, *The phenomenon of electroohmic transformation*, Physics and Chemistry of Solid State 21(4), 743 (2020); <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.743-748>.
- [2] A.G. Samoilovich. Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion (Ruta, Chernivtsi, 2006).
- [3] A.A. Ashcheulov, N.Ya. Derevianchuk, D.A Lavreniuk, I.S. Romaniuk, *Electric current transformation by anisotropic electroconductive medium*, ТКЕА, 5-6, 28 (2020); <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2020.5-6.28>.
- [4] A.A. Ashcheulov, M.V. Horobets, Yu.H. Dobrovolskyi, I.S. Romaniuk, *Thermoelectric Peltier modules based on Bi-Te-Se-Sb solid solution crystals* (Prut, Chernivtsi, 2011).
- [5] J.F. Nye, Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices (Oxford University Press); (1985).
- [6] A.N. Vlasov et al., Energy and physical vacuum (Stanitsa-2, Volgograd, 2004).
- [7] V.V. Kozlov, General theory of vortices. 2nd ed. revised and enlarged (Izhevsk, Institute of Computer Research, 2013).
- [8] L. Davidson, An introduction to turbulence models (Charmles Un-ty of Technology, Göteborg, 2003).
- [9] Yu.I. Khlopkov, V.A. Zharov, S.L. Gorelov, Lectures on the theoretical methods of turbulence study (FFTI Publ, 2005).
- [10] T.G. Elizarova, I.A. Shirokov, *Laminar and turbulent modes of the Taylor-Green vortex decay*, Preprints of the Keldysh IPM, 63(16) (2013); <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-63>
- [11] A.G. Boev, *Electromagnetic theory of tornado*, Electrodynamics of vortex. Radiophysics and Radioastronomy, 14(2), 121 (2009).
- [12] A.M. Prokhorov (1988-1998). Physics encyclopedia. [Vol.1-Vol. 5 Reference edition]. Sov. encyclopedia, 1988-1998, –704 p., 704 p., 672 p., 704 p., 760 p.
- [13] Patent UA. №147993. A.A. Ascheulov, M.Ya. Derevianchuk, D.O. Lavrenyuk, Anisotropic electrically conductive material. Bull. №25/2021 dated 23.06.2021
- [14] Patent UA № u 2021 03958. A.A.Ashcheulov. Thermostatic cooling process.

A.A. Ashcheulov¹, M.Ya. Derevianchuk², D.O. Lavreniuk²

Phenomenon of electro-ohmic energy transformation in the anisotropic electrically conductive environments

*Institute of Thermoelectricity of NAS and MES of Ukraine, Chernivtsi, Ukraine, ashcheulov.anatoly@gmail.com
Uryi Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, m.derevianchuk@ukr.net*

A study was made of the features of electric current transformation by an anisotropic electrically conductive medium characterized by different types of conductivity (*p*- and *n*-types) in selected crystallographic directions under ohmic contact conditions. It has been established that in the case of an external sinusoidal electric current flowing through a device based on a rectangular plate of the abovementioned anisotropic material, electric current vortices occur in its bulk. Based on the analysis of the function $m(K, \alpha)$ (case $|m| > 1$), which determines the transformation coefficient of the device, a conclusion is made about the energy interaction between the bulk of the anisotropic plate and the external medium. Studies have shown that the use of anisotropic electrically conductive bipolar material leads to a significantly higher ($m > 1$) or lower ($m < -1$) value of the transformation coefficient m than in the case of unipolar anisotropic electrically conductive materials. The phenomenon of electroohmic transformation is caused by the appearance of electric field vortices which are characterized by turbulent flow represented by the expression $\text{rot } \vec{j} = \pm \omega$, where ω is a circular frequency of vortex rotation, and signs «+» and «-» denote the direction of its rotation and are determined by the value of the anisotropy coefficient $K = \sigma_{11}/\sigma_{22}$. Such electric vortices with a turbulent flow are an efficient mechanism of pumping energy between the external medium and, in our case, the anisotropic plate of the device. It should be noted that in some cases there is an anomalous value of the abovementioned coefficient. The application of the considered method of electric current transformation with the help of the proposed devices, which are based on a plate made of anisotropic electrically conductive material, significantly expands the field of alternative electricity and other related fields of science and technology.

Keywords: anisotropic medium; electrical conductivity; transformation; electric current; efficiency; heating; cooling; generation.