

А.А. Ащеулов<sup>1</sup>, М.Я. Дерев'янчук<sup>2</sup>, Д.О. Лавренюк<sup>2</sup>

## Ефект концентрації магнітного поля

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України, м. Чернівці, Україна, [ashcheulovaa@rambler.ru](mailto:ashcheulovaa@rambler.ru), m

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, [derevianchuk@ukr.net](mailto:derevianchuk@ukr.net)

Розглянуто особливості поширення магнітного поля в анізотропному магнітному середовищі і встановлено залежності поздовжньої та поперечної складових магнітного поля від геометричних розмірів. Вперше показано можливість концентрації величини магнітного поля і проведено оптимізацію її величини. Представлено математичну модель анізотропного магнітного концентратора, а також запропоновано метод створення штучних анізотропних класичних матеріалів. Застосування цього методу концентрації магнітного поля розширює можливості та підвищує чутливість фото-, термомагнітних приймачів та ефективність гальванотермомагнітних охолоджувачів, а також електромагнітних і магнітоелектричних вимірювальних систем.

**Ключові слова:** тензор, магнітна проникність, анізотропія, концентрація, магнітне поле..

Подано до редакції 16.10.2021; прийнято до друку 27.01.2022.

### Вступ

Відомо, що магнітне поле, як і електричне є основою сучасної енергетики, електроніки, радіо, обчислювальної техніки, а також інших областей науки і техніки [1].

У даний час розвиток нових технологій і технологічних систем потребує конструювання економічно ефективних електротехнічних комплексів.

Концентратори магнітного поля отримали розповсюдження в пристроях для підвищення напруженості індукції магнітного поля в заданій області – в медичних пристроях, в магнітних уловлювачах, в пристроях для підвищення октанового числа нафтопродуктів, у різних фото- [2], термо- [3] магнітних приймачах, у гальванотермомагнітних охолоджувачах [4, 5] та інших приймальних пристроях, які працюють у широкому спектральному діапазоні.

Основна вимога, яка ставиться до них є створення підвищеного значення магнітної індукції  $B$  у зазорі де розташований чутливий елемент конкретного пристрою. У даний час ця вимога вирішується в основному шляхом зміни геометричної

форми наконечника магніту [6]. Такий метод не зовсім задовольняє вимоги до сучасних новітніх технологій.

### I. Математична модель ефекту концентрації магнітного поля

Розглянемо середовище, яке характеризується анізотропією коефіцієнту магнітної проникності  $\hat{\mu}_{ii}$  головні кристалографічні осі  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  якого співпадають з осями  $Ox'$ ,  $Oy'$ ,  $Oz'$  вибраної лабораторної системи координат. Тензор магнітної проникності такого середовища  $\hat{\mu}$  представляється наступним чином [7, 8]:

$$\hat{\mu} = \mu_0 \begin{vmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{vmatrix} \quad (1)$$

У випадку створення з такого анізотропного матеріалу прямокутної пластини довжиною  $a$ , висотою  $b$  ( $a \gg b$ ) і шириною  $c$  ( $a \gg b > c$ ) вибрані кристалографічні осі  $Ox$  і  $Oy$  якої розміщені в площині бокової грані ( $a \times b$ ), а вісь  $Ox$  розміщена під

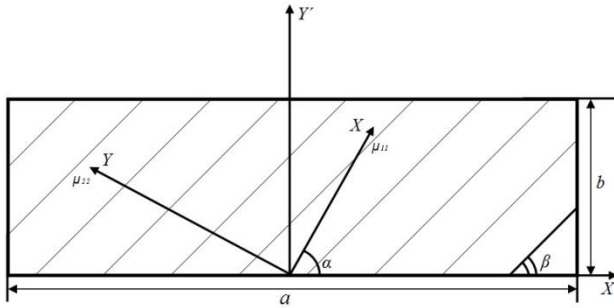
деяким кутом  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 90^\circ$ ) до ребра  $a$  (рис. 1). Тоді тензор  $\hat{\mu}$  у такому випадку представляється

$$\hat{\mu} = \mu_0 \begin{pmatrix} \mu_{11}\cos^2\alpha + \mu_{22}\sin^2\alpha & (\mu_{11} - \mu_{22})\sin\alpha \cdot \cos\alpha & 0 \\ (\mu_{11} - \mu_{22})\sin\alpha \cdot \cos\alpha & \mu_{11}\sin^2\alpha + \mu_{22}\cos^2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Тензор (2) характеризується наявністю як поздовжньої  $\mu_{\parallel}$ , так і поперечної  $\mu_{\perp}$  складових:

$$\mu_{\parallel} = \mu_0(\mu_{11}\cos^2\alpha + \mu_{22}\sin^2\alpha), \quad (3)$$

$$\mu_{\perp} = \mu_0(\mu_{11} - \mu_{22}) \sin\alpha \cos\alpha \quad (4)$$



**Рис. 1.** Штучна анізотропна магнітна пластина (кристалографічна вісь  $Z$  співпадає з лабораторною  $Z'$ , вони розміщені перпендикулярно до площини рисунка).

Якщо таку пластину розмістити в зовнішнє однорідне магнітне поле напруженістю  $\vec{H}$  таким чином, щоб вектор напруженості  $\vec{H}$  був розміщений перпендикулярно до верхньої та нижньої граней цієї пластини ( $a \times c$ ), то в її об'ємі виникають, як поздовжня  $\vec{B}_{\parallel}$  так і поперечна  $\vec{B}_{\perp}$  складові вектора магнітної індукції  $\vec{B}$ . При цьому їх величини можна представити формулами:

$$\vec{B}_{\parallel} = \vec{H} \cdot \mu_0(\mu_{11}\cos^2\alpha + \mu_{22}\sin^2\alpha), \quad (5)$$

$$\vec{B}_{\perp} = \vec{H} \cdot \mu_0(\mu_{11} - \mu_{22}) \sin\alpha \cos\alpha. \quad (6)$$

Поперечний та поздовжній магнітні потоки, що виникають в об'ємі ( $a \times b \times c$ ) пластини опишемо наступними формулами

$$\vec{\Phi}_{\parallel} = \vec{H} \cdot \mu_0(\mu_{11}\cos^2\alpha + \mu_{22}\sin^2\alpha) \cdot b/ac, \quad (7)$$

$$\vec{\Phi}_{\perp} = \vec{H} \cdot \mu_0(\mu_{11} - \mu_{22}) \sin\alpha \cos\alpha \cdot a/bc. \quad (8)$$

Коефіцієнт перетворення  $m$  представимо формулою

$$m = \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}} = \frac{(\mu_{11} - \mu_{22}) \sin\alpha \cos\alpha}{\mu_{11}\cos^2\alpha + \mu_{22}\sin^2\alpha} \quad (9)$$

Дослідження значень коефіцієнта перетворення  $m$  на екстремум по куту  $\alpha$  ( $\partial m / \partial \alpha = 0$ ) – показала,

наступним чином:

що максимум величини  $m$  спостерігається при куті  $\alpha_{opt.} = \arctg \sqrt{\mu_{11}/\mu_{22}}$

$$m_{max} = m(\alpha_{opt.}) = \frac{\sqrt{K(K-1)}}{2K}, \quad (10)$$

де  $K = \mu_{11}/\mu_{22}$ .

Проведені оцінки продемонстрували, що оскільки  $a \gg b > c$  то впливом краєвих умов на торцевих та бічних гранях можна знехтувати [9].

Тому, формули поперечного та поздовжнього магнітних потоків при оптимальному куті  $\alpha_{opt.}$  набувають вигляду

$$\vec{\Phi}_{\parallel} = \vec{H} \cdot \mu_0 \frac{2K}{K+1} \cdot \frac{b}{ac}, \quad (11)$$

$$\vec{\Phi}_{\perp} = \vec{H} \cdot \mu_0 \frac{\sqrt{K(K-1)}}{K+1} \cdot \frac{a}{bc}. \quad (12)$$

Таким чином максимальний коефіцієнт концентрації  $l$  досліджуваного пристрою з одного боку визначається величинами коефіцієнтів  $\mu_{11}$  та  $\mu_{22}$  матеріалу пластини, а з іншого квадратом коефіцієнта її форми ( $a \times b$ ).

$$l = \frac{\vec{\Phi}_{\perp}}{\vec{\Phi}_{\parallel}} = \frac{\sqrt{K(K-1)}}{2K} \cdot (a/b)^2 = m_{max} \cdot (a/b)^2 \quad (13)$$

Це дає змогу отримати достатньо великі значення магнітного поля при малих геометричних розмірах.

Слід відмітити, що в такому випадку екіпотенціальні поверхні магнітного поля всередині об'єму пластини розміщуються під деяким кутом  $\beta$ , значення якого визначається виразом

$$\beta = \arctg \left( \frac{K-1}{K+1} \right) \quad (14)$$

У випадку необхідності розміщення екіпотенціальних поверхонь магнітного поля поперечної складової магнітної індукції паралельно граням  $a \times c$  необхідно зорієнтувати кристалографічні осі під деяким кутом  $\gamma = \alpha_{opt} - \beta$ .

У такому випадку екіпотенціальні поверхні поперечної складової магнітного поля розміщуються паралельно граням  $a \times c$ , коефіцієнт концентрації  $l_1$  визначається наступним виразом

$$l_1 = \frac{(K-1) \cdot \sin\gamma \cdot \cos\gamma}{K \cos^2\gamma + \sin^2\gamma} \cdot (a/b)^2 \quad (15)$$

У цьому випадку поперечний магнітний потік  $\vec{\Phi}_{\perp}$

розташовується вздовж довжини  $a$  анізотропної пластини.

Слід зазначити, що даний ефект працює, як для статичних так і динамічних полів.

## II. Матеріали для ефективних анізотропних магнітних концентраторів

Проведений аналіз існуючої літератури показав, що на даний момент відсутні реальні анізотропні магнітні матеріали, які дозволяли б використати їх для створення ефективних магнітних концентраторів [10, 11, 12].

Вирішення цієї проблеми було знайдено шляхом створення штучних анізотропних магнітних матеріалів. Зміст якого полягає в тому, що штучний анізотропний магнітний матеріал являє собою систему паралельно розташованих чергуючих пластин 1 та 2 з товщинами  $d_1$  і  $d_2$ , що характеризуються різними коефіцієнтами проникності  $\mu_1$  та  $\mu_2$  відповідно ( $\mu_2 \gg \mu_1$ ) [9].

Розрахунок такого штучного анізотропного магнітного матеріалу проводять виходячи з максимального значення коефіцієнта анізотропії магнітної проникності  $k = \mu_{\parallel}/\mu_{\perp}$ . Із використанням методики, яка наведена у статті [9]. Вихідні матеріали шарів 1 та 2 вибирають виходячи з максимального значення різниці їх коефіцієнтів ( $\mu_2 \gg \mu_1$ ).

Представимо таку систему у вигляді прямокутного паралелепіпеда рис. 2. довжиною  $a_1$ , висотою  $b_1$  та шириною  $c_1$ , що складається з паралельно розташованих шарів 1 та 2, які чергуються. Ці шари товщинами  $d_1$  і  $d_2$ , виконані із магнітних матеріалів з коефіцієнтами проникності  $\mu_1$  та  $\mu_2$  відповідно ( $\mu_2 \gg \mu_1$ ).

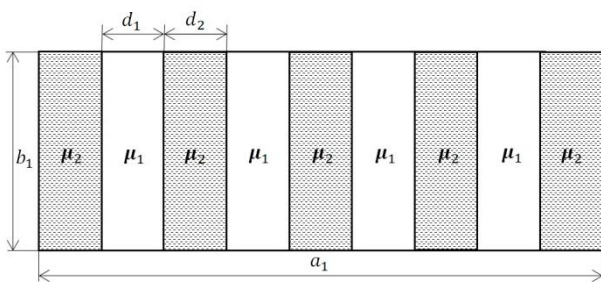


Рис. 2. Модель структури штучного анізотропного магнітного середовища. 1 – шар із матеріалу з магнітною проникністю  $\mu_1$  і товщиною  $d_1$ ; 2 – шар із матеріалу з магнітною проникністю  $\mu_2$  і товщиною  $d_2$ .

Величини повздовжньої  $\mu_{\parallel}$  і поперечної  $\mu_{\perp}$ , складових тензора магнітної проникності  $\hat{\mu}$  цієї чергуючої системи визначається наступним виразом:

$$\mu_{\parallel} = (\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2) / (d_1 + d_2), \quad (16)$$

$$\mu_{\perp} = \mu_1 \mu_2 (d_1 + d_2) / (\mu_1 d_2 + \mu_2 d_1) \quad (17)$$

Оптимальні значення величин  $d_1$  та  $d_2$  пов'язано

наступним співвідношенням:

$$d_2 = d_1 \cdot \sqrt{\mu_2 / \mu_1} \quad (18)$$

Це, в свою чергу дає можливість як незалежного підбору вихідних матеріалів так і їх геометричних розмірів, та відповідної оптимізації, що в цілому веде до появи анізотропних речовин з необхідними заданими магнітними параметрами.

Основою анізотропного магнітного концентратора є пластина довжиною  $a$  висотою  $b$  та шириною  $c$ , чергуючі шари 1 і 2 якої розташовано під деякими оптимальним кутом [13], яку зображено на рис. 3.

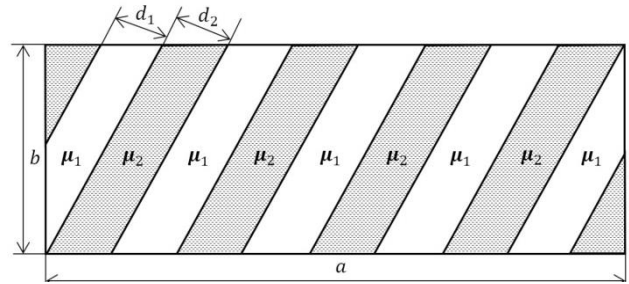


Рис. 3. Анізотропний трансформуючий елемент із штучного анізотропного магнітного матеріалу.

У таблиці 1, яка наведена у [11, 12] представлено короткі характеристики існуючих ізотропних магнітних матеріалів, які можуть бути використані для створення штучних анізотропних матеріалів.

Таблиця 1  
Коефіцієнти магнітної проникності матеріалів.

Назва матеріалу	Проникність ( $\mu$ ) Гн/м (Н/м)
Метглас (анг. Metglas)	1,25
Наноперм (анг. Nanoperm)	$10 \times 10^{-2}$
Мю-метал	$2,5 \times 10^{-2}$
Пермалой (сплав 80% нікелю і 20% заліза)	$1,0 \times 10^{-2}$
Електротехнічна сталь	$5,0 \times 10^{-3}$
Нікель-цинковий Ферит	$2,0 \times 10^{-5} - 8,0 \times 10^{-4}$
Марганець-цинковий Ферит	$> 8,0 \times 10^{-4}$
Сталь	$1,26 \times 10^{-4}$
Нікель	$1,26 \times 10^{-4} - 7,54 \times 10^{-4}$
Платина	$1,2569701 \times 10^{-6}$
Алюміній	$1,2566650 \times 10^{-6}$
Вісмут	$1,25643 \times 10^{-6}$
Залізо (чистота 99,8%)	$6,3 \times 10^{-3}$
Залізо (99,95% чисте залізо випалене у водні)	$2,5 \times 10^{-1}$
Залізо-кобальтові сплави	$2,3 \times 10^{-2}$
Мартенситна нержавіюча сталь (загартована)	$5,0 \times 10^{-5} - 1,2 \times 10^{-4}$
Вуглецева сталь	$1,26 \times 10^{-4}$
Неодимовий магніт	$1,32 \times 10^{-6}$
Фторопласт 4, Тефлон	$1,2567 \times 10^{-6}$
Сапфір	$1,2566368 \times 10^{-6}$
Мідь	$1,2566290 \times 10^{-6}$

Таблиця 2.

## Характеристики штучних анізотропних магнітних матеріалів.

Вихідні магнітні матеріали	Алюміній $\mu_1 = 1,256665 \times 10^{-6}$ Гн/м (Н/м)	Мідь $\mu_1 = 1,256629 \times 10^{-6}$ Гн/м (Н/м)	Вісмут $\mu_1 = 1,25643 \times 10^{-6}$ Гн/м (Н/м)
	Нікель $\mu_2 = 1,26 \times 10^{-4}$ Гн/м (Н/м)	Електротехнічна сталь $\mu_2 = 5,0 \times 10^{-3}$ Гн/м (Н/м)	Залізо-кобальтовий сплав $\mu_2 = 2,3 \times 10^{-2}$ Гн/м (Н/м)
Коефіцієнт анізотропії штучного шарового матеріалу $k = \mu_{\parallel} / \mu_{\perp}$	$8,30491 \times 10^1$	$3,855711 \times 10^3$	$1,803822 \times 10^4$
Коефіцієнт перетворення $m$ , %	97,62	99,95	99,99
Коефіцієнт концентрації $l$ , (при $a/b = 20$ )	390,48	399,79	399,96

Використання обраних матеріалів, що наведені в Таблиці 1 дає нам можливість створювати штучні анізотропні магнітні матеріали анізотропія магнітної проникності яких знаходяться у широкому діапазоні.

У таблиці 2 наведено характеристики трьох штучних анізотропних магнітних матеріалів, шар 1 та 2 виконано з: алюмінію та нікелю; міді та електротехнічної сталі; вісмуту та залізо-кобальтового сплаву.

Аналіз даних таблиці 2 свідчить про те, що запропонований метод створення штучних анізотропних магнітних матеріалів, які характеризуються достатньо високим значенням коефіцієнтів анізотропії магнітної проникності.

При застосуванні штучного анізотропного магнітного матеріалу в якості вихідних матеріалів вісмуту та залізо-кобальтового сплаву та пластини з коефіцієнтом форми  $a/b = 20$  то коефіцієнт перетворення  $m = 99,99$  %.

Можливість незалежного підбору матеріалів для шарів 1 і 2 з необхідними товщинами  $d_1$ ,  $d_2$  веде до появи необхідних анізотропних магнітних структур із заданими коефіцієнтами концентрації.

## Висновок

Розглянутий ефект концентрації магнітного поля з штучно анізотропними магнітними матеріалами значно розширюють можливості електротехніки, приладобудування та інші пов'язані з ним галузі.

**Ащеулов А.А.** - доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Інституту термoeлектрики НАН та МОН України;  
**Дерев'яничук М.Я.** – заступник директора;  
**Лавренюк Д.О.** – інженер.

- [1] I.E. Tamm, Fundamentals of theory of thermoelectricity (Fizmatlit, Moscow, 2003) [in Russian].
- [2] I.M. Vikulin., V.I. Stasfeyev, Physics of semiconductor devices (Radio i sviaz, Moscow, 1990) [in Russian].
- [3] L.I. Anatychuk, Thermoelements and thermoelectric devices: Handbook (Naukova dumka, Kyiv, 1979) [in Russian].
- [4] A.G. Samoilovich, Thermoelectric and thermomagnetic energy conversion methods (LKI, Moscow, 2012) [in Russian].
- [5] A.A. Ashcheulov, V.G. Okhrem, I.S. Romaniuk, New thermoelectric effects and elements (Rodovid, Chernivtsi, 2015) [in Ukrainian].
- [6] E.G. Andreeva, A.A. Tatevosian, I.A. Semina, Scientific Bulletin, Omsk 1(87), 110 (2010) [in Russian].
- [7] J. Nye, Physical properties of crystals and their description with the help of tensors and matrices (Mir, Moscow, 1967) [Russian transl.].
- [8] Jacob Fraden, Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications (Springer, New York, 2015).
- [9] V.P. Babin, T.S. Gudkin., Z.M. Dashevsky, L.D. Dudkin, E.K. Iordanishvili, Semiconductors 4, 742 (1974).
- [10] Physical encyclopaedic dictionary (Sov.entsyklopedia, Moscow, 1984).
- [11] David Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials (CRC Press, New York, 1998).
- [12] B.D. Cullity, C.D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2nd edition. Hoboken (John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2008).
- [13] A.A. Ascheulov, D.O. Lavreniuk, O.S. Verenko, Patent of Ukraine № 141900 Magnetic field concentrator, (2020) [in Ukrainian].

A.A. Ashcheulov<sup>1</sup>, M.Ya. Derevianchuk<sup>2</sup>, D.A. Lavreniuk<sup>2</sup>

## Effect of Magnetic Field Concentration

<sup>1</sup>*Institute of Thermoelectricity of NAS and MES of Ukraine, [ashcheulovaa@rambler.ru](mailto:ashcheulovaa@rambler.ru).*

<sup>2</sup>*Uryi Fedkovich Chernivtsi National University, [m.derevianchuk@ukr.net](mailto:m.derevianchuk@ukr.net)*

The peculiarities of magnetic field propagation in an anisotropic magnetic medium are considered and the dependences of the longitudinal and transverse components of the magnetic field on the geometric dimensions are established. For the first time, the possibility of concentrating the magnitude of the magnetic field has been shown and its value has been optimized. A model of an anisotropic magnetic concentrator is developed, and a method for creating artificial anisotropic classical materials is proposed. The application of this method of the magnetic field concentration makes it possible to increase the sensitivity of photo-, thermomagnetic detectors and the efficiency of galvano-thermomagnetic coolers, as well as electromagnetic and magnetoelectric measuring systems.

**Keywords:** tensor, magnetic permeability, anisotropy, concentration, magnetic field.