

**А.А. Ащеулов, д.т.н., проф.**  
*Інститут термоелектрики НАН і МОН України*  
**М.Я. Дерев'янчук, аспірант**  
**Д.О. Лавренюк, студент**  
*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича*

## Ефект концентрації магнітного поля в анізотропних метамагнітних середовищах

*У роботі розглянуто особливості поширення магнітного поля в прямокутній пластині з анізотропного за коефіцієнтом магнітної проникності  $\hat{\mu}$  матеріалу. Встановлено залежності поздовжньої та поперечної складових магнітного поля від геометричних розмірів пластини та кута нахилу вибраних головних кристолографічних осей. Вперше показано можливість концентрації величини напруженості  $\vec{H}$  магнітного поля і проведено відповідну оптимізацію її величини. Представлено моделі анізотропного магнітного концентратора, а також запропоновано метод його створення на основі штучних анізотропних, як класичних, так і метамагнітних, матеріалів. Застосування запропонованого методу веде до появи нових енергетичних перетворювачів автономної екологічно чистої енергії, що не потребує класичних енергоносіїв.*

*Метод концентрації магнітного поля з використанням штучних анізотропних класичних матеріалів покращує показники електромагнітних і магнітоелектричних вимірювальних систем, проте не зовсім задовольняє вимоги до новітніх технологічних пристроїв.*

*Подальше підвищення коефіцієнта концентрації магнітного поля досягається при використанні штучних анізотропних метамагнітних матеріалів, що характеризуються від'ємним значенням магнітної проникності у одному із вибраних головних кристолографічних напрямків.*

*Запропоновані методи концентрації магнітного поля знайдуть використання у електротехніці, радіотехніці, метрології та інших пов'язаних із ними галузях.*

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

**Актуальність теми.** Як відомо, основою сучасної електрики та пов'язаних із нею галузей науки і техніки поряд з електричним є магнітне поле [1].

У деяких випадках магнітне поле потребує підвищеного значення. На даний час ця вимога вирішується в основному шляхом зміни геометричної форми наконечників магнітів [2]. Як матеріал у цьому випадку застосовуються ізотропні магнітні матеріали із додатнім значенням магнітної проникності ( $\mu$ ). В цілому такий конструктивний прийом не повною мірою задовольняє вимоги до новітніх технологічних пристроїв.

Концентрації магнітного поля також можна досягнути у випадку застосування монокристалічних анізотропних магнітних матеріалів, які мають форму прямокутної пластини. Розміщення такої пластини у зовнішньому магнітному полі із напруженістю  $\vec{H}$  призводить до концентрації в її об'ємі поперечної складової магнітного поля на її торцевій грані [3].

Коефіцієнт перетворення  $m$  монокристалічного анізотропного магнітного матеріалу з уніполярним значенням  $\mu_{11}$  та  $\mu_{22}$ , як уже відомо, визначається таким виразом:

$$m = \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}} = \frac{(\mu_{11} - \mu_{22}) \sin \alpha \cos \alpha}{\mu_{11} \cos^2 \alpha + \mu_{22} \sin^2 \alpha}. \quad (1)$$

При цьому коефіцієнт концентрації пристрою, що розглядається, визначається формулою:

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

Монокристалічне анізотропне магнітне середовище, що характеризується анізотропією коефіцієнта магнітної проникності  $\hat{\mu}_{ii}$  ( $\hat{\mu}_{ii} > 0$ ,  $\hat{\mu}_{11} > \hat{\mu}_{22}$ ), є уніполярним. Слід зауважити, що у такому випадку завжди значення коефіцієнта перетворення  $m < 1$ .

Такий метод концентрації дозволяє формувати напруженість магнітного поля значно більших значень, проте і вони не вирішують проблеми в цілому.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Вивчення електромагнітної взаємодії з матеріалами має тривалу і насичену історію та сягає Френеля, Максвелла, Релея та багатьох інших [4–7]. За майже 200 років досліджень електромагнітна взаємодія матеріалів перейшла у розробку і вивчення властивостей метаматеріалів.

Штучний композит матеріалів, який пізніше почали називати «метаматеріал», спочатку був відомий як матеріал з лівостороннім заломлення (LHM), або матеріал з від'ємним коефіцієнтом заломлення (NIM). Можливість такого від'ємного заломлення вказав ще у 1944 р. відомий академік АН СРСР Леонід Мандельштам у своїх лекціях, однак він не вводив поняття «від'ємного заломлення» і взагалі не пов'язував це з коефіцієнтом заломлення. Він показав, що якщо групова і фазова швидкості хвиль різного знаку, то заломлений промінь відхилиться в іншу сторону [8]. У 1967 р., радянський фізик Віктор Веселаго вперше теоретично описав матеріал, в якому діелектрична і магнітна проникність одночасно від'ємні [9]. Проте у його статті не було вказано матеріал, у якому це можна спостерігати.

Дослідження в галузі метаматеріалів перебували у застої понад 30 років через відсутність експериментальної перевірки. Перша революція, пов'язана з LHM, відбулася в 1996 р., коли англійський фізик-теоретик Джон Пендрі відкрив дротяне середовище з від'ємною проникністю [10]. У 2000 р. американським фізиком Девідом Смітом зі співробітниками Каліфорнійського університету в Сан-Дієго було створено перший метаматеріал [11–13]. Властивості цього метаматеріалу повністю відповідали теорії Веселаго.

Вважається, що термін «метаматеріал» був запропонований в кінці 90-х років минулого століття американським дослідником Роджером Вальсером, який займався електронним матеріалознавством [14–15].

Дослідники з усього світу, натхненні експериментальною реалізацією, почали проводити як теоретичні дослідження, так і експериментальні. Друга революція в метаматеріалах відбулася в 2005 р., коли було реалізовано градієнтне середовище індексу заломлення для викривлення електромагнітних хвиль, що було виявлено Девідом Смітом та ін.

Сьогодні метаматеріал має набагато ширше визначення ніж на початкових етапах, а отже, відкриває абсолютно нові галузі для досліджень. Неодноразові прориви в дослідженнях стали результатом багатьох наукових праць, які публікуються в журналах. Як підсумок досліджень метаматеріалів з 2003 р. видається ряд книг [16–24].

**Метою статті** є дослідження і розробка оригінального методу концентрації магнітного поля, який базується на використанні поперечних ефектів у штучних анізотропних матеріалах, що виконано з поперемінних шарів на основі метамагнітних матеріалів.

**Викладення основного матеріалу.** Підвищене значення коефіцієнта концентрації магнітного поля можна досягнути при застосуванні анізотропних метамагнітних матеріалів, що характеризуються від'ємним значенням магнітної проникності у одному із вибраних головних кристалографічних напрямків. У цьому випадку анізотропне середовище, тензор магнітної проникності  $\hat{\mu}$  якої, в головних кристалографічних осях  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ , має такий вигляд [25, 26]:

$$\hat{\mu} = \mu_0 \begin{vmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\mu_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Один із варіантів такого анізотропного метамагнітного середовища є поперемінна шарувата структура на основі ізотропних магнітних матеріалів з додатнім та від'ємним значеннями коефіцієнтів магнітної проникності  $\mu$ . Розглянемо випадок коли  $\mu_{11}, \mu_{33} > 0$ ,  $(-\mu_{22}) < 0$ .

Створення з такого матеріалу прямокутної пластини розмірами  $a \times b \times c$  ( $a \approx c \gg b$ ), кристалографічна орієнтація вибраних осей  $OX$  та  $OY$  аналогічна орієнтації у випадку класичних матеріалів [3]. Орієнтацію кристалографічних осей  $OX$ ,  $OY$  та  $OZ$  анізотропної метамагнітної пластини і розташування векторів магнітних полів  $\vec{H}_x$ ,  $\vec{H}_y$  та індукції  $\vec{B}_x$ ,  $\vec{B}_y$  показано на рисунку 1. У випадку використання анізотропної метамагнітної пластини тензор  $\hat{\mu}$  визначається таким чином:

$$\hat{\mu} = \mu_0 \begin{vmatrix} \mu_{11} \cos^2 \alpha - \mu_{22} \sin^2 \alpha & (\mu_{11} + \mu_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ (\mu_{11} + \mu_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & \mu_{11} \sin^2 \alpha - \mu_{22} \cos^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

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

$$\mu_{\parallel} = \mu_0 (\mu_{11} \cos^2 \alpha - \mu_{22} \sin^2 \alpha), \quad (5)$$

$$\mu_{\perp} = \mu_0 (\mu_{11} + \mu_{22}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (6)$$

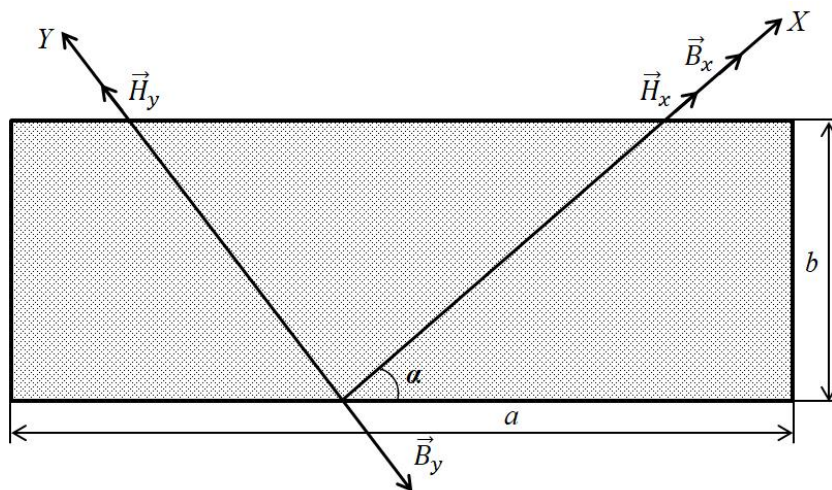


Рис. 1. Розташування векторів  $\vec{B}$  та  $\vec{H}$  у анізотропній пластині на основі метамагнітних матеріалів

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:

$$\vec{B}_{\parallel} = \vec{H} \cdot \mu_0 (\mu_{11} \cos^2 \alpha - \mu_{22} \sin^2 \alpha), \quad (7)$$

$$\vec{B}_{\perp} = \vec{H} \cdot \mu_0 (\mu_{11} + \mu_{22}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (8)$$

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

$$\vec{\Phi}_{\parallel} = \vec{H} \cdot \mu_0 (\mu_{11} \cos^2 \alpha - \mu_{22} \sin^2 \alpha) \cdot b/ac, \quad (9)$$

$$\vec{\Phi}_{\perp} = \vec{H} \cdot \mu_0 (\mu_{11} + \mu_{22}) \sin \alpha \cos \alpha \cdot a/bc. \quad (10)$$

Коефіцієнт перетворення  $m_1$  представимо формулою:

$$m_1 = \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}} = \frac{(\mu_{11} + \mu_{22}) \sin \alpha \cos \alpha}{\mu_{11} \cos^2 \alpha - \mu_{22} \sin^2 \alpha}. \quad (11)$$

Проведено чисельні оцінки із врахуванням краєвих умов на торцевих  $b \times c$  та бічних  $a \times b$  гранях. Вони показали, що оскільки  $a \approx c \gg b$  ( $a/b > 10$ ), то впливом краєвих умов можна знехтувати. Їх вплив знаходиться в межах 3–4 % [27, 28].

Дослідження функції  $m(K, \alpha) = (K + 1)tg\alpha / (K - tg^2\alpha)$  на екстремум ( $\partial m / \partial \alpha = 0, \partial^2 m / \partial \alpha^2 < 0$ ) показує, що екстремум функції відсутній. В уніполярному випадку максимальний коефіцієнт перетворення був обмежений і точно визначений.

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 ( $a/b$ ).

$$l_1 = \vec{\Phi}_{\perp} / \vec{\Phi}_{\parallel} = ((K + 1)tg\alpha / (K - tg^2\alpha)) \cdot (a/b)^2 = m_1 \cdot (a/b)^2. \quad (12)$$

Зобразимо залежність коефіцієнта перетворення  $m$  анізотропного метамагнітного концентратора (АММК) від кута  $\alpha$  для чотирьох анізотропних метамагнітних матеріалів при фіксованих коефіцієнтах анізотропії метамагнітного матеріалу  $K = 0,75; 0,9; 10; 50$  у вигляді графіків на рисунку 2.

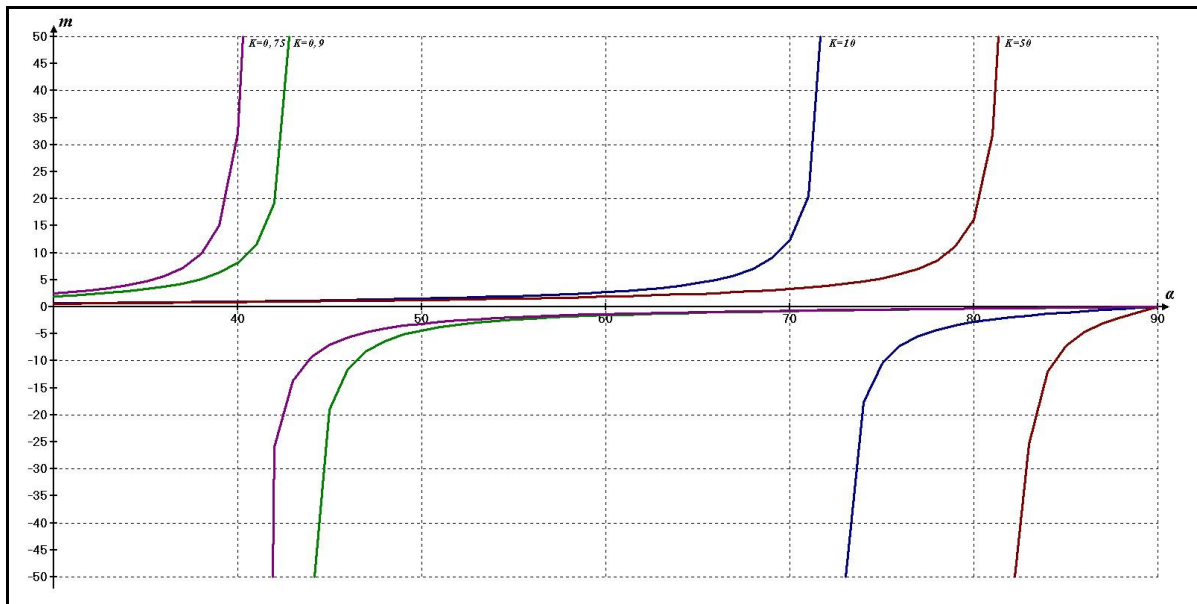


Рис. 2. Залежність коефіцієнта перетворення  $m$  АММК від кута  $\alpha$  при фіксованих коефіцієнтах анізотропії метамагнітного матеріалу  $K = 0,75; 0,9; 10; 50$

Варто зазначити, що величиною коефіцієнта  $m$  анізотропного метамагнітного матеріалу можна варіювати в широких межах шляхом підбору оптимального кута  $\alpha$ . З цього графіка випливає, що завжди існує можливість підбору кута  $\alpha$  для заданого  $m$  з необхідною величиною і знаком.

В разі  $\alpha = 45^\circ$  формула (11) набуде такого вигляду:

$$m_2 = \frac{\mu_{11} + \mu_{22}}{\mu_{11} - \mu_{22}} = \frac{K + 1}{K - 1} \tag{13}$$

Таким чином, з використанням анізотропного метамагнітного матеріалу з від'ємним значенням коефіцієнта магнітної проникності  $\mu_{22}$  в другому кристалографічному напрямку веде до аномального зростання значення коефіцієнта перетворення  $m$  АММК.

На рисунку 3, а представлено аналіз залежностей  $m = F(K)$ , який показує, що у інтервалі  $0 < K < 1$  його величина характеризується від'ємним значенням, а в інтервалі  $1 < K < \infty$  – додатнім (рис. 3, б).

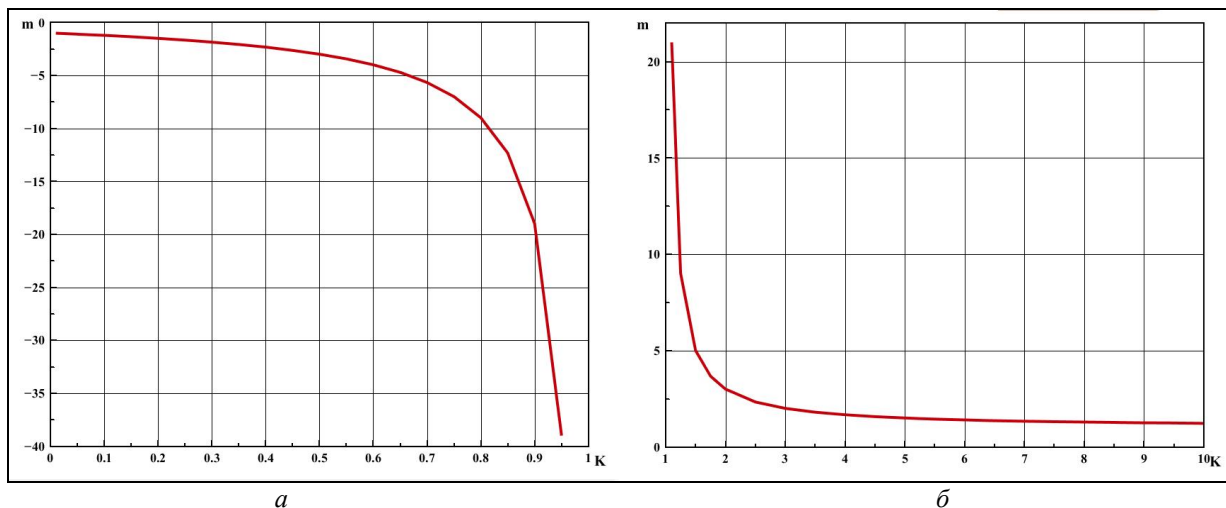


Рис. 3. Залежність коефіцієнта перетворення  $m$  АММК від величини анізотропії метамагнітного матеріалу при  $\alpha = 45^\circ$

- а) залежність коефіцієнта перетворення  $m$  АММК від величини анізотропії при  $0 < K < 1$  та куті  $\alpha = 45^\circ$ ;
- б) залежність коефіцієнта перетворення  $m$  АММК від величини анізотропії при  $1 < K < \infty$  та куті  $\alpha = 45^\circ$ .

Від’ємне значення магнітної проникності метаматеріалів пояснюється антипаралельним розташуванням векторів фазової  $\vec{V}_\phi$  та групової  $\vec{V}_B$  швидкостей магнітного поля  $\vec{E}$  [8, 9, 29].

У разі АММК значення коефіцієнта  $K$  анізотропного метамагнітного матеріалу визначаються вибраними кристалографічними напрямками. У першому вибраному кристалографічному напрямку  $OX$  розташування векторів  $\vec{V}_\phi$  і  $\vec{V}_B$  взаємно паралельне (класичне), а в напрямку  $OY$  – вектора  $\vec{V}_\phi$  і  $\vec{V}_B$  орієнтуються антипаралельно (мета) (рис. 1).

Коефіцієнт концентрації АММК запишемо так:

$$l_2 = \frac{(K + 1)tg\alpha}{K - tg^2\alpha} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2. \quad (14)$$

Аналіз отриманих результатів досліджень показує, що у цьому випадку аномальне значення коефіцієнтів  $m$  обумовлене зміною характеру течії магнітного вихору. Магнітний вихор характеризуватиметься турбулентною течією і може бути представлений формулою  $rot \vec{H} = \pm\omega$ , де  $\omega$  – швидкість обертання вихору, а знаки «+» та «-» вказують на напрям його обертання – «+» – правостороннє ( $1 < K < \infty$ ), «-» – лівостороннє ( $0 < K < 1$ ). Такий турбулентний магнітний вихор у процесі свого обертання енергетично взаємодіє з зовнішнім середовищем [30–32]. Наведені вище результати виникають у випадку, коли коефіцієнти матеріалу пластини  $\mu_{11}$  та  $\mu_{22}$  різного знаку та при цьому для магнітного поля, що виникає в об’ємі пластини, виконується умова:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial y} \neq \left| \frac{\partial \vec{B}}{\partial x} \right|. \quad (15)$$

Оскільки вектори  $\vec{B}_x$  та  $\vec{B}_y$  розташовані під кутом  $\psi = 90^\circ$  перпендикулярно площині їх розміщення, то виникає сила  $\vec{F} = \vec{B}_x \vec{B}_y \sin \psi$ . Ця сила спрямовує енергію із об’єму пластини у зовнішнє середовище за лівостороннього обертання вихору або навпаки – за правостороннього.

Варто зауважити, що при додатному півперіоді напруженості магнітного поля синусоїдальної форми, що падає на верхню грань  $a \times c$ , енергія виходить у зовнішнє середовище через одну із бічних граней пластини. А при від’ємному півперіоді через протилежну грань  $a \times b$ .

За правостороннього обертання турбулентного вихору енергія зовнішнього середовища почергово поступає в об’єм пластини через її бічні грані  $a \times b$  залежно від додатного / від’ємного півперіода цього магнітного поля.

Застосування метамагнітних матеріалів веде до зменшення геометричних розмірів таких концентраторів.

**Порівняльні характеристики концентраторів.** Для створення ефективних АММК необхідна пластинка довжиною  $a$  висотою  $b$  та шириною  $c$  із анізотропного метамагнітного матеріалу. Проведений аналіз існуючої літератури показав, що на даний момент відсутні реальні анізотропні, як класичні, тим паче і метамагнітні матеріали, які можна використати для створення ефективних концентраторів [33–35].

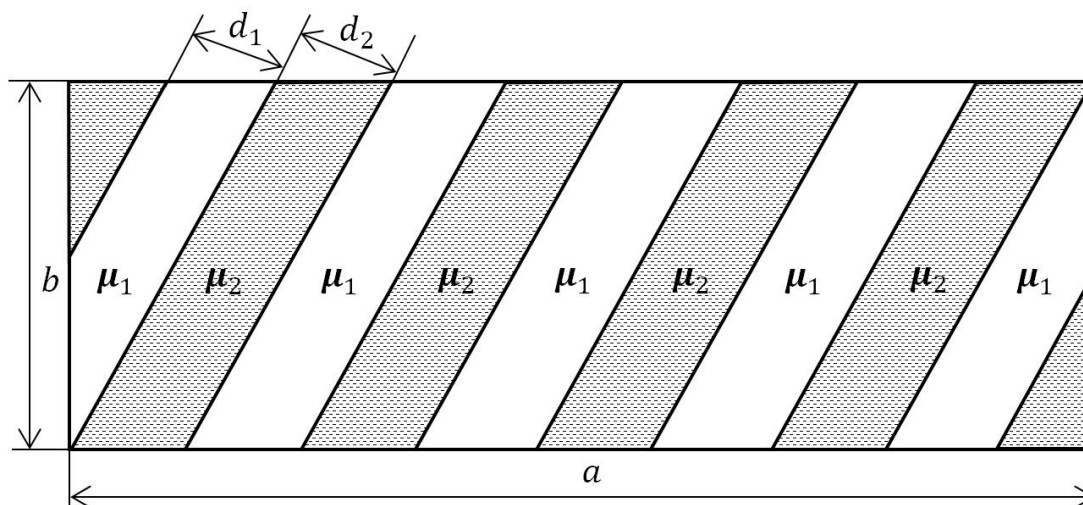


Рис. 5. Схематичне зображення пластини із штучного анізотропного метамагнітного матеріалу

Для створення штучного анізотропного метамагнітного матеріалу пропонується вже відомий алгоритм, як і для випадку класичних анізотропних магнітних матеріалів [36]. Різниця між ними полягатиме лише в тому, що поперемінні шари 1 та 2, товщинами  $d_1$  та  $d_2$  відповідно, будуть виконуватись із матеріалів, що характеризуватимуться як додатніми  $\mu_1$ , так і від'ємними  $\mu_2$  значеннями магнітної проникності (рис. 5).

У таблиці 1 наведено характеристики 2-х штучних класичних анізотропних магнітних матеріалів та 2-х штучних анізотропних метамагнітних матеріалів, шар 1 та 2 яких виконано із: алюмінію та нікелю; вісмуту та залізкокобальтового сплаву; міді та метаматеріалу 1; електротехнічної сталі та метаматеріалу 2.

Таблиця 1

Характеристики штучних класичних анізотропних магнітних та метамагнітних матеріалів

Вихідні магнітні матеріали	Штучні класичні анізотропні магнітні матеріали		Штучні анізотропні метамагнітні матеріали	
	Алюміній $\mu_1 = 1,256665 \times 10^{-6}$ Гн/м (Н/м)	Вісмут $\mu_1 = 1,25643 \times 10^{-6}$ Гн/м (Н/м)	Електротехнічна сталь $\mu_1 = 5,0 \times 10^{-3}$ Гн/м (Н/м)	Мідь $\mu_1 = 1,256629 \times 10^{-6}$ Гн/м (Н/м)
	Нікель $\mu_2 = 1,26 \times 10^{-4}$ Гн/м (Н/м)	Залізкокобальтовий сплав $\mu_2 = 2,3 \times 10^{-2}$ Гн/м (Н/м)	Метаматеріал 1 $\mu_2 = -9,0 \times 10^{-4}$ Гн/м (Н/м)	Метаматеріал 2 $\mu_2 = -5,0 \times 10^{-6}$ Гн/м (Н/м)
Коефіцієнт анізотропії штучного шарового матеріалу $k = \mu_{\parallel} / \mu_{\perp}$	$8,30491 \times 10^1$	$1,803822 \times 10^4$	-2,336387	-1,3484698
Коефіцієнт перетворення $m$	0,9762	0,9999	2,4966	6,7394
Коефіцієнт концентрації $l$ , (за $a / b = 20$ )	390,48	399,96	998,63	2695,75

Аналіз даних таблиці 1 свідчить про те, що магнітні концентратори [37] значно ефективніші у випадку застосування штучних анізотропних метамагнітних матеріалів, які характеризуються достатньо високими значеннями коефіцієнтів перетворення  $m$  та концентрації  $l$  порівняно з класичними.

Коефіцієнт перетворення, у випадку використання штучних класичних анізотропних магнітних матеріалів, коливається у межах  $0,95 \div 1,0$ . При застосуванні штучного анізотропного метамагнітного матеріалу як вихідні матеріалів мідь та метаматеріал із магнітною проникністю  $\mu_2 = -5,0 \times 10^{-6}$  (пластина з коефіцієнтом форми  $a / b = 20$ ) показник коефіцієнта перетворення  $m = 6,7394$ , а коефіцієнт концентрації  $l = 2695,75$ , що значно вище ніж у випадку використання штучних класичних анізотропних магнітних матеріалів.

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

За однакового значення кута  $\alpha$  та з коефіцієнтами форми  $a / b$  анізотропної пластини відношення коефіцієнтів концентрації  $l_1$  (класичний) та  $l_2$  (мета) показує, що у 2-му випадку коефіцієнт концентрації зростає у  $m^2$  разів.

#### Висновки:

1. Вперше запропоновано метод концентрації магнітного поля анізотропними метамагнітними середовищами;

2. Запропоновано конструкції концентраторів магнітного поля у вигляді прямокутних пластин на основі поперемінних шарів зі штучних анізотропних магнітних та метамагнітних матеріалів;

3. Показано, що параметри анізотропних метамагнітних концентраторів значно перевищують характеристики аналогічних класичних концентраторів;

4. Запропонований ефект концентрації магнітного поля за допомогою метамагнітних матеріалів є перспективним та значно розширює можливості електротехніки, радіотехніки, метрології, приладобудування та інші пов'язані з ним галузі.

## Список використаної літератури:

1. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. – М. : Физматлит, 2003. – 616 с.
2. Андреева Е.Г. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа / Е.Г. Андреева, А.А. Татевосян, И.А. Семина // Омский научный вестник. – 2010. – Вып. 1 (87). – С. 110–113.
3. Ashcheulov A. Effect of magnetic field concentration / A.Ashcheulov, M.Derevianchuk, D.Lavreniuk // Physics and Chemistry of Solid State. – 2022. – № 23 (1). – P. 72–76. DOI: 10.15330/pcss.23.1.72-76.
4. Fresnel A. La loi des modifications que la réflexion imprime à la lumière polarisée / A.Fresnel. – Mem. Acad. R. Sci. Inst. France. – 1832. – № 11. – P. 393–433.
5. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism / J.C. Maxwell // New York. – Dover. – 1954. – Vol. 1. – P. 306–307.
6. Rayleigh L. On the influence of obstacles arranged in rectangular order on the properties of a medium / L.Rayleigh // Philos. Mag. Ser. – 1892. – № 5 (34). – P. 481–502.
7. Born M. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation / M.Born, E.Wolf // Interference and Diffraction of Light, 6 ed. – Oxford : Pergamon Press, 1980.
8. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике / Л.И. Мандельштам. – М. : Наука, 1972. – 440 с.
9. Veselago V.G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  / V.G. Veselago // Sov. Phys. Usp. – 1968. – № 10. – P. 509–514. DOI: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.
10. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena / J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1999. – Vol. 47. – № 11. – P. 2075–2084.
11. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith et al. // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 84. – № 18. – P. 4184–4187.
12. Smith D.R. Experimental verification of a negative index of refraction / D.R. Smith, R.A. Shelby, S.Schultz // Science. – 2001. – Vol. 292. – P. 77–79.
13. Smith D.R. Design and measurement of anisotropic metamaterials that exhibit negative refraction / D.R. Smith, R.A. Shelby, S.Schultz // IEICE Trans. Electron. – 2004. – Vol. E87-C. – № 3. – P. 359–370.
14. Walser R.M. Электромагнитные Метаматериалы / Walser R.M. // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4467. – P. 1–15.
15. Lakhtakia A. Meet the metamaterials / A.Lakhtakia, T.G. Mackay // Opt. and Photonic News. – 2007. – Vol. 18. – № 1. – P. 32–39.
16. Zouhdi S. Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials / S.Zouhdi, A.Sihvola, M.Arsalane. – Springer, 2003.
17. Tretyakov S. Analytical Modeling in Applied Electromagnetics / S.Tretyakov. – Artech House, 2003.
18. Eleftheriades G.V. Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications / G.V. Eleftheriades, K.G. Balmain // Wiley-IEEE Press, 2005.
19. Caloz C. Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications / C.Caloz, T.Itoh. – Wiley-IEEE Press, 2006.
20. Engheta N. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations / N.Engheta, R.W. Ziolkowski. – Wiley-IEEE Press, 2006.
21. Sir J.B. Pendry. Fundamentals and Applications of Negative Refraction in Metamaterials / Sir J.B. Pendry. – Princeton University Press, 2007.
22. Marques R. Metamaterials with Negative Parameters / R.Marques, F.Martin, M.Sorolla. – Wiley, 2007.
23. Ramakrishna S.A. Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials / S.A. Ramakrishna, T.M. Grzegorzczuk. – SPIE and CRC Press, 2009.
24. Munk B.A. Metamaterials: Critique and Alternatives / B.A. Munk. – Wiley, 2009.
25. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Дж.Най. – М. : Мир, 1967. – 286 с.
26. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications / J.Fraden. – New York : Springer, 2015. – 758 p.
27. Анизотропные термоэлементы / С.Л. Королюк, И.М. Пилат, А.Г. Самойлович и др. // Физика и техника полупроводников. – 1973. – Т. 7 (4). – С. 725–734.
28. Искусственно-анизотропные термоэлементы и их предельные возможности / В.П. Бабин, Т.С. Гудкин, З.М. Дашевский и др. // Физика и техника полупроводников. – 1974. – № 4. – С. 742–753.
29. Вольнян О.Д. Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов / О.Д. Вольнян, А.И. Кузьмичёв ; под ред. Г.М. Зверева. – К. : Аверс, 2012. – 360 с.
30. Козлов В.В. Общая теория вихрей / В.В. Козлов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Институт компьютерных исследований, 2013. – 319 с.
31. Энергия и физический вакуум / А.Н. Власов и др. – Волгоград : Станица-2, 2004. – 192 с.
32. Davidson L. An Introduction to Turbulence Models. Department of Thermo and Fluid Dynamics Chalmers University of Technology Göteborg / L.Davidson. – Sweden, 2003.
33. Прохоров А.М. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров, ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич и др. – М. : Сов. Энциклопедия, 1984. – 944 с.
34. Jiles D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials / D.Jiles. – New York : CRC Press, 1998. – 354 p.
35. Cullity B.D. Introduction to Magnetic Materials / B.D. Cullity, C.D. Graham. – 2-nd ed. – Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2008. – 568 p.
36. Анизотропний магнітний матеріал : Патент України № 149946 / А.А. Ацеулов, М.Я. Дерев'янчук, Д.О. Лавренюк, І.С. Романюк. – 2021.

37. Ащеулов А.А. Концентратор магнитного поля : Патент України № 141900 / А.А. Ащеулов, Д.О. Лавренюк, О.С. Веренко. – 2020.

#### References:

1. Tamm, I.E. (2003), *Osnovy teorii elektrichestva*, Fizmatlit, M., 616 p.
2. Andreeva, E.G., Tatevosyan, A.A. and Semina, I.A. (2010), «Issledovanie osesimmetrichnoi modeli magnitnoi sistemy otkrytogo tipa», *Omskii nauchnyi vestnik*, Issue 1 (87), pp. 110–113.
3. Ashcheulov, A., Derevianchuk, M. and Lavreniuk, D. (2022), «Effect of magnetic field concentration», *Physics and Chemistry of Solid State*, No. 23 (1), pp. 72–76, doi: 10.15330/pcss.23.1.72-76.
4. Fresnel, A. (1832), «La loi des modifications que la réflexion imprime à la lumière polarisée», *Mem. Acad. R. Sci. Inst. France*, No. 11, pp. 393–433.
5. Maxwell, J.C. (1954), «A Treatise on Electricity and Magnetism», *New York*, Dover, Vol. 1, pp. 306–307.
6. Rayleigh, L. (1892), «On the influence of obstacles arranged in rectangular order on the properties of a medium», *Philos. Mag. Ser.*, No. 5 (34), pp. 481–502.
7. Born, M. and Wolf, E. (1980), «Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation», *Interference and Diffraction of Light*, 6 ed., Pergamon Press, Oxford.
8. Mandel'shtam, L.I. (1972), *Leksii po optike, teorii otositel'nosti i kvantovoi mekhanike*, Nauka, M., 440 p.
9. Veselago, V.G. (1968), «The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ », *Sov. Phys. Usp.*, No. 10, pp. 509–514, doi: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.
10. Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J. (1999), «Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena», *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, Vol. 47. No. 11, pp. 2075–2084.
11. Smith, D.R. et al. (2000), «Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity», *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 84, No. 18, pp. 4184–4187.
12. Smith, D.R., Shelby, R.A. and Schultz, S. (2001), «Experimental verification of a negative index of refraction», *Science*, Vol. 292, pp. 77–79.
13. Smith, D.R., Shelby, R.A. and Schultz, S. (2004), «Design and measurement of anisotropic metamaterials that exhibit negative refraction», *IEICE Trans. Electron*, Vol. E87-C, No. 3, pp. 359–370.
14. Walser, R.M. (2000), «Elektromagnitnye Metamaterialy», *Proc. SPIE*, Vol. 4467, pp. 1–15.
15. Lakhtakia, A. and Mackay T.G. (2007), «Meet the metamaterials», *Opt. and Photonic News*, Vol. 18, No. 1, pp. 32–39.
16. Zouhdi, S., Sihvola, A., Arsalane, M. (2003), *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials*, Springer.
17. Tretyakov, S. (2003), *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics*, Artech House.
18. Eleftheriades, G.V. and Balmain, K.G. (2005), «Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications», *Wiley-IEEE Press*.
19. Caloz, C. and Itoh, T. (2006), «Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications», *Wiley-IEEE Press*.
20. Engheta, N. and Ziolkowski, R.W. (2006), «Metamaterials: Physics and Engineering Explorations», *Wiley-IEEE Press*.
21. Pendry, J.B. (2007), «Fundamentals and Applications of Negative Refraction in Metamaterials», *Princeton University Press*.
22. Marques, R., Martin, F. and Sorolla, M. (2007), «Metamaterials with Negative Parameters», *Wiley*.
23. Ramakrishna, S.A. and Grzegorzczak, T.M. (2009), «Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials», *SPIE and CRC Press*.
24. Munk, B.A. (2009), *Metamaterials: Critique and Alternatives*, Wiley.
25. Nai, Dzh. (1967), *Fizicheskie svoystva kristallov i ikh opisanie pri pomoshchi tenzorov i matrits*, Mir, M., 286 p.
26. Fraden, J. (2015), *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, Springer, New York, 758 p.
27. Korolyuk, S.L. Pilat, I.M. Samoilovich, A.G. et al. (1973), «Anizotropnye termoelementy», *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, Vol. 7 (4), pp. 725–734.
28. Babin, V.P., Gudkin, T.S., Dashevskii, Z.M. et al. (1974), «Iskusstvenno-anizotropnye termoelementy i ikh predel'nye vozmozhnosti», *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, No. 4, pp. 742–753.
29. Vol'p'yan, O.D. and Kuz'michev, A.I. (2012), *Otritsatel'noe prelomlenie voln. Vvedenie v fiziku i tekhnologiyu elektromagnitnykh metamaterialov*, by Zvereva, G.M. (ed.), Avers, K., 360 p.
30. Kozlov, V.V. (2013), *Obshchaya teoriya vikhrei*, 2 ed., Institut komp'yuternykh issledovaniy, M., 319 p.
31. Vlasov, A.N. et al. (2004), *Energiya i fizicheskii vakuum*, Stanitsa-2, Volgograd, 192 p.
32. Davidson, L. (2003), *An Introduction to Turbulence Models. Department of Thermo and Fluid Dynamics Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden*.
33. Prokhorov, A.M., Alekseev, D.M., Bonch-Bruevich, A.M. et al. (ed.) (1984), *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'*, Sov. Entsiklopediya, M., 944 p.
34. Jiles, D. (1998), *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, CRC Press, New York, 354 p.
35. Cullity, B.D. and Graham, C.D. (2008), *Introduction to Magnetic Materials*, 2-nd ed., John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 568 p.
36. Ashcheulov, A.A., Derev'janchuk, M.Ja., Lavrenjuk, D.O. and Romanjuk, I.S. (2021), *Anizotropnyj magnitnyj material*, Patent Ukrainy No. 149946.
37. Ashcheulov, A.A., Lavrenjuk, D.O. and Verenko, O.S. (2020), *Koncentrator magnitnogo polja*, Patent Ukrainy No. 141900.



**Ащеулов** Анатолій Анатолійович – доктор технічних наук, професор Інституту термоелектрики НАН і МОН України.

<https://orcid.org/0000-0002-3195-6342>.

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- розробка та впровадження в промисловість пристроїв та приладів, що працюють на основі термоелектричних явищ в анізотропних середовищах;
- метаматеріали.

**Дерев'янчук** Микола Ярославович – аспірант, заступник директора Відокремленого структурного підрозділу «Фаховий коледж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича».

<https://orcid.org/0000-0001-7218-1451>.

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- дослідження нелінійних коливних систем;
- метаматеріали.

**Лавренюк** Дмитро Олександрович – інженер Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

<https://orcid.org/0000-0001-5859-4479>.

Наукові інтереси:

- термоелектричні явища в анізотропних середовищах та їх практичне застосування;
- мікропроцесорні системи керування технологічними об'єктами (процесами);
- метаматеріали.

**Ashcheulov A.A., Derevianchuk M.Ya., Lavreniuk D.O.**

#### **The effect of magnetic field concentration in anisotropic metamagnetic media**

The peculiarities of magnetic field propagation in a rectangular plate made of anisotropic material by the coefficient of magnetic permeability  $\hat{\mu}$  are considered. The dependences of the longitudinal and transverse components of the magnetic field on the geometric dimensions of the plate and the angle of inclination of the selected main crystallographic axes are established. For the first time, the possibility of concentrating the magnitude of the magnetic field strength  $\vec{H}$  was shown and the corresponding optimization of its magnitude was performed. Models of anisotropic magnetic concentrator are presented, and also the method of its creation on the basis of artificial anisotropic, both classical, and metamagnetic materials is offered. The application of the proposed method leads to the emergence of new energy converters of autonomous clean energy that does not require conventional energy sources.

The method of magnetic field concentration using artificial anisotropic classical materials improves the performance of electromagnetic and magnetoelectric measuring systems, but does not fully meet the requirements of the latest technological devices.

Further increase of the magnetic field concentration coefficient is achieved by using artificial anisotropic metamagnetic materials, which are characterized by a negative value of magnetic permeability in one of the selected main crystallographic directions.

The proposed methods of magnetic field concentration will be used in electrical engineering, radio engineering, metrology and other related fields.

**Keywords:** tensor; magnetic permeability; anisotropy; concentration; magnetic field; metamaterial.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2022.