

Ю.В. БАТЫГИН, С.А. ШИНДЕРУК, Е.А. ЧАПЛЫГИН, А.А. КОРЯК, А.В. ДОВГИЙ  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

## ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ВНЕШНИМ БИФИЛЯРНЫМ СОЛЕНОИДОМ. РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

*Рассмотрена идея исполнения индукторной системы с индуктором, размещённым внутри коаксиального соленоида, обмотка которого выполнена в виде бифиляра с противоположно направленными токами. Получены расчётные соотношения для теоретического анализа и численных оценок характеристик электромагнитных процессов в такой системе. Результаты исследований могут быть использованы при выборе конструктивных решений новых схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов.*

*Ключевые слова: индукторная система, бифилярная катушка, соленоид, магнитно-импульсная обработка, электромагнитные процессы.*

YU.V. BATYGIN, S.A. SHINDERUK, E.A. CHAPLYGIN, A.A. KORYAK, A.V. DOVGY  
Kharkiv National Automobile and Highway University

### CYLINDRICAL INDUCTOR SYSTEM WITH EXTERNAL BIFILAR SOLENOID. CALCULATED RATIOS

*The aim of the research is to obtain the calculated dependencies for the numerical characteristics of the inductor system, the solenoid winding of which is made in the form of a bifilar with oppositely directed currents. Information on the practical application and calculations of bifilar designs in modern electrical devices for various purposes was analysed. The expediency of using inductor systems with external bifilar coils in the circuit elements of modern metal processing equipment is substantiated. Of particular practical interest is the bifilar as an element of equipment for magnetic pulse metal processing. Calculated ratios are obtained for theoretical analysis and numerical estimates of the characteristics of electromagnetic processes in a cylindrical inductor system, where the inductor is located inside a coaxial solenoid, the winding of which is made in the form of a bifilar with oppositely directed currents. In this case, the excited magnetic fluxes are subtracted outside the windings, which ultimately leads to a decrease in the resulting field, which will be less than the magnetic field of each of the currents separately, which ultimately means a decrease in the coil inductance as an element of the electrical circuit. It is shown that the obtained formulas for fields and currents when changing the sign of the corresponding algebraic term remain valid for the case of unidirectional currents. The found dependences for the voltages and current induced in the bifilar winding are represented by expressions in  $L$  – space that can be converted to explicit time dependences by numerical or analytical methods depending on the calculation conditions for a particular design of the inductor system. The novelty of the present work consists in proposing the idea of constructive execution of the inductor system itself, its physical and mathematical model and obtaining design relationships for the analysis of ongoing electromagnetic processes with numerical estimates of the characteristics of the excited fields. Thus, the proposed design of the inductor system and the resulting calculated dependencies can be used in the design of new equipment for magnetic-pulse metal processing.*

*Keywords: inductor system, bifilar coil, solenoid, magnetic-pulsed forming, electromagnetic processes.*

### Введение

Бифилярной является катушка, намотанная двумя параллельными проводниками, расположенными рядом друг с другом на одном общем каркасе, и изолированными друг от друга на всем протяжении намотки. И как бы ни была намотана бифилярная катушка, при включении в электрическую цепь будет реализован один из двух вариантов взаимодействия токов в двух её проводниках. Первый вариант, когда протекающие токи – однонаправлены. В этом случае вне намоток возбуждаемые магнитные потоки складываются, что приводит к увеличению результирующего поля, которое будет больше магнитного поля каждого из токов бифиляра в отдельности. Второй вариант, когда протекающие токи – разнонаправлены. В этом случае вне намоток возбуждаемые магнитные потоки вычитаются, что в итоге ведёт к уменьшению результирующего поля, которое будет меньше магнитного поля каждого из токов в отдельности, что в конечном итоге означает снижение величины индуктивности катушки, как элемента электрического контура [1].

### Анализ публикаций и постановка задачи

Впервые термин «бифилярная катушка» упоминается Николой Тесла в патенте США [2], где данная конструкция намотки была предложена для придания цепям большей собственной емкости и позволяла отказаться от применения дорогостоящих конденсаторов. В своих лекциях ученый упоминал бифилярные катушки именно как инструмент повышения собственной емкости зарядных и рабочих цепей различного высокочастотного оборудования, которое он разрабатывал как для питания эффективных источников света, так и для передачи энергии на расстояние без проводов [3].

В современной электронной технике такие приспособления часто используют как один из способов создания проволочных резисторов с достаточно малой индуктивностью [4]. Бифилярные катушки могут использоваться, например, для генерации магнитных импульсов любой формы и длительности, увеличения широкополосности и устранения нежелательных резонансов в радиотехнических устройствах и др. [5]. Бифилярная неиндуктивная катушка является существенным элементом резистивного сверхпроводящего ограничителя тока, включая токи короткого замыкания (FCL, SFCL) [6, 7]. Так называемые «открытые бифилярные соленоиды» (Open Bifilar Coils) применяются в промежуточных схемах систем беспроводной передачи энергии [8]. Разработкам физико-математических моделей электромагнитных процессов в соленоидах разной геометрии, рассматриваемых в качестве источников сильных полей для технологических

целей и полей излучения в передающих устройствах, посвящены работы [9, 10].

Для схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов представляют практический интерес исследования систем, в которых бифилярные катушки размещаются либо внутри, либо поверх многovitковых цилиндрических индукторов [11, 12].

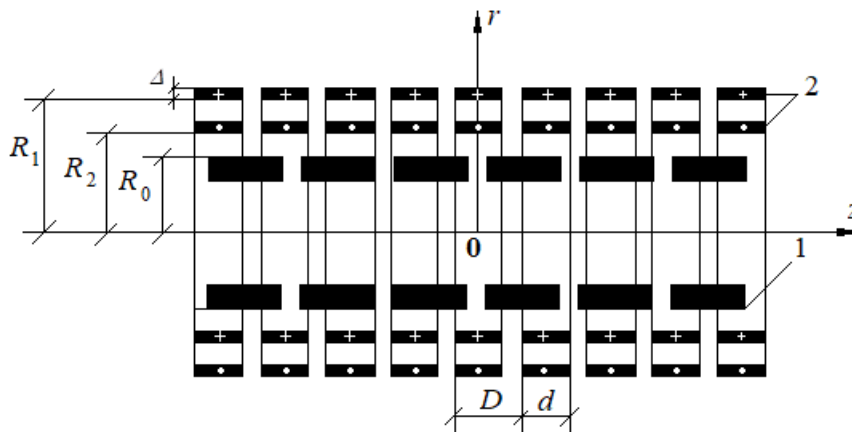
Цель настоящей работы – вывод расчётных соотношений для теоретического анализа и численных оценок характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической системе, где индуктор размещён внутри коаксиального соленоида, обмотка которого выполнена в виде бифиляра с противоположно направленными токами.

Научная новизна состоит в предложении идеи конструктивного исполнения собственно индукторной системы, её физико-математической модели и получении расчётных соотношений для анализа протекающих электромагнитных процессов с численными оценками характеристик возбуждаемых полей, что позволит обосновать практическую дееспособность предложенной индукторной системы.

**Расчётные соотношения**

При решении поставленной задачи примем следующие допущения.

- Расчётная модель исследуемой системы представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Расчётная модель индукторной системы с внешней бифилярной обмоткой**

- В принимаемой цилиндрической системе координат индукторная система является достаточно протяжённой (краевыми эффектами пренебрегаем) и аксиально-симметричной, так что  $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ ,

$\varphi$  – азимутальный угол.

- Внутренний индуктор отключён, его витки выполнены из металла с высокой электропроводностью, достаточно плотно прилегают друг к другу, так что их внешнюю поверхность ( $R_0$  – радиус) можно считать сплошной поверхностью из идеального проводника.

- В продольном направлении бифилярная обмотка представляет собой периодическую структуру, где  $D$  – шаг намотки,  $d$  – ширина витков.

- Витки бифилярной обмотки из металлической ленты ( $R_1, R_2$  – радиусы внутренней и внешней её частей) не влияют на протекающие электромагнитные процессы, так как они «прозрачны» для возбуждаемых полей, их радиальная толщина  $\Delta \rightarrow 0$ , что позволяет представить поперечную структуру обмотки дельта-функциями Дирака  $-\delta(r - R_{1,2})$  [13].

- Бифиляр возбуждается гармоническим током с плотностью  $j_\varphi(t, r, z) = j_m \cdot \sin(\omega t) \cdot f(r) \cdot g(z)$ , где  $j_m$  – амплитуда линейной плотности возбуждающего тока,  $\omega$  – циклическая частота,  $t$  – время,  $f(r), g(z)$  – функции радиального и продольного распределений.

- Временные параметры возбуждающего тока удовлетворяют квазистационарному приближению по Ландау  $-\frac{\omega}{c} \cdot \ell \ll 1$  [14], где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\ell$  – максимальный размер в системе.

Уравнения Максвелла ( $E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ) для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [11,12,14]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z) + p\varepsilon_0 E_\varphi(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;

$$E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}; \quad H_{r, z}(p, r, z) = L\{H_{r, z}(t, r, z)\};$$

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\}; \quad j_\varphi(p, r, z) – \text{плотность тока в бифиляре.}$$

Согласно принятым допущениям плотность тока в бифиляре и его  $L$ -образ в правой части уравнения (1) можно представить косинус разложением Фурье по продольной координате –  $z$  [13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} g(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cdot \cos(\Omega_n \cdot z), \\ j_\varphi(p, r, z) = j_m \cdot \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \cdot f(r) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cdot \cos(\Omega_n \cdot z), \\ f(r) = [\delta(r - R_1) - \delta(r - R_2)], \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $\Omega_n = \frac{2\pi}{D} \cdot n$ ;

$$a_n^* = \begin{cases} \frac{d}{D}, & n = 0, \\ \frac{2}{\pi n} \cdot \sin\left(\pi n \cdot \frac{d}{D}\right), & n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

В случае однонаправленных токов в обмотках бифиляра функция радиального распределения записывается в виде  $f(r) = [\delta(r - R_1) + \delta(r - R_2)]$ .

Из дифференциальных уравнений (1)–(3) с учётом выражения (4) в рамках принятых допущений получим уравнения для азимутальной компоненты напряжённости электрического поля  $E_\varphi(p, r, z)$  [13].

$$\frac{\partial^2 E_\varphi(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r, z)) \right) - k^2(p) E_\varphi(p, r, z) = \mu_0 p \cdot j_\varphi(p, r, z), \quad (5)$$

где  $k(p) = \frac{p}{c}$  – волновое число,  $c$  – скорость света в вакууме.

Согласно продольной зависимости возбуждающего тока в виде косинус-разложения Фурье (4),  $E_\varphi(p, r, z)$  в уравнении (5) можно представить аналогичным разложением [13, 14].

$$E_\varphi(p, r, z) = \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} E_n(r) \cdot \cos(\Omega_n \cdot z), \quad (6)$$

где  $E_n(r)$  – функция радиального распределения азимутальной компоненты напряжённости электрического поля  $E_\varphi(p, r, z)$  в соответствующем представлении рядом Фурье.

Подставляя (6) в (5), получаем неоднородное уравнение Бесселя [13]:

$$\frac{d^2 E_n(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dE_n(r)}{dr} - \left( \frac{1}{r^2} + k_n^2(p) \right) \cdot E_n(r) = K_n \cdot f(r), \quad (7)$$

где  $K_n = \mu_0 p \cdot j_m \cdot a_n^*$ ,  $k_n(p) = \sqrt{\Omega_n^2 + k^2(p)}$  – радиальное волновое число.

Уравнение (7) – линейное неоднородное уравнение второго порядка можно проинтегрировать с помощью метода вариации произвольных постоянных. Согласно алгоритму метода общий интеграл уравнения (7) следует искать в виде линейной комбинации фундаментальных решений с коэффициентами – функциями радиальной переменной [13].

$$E_n(r) = A_n(r) \cdot I_1(k_n(p) \cdot r) + B_n(r) \cdot K_1(k_n(p) \cdot r), \tag{8}$$

где  $A_n(r), B_n(r)$  – коэффициенты разложения,

$I_1(k_n(p) \cdot r), K_1(k_n(p) \cdot r)$  – модифицированные функции Бесселя первого порядка.

Опуская известные математические преобразования, запишем систему дифференциальных уравнений для определения неизвестных  $A_n(r), B_n(r)$  в выражении (8) [13].

$$\begin{cases} \frac{dA_n(r)}{dr} \cdot I_1(k_n(p) \cdot r) + \frac{dB_n(r)}{dr} \cdot K_1(k_n(p) \cdot r) = 0, \\ \frac{dA_n(r)}{dr} \cdot \frac{dI_1(k_n(p) \cdot r)}{dr} + \frac{dB_n(r)}{dr} \cdot \frac{dK_1(k_n(p) \cdot r)}{dr} = K_n \cdot f(r). \end{cases} \tag{9}$$

Из системы (9) находим, что

$$A_n(r) = A_n + K_n \cdot \int_{R_0}^r r \cdot f(r) \cdot K_1(k_n(p) \cdot r) dr = A_n + K_n \cdot F_n(r, R_{1,2}), \tag{10}$$

где  $A_n$  – произвольная постоянная интегрирования,

$$F_n(r, R_{1,2}) = \eta(r - R_1) R_1 \cdot K_1(k_n(p) \cdot R_1) - \eta(r - R_2) R_2 \cdot K_1(k_n(p) \cdot R_2),$$

$\eta(r - R_{1,2})$  – ступенчатые функции Хэвисайда.

$$B_n(r) = B_n - K_n \cdot \int_{R_0}^r r \cdot f(r) \cdot I_1(k_n(p) \cdot r) dr = B_n - K_n \cdot G_n(r, R_{1,2}), \tag{11}$$

где  $B_n$  – произвольная постоянная интегрирования,

$$G_n(r, R_{1,2}) = \eta(r - R_1) \cdot R_1 \cdot I_1(k_n(p) \cdot R_1) - \eta(r - R_2) \cdot R_2 \cdot I_1(k_n(p) \cdot R_2).$$

Подставляя выражения (10) и (11) в зависимость (8), получим, что

$$E_n(r) = A_n \cdot I_1(k_n(p) \cdot r) + B_n \cdot K_1(k_n(p) \cdot r) + K_n \cdot N_n(r, R_{1,2}), \tag{12}$$

где  $N_n(r, R_{1,2}) = F_n(r, R_{1,2}) \cdot I_1(k_n(p) \cdot r) - G_n(r, R_{1,2}) \cdot K_1(k_n(p) \cdot r)$ .

Соответственно принятой постановке задачи  $E_n(R_0) = 0$ . Отсюда, поскольку

$$F_n(r, R_{1,2}) \Big|_{R_0 < R_{1,2}} = G_n(r, R_{1,2}) \Big|_{R_0 < R_{1,2}} = 0, \text{ легко определить произвольную постоянную } B_n.$$

$$B_n = -A_n \cdot \frac{I_1(k_n(p) \cdot R_0)}{K_1(k_n(p) \cdot R_0)}. \tag{13}$$

Неизвестную  $A_n$  можно найти из условия ограниченности функции  $E_n(r)$  при  $r \rightarrow \infty$ .

$$A_n = -K_n \cdot M_n(R_{1,2}), \tag{14}$$

где  $M_n(R_{1,2}) = R_1 \cdot K_1(k_n(p) \cdot R_1) - R_2 \cdot K_1(k_n(p) \cdot R_2)$ .

С учётом (13), (14) выражение (12) принимает вид:

$$E_n(r) = K_n \cdot [N_n(r, R_{1,2}) - M_n(R_{1,2}) \cdot Q_n(r, R_0)], \tag{15}$$

где  $Q_n(r, R_0) = I_1(k_n(p) \cdot r) - \frac{I_1(k_n(p) \cdot R_0)}{K_1(k_n(p) \cdot R_0)} \cdot K_1(k_n(p) \cdot r)$ .

Подставляя (15) в (6), после необходимых тождественных преобразований получаем  $L$ -изображение напряжённости электрического поля, возбуждаемого соленоидом с бифилярной обмоткой в рассматриваемой индукторной системе.

$$E_\varphi(p, r, z) = \mu_0 p \cdot j_m \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cos(\Omega_n \cdot z) \cdot [N_n(r, R_{1,2}) - M_n(R_{1,2}) \cdot Q_n(r, R_0)]. \tag{16}$$

С помощью уравнения Максвелла (2) и выражения (16) находим изображение по Лапласу для  $z$ -компоненты напряжённости магнитного поля, возбуждаемого в рассматриваемой индукторной системе.

$$H_z(p, r, z) = j_m \cdot \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cdot \cos(\Omega_n \cdot z) \cdot k_n(p) \cdot [W_n(r, R_{1,2}) - M_n(R_{1,2}) \cdot V_n(r, R_0)], \tag{17}$$

где  $W_n(r, R_{1,2}) = F_n(R_{1,2}) \cdot I_0(k_n(p)r) + G_n(R_{1,2}) \cdot K_0(k_n(p)r)$ ,

$$V_n(r, R_0) = I_0(k_n(p)r) + \frac{I_1(k_n(p)R_0)}{K_1(k_n(p)R_0)} \cdot K_0(k_n(p)r)$$

Из (17) находим  $L$  – изображение плотности тока, индуцированного в металле внутреннего индуктора-соленоида [13, 14].

$$j_i(p, z) = H_z(p, r = R_0, z) = -j_m \cdot \frac{1}{R_0} \cdot \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\Omega_n \cdot z) \cdot M_n(R_{1,2}) \cdot V_n(R_0), \quad (18)$$

где  $V_n(R_0) = \frac{1}{K_1(k_n(p) \cdot R_0)}$ .

Выражения (16)–(18) являются расчётными соотношениями для анализа и оценок характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической системе, где индуктор размещён внутри коаксиального соленоида, обмотка которого выполнена в виде бифиляра с противоположно направленными токами.

В заключение отметим, что переход обратное преобразование Лапласа в (16)–(18) можно осуществить в зависимости от конкретных условий расчёта либо с помощью известных численных методов, либо аналитически с помощью допустимых упрощающих положений [13].

### Выводы

Получены расчётные соотношения для теоретического анализа и численных оценок характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической системе, где индуктор размещён внутри коаксиального соленоида, обмотка которого выполнена в виде бифиляра с противоположно направленными токами.

Найденные зависимости для напряжённостей и тока, индуцированного в обмотке бифиляра, представлены выражениями в  $L$ -пространстве, которые можно преобразовать к виду явных временных зависимостей численными или аналитическими методами в зависимости от условий расчёта для конкретной конструкции индукторной системы.

### Литература

1. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры / Волгов Виктор Андреевич. – М. : Энергия, 1977. – 88 с.
2. Pat. 512.340 US. Coil for electro-magnets / N. Tesla. – Serial No. 479.804 ; application filed July 7, 1893 ; patented Jan. 9, 1894.
3. Тесла Н. Лекции и статьи / Никола Тесла. – М. : Изд. «Tesla Print», 2003. – 386 с.
4. Герасимов В. Г. Электротехника и электроника. Электрические и магнитные цепи / В.Г. Герасимов, Э. В. Кузнецов, О. В. Николаева. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 288 с.
5. Пат. 2355060, Российская Федерация, МПК H01F 5/00. Катушка / В. П. Янчук. – № 2007111425/09 ; заявл. 28.03.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
6. Ahn M. C., Baek D. K., Yang S. E., Park D. K., Ko T. K., Lee C., Seok B.-Y., Chang H.-M. Manufacture and test of small-scale superconducting fault current limiter by using the bifilar winding of coated conductor // IEEE Trans. Applied Superconductivity. 2006. Vol. 16, Issue 2, pp. 646–649.
7. Ahn M. C., Jang J. Y., Ko T. K., Lee H. Novel Design of the Structure of a Non-Inductive Superconducting Coil // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2011. Vol. 21, Issue 3, pp. 1250–1253.
8. Miranda C. M., Pichorim S. F. A Self-resonant Two-Coil Wireless Power Transfer System Using Open Bifilar Coils // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2017. Vol. 64, Issue 6, pp. 615–619.
9. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. – [Изд. 2-е, перераб., и доп.]. – Харьков : МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.
10. Batygin Yu. V. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies / Batygin Yu. V., Barbashova M. V., Sabokar O. S. – Springer International Publishing AG (Switzerland), part of Springer Nature. 2018. – 94 p.
11. Подольцев А. Д. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в ферромагнитных средах / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К. : Изд. Института электродинамики НАНУ. 1999. – 362 с.
12. Никишенко А. Н. Разработка модели излучения плоской катушки / А. Н. Никишенко, Н. В. Богач // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций. РТ-2010. – Севастополь, 2010. – С. 362–366.
13. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 831 с.
14. Landau L. D. Electrodynamics of Continuous Media / L. D. Landau, E. M. Lifshitz, L. P. Pitaevsky ; translated from Russian by J. B. Sykes, J. S. Bell, M. J. Kearsley. [2-nd Edition added and enlarged]. Reprinted 2004 (twice). Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. – 620 p.

## References

1. Volgov V. A. Detali i uzly radioelektronnoj apparatury / Volgov Viktor Andreevich. – M. : Energiya, 1977. – 88 s.
2. Pat. 512.340 US. Coil for electro-magnets / N. Tesla. – Serial No. 479.804 ; application filed July 7, 1893 ; patented Jan. 9, 1894.
3. Tesla N. Lekcii i stati / Nikola Tesla. – M. : Izd. «Tesla Print», 2003. – 386 s.
4. Gerasimov V. G. Elektrotehnika i elektronika. Elektricheskie i magnitnye cepi / V. G. Gerasimov, E. V. Kuznecov, O. V. Nikolaeva. – M. : Energoatomizdat, 1996. – 288 s.
5. Pat. 2355060, Rossijskaya Federaciya, MPK H01F 5/00. Katushka / V. P. Yanchuk. – № 2007111425/09 ; zayavl. 28.03.2007 ; opubl. 10.05.2009, Byul. № 13.
6. Ahn M. C., Bae D. K., Yang S. E., Park D. K., Ko T. K., Lee C., Seok B.-Y., Chang H.-M. Manufacture and test of small-scale superconducting fault current limiter by using the bifilar winding of coated conductor // IEEE Trans. Applied Superconductivity. 2006. Vol. 16, Issue 2, pp. 646–649.
7. Ahn M. C., Jang J. Y., Ko T. K., Lee H. Novel Design of the Structure of a Non-Inductive Superconducting Coil // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2011. Vol. 21, Issue 3, pp. 1250–1253.
8. Miranda C. M., Pichorim S. F. A Self-resonant Two-Coil Wireless Power Transfer System Using Open Bifilar Coils // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2017. Vol. 64, Issue 6, pp. 615–619.
9. Batygin Yu. V. Impulsnye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij / Batygin Yu. V., Lavinskij V. I., Himenko L. T. – [Izd. 2-e, pererab., i dop.]. – Harkov : MOST-Tornado, 2003. – 284 s.
10. Batygin Yu. V. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies / Batygin Yu. V., Barbashova M. V., Sabokar O. S. – Springer International Publishing AG (Switzerland), part of Springer Nature. 2018. – 94 p.
11. Podolcev A. D. Elementy teorii i chislennogo raschyota elektromagnitnyh processov v ferromagnitnyh sredah / A. D. Podolcev, I. N. Kucheryavaya. – K. : Izd. Instituta elektrodinamiki NANU. 1999. – 362 s.
12. Nikishenko A. N. Razrabotka modeli izlucheniya ploskoj katushki / A. N. Nikishenko, N. V. Bogach // Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikacij. RT-2010. – Sevastopol, 2010. – S. 362–366.
13. Korn G. Spravochnik po matematike / G. Korn, T. Korn. – M. : Nauka, 1973. – 831 s.
14. Landau L. D. Electrodynamics of Continuous Media / L. D. Landau, E. M. Lifshitz, L. P. Pitaevsky ; translated from Russian by J. B. Sykes, J. S. Bell, M. J. Kearsley. [2-nd Edition added and enlarged]. Reprinted 2004 (twice). Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. – 620 p.

Рецензія/Peer review : 27.05.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М.А. Подригало