

УДК 621.3.011

УПРАВЛЕНИЕ ПОГОННОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ КОАКСИАЛЬНОГО КАБЕЛЯ С АКСИАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКОВ

¹Сапогин В.Г., ²Манжула В.Г.

¹Таганрогский технологический институт Южного федерального университета,
Таганрог, e-mail: sapogin@mail.ru;

²НОУ ВПО «Институт коммуникативных технологий», Москва, e-mail: manjula@bk.ru

Предложен аналитический метод расчёта погонной индуктивности коаксиального кабеля с аксиальной плотностью токов. Для трёх областей получены радиальные распределения аксиальной компоненты векторного потенциала и азимутальной компоненты индукции магнитного поля. Показано, что полная индуктивность коаксиального кабеля складывается из трёх погонных индуктивностей: двух токовых, которые возникают в областях 1 и 3, и одной потоковой, которая формируется в области 2. Вычисление первой токовой индуктивности показывает, что её значение пропорционально магнитной постоянной. Вычисление потоковой индуктивности указывает на то, что её значение пропорционально логарифму отношения радиусов второй и первой областей. Вычисление второй токовой индуктивности приводит к соотношению, из которого следует, что она может быть управляема отношением и направлением токов в центральной жиле и оплётке. Определён динамический диапазон её изменения для различных случаев направления и значений отношения токов.

Ключевые слова: потоковая индуктивность, векторный потенциал, токовая индуктивность, индукция магнитного поля, поток магнитного поля, коаксиальный кабель

CONTROL OF RUNNING INDUCTANCE OF COAXIAL CABLE WITH CURRENTS AXIAL DENSITY

¹Sapogin V.G., ²Manzhula V.G.

¹Taganrog Institute of Technology Southern Federal University, Taganrog, e-mail: sapogin@mail.ru;

²Non-state institute of higher education «Institute of communicative technologies»,
Moscow, e-mail: manjula@bk.ru

The analytic method for calculation of running inductance of coaxial cable with currents' axial density has been proposed. The radial distributions of axial component of vector potential and azimuthal component of magnetic field induction have been obtained for three areas. Then it has been shown that complete inductance of coaxial cable is summed from three running inductances: two of current one, which arise in 1 and 3 areas, and one flux inductance, which is formed in 2 area. The calculation of first current inductance shows that its value is proportional to magnetic constant. The calculation of flux inductance points to that its value is proportional to logarithm of ratio between the radiuses of second and first areas. The calculation of second current inductance brings to relation, which shows that this inductance can be controlled by currents' ratio and by currents' direction in the central of cable conductor and its braid. The dynamic range of inductance's change for the various cases of direction and values of currents' ratio is defined.

Keywords: flux inductance, vector potential, current inductance, magnetic field inductance, magnetic flux, coaxial cable

В [7, 9] был предложен аналитический метод расчёта потоковой индуктивности токового кольца с конечной радиальной шириной, который основывался на законе Био – Савара – Лапласа для геометрического проводника [4]. Этот же метод был применён для расчёта коэффициента увеличения индуктивности спирального типа [5]. Учёт конечности поперечного сечения проводника при нахождении распределения магнитных полей требует применения фундаментальных законов магнитостатики. Таким методом была рассчитана погонная индуктивность цилиндрических проводников с аксиальной плотностью тока [8].

Сохраняя идеологию методики расчёта, предложенной в [1–3, 5–9], рассчитаем погонную индуктивность цилиндрического коаксиального кабеля, в котором векторы плотности тока центральной жилы и оплётки имеют аксиальные направления.

Физико-математическая модель расчёта

Расчёт будем проводить исходя из фундаментального уравнения магнитостатики, записанного для векторного потенциала

$$\Delta \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j}, \quad (1)$$

с калибровкой

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0. \quad (2)$$

Связь индукции магнитного поля с векторным потенциалом находится из соотношения

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (3)$$

Запишем (1) в цилиндрических координатах. Учтем, что плотности тока в коаксиальном кабеле имеют только одну аксиальную компоненту $\mathbf{j} = (0, 0, j_z)$, направленную по оси z , а сама плотность тока складывается из двух составляющих:

плотности тока, текущего в центральной жиле j_0 , и тока, текущего по оплётке j_1 . Они порождают поле векторного потенциала, имеющего также только одну компоненту $\mathbf{A} = (0, 0, A_z)$;

$$\Delta A_z = -\mu_0 j_z. \quad (4)$$

Оператор Лапласа в уравнении (1) для декартовой компоненты векторного потенциала, зависящей от радиуса, имеет вид

$$\Delta A_z = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dA_z}{dr} \right) = -\mu_0 j_0 - \mu_0 \sigma j_1, \quad (5)$$

где σ – знаковый множитель. Для сонаправленных токов он принимает значение +1, а для токов противоположного направления – 1.

Предположим, что в (5) обе плотности токов однородны по поперечному сечению, коаксиальный кабель имеет внешний радиус R , а геометрия его поперечного сечения представлена на рис. 1.

На рис. 1 введены обозначения: r_1 – внешний радиус первой области (радиус проводника центральной жилы); r_2 – внешний радиус второй немагнитной области; R – внешний радиус оплётки коаксиального кабеля; r – текущий радиус цилиндра. Всегда выполняется условие $r_1 < r_2 < R$.

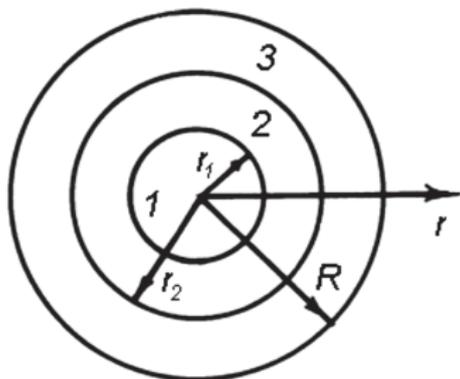


Рис. 1. Поперечное сечение коаксиального кабеля

Из (3) следует, что такое поле векторного потенциала в каждой области коаксиального кабеля порождает индукцию магнитного поля с одной компонентой

$$B_\phi = -\frac{dA_z}{dr}. \quad (6)$$

Распределение векторного потенциала внутри коаксиального кабеля

Цилиндрическая поверхность коаксиального кабеля, имеющего внешний радиус R , содержит внутри себя области, в которых возбуждено статическое магнитное

поле (рис. 1). Их три: область 1 ($0 \leq r \leq r_1$), в которой есть ток j_0 ; внутренняя область 2, в которой $r_1 \leq r \leq r_2$, и токов нет; и внешняя область 3 ($r_2 < r < R$), где есть ток j_1 . Поставленная задача очень похожа на задачу электростатики для уравнения Пуассона (внутренняя краевая задача с тремя границами).

Тогда для области 1 (потенциал и индукция далее отмечены индексом «1») уравнение (5) имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dA_1}{dr} \right) = -\mu_0 j_0, \quad (7)$$

а во второй области на рис. 1 (потенциал отмечен индексом «2») –

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dA_2}{dr} \right) = 0. \quad (8)$$

В уравнении (5) перейдём к новой функции

$$y_1(\xi) = A_z / A_*,$$

где $\xi = r/R$, в области $0 \leq \xi \leq \xi_1$, а

$$A_* = \mu_0 j_0 R^2 / 4 \quad (9)$$

– масштаб векторного потенциала, одинаковый во всех областях.

Решение (7) для области 1 имеет вид

$$y_1 = -\frac{u_0}{4} \xi^2 + c_1 \ln \xi + c_2, \quad (10)$$

где

$$u_0 = j_0 / j_*, \quad (11)$$

а $j_* = A_* / (\mu_0 R^2)$ – масштаб плотности тока. Калибруя векторный потенциал по условию $y_1(0) = 0$ (тогда $c_1 = c_2 = 0$), приходим к решению в области 1, имеющему вид

$$y_1 = -\frac{u_0}{4} \xi^2. \quad (12)$$

Решение уравнения (8) для области 2 ($\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$) имеет вид

$$y_2 = c_3 \ln \xi + c_4, \quad (13)$$

где c_3, c_4 – произвольные постоянные

Распределение векторного потенциала в области 3 ($\xi_2 \leq \xi \leq 1$) получается из решения уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dA_3}{dr} \right) = -\mu_0 \sigma j_1,$$

которое в безразмерных переменных имеет вид

$$\frac{1}{\xi} (\xi y_3)' = -\sigma u_1, \quad (14)$$

где u_1 связано с масштабом плотности тока соотношением

$$u_1 = j_1 / j_*. \quad (15)$$

Решение (14) в области 3 ($\xi_2 \leq \xi \leq 1$) имеет вид

$$y_3 = -\frac{\sigma u_1}{4} \xi^2 + c_5 \ln \xi + c_6, \quad (16)$$

где c_5, c_6 – произвольные постоянные. Все произвольные постоянные должны быть определены в процессе решения граничной задачи.

Распределение индукции магнитного поля внутри коаксиального кабеля

Радиальное распределение индукции в трёх областях находим из (6)

$$B_\phi = -B_* \frac{dy}{d\xi}, \quad (17)$$

где

$$B_* = A_* / R = \mu_0 j_0 R / 4 \quad (18)$$

– масштаб индукции магнитного поля.

В первой области $0 \leq \xi \leq \xi_1$ получим

$$\frac{B_1}{B_*} = -y'_1 = u_0 \xi / 2. \quad (19)$$

Из (19) следует, что вектор индукции магнитного поля в области $0 \leq \xi \leq \xi_1$ сонаправлен с \vec{e}_ϕ (единичный азимутальный вектор) и линейно нарастает с радиусом r системы.

Во второй области $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$ получим

$$\frac{B_2}{B_*} = -y'_2 = -c_3 / \xi. \quad (20)$$

$$c_6 = \frac{u_0 \xi_1^2}{4} [2 \ln(\xi_1 / \xi_2) - 1] + \frac{\sigma u_1}{4} (\xi_2^2 - 2 \ln \xi_2). \quad (25)$$

Как видно из значений найденных произвольных постоянных, индукция магнитного поля в первой области положительная и линейно нарастающая. Во второй области она положительна, но всегда убывающая. Затем при переходе через границу раздела ξ_2 индукция испытывает скачок. Во время скачка знак индукции может либо измениться, либо нет. При значении знаковой функции $\sigma = +1$ (оба тока в кабеле одинакового направления) индукция становится отрицательной и при $\xi = 1$ она равна нулю. При значении знаковой функции $\sigma = -1$ (токи кабеля имеют противоположные направления) она остаётся положительной, испытывает либо положительный, либо отрицательный скачок и при $\xi = 1$ обращается в нуль.

Индуктивности коаксиального кабеля

Полная индуктивность L коаксиального кабеля складывается из трёх индуктивностей:

1) токовой L_1 , которая возникает в области 1;

Из (20) следует, что вектор индукции магнитного поля в области $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$ при $c_3 < 0$ также сонаправлен с \vec{e}_ϕ и убывает с ростом радиуса r системы.

В области 3 $\xi_2 \leq \xi \leq 1$ получим

$$\frac{B_3}{B_*} = -y'_3 = \sigma u_1 \xi / 2 - c_5 / \xi. \quad (21)$$

Из (21) следует, что вектор индукции магнитного поля в области $\xi_2 \leq \xi \leq 1$ при $c_5 < 0$ может быть сонаправлен с \vec{e}_ϕ при $\sigma = +1$, а может быть противоположного направления с \vec{e}_ϕ при $\sigma = -1$. Уточнение распределения индукции и векторного потенциала магнитного поля коаксиального кабеля может быть проведено после определения произвольных постоянных на трёх границах системы.

Постоянные c_3 и c_4 определяем из условия непрерывности функции потенциала и её производной на границе областей $\xi = \xi_1$

$$c_3 = -u_0 \xi_1^2 / 2; \quad (22)$$

$$c_4 = u_0 \xi_1^2 (2 \ln \xi_1 - 1) / 4. \quad (23)$$

Постоянную c_5 определяем из требования равенства нулю индукции магнитного поля на внешнем радиусе R

$$c_5 = \sigma u_1 / 2. \quad (24)$$

Постоянную c_6 определяем из равенства потенциалов на границе ξ_2

2) потоковой L_2 , которая характеризует область 2;

3) токовой L_3 , которая возникает в области 3. А именно:

$$L = L_1 + L_2 + L_3. \quad (26)$$

Поясним, что мы под этим понимаем. Наличие трёх областей, в которых магнитное поле распределено по разным законам, указывает на то, что индуктивность прямолинейного круглого тока складывается из трёх частей. Первая часть соответствует индуктивности, которая связана с потоком магнитного поля в области 1. В ней силовые линии магнитного поля поперечны линиям плотности тока. В связи с этим её удобно назвать первой токовой частью коаксиальной индуктивности.

Вторая часть соответствует индуктивности, которая связана с магнитным потоком, находящимся в области 2. В этой области нет тока, поэтому её удобно назвать потоковой частью коаксиальной индуктивности.

Третья часть соответствует индуктивности, которая связана с потоком магнитного поля в области 3. В ней силовые линии магнитного поля снова поперечны линиям плотности тока. В связи с этим её удобно назвать второй токовой частью коаксиальной индуктивности.

Если цилиндрический коаксиальный кабель разрезать по оси (рис. 2), то видна

$$\Phi_1 = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_S B_\phi dS_\phi = \int_0^l dz \int_0^{r_1} B_1(r) dr = \Phi_* \xi_1^2 / 2, \quad (27)$$

где $\Phi_* = A_* l \mu_0 / 2$ – масштаб потока. Между током в области 1 и потоком существует базовая связь

$$\Phi_1 = L_1 i_1, \quad (28)$$

где L_1 – первая токовая коаксиальная индуктивность. Подставляя в (28) ток, выраженный через плотность тока и площадь обла-

сть, по которой следует интегрировать при вычислении потока в области 1. Ось проводника обозначена OO' , а элементарная площадка интегрирования dS – заштрихована. Для областей 2 и 3 площадка dS перемещается в соответствующую область.

Вычисляя магнитный поток в области 1, получим

сти 1, получим погонную индуктивность в виде

$$\frac{L_1}{l} = \frac{\mu_0}{4\pi} = \text{const}. \quad (29)$$

Как видно из (29), она с точностью до постоянной величины совпадает с магнитной постоянной.

Рассуждая аналогично для области 2, получим

$$\Phi_2 = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_S B_\phi dS_\phi = \int_0^l dz \int_{r_1}^{r_2} B_2(r) dr = \Phi_* \xi_1^2 \ln(\xi_2 / \xi_1). \quad (30)$$

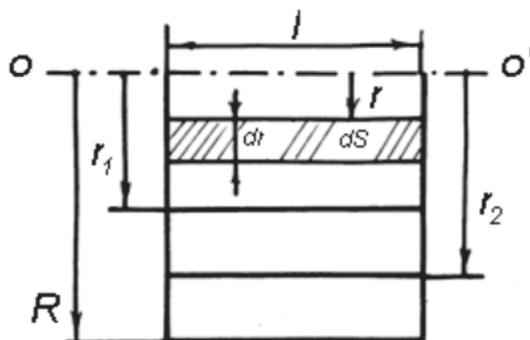


Рис. 2. Площадка интегрирования при вычислении потока в области 1

$$\Phi_3 = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_S B_\phi dS_\phi = \int_0^l dz \int_{r_2}^R B_3(r) dr = \sigma \Phi_* \left[(1 - \xi_2^2) / 2 + \ln \xi_2 \right]; \quad (32)$$

где масштаб потока

$$\Phi_* = A_* l \mu_0 / 2. \quad (33)$$

Значение магнитного потока будет положительно (токи текут в противоположные стороны) при $\sigma = -1$, и отрицательно, если токи в коаксиальном кабеле текут сонаправленно.

Ток, создающий поток Φ_3 , складывается из всех токов, протекающих в системе

$$i = j_0 \pi r_1^2 + \sigma j_1 \pi (R^2 - r_2^2). \quad (34)$$

Учитывая связь (28) между Φ_3 и (34), получим для второй токовой по-

гонной индуктивности кабеля соотношение

$$\frac{L_2}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(\xi_2 / \xi_1). \quad (31)$$

Вычисление третьей токовой погонной индуктивности сводится к вычислению потока, в котором индукция, а стало быть, и поток в области интегрирования может быть отрицательной (зависит от знака σ):

гонной индуктивности кабеля соотношение

$$\frac{L_3}{L_*} = \frac{4\pi L_3}{\mu_0 l} = \frac{\sigma u (1 - \xi_2^2 + 2 \ln \xi_2)}{\left[\xi_1^2 + \sigma u (1 - \xi_2^2) \right]}, \quad (35)$$

где

$$L_* = \mu_0 l / (4\pi) \quad (36)$$

– масштаб индуктивности,

$$u = \frac{i_1}{i_0} \frac{\xi_1^2}{(1 - \xi_2^2)} \quad (37)$$

– параметр, связанный с отношением токов, протекающих в коаксиальном кабеле.

В табл. 1 приведены значения второй токовой индуктивности в зависимости от отношения токов u . Её значения вычис-

лены при следующих предположениях: $\xi_1 = 0,25$; $\xi_2 = 0,75$; токи сонаправлены ($\sigma = +1$).

Таблица 1

Приведённые значения второй токовой индуктивности при токах одного направления ($\sigma = +1$)

i_1/i_0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$-L_3/L_*$	0,53	0,90	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21

Как видно из табл. 1, вторая токовая индуктивность всегда отрицательная. Физические причины этого становятся понятными. Индуктивность с ростом отношения токов сначала увеличивается почти в два раза, затем начинает падать, а потом снова медленно увеличиваться. Индуктивность может изменяться в четыре раза при изменении отношения токов в десять раз.

Полная индуктивность кабеля для выбранных расчётных значений оказывается всегда положительной величиной.

В табл. 2 приведены значения второй токовой индуктивности в зависимости от отношения токов. Значения вычислены при следующих предположениях: $\xi_1 = 0,25$; $\xi_2 = 0,75$; токи имеют противоположное направление ($\sigma = -1$).

Таблица 2

Приведённые значения второй токовой индуктивности при токах противоположного направления ($\sigma = -1$)

i_1/i_0	0,85	0,90	0,95	1,05	1,1	1,15	1,20
L_3/L_*	1,79	2,84	5,99	-6,62	-3,47	-2,42	-1,89

Как видно из табл. 2, в этом случае вторая токовая индуктивность может быть как положительной, так и отрицательной. Она может принимать большие значения в области, где токи становятся близки друг другу по величине. В этом случае знаменатель выражения (35) обращается в нуль при выполнении условия

$$u = \xi_1^2 / (1 - \xi_2^2). \quad (38)$$

Тогда возможен случай, когда величина $L_3/L_* = -6,62$ при значении отношения токов 1,05 (табл. 2). При таких больших значениях второй токовой индуктивности полная индуктивность коаксиального кабеля будет отрицательной

$$\frac{L}{L_*} = 1 + 2 \ln(\xi_2 / \xi_1) + \frac{L_3}{L_*} = -3,42.$$

Полученные значения индуктивности следует считать идеализированными, поскольку вычисления проводились на постоянном токе. Эти же значения могут реализовываться на переменном токе на частотах, при которых фазовый сдвиг между током и потоком будет близок к нулю.

Выводы

1. Предложен аналитический метод расчёта радиального распределения векторного потенциала и индукции магнитно-

го поля в бесконечно длинном коаксиальном кабеле.

2. Уравнение магнитостатики, записанное для векторного потенциала, решается для трёх областей коаксиального кабеля, на которых сформулированы граничные условия.

3. Радиальное распределение магнитной индукции таково, что в первой области она положительна и линейно нарастает с увеличением радиуса.

4. Во второй области магнитная индукция убывает с ростом радиуса, оставаясь положительной.

5. При переходе через границу раздела между второй и третьей областями индукция магнитного поля испытывает скачок. Скачок может быть как со сменой знака, так и без нее.

6. Когда оба тока в кабеле имеют одинаковые направления, то индукция в третьей области становится отрицательной, а при $\xi = 1$ она равна нулю.

7. Когда оба тока в кабеле имеют противоположные направления, индукция магнитного поля в этой области остаётся положительной, но испытывает либо положительный, либо отрицательный скачок и при $\xi = 1$ обращается в нуль.

8. Полная индуктивность коаксиального кабеля складывается из трёх погонных индуктивностей: двух токовых, которые возникают в областях 1 и 3, и одной потоковой, которая формируется в области 2.

9. Вычисление первой токовой индуктивности показывает, что её значение пропорционально магнитной постоянной.

10. Вычисление потоковой индуктивности указывает на то, что её значение оказывается пропорциональным логарифму отношения радиусов второй и первой областей.

11. Вычисление токовой индуктивности в области 3 указывает на то, что она может быть управляема соотношением и направлением токов в центральной жиле и оплётке.

12. При совпадении направлений обоих токов она мала и отрицательна. Её значение не может изменить положительный характер полной индуктивности коаксиального кабеля.

13. При токах разных направлений эта часть индуктивности становится большой и может быть при одном отношении токов положительной, а при другом отношении токов – отрицательной.

14. Численное моделирование для конкретных размеров областей показывает, что при определённых значениях противоположных токов индуктивность становится отрицательной и настолько большой, что знак полной индуктивности коаксиального кабеля тоже может стать отрицательным.

Список литературы

1. Манжула В.Г. Информационная поддержка синтеза схемотехнически интегрированных принципиальных электрических схем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – Т. 2. – № 145. – С. 144–150.
2. Манжула В.Г. Оценка интегральной избыточности в процессе синтеза микросистемных систем // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 4. – С. 33.
3. Манжула В.Г. Снижение параметрической избыточности в импульсных компенсационнопараметрических стабилизаторах напряжения // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 1. – С. 199.
4. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
5. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Манжула В.Г. О расчёте коэффициента увеличения планарной индуктивности спирального типа // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11–6. – С. 1150–1153.
6. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Манжула В.Г., Сапунцов Н.Е., Нестюрина Е.Е. Индуктивность сплошного проводящего цилиндра с азимутальной плотностью вихревого тока в низкочастотной области // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11–3. – С. 441–446.
7. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Марчук В.И. Поток индуктивности плоского проводящего кольца с азимутальной плотностью тока // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 5. – С. 68–72.

8. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Марчук В.И., Манжула В.Г. Погонная индуктивность цилиндрических проводников с аксиальной плотностью тока в сложных функциональных блоках // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 22. – № 4–1 (22). – С. 79.

9. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Марчук В.И., Манжула В.Г., Будяков А.С. Индуктивные свойства микроскопического проводящего кольца с плотностью вихревого тока азимутального направления // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 1. – С. 22–26.

References

1. Manzhula V.G. Informacionnaya podderzhka sinteza shemotehnicheskii integrirovannyh principialnyh elektricheskikh shem. Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie. 2012. T. 2. no. 145. pp. 144–150.
2. Manzhula V.G. Ocenka integralnoy izbytochnosti v processe sinteza mikroelektronnyh sistem. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2011. no. 4. p. 33.
3. Manzhula V.G. Snizhenie parametricheskoy izbytochnosti v impulsnyh kompensacionnparametricheskikh stabilizatorah napryazheniya. Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzhya. 2012. no. 1. pp. 199.
4. Matveev A.N. Electrichestvo i magmetizm. M.: Vysshaya shkola. 1983. 463 p.
5. Sapogin V.G., Prokopenko N.N., Manzhula V.G. O raschyote koeficienta uvelicheniya planarnoy induktivnosti spiralnogo tipa. Fundamentalnye issledovaniya. 2013. no. 11-6. pp. 1150–1153.
6. Sapogin V.G., Prokopenko N.N., Manzhula V.G., Sapuncov N.E., Nesturina E.E. Induktivnost sploshnogo provodyaschego cilindra s azimutalnoy plotnostu vihrevogo toka v nizkochastotnoy oblasti. Fundamentalnye issledovaniya. 2013. no. 11–3. pp. 441–446.
7. Sapogin V.G., Prokopenko N.N., Marchuk V.I. Potokovaya induktivnost ploskogo provodyaschego kolca s azimutalnoy plotnostu toka. Uspehi sovremennoy radioelektroniki. 2012. no. 5. pp. 68–72.
8. Sapogin V.G., Prokopenko N.N., Marchuk V.I., Manzhula V.G. Pogonnaya induktivnost cilindricheskikh provodnikov s aksialnoy plotnostu toka v slozhnyh funktsionalnyh bloках. Inzhenernyy vestnik Dona. 2012. T. 22. no. 4–1 (22). pp. 79.
9. Sapogin V.G., Prokopenko N.N., Marchuk V.I., Manzhula V.G., Budyakov A.S. Induktivnye svoystva mikroscopiccheskogo provodyaschego kolca s plotnostu vihrevogo toka azimutalnogo napravleniya. Nano- i mikrosistemnaya tehnika. 2014. no. 1. pp. 22–26.

Рецензенты:

Бубнов В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин, ГБОУ ВПО «Московский городской педагогический университет», г. Москва;

Крутчинский С.Г., д.т.н., профессор кафедры систем автоматического управления, ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.

Работа поступила в редакцию 26.03.2014.