

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ВНУТРЕННИМ КОАКСИАЛЬНЫМ БИФИЛЯРНЫМ СОЛЕНОИДОМ

**Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, С. А. Шиндерук, В. А. Стрельникова, Д. И. Гмыря**

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: yu.v.batygin@gmail.com, chaplygin.e.a@gmail.com, s.shinderuk.2016102@ukr.net, v.strelnikova91@gmail.com, gmiriadima@gmail.com

С практической точки зрения представляют интерес исследования систем, в которых бифилярные катушки размещаются либо внутри, либо поверх цилиндрических соленоидов в схемах оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов. Целью настоящей работы является проведение расчёта и анализа характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны. Получены аналитические зависимости для напряжённостей и магнитных потоков возбуждаемых электромагнитных полей в цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра. Показано, что интегральный магнитный поток во внутренней полости рассматриваемой системы и индуктивность всей системы в целом равны нулю. Научная новизна проведенных исследований состоит в том, что в нём впервые изложены результаты расчёта и анализа пространственного распределения магнитных потоков, возбуждаемого в цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны. Полученные результаты можно использовать для выбора рабочих конструкторских решений для соответствующих элементов новых схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов. Весьма перспективным в направлении проведенных исследований видится расчёт и анализ электромагнитных процессов в индукторных системах, где бифилярные катушки размещают поверх цилиндрических соленоидов, что является весьма интересным для формирования новых схем оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов.

**Ключевые слова:** бифиляр, цилиндрическая индукторная система, магнитно-импульсная обработка металлов, источник энергии, магнитный поток.

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ У ЦИЛІНДРИЧНІЙ ІНДУКТОРНІЙ СИСТЕМІ ІЗ ВНУТРІШНІМ КОАКСІАЛЬНИМ БІФІЛЯРНИМ СОЛЕНОІДОМ

**Ю. В. Батигін, Є. О. Чаплигін, С. О. Шиндерук, В. А. Стрельнікова, Д. І. Гмиря**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: yu.v.batygin@gmail.com, chaplygin.e.a@gmail.com, s.shinderuk.2016102@ukr.net, v.strelnikova91@gmail.com, gmiriadima@gmail.com

З практичної точки зору представляють інтерес дослідження систем, в яких біфілярні котушки розміщуються або всередині, або поверх циліндричних соленоїдів в схемах обладнання для магнітно-імпульсної обробки металів. Метою цієї роботи є проведення розрахунку та аналізу характеристик електромагнітних процесів у циліндричній індукторній системі із внутрішнім коаксиальним соленоїдом, обмотка якого виконана у вигляді біфіляра так, що струми в кожній з його жил спрямовані в протилежні сторони. Отримано аналітичні залежності для напруженостей і магнітних потоків збуджуваних електромагнітних полів у циліндричній індукторній системі із внутрішнім коаксиальним соленоїдом, обмотка якого виконана у вигляді біфіляра. Показано, що інтегральний магнітний потік у внутрішній порожнині даної системи та індуктивність всієї системи в цілому дорівнює нулю. Наукова новизна проведених досліджень полягає в тому, що в них вперше викладені результати розрахунку і аналізу просторового розподілу магнітних потоків, що збуджується в циліндричній індукторній системі із внутрішнім коаксиальним соленоїдом, обмотка якого виконана у вигляді біфіляра так, що струми в кожній з його жил спрямовані в протилежні сторони. Отримані результати можна використовувати для вибору робочих конструкторських рішень для відповідних елементів нових схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів. Вельми перспективним в напрямку проведених досліджень бачиться розрахунок і аналіз електромагнітних процесів в індукторних системах, де біфілярні котушки розміщують поверх циліндричних соленоїдів, що є доволі цікавим для формування нових схем обладнання для магнітно-імпульсної обробки металів.

**Ключові слова:** біфіляр, циліндрична індукторна система, магнітно-імпульсна обробка металів, джерело енергії, магнітний потік.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Бифилярная катушка – это электромагнитная катушка, которая содержит две близко расположенные, параллельные обмотки. В зависимости от назначения, токи в её обмотках могут протекать как в одном, так и в противоположном направлениях. В последнем практи-

чески наиболее интересном случае магнитное поле одной обмотки равно и направлено противоположно по отношению к полю другой. Их суперпозиция приводит к взаимной нейтрализации, что означает равенство нулю коэффициента самоиндукции катушки в целом.

В современной электронной технике бифилярные катушки часто используют как один из способов создания проволочных резисторов с достаточно малой индуктивностью [1]. Бифилярные катушки, можно увидеть в обмотках реле или трансформаторов. Их используют также в импульсных источниках электрического питания благодаря их способности подавлять обратную электродвижущую силу [2, 3]. Бифилярные катушки могут использоваться, например, для генерации магнитных импульсов любой формы и длительности, увеличения широкополосности и устранения нежелательных резонансов в радиотехнических устройствах и др. [4]. Следует отметить, что бифилярные катушки применялись даже в экспериментах для получения антигравитации [5].

Расчётам электромагнитных полей соленоидов различной геометрии посвящены довольно многочисленные работы различных авторов, как, например [6–10].

Так, в [6–8] используются расчётные модели, предполагающие использование аналитических методов решения краевых задач математической физики. Для типичных конфигураций соленоидов – инструментов в магнитно-импульсной обработке металлов определены пространственно-временные распределения возбуждаемых полей и индуцированных токов. Вычислены фундаментальные характеристики экспериментальных образцов разного конструктивного исполнения.

В [9–10] предложены методы численного моделирования электромагнитных процессов в цилиндрических и плоских катушках различного назначения. Направленность выделенных работ устанавливалась вопросами создания эффективных конструкций источников магнитных полей для решения соответствующих производственных задач.

С практической точки зрения представляют интерес исследования систем, в которых бифилярные катушки размещаются либо внутри, либо поверх цилиндрических соленоидов в схемах оборудования для магнитно-импульсной обработки металлов [6, 7]. С физической точки зрения цилиндрическая геометрия бифиляра нарушает симметрию обмоток, относительно друг друга в сравнении с плоским вариантом исполнения. Кроме того, интересен вклад металла внешнего соленоида в протекающие электромагнитные процессы.

Цель настоящей работы – расчёт и анализ характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** При решении поставленной задачи примем следующие допущения.

Расчётная модель исследуемой системы представлена на рис. 1.

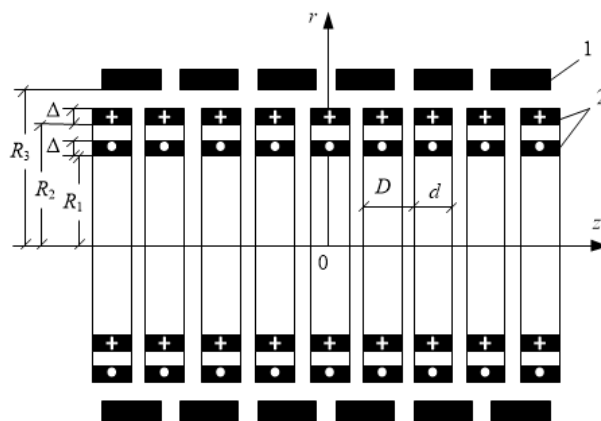


Рисунок 1 – Расчётная модель индукторной системы с внутренней бифилярной обмоткой:  
1 – внешний индуктор с внутренним радиусом –  $R_3$ ; 2 – внутренняя бифилярная обмотка:  $R_1, R_2$  – радиусы внутренней и внешней частей бифиляра,  $D$  – шаг намотки,  $d$  – ширина витков бифиляра

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.

Внешний индуктор отключён, его витки выполнены из металла с высокой электропроводностью, достаточно плотно прилегают друг к другу, так что их внутреннюю поверхность можно считать сплошной поверхностью из идеального проводника.

Витки бифилярной обмотки выполнены из металлической ленты (толщина –  $\Delta$ , ширина –  $d$ , радиусы внутренней и внешней намоток –  $R_{1,2}$ , шаг намоток –  $D$ ), «прозрачны» для возбуждаемых полей (так что  $\frac{\Delta}{\delta} \ll 1$ , где  $\delta$  – величина скин-слоя) и не влияют на протекающие электромагнитные процессы [8, 11].

В бифиляре протекает гармонический ток с плотностью  $j_\varphi(t, r, z) = j_m \sin(\omega t) f(r) g(z)$ , где  $j_m = \frac{J_m}{(d\Delta)}$  – амплитуда плотности,  $J_m$  – амплитуда тока,  $\omega$  – циклическая частота,  $f(r), g(z)$  – функции радиального и продольного распределений.

Временные параметры возбуждающего тока удовлетворяют квазистационарному приближению по Ландау –  $\frac{\omega}{c} l \ll 1$  [11], где  $c$  – скорость света в вакууме,  $l$  – 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 [6–8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); & (1) \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 p H_z(p, r, z); & (2) \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 p H_r(p, r, z), & (3) \end{cases}$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;

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

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

$$j_\varphi(p, r, z) = L\{j_\varphi(t, r, z)\};$$

$j_\varphi(t, r, z)$  – плотность тока в бифиляре.

Согласно принятым допущениям продольную зависимость  $L$ -изображения плотности тока в бифиляре можно представить косинус разложением Фурье по продольной координате  $-z$  [12]:

$$\begin{cases} g(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cos(\Omega_n z); \\ j_\varphi(p, r, z) = j_m \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) f(r) \times \\ \times \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cos(\Omega_n z); \\ f(r) = \begin{cases} 1, r \in [R_1, (R_1 + \Delta)] \cup [R_2, (R_2 + \Delta)] \\ 0, r \notin [R_1, (R_1 + \Delta)] \cup [R_2, (R_2 + \Delta)] \end{cases}, \end{cases} \quad (4)$$

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

Из дифференциальных уравнений (1)–(3) с учётом выражения (4) в рамках принятых допущений (пренебрегая токами смещения) получим уравнение для азимутальной компоненты напряжённости электрического поля  $E_\varphi(p, r, z)$  в выделенных областях.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_\varphi(p, r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r, z)) \right) = \\ = \mu_0 p j_\varphi(p, r, z). \end{aligned} \quad (5)$$

С учётом конечности касательной компоненты напряжённости электрического поля на оси системы и её равенства нулю на идеально проводящей внутренней поверхности внешнего индуктора решение уравнения (5) можно записать в виде разложения Фурье-Бесселя [12, 13]:

$$E_\varphi(p, r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} E_\varphi(p, m, z) J_1 \left( \beta_m \frac{r}{R_3} \right), \quad (6)$$

где  $E_\varphi(p, m, z)$  – амплитуда разложения,  $J_1 \left( \beta_m \frac{r}{R_3} \right)$  – функция Бесселя первого порядка,  $\beta_m$  – корни уравнения  $J_1(\beta_m) = 0, m = 1, 2, 3 \dots$

В соответствии с (6) уравнение (5) приводится к обыкновенному линейному дифференциальному уравнению второго порядка относительно функции  $E_\varphi(p, m, z)$  [12]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 E_\varphi(p, m, z)}{dz^2} - \left( \frac{\beta_m}{R_3} \right)^2 E_\varphi(p, m, z) = \mu_0 p j_m \times \\ \times \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \frac{2F(m, R_{1,2})}{J_2^2(\beta_m)} \sum_{n=0}^{\infty} a_n^* \cos(\Omega_n z), \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$F(m, R_{1,2}) = \left( \int_{\left( \beta_m \frac{R_1}{R_3} \right)}^{\left( \beta_m \frac{R_1 + \Delta}{R_3} \right)} x J_1(x) dx - \int_{\left( \beta_m \frac{R_2}{R_3} \right)}^{\left( \beta_m \frac{R_2 + \Delta}{R_3} \right)} x J_1(x) dx \right).$$

В случае однонаправленных токов в обмотках бифиляра знак перед вторым алгебраическим слагаемым в выражении для  $F(m, R_{1,2})$  меняется на противоположный.

Из уравнения (7) находим, что

$$\begin{aligned} E_\varphi(p, m, n) = -2p\mu_0 j_m \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \times \\ \times \frac{F(m, R_{1,2})}{\left( \Omega_n^2 + \left( \frac{\beta_m}{R_3} \right)^2 \right) J_2^2(\beta_m)} a_n^*. \end{aligned} \quad (8)$$

Учитывая (6) и раскрывая ранее принятые обозначения, получаем  $L$ -изображение напряжённости возбуждаемого электрического поля.

$$\begin{aligned} E_\varphi(p, r, z) = -2p\mu_0 \left( \frac{J_m}{d\Delta} \right) \left( \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \times \\ \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F(m, R_{1,2})}{\left( \Omega_n^2 + \left( \frac{\beta_m}{R_3} \right)^2 \right) J_2^2 \left( \beta_m \frac{r}{R_3} \right)} J_1 \left( \beta_m \frac{r}{R_3} \right) \times \\ \times a_n^* \cos(\Omega_n z). \end{aligned} \quad (9)$$

С помощью уравнения (2) и выражения (9) после обратного преобразования Лапласа находим продольную компоненту напряжённости магнитного поля.

$$\begin{aligned} H_z(t, r, z) = 2 \left( \frac{J_m}{d\Delta} \right) \sin(\omega t) \times \\ \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left( \frac{\beta_m}{R_3} \right) F(m, R_{1,2})}{\left( \Omega_n^2 + \left( \frac{\beta_m}{R_3} \right)^2 \right) J_2^2(\beta_m)} \times \\ \times J_0 \left( \beta_m \frac{r}{R_3} \right) a_n^* \cos(\Omega_n z) \end{aligned} \quad (10)$$

В конечном итоге принципиальная действенность бифиляра предполагает вычитание магнитных потоков вне обмоток и их сложение между ними [1, 4, 5]. В этой связи с помощью выражения (10) вычислим магнитный поток во временном

максимуме –  $t = \frac{\pi}{2\omega}$  на периоде продольной координаты –  $z \in \left[-\frac{D}{2}, +\frac{D}{2}\right]$  сквозь произвольную поверхность –  $r \in [r_1, r_2]$ .

После необходимых тождественных преобразований получаем, что

$$\Phi(r_1, r_2) = 4\pi\mu_0 \left(\frac{J_m}{\Delta}\right) \left(\frac{R_3^3}{D}\right) \times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F(m, R_{1,2}) G(m, r_{1,2})}{\beta_m^2 J_2^2(\beta_m)}, \quad (11)$$

где  $G(m, r_{1,2}) = \left(\frac{r_2}{R_3}\right) J_1\left(\beta_m \frac{r_2}{R_3}\right) - \left(\frac{r_1}{R_3}\right) J_1\left(\beta_m \frac{r_1}{R_3}\right)$ .

Анализ протекающих процессов, численные оценки начнём с выражения (11).

1. Величина и направление магнитного потока сквозь любую произвольную выделенную поверхность в рассматриваемой системе определяется множителем  $G(m, r_{1,2})$ .

2. В центральной полости обмотки бифиляра,

где  $r \in [0, R_1]$ ,  $G(m, r_{1,2}) = \left(\frac{R_1}{R_3}\right) J_1\left(\beta_m \frac{R_1}{R_3}\right)$ , а

в полости где  $r \in [R_1, R_2] \cap [R_2, R_3]$ ,

$G(m, r_{1,2}) = -\left(\frac{R_1}{R_3}\right) J_1\left(\beta_m \frac{R_1}{R_3}\right)$ . Следовательно, маг-

нитные потоки в выделенных полостях должны быть равными и противоположно направленными.

3. В полости между обмотками бифиляра, где  $r \in [R_1, R_2]$  величина и направление магнитного потока зависит от соотношения алгебраических слагаемых выражения для  $G(m, r_{1,2})$ .

4. Интегральный магнитный поток во внутренней полости всей рассматриваемой системы, где  $r \in [0, R_3]$ , как результат суперпозиции всех его составляющих, равен нулю, так как  $G(m, r_{1,2})|_{r_1=0, r_2=R_3} = 0$ .

5. Равенство нулю интегрального магнитного потока означает равенство нулю индуктивности рассматриваемой системы.

В заключение с помощью формулы (11) проведём вычисления возбуждаемых магнитных потоков в экспериментальных вариантах исследуемой индукторной системы при увеличении расстояния между обмотками бифиляра (разные радиусы внутренней обмотки).

Для количественного сравнения результаты вычислений выразим в относительных единицах,

нормированных на максимальные значения потоков в каждой экспериментальной конструкции. Токи в обмотках бифиляра одинаковы, их направления различны и соответствуют схеме на рис. 1.

Сумма ряда Фурье-Бесселя в (11) с точностью до ~ 5 % вычислена с учётом 500 слагаемых.

Вариант №1.

Геометрия системы

– радиальные размеры:  $R_1 = 0,0295$  м,  $R_2 = 0,0335$  м,  $R_3 = 0,0375$  м;

– продольные размеры:  $d = 0,002$  м,  $D = 0,004$  м.

Результаты вычислений представлены в табл. 1–3.

Вариант №2.

Геометрия системы

– радиальные размеры –  $R_1 = 0,0245$  м,  $R_2 = 0,0335$  м,  $R_3 = 0,0375$  м;

– продольные размеры –  $d = 0,002$  м,  $D = 0,004$  м.

Результаты вычислений представлены в табл. 4.

Основные результаты проведенных вычислений:

1. Интегральный магнитный поток во внутренней полости всей рассматриваемой системы вне зависимости от её конструктивных особенностей равен нулю и, соответственно, равна нулю индуктивность, что подтверждает предыдущее качественное заключение.

2. Справедливость результата для интегрального потока можно объяснить как следствие из теоремы о циркуляции вектора индукции магнитного поля в физически замкнутой системе [2, 3].

3. Максимум потока в системе с бифиляром всегда должен иметь место в полости между обмотками, что объясняется суперпозицией однонаправленных векторов индукции магнитных полей, возбуждаемых разнонаправленными токами в обмотках бифиляра.

4. Вариация геометрии и количества компонент позволяет получать различные радиальные распределения магнитных полей в рассмотренной индукторной системе, что представляет практический интерес для новых схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов [6–8].

Обобщение качественных заключений и результатов расчёта характеристик электромагнитных процессов для модельных образцов рассмотренной индукторной системы приводит к следующим выводам.

**ВЫВОДЫ.** Проведен расчёт и анализ характеристик электромагнитных процессов в цилиндрической индукторной системе с внутренним коаксиальным соленоидом, обмотка которого выполнена в виде бифиляра так, что токи в каждой из его жил направлены в противоположные стороны.

Получены аналитические зависимости для напряжённостей и магнитных потоков возбуждаемых электромагнитных полей.

Таблица 1 – Подключение обеих обмоток бифиляра

1	Выделенные полости	$r \in [0, R_1]$	$r \in [R_1, R_2]$	$r \in [R_2, R_3]$
2	Магнитный поток с нормировкой на абсолютный максимум	0,396	- 1	0,604

Максимум величины возбуждаемого потока имеет место в центральной полости системы. Различие знаков соответствует различным направлениям возбуждаемых потоков.

Таблица 2 – Подключение внешней обмотки бифиляра при отключении внутренней

1	Выделенные полости	$r \in [0, R_2]$	$r \in [R_2, R_3]$
2	Магнитный поток с нормировкой на абсолютный максимум	0,496	- 0,496

Нормировка на максимум при подключении обеих обмоток бифиляра.

Таблица 3 – Подключение внутренней обмотки бифиляра при отключении внешней

1	Выделенные полости	$r \in [0, R_2]$	$r \in [R_2, R_3]$
2	Магнитный поток с нормировкой на абсолютный максимум	0,406	- 0,406

Нормировка на максимум при подключении обеих обмоток бифиляра.

Таблица 4 – Подключение обеих обмоток бифиляра

1	Выделенные полости	$r \in [0, R_1]$	$r \in [R_1, R_2]$	$r \in [R_2, R_3]$
2	Магнитный поток с нормировкой на абсолютный максимум	0,373	- 1	0,621

Максимум величины возбуждаемого потока имеет место в центральной полости системы. Отношение абсолютных максимумов потоков 1-го и 2-го вариантов исполнения индукторной системы составляет  $\frac{\Phi_{1\max}}{\Phi_{2\max}} \approx 1,15$ .

Показано, что интегральный магнитный поток во внутренней полости рассматриваемой системы вне зависимости от её конструктивных особенностей равен нулю и, соответственно, равна нулю индуктивность всей системы в целом.

Концентрация магнитного потока в системе с бифиляром имеет место в полости между его обмотками, что объясняется позитивной суперпозицией однонаправленных векторов индукции возбуждаемых полей.

Вариация геометрии и количества компонент позволяет варьировать показатели радиальных распределений электромагнитных полей в рассмотренной индукторной системе.

*Работа проводилась кафедрой физики ХНАДУ в рамках Научного исследования: «Енергозберігаючі маловитратні технології живлення та ремонту транспортних засобів» 08-53-19, финансируемого Министерством образования и науки Украины.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. Москва, 1977. 88 с.
2. Герасимов В. Г., Кузнецов Э. В., Николаева О. В. Электротехника и электроника. Электрические и магнитные цепи. Москва, 1996. 288 с.
3. Атабеков Г. И. Основы теории цепей, Санкт-Петербург, 2006. 220 с.

4. Катушка : пат. 2355060 Россия : № 2007111425/09 ; заявл. 28.03.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
5. All-electric motional electric field generator. US Patent №3610971. опубл. 10.05.1971.
6. Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Харьков, 2003. 284 с.
7. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies. Switzerland, 2018. 94 p.
8. Шнеерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Москва, 1992. 413 с.
9. Богач Н. В., Никищенко А. Н. Анализ магнитных полей плоских излучателей. *Радиоэлектроника и информатика*. 2010. № 3. С. 46–50.
10. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в ферромагнитных средах. Киев, 1999. 362 с.
11. Ландау Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. Москва, 1982. 620 с.
12. Korn G. A., Korn T. M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers : definitions, theorems, and formulas, for reference and review. Mineola, N.Y. 2000. 1152 p.
13. Справочник по специальным функциям : ред. М. Абрамовиц, И. Стиган. Москва, 1979. 830 с.

## ELECTROMAGNETIC FIELDS IN THE CYLINDRICAL INDUCTOR SYSTEM WITH INNER COAXIAL BIFILAR SOLENOID

Yu. Batygin, E. Chaplygin, S. Shinderuk, V. Strelnikova, D. Gmiria

Kharkov National Automobile and Highway University

vul. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: yu.v.batygin@gmail.com, chaplygin.e.a@gmail.com, s.shinderuk.2016102@ukr.net, v.strelnikova91@gmail.com, gmiriadima@gmail.com

**Purpose.** To calculate and to analyze the characteristics of electromagnetic processes in the cylindrical inductor system with inner coaxial solenoid which winding is a bifilar, so the currents in its every turn flow in the opposite sides. **Originality.** The scientific novelty of the given research consists of the first presentation of the calculation and analysis results of spatial distribution of excited magnetic fluxes in the cylindrical inductor system with inner coaxial solenoid the winding of which is made in a bifilar form, so the currents in its every turn are directed oppositely. **Methodology.** There has been used electromagnetic field theory to obtain numerical estimates of the system describing in the paper. In accordance with the accepted model assumptions, the Maxwell's equations were integrated with further processing of the obtained values due to two experimental models. **Results.** Analytical dependences are obtained for the strengths and magnetic fluxes of the excited electromagnetic fields in the cylindrical inductor system with inner coaxial solenoid with the bifilar winding. It is shown that the integral magnetic flux in the internal cavity of the considering system is zero, regardless of its design features. The inductance of the entire system is zero according to the previous statement. The concentration of the magnetic flux in the system with a bifilar takes place in the cavity between its windings, which is explained by the positive superposition of the unidirectional induction vectors of the fields excited. The variation of the geometry and the number of components allows varying the indices of the radial distributions of the electromagnetic fields in the considering inductor system. **Practical value.** The results obtained can be used to select working design solutions for the corresponding elements of the new equipment schemes for magnetic-pulsed metal processing. The calculation and analysis of electromagnetic processes in inductor systems, where bifilar coils are placed over cylindrical solenoids, seems very perspective for the future research, it is also very interesting for the new equipment schemes formation for magnetic-pulsed metal processing. Figures 1, tables 4, references 13.

**Key words:** bifilar, cylindrical inductor system, magnetic-pulsed metal processing, energy source, magnetic flux.

## REFERENCES

1. Volgov, V. A. (1977). *Detali i uzly radioelektronnoy apparatury [Details and units of electronic equipment]*. Moscow: Energiia. [in Russian]
2. Gerasimov, V. G., Kuznetsov, E. V. & Nikolaeva, O. V. (1996). *Elektrotehnika i elektronika. Elektricheskie i magnitnye tsepi [Electrical engineering and electronics. Electrical and magnetic circuits]*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian]
3. Atabekov, G. I. (2006). *Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of circuit theory]*. St. Petersburg: Energiia. [in Russian]
4. Yanchuk, V. P. (2009). *Katushka [Bobbin]*. Patent Ru, no. 2355060. Bull. 13. [in Russian]
5. Hopper, W. J. (1971). All-electric motional electric field generator. Patent US, no. 3610971.
6. Batygin, Yu. V., Lavinsky, V. I. & Khimenko, L. T. (2003). *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 1 [The pulse magnetic fields for advanced technologies. Vol. 1]*. Kharkov: «TORNADO-MOST». [in Russian]
7. Batygin, Yu. V., Barbashova, M. V., & Sabokar, O. S. (2018). *Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies*. Switzerland: Springer Publ.
8. Shneerson, G. A. (1992). *Polya i perekhodnye protsessy v apparature sverkhsil'nykh tokov [Fields and transients in the equipment of superstrong currents]*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian]
9. Bogach, N. V., & Nikishenko, A. N. (2010). Analiz magnitnykh poley ploskikh izluchateley. *Radioelectronics & informatics*, 3, 46–50. [in Russian]
10. Podoltsev, A. D., & Kucheriavaia, I. N. (1999). *Elementy teorii i chislennogo rascheta elektromagnitnykh protsessov v ferromagnitnykh sredakh [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in ferromagnetic media]*. Kiev: Institut elektrodinamiki NAN Ukrainy. [in Russian]
11. Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1982). *Teoreticheskaya fizika. Elektrodinamika sploshnykh sred [Theoretical physics. Electrodynamics of continuous media]*. Moscow: Nauka. [in Russian]
12. Korn, G. A., & Korn, T. M. (2000). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, and formulas, for reference and review*. Mineola, N.Y.: Dover Publications.
13. Abramovits, M., & Stigan, I. (1979) *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam [Handbook of special mathematical functions]*. Moscow: Nauka. [in Russian]

Стаття надійшла 14.09.2019.