

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ<sup>1</sup>, Н. Я. ДЕРЕВЯНЧУК<sup>2</sup>, Д. А. ЛАВРЕНЮК<sup>2</sup>, к. т. н. И. С. РОМАНЮК<sup>3</sup>

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества<sup>1</sup>, ЧНУ им. Ю. Федыковича<sup>2</sup>, Завод «Кварц»<sup>3</sup>

E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru, m.derevianchuk@ukr.net

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СРЕДОЙ

*Рассмотрены особенности распределения электрического тока в анизотропных электропроводных средах и установлены зависимости его продольной и поперечной составляющих от геометрических факторов. Показана возможность трансформации величины электрического тока и проанализированы основные методы ее оптимизации. Предложено два варианта конструкции анизотропных трансформаторов и проведена соответствующая оптимизация их коэффициента трансформации.*

*Ключевые слова:* электропроводность, электрический ток, анизотропия, трансформатор, коэффициент трансформации.

В настоящее время согласование источников и потребителей электрической энергии переменного тока осуществляется с помощью трансформаторов. Работа этих устройств основана на явлениях электромагнитной индукции и трансформации [1]. Наряду с этим также известен и эффект электроомической трансформации, основанный на использовании особенностей поперечных эффектов анизотропных электропроводных сред [2]. Их применение позволило предложить новое поколение высокоточковых термоэлектрических преобразователей тепловой энергии, характеризующихся повышенными значениями коэффициента полезного действия.

В [3] представлена оригинальная конструкция трансформатора для внешнего источника постоянного электрического тока на основе прямоугольной пластины из анизотропного электропроводного материала, на определенных гранях которой выполнены соответствующим образом расположенные и электрически подключенные *p-n*-переходы. Экспериментальные исследования этого устройства показали, что его коэффициент трансформации может принимать значения как больше, так и меньше единицы, однако при этом наблюдается нелинейная зависимость между входными и выходными характеристиками, обусловленная влиянием *p-n*-переходов. Трансформация переменного электрического тока в этом случае невозможна.

В настоящей работе представлена физическая модель оригинального принципа трансформации переменного электрического тока с линейной зависимостью входных и выходных характеристик, позволяющая значительно расширить практические возможности в современной электроэнергетике, электронике, приборостроении, а также в других областях науки и техники.

### Уравнение трансформации электрического тока в анизотропных электропроводных средах

В общем случае тензор электропроводности  $\hat{\sigma}$  анизотропной электропроводной среды в условиях, когда его главные кристаллографические оси  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  совпадают, соответственно, с осями  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  выбранной лабораторной системы координат  $OXYZ$ , имеет следующий вид [4]:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Если вектор внешнего электрического поля  $\vec{E}$ , накладываемый на среду, ориентирован вдоль какой-либо ее главной кристаллографической оси, например  $\sigma_{22}$ , которая совпадает с осью  $OY$ , то в объеме среды электрический ток возникает только в этом направлении:

$$\vec{J}_{yy} = \vec{E}_y \sigma_{22}, \quad (2)$$

в других кристаллографических направлениях среды ток не наблюдается.

Иная ситуация складывается в случае, когда вектор электрического поля располагается в плоскости, образованной кристаллографическими осями  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$ , одна из которых, например  $\sigma_{11}$ , ориентирована под углом  $\alpha$  к оси  $OX$  лабораторной системы координат (рис. 1, а). Такое размещение осей позволяет представить тензор  $\hat{\sigma}$  в следующем виде:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11}\cos^2\alpha + \sigma_{22}\sin^2\alpha & (\sigma_{11} - \sigma_{22})\sin\alpha\cos\alpha & 0 \\ (\sigma_{11} - \sigma_{22})\sin\alpha\cos\alpha & \sigma_{11}\sin^2\alpha + \sigma_{22}\cos^2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

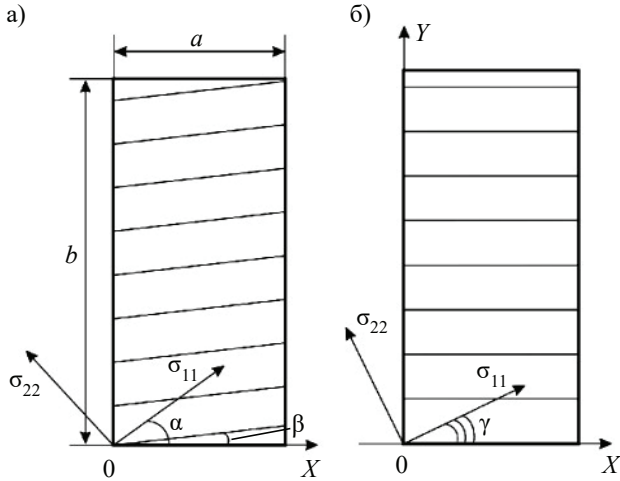


Рис. 1. Распределение линий плотности трансформированного электрического тока в объеме пластины при различной ориентации кристаллографических осей:  
а)  $\alpha = \alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ ; б)  $\gamma = 45^\circ - \beta$

В этом случае тензор электропроводности  $\hat{\sigma}$  характеризуется наличием как продольной ( $\sigma_{\parallel}$ ), так и поперечной ( $\sigma_{\perp}$ ) составляющих.

Приложение с помощью внешних электродов электрического поля с напряженностью, направленной вдоль оси OY, приводит к появлению как продольной ( $\vec{j}_{yy}$ ), так и поперечной ( $\vec{j}_{xx}$ ) составляющих плотности векторов электрического тока:

$$\vec{j}_{yy} = \vec{E}_y (\sigma_{11} \cos^2 \alpha + \sigma_{22} \sin^2 \alpha); \quad (4)$$

$$\vec{j}_{xx} = \vec{E}_y (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

Оптимизация величин (4) и (5) по углу  $\alpha$  —  $\left(\frac{\partial j}{\partial \alpha} = 0; \frac{\partial^2 j}{\partial \alpha^2} < 0\right)$  — показывает, что их максимальные значения наблюдаются при  $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ , и в этом случае

$$\vec{j}_{yy} = 0,5 \cdot \vec{E}_y (\sigma_{11} + \sigma_{22}); \quad (6)$$

$$\vec{j}_{xx} = 0,5 \cdot \vec{E}_y (\sigma_{11} - \sigma_{22}). \quad (7)$$

Перейдем к рассмотрению прямоугольной пластины размерами  $a \times b \times c$ , выполненной из материала, который характеризуется анизотропией коэффициента электропроводности  $\hat{\sigma}$ , кристаллографические оси  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  которой размещены в плоскости ее боковой грани  $a \times b$  (рис. 1, а), при этом одна из этих осей, например  $\sigma_{11}$ , ориентирована под углом  $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$  к оси OX. Приложение к верхней и нижней граням ( $a \times c$ ) некоторой разности потенциалов  $U_y$  вызывает протекание продольного ( $I_y$ ) и поперечного ( $I_x$ ) электрического тока:

$$I_y = U_y \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{b}{ac}; \quad (8)$$

$$I_x = U_y \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{a}{bc}. \quad (9)$$

Коэффициент трансформации такого устройства равен

$$n = \frac{I_x}{I_y} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}} \cdot \frac{b^2}{a^2}. \quad (10)$$

Следует отметить, что в этом случае возможна трансформация как постоянного, так и переменного электрического тока.

При этом эквипотенциальные линии трансформированного тока  $I_x$  наложены под углом  $\beta$  (рис. 1, б), который определяется следующим образом:

$$\beta = \arctg \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}. \quad (11)$$

Коэффициентом преобразования материала анизотропной пластины является величина  $\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}$ , а коэффициентом ее формы —  $b/a$ .

### Конструктивные особенности анизотропных трансформаторов переменного электрического тока

В общем случае выбор конкретной конструкции трансформатора на основе анизотропного электропроводного материала определяется как особенностями физических явлений, происходящих в нем, так и условиями его эксплуатации [5]. Один из возможных вариантов конструкции этого устройства, предназначенного для трансформации переменного электрического тока, приведен на рис. 2.

Основой этого устройства является трансформирующий элемент в виде прямоугольной пластины  $l$  размерами  $a \times b \times c$  из анизотропного электропровод-

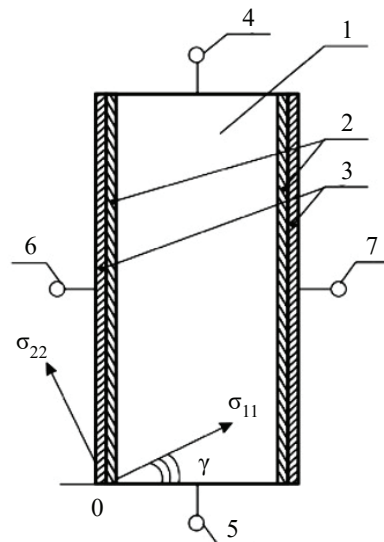


Рис. 2. Схематическая конструкция анизотропного трансформатора переменного электрического тока:

1 — анизотропная пластина; 2 — диэлектрический слой; 3 — электропроводящие слои; 4, 5 и 6, 7 — входные и выходные контакты соответственно

ного материала. Кристаллографические оси  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  расположены в плоскости ее грани  $a \times b$ , при этом ось  $\sigma_{11}$  располагается под углом  $\alpha_{\text{отт}} = 45^\circ$ . Левая и правая грани  $b \times c$  этой пластины содержат диэлектрические слои 2 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Наружные стороны этих слоев, в свою очередь, содержат электропроводящие слои 3, к которым прикреплены выходные электрические выводы 6, 7. Входные электрические выводы 4, 5 располагаются на верхней и нижней торцевых гранях пластины ( $a \times c$ ).

Такая конструкция трансформатора обеспечивает равномерное распределение трансформируемого электрического тока в объеме пластины 1 и предохраняет его от электрического шунтирования электропроводящими слоями 3.

Анализ распределения плотности трансформируемых токов в объеме пластины показал, что ориентация кристаллографической оси  $\sigma_{11}$  под углом  $\alpha_{\text{отт}} = 45^\circ$  ведет к некоторому искажению их эквипотенциальности, а следовательно, и к уменьшению коэффициента трансформации. Чтобы этого избежать, ось  $\sigma_{11}$  необходимо ориентировать под углом  $\gamma = \alpha_{\text{отт}} - \beta$  (рис. 1, б). В этом случае линии плотности трансформируемых токов искажаются, а величина коэффициента трансформации определяется следующим образом:

$$n_1 = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \gamma \cos \gamma}{\sigma_{11} \cos^2 \gamma + \sigma_{22} \sin^2 \gamma} \cdot \frac{a}{b}. \quad (12)$$

Такое конструктивное решение позволяет устранить искажения распределения электрических токов в объеме пластины.

Эквивалентная схема электрического размещения этого устройства относительно входных электрических выводов 4 и 5 представляет собой активное по характеру сопротивление, величина которого равна

$$r_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{b}{ac}. \quad (13)$$

Его выходное сопротивление относительно выводов 6, 7 носит активно-емкостный характер, величина которого определяется как

$$Z = \sqrt{r_2^2 + \frac{1}{\omega^2 c^2 L}}, \quad (14)$$

где

$$r_2 = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{a}{bc}; \quad (15)$$

$$c = \epsilon \epsilon_c \frac{bc}{2\Delta}; \quad (16)$$

$$\omega = 2\pi f;$$

$\Delta$  — толщина диэлектрического слоя;

$f$  — частота трансформируемого тока.

Таким образом, рассматриваемое устройство обладает активным входным и активно-емкостным по характеру сопротивлениями и может использоваться

для трансформации только переменных электрических токов.

Для увеличения коэффициента трансформации устройства необходимо увеличивать размеры анизотропной электропроводной пластины, являющейся его основой, что значительно ограничивает его практическое применение.

Указанное ограничение снимается в конструкции трансформатора, представленной на рис. 3. Такое устройство состоит из трансформирующего элемента 1 — свернутой в спираль пластины, выполненной из анизотропного электропроводного материала, размерами  $a \times b \times c$ , на одну из поверхностей которой ( $a \times b$ ) нанесен электроизолирующий слой 8 толщиной  $\Delta_3$ . Таким образом, трансформирующий элемент представляет собою диск высотой  $b$  внешним радиусом  $r_1$  и внутренним  $r_2$ . На верхнюю и нижнюю поверхности этого диска площадью  $S = \pi(r_1^2 - r_2^2)$  нанесены диэлектрические слои 2 толщиной  $\Delta_1$ , на которые, в свою очередь, нанесены электропроводящие слои 3 толщиной  $\Delta_2$ . Входные электроконтакты 4, 5 располагаются, соответственно, на внутренней ( $r_2$ ) и на внешней ( $r_1$ ) сторонах спирали, выходные 6, 7 — на электропроводящих слоях 3 поверхностей диска.

При данной конструкции коэффициент трансформации  $n_3$  устройства, длина пластины  $a$  и число витков  $N$  спирали связаны между собой следующими соотношениями:

$$a = \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{c + \Delta_3}; \quad (17)$$

$$N = \frac{\pi(r_1 - r_2)}{c + \Delta_3}; \quad (18)$$

$$n_2 = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}} \cdot \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{b(c + \Delta_3)}. \quad (19)$$

Сравним геометрические размеры устройств, выполненных из анизотропной слоистой композиции на основе серебра и хрома, конструкции которых при-

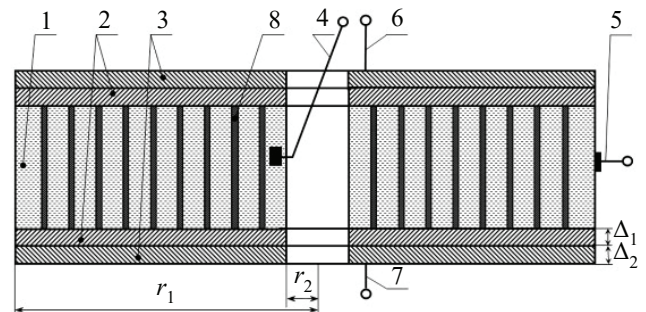


Рис. 3. Анизотропный электропроводный трансформатор: 1 — трансформирующая анизотропная электропроводная пластина, свернутая в спираль; 2 — диэлектрические слои; 3 — электропроводящие слои; 4, 5 и 6, 7 — входные и выходные контакты соответственно; 8 — межвитковый электроизолирующий слой толщиной  $\Delta_3$

ведены на рис. 2 и 3, при одинаковых значениях коэффициента трансформации  $n_1 = n_2 = 10^3$ .

Для конструкции, представленной на рис. 2, значение  $n_1 = 10^3$  обеспечивается при длине пластины  $a = 2100$  мм, высоте  $b = 2$  мм и ширине  $c = 2$  мм. В случае спирального трансформирующего элемента, представленного на рис. 3, величина  $n_2 = 10^3$  достигается при высоте диска  $b = 2$  мм и внешнем радиусе  $r_1 = 12,5$  мм (внутренний  $r_2 = 2$  мм, толщина межвиткового электроизолирующего слоя  $\Delta_3 = 10^{-2}$  мм).

Как видно, спиральная конструкция трансформатора позволяет значительно уменьшить его линейные размеры при сохранении величины коэффициента трансформации.

В качестве материалов для пластины можно использовать как анизотропные монокристаллы на основе соединений  $A_2B_5$  соответствующих эвтектических сплавов с  $k = \sigma_{11}/\sigma_{22} = 1,8\text{—}5$  [6], так и искусственно-анизотропные материалы с  $k = 10\text{—}100$ , методика расчета которых приведена в [7]. Перспективны также высокотемпературные сверхпроводящие материалы, характеризующиеся высоким значением анизотропии остаточной электропроводности [8].

### Заключение

Устройства на основе рассмотренного выше принципа электроомической трансформации могут использоваться в качестве согласующих элементов различных систем с широкополосными характери-

стиками, а также узлов и блоков электроники, приборостроения, метрологии.

Вихревой характер электрических токов, протекающих в объеме анизотропных пластин, создает предпосылки для появления новых перспективных подходов к созданию измерительной техники, оригинальных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Приведенный принцип трансформации расширит возможности их использования в различных областях науки и техники.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тамм И. Е. *Основы теории электричества*. Москва, Ленинград, ОГИЗ, 1946, 660 с.
2. Анатычук Л. И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства*. Киев, Наукова думка, 1979, 767 с.
3. Ащеулов А. А. и др. Преобразователь величины постоянного тока. А.с. 1512457 СССР, 1989, Б.и. №12.
4. Най Дж. *Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц*. Москва, Мир 1967, 286 с.
5. Ащеулов А. А. та ін. *Процес трансформації електрики*. Пат. №151258 України, 2020, бюл. № 6.
6. Маренкин С. Ф., Трухан В. М. *Фосфириды, арсениды цинка и кадмия*. Минск, НАН Беларуси, 2010, 227 с.
7. Герашенко О. А., Иорданишвили Е. К., Губкин Т. С. и др. Датчики теплового потока на основе искусственно-анизотропных термоэлектрических материалов. *ИФЖ*, 1978, т. 35, № 2, с. 228–233.
8. Tsuei C. C., Kirtley J. R. Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 2000, vol. 72, iss. 4, pp. 969–1016. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.969>.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 18.08 2020 г.

УДК 537.29

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.28

А. А. АЩЕУЛОВ<sup>1</sup>, М. Я. ДЕРЕВ'ЯНЧУК<sup>2</sup>,  
Д. А. ЛАВРЕНЮК<sup>2</sup>, І. С. РОМАНЮК<sup>3</sup>

Україна, м. Чернівці, <sup>1</sup>Інститут термоелектрики,  
<sup>2</sup>ЧНУ імені Юрія Федьковича, <sup>3</sup>Завод «Кварц»

E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru, m.derevianchuk@ukr.net

## ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ Анізотропним електропровідним середовищем

*Розглянуто особливості розподілу електричного струму в анізотропному електропровідному середовищі і встановлено залежності його поздовжньої та поперечної складових від геометричних факторів.*

*У випадку пластини прямокутної форми розміром  $a \times b \times c$  кристалографічні осі розміщено в площині бічної грані  $a \times b$ , причому одну з цих осей орієнтовано під деяким кутом  $\alpha$  до ребра  $a$ . Прикладання до верхньої і нижньої торцевих граней пластини деякої різниці потенціалів приводить до появи поздовжньої та поперечної складових внутрішнього електричного струму. Показано можливість трансформації величини електричного струму, а також спосіб оптимізації його величини.*

*Коефіцієнт трансформації такого пристрою визначається величиною анізотропії електропровідності матеріалу пластини та коефіцієнтом її форми  $k = a/b$ . Розглянуто декілька варіантів конструкції анізотропного діелектричного трансформатора та запропоновано їхні еквівалентні електричні схеми заміщення. Також запропоновано трансформатор спіралеподібної конструкції, який характеризується високим значенням коефіцієнта трансформації  $n$  при його малих лінійних розмірах. Наприклад, при висоті  $b = 2$  мм та зовнішньому радіусі  $r_1 = 12,5$  мм він характеризується коефіцієнтом трансформації  $n = 10^3$ .*

*Наведено інформацію про існуючі монокристалічні та штучні анізотропні матеріали, які можуть застосовуватися для пропонованого пристрою. Перспективними тут вбачаються високотемпературні надпровідні матеріали, що характеризуються високим значенням анізотропії залишкового опору.*



Використання описаного ефекту трансформації дозволить значно розширити можливості практичного застосування розглянутого електроомічного явища, що призведе до появи нового покоління приладів та пристроїв для НВЧ-техніки, електроніки та електроенергетики.

Ключові слова: анізотропія, електропровідне середовище, електричний струм, трансформатор, коефіцієнт трансформації.

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.5-6.28  
UDC 537.29

A. A. ASHCHEULOV<sup>1</sup>, M. Ya. DEREVIANCHUK<sup>2</sup>,  
D. A. LAVRENIUK<sup>2</sup>, I. S. ROMANIUK<sup>3</sup>

Ukraine, Chernivtsi, <sup>1</sup>Institute of Thermoelectricity of NAS and MES of Ukraine,  
<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, <sup>3</sup>Plant "Quartz"  
E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru, m.derevianchuk@ukr.net

## ELECTRIC CURRENT TRANSFORMATION BY ANISOTROPIC ELECTRICALLY CONDUCTIVE MEDIUM

The authors consider the aspects of electric current distribution in electrically conductive anisotropic medium and establish how geometrical factors affect its longitudinal and transverse components.

In the case of an  $a \times b \times c$  rectangular plate, its selected crystallographic axes are located on the plane of the side face  $a \times b$ , whereas one of these axes is oriented at an angle  $\alpha$  to the edge  $a$ . Applying a certain potential difference to the upper and lower end faces of the plate causes the appearance of longitudinal and transverse components of the internal electric current. The paper demonstrates the possibility of transforming the magnitude of the electric current and a way to optimize this magnitude.

The transformation coefficient of such a device is determined by the anisotropy of the electrical conductivity of the plate and the coefficient of its shape  $k = a/b$ . The authors consider a few versions of anisotropic dielectric transformer design and offer their equivalent electric circuits. Another suggested transformer design is spiral in shape, compact and is characterized by high transformation coefficient value  $n$ . For example, at external radius  $r_1 = 12,5$  mm, internal radius  $r_2 = 2$  mm, height  $b = 2$  mm and plate thickness  $c = 2,0$  mm, its transformation coefficient  $n = 10^3$ .

The information is given on existing monocrystalline and artificial anisotropic materials that can be used for the proposed device. High-temperature superconducting materials characterized by a high value of residual resistance anisotropy hold special promise in this case.

Using the described transformation effect will significantly expand the possibilities of practical application of the considered electroohmic phenomenon. This will lead to the emergence of a new generation of devices for microwave technology, electronics and power engineering.

Keywords: anisotropy, electrically conductive medium, electric current, transformer, transformation coefficient.

### REFERENCES

1. Tamm I. Ye. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow, Leningrad, OGIz, 1946, 660 p. (Rus)
2. Anatychuk L. I. *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva* [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kiyev, Naukova dumka, 1979, 767 p. (Rus)
3. Ashcheulov A. A. et al. *Preobrazovatel' velichiny postoyannogo toka* [DC value converter]. A.s. 1512457 USSR, 1989. (Rus)
4. Nye J. F. *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. Clarendon Press, 1957, 322 p.

5. Ashcheulov A. A. et al. *Electricity transformation process*. Pat. 151258 UA, 2020. (Ukr)
6. Marenkin S. F., Trukhan V. M. *Fosiridy, arsenidy tsinka i kadmiya* [Fosirides, arsenides of zinc and cadmium]. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, 2010, 227 p. (Rus)
7. Gerashchenko O. A., Iordanishvili Ye. K., Gubkin T. S. et al. Heat flow sensors based on artificially anisotropic thermoelectric materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1978, vol. 35, no. 2, pp. 228–233. (Rus)
8. Tsuei C. C., Kirtley J. R. Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 2000, vol. 72, iss. 4, pp. 969–1016. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.969>

### Описание статьи для цитирования:

Ащеулов А. А., Деревянчук Н. Я., Лавренюк Д. А., Романюк И. С. Трансформация электрического тока анизотропной электропроводной средой. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 5–6, с. 28–32. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.5-6.28>

### Cite the article as:

Ashcheulov A. A., Derevianchuk M. Ya., Lavreniuk D. A., Romaniuk I. S. Electric current transformation by anisotropic electrically conductive medium. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 5–6, pp. 28–32. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2020.5-6.28>