


DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-130-136
УДК 621.317.441

Г.Н. Цицикян , М.Ю. Антипов, С.Н. Кунаев
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

КОЭФИЦИЕНТЫ ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ И САМОИНДУКЦИИ ОДНОСЛОЙНЫХ И ДВУХСЛОЙНЫХ КАТУШЕК

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются однослойные и двухслойные катушки. Цель – совершенствование работы судовых энергетических систем.

Материалы и методы. В работе использованы методы математической физики и теоретической электротехники.


Основные результаты. Дан анализ существующих методов и рекомендаций по расчету индуктивностей однослойных и двухслойных катушек. На основе сопоставительного анализа предложены выражения, исключающие применение табличных значений.

Заключение. Записаны строгие выражения, содержащие специальные функции, вытекающие из наложения ряда идеализированных представлений. В качестве одного из них дается формула для индуктивности через сферические функции Лежандра с полуцелым индексом. Сопоставлением рекомендуемых выражений для индуктивностей двухслойных катушек не выявлено существенных различий.

Ключевые слова: индуктивность, самоиндукция, однослойные катушки, двухслойные катушки, соленоид.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-130-136
UDC 621.317.441

G. Tsitsikyan , M. Antipov, S. Kunaev
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

MUTUAL INDUCTION AND SELF-INDUCTION COEFFICIENTS OF SINGLE- AND DOUBLE-LAYER COILS

Object and purpose of research. This paper discusses single- and double-layer coils. The purpose of the study was to improve the operation of ship power systems.

Materials and methods. The study relied on the methods of mathematical physics and theoretical electric engineering.

Main results. The study analyses current methods and recommendations for inductance calculations of single- and double-layer coils. Based on the comparative analysis, the paper suggests the expressions that make it possible to do without the tabular values.

Conclusion. The study yielded strict expressions with special functions that entail from the overlapping of a number of idealized representations. As an example for one of them, the paper gives a formula expressing the inductance in terms of spherical Legendre functions with semi-integer index. The comparison of recommended calculation expressions for double-layer coil inductance has not found any significant deviations.

Keywords: inductance, self-induction, single-layer coils, double-layer coils, solenoid.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Соленоиды являются идеализированным представлением для реальной катушки, намотанной

проводом малого сечения на цилиндрический каркас без учета угла намотки. Выражение для коэффициента самоиндукции такой катушки имеет ряд видоизменений, и здесь будут затронуты наиболее известные из них.

Для цитирования: Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю., Кунаев С.Н. Коэффициенты взаимной индукции и самоиндукции однослойных и двухслойных катушек. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 130–136.

For citations: Tsitsikyan G., Antipov M., Kunaev S. Mutual induction and self-induction coefficients of single- and double-layer coils. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 130–136 (in Russian).

Расчет индуктивностей однослойных катушек

Inductance calculation for single-layer coils

Можно предположить, что катушки с фиксированным числом витков при неизменном радиусе будут отличаться по индуктивности из-за учета расстояния между витками так, как это показано на рис. 1.

Выражение для индуктивности катушки в конфигурации и в обозначениях рис. 1 представлено в [1] в виде:

$$L = \frac{\pi \mu_0 r^2 w^2}{\sqrt{4r^2 + (w-1)^2 s_w^2}} = \frac{\pi \mu_0 r^2 w^2}{\sqrt{4r^2 + l^2}}, \quad (1)$$

где w – количество витков; $l = (w-1)s_w$ – длина; s_w – шаг намотки; r – радиус витка.

Если пренебречь зазором между витками и считать, что провода практически заполняют межвитковое пространство, то для нахождения индуктивности такой соленоидальной катушки с числом витков w и с шагом намотки s_w можно воспользоваться способом вычислений на основе формулы (6–2) в [2]:

$$L = \frac{\pi}{4} \mu_0 w^2 \frac{4r^2}{(w-1)s_w} K_\alpha = \frac{\pi \mu_0 r^2 w^2}{(w-1)s_w} K_\alpha, \quad (2)$$

где величина K_α является функцией α ,

$$\alpha = \frac{(w-1)s_w}{2r} = \frac{l}{d}, \quad (3)$$

и определяется по [2, табл. 6.2] по α или по α^{-1} . Здесь: l – длина; d – диаметр катушки; w – количество витков; r – радиус витка, $r = d/2$.

Выберем для сравнения (1) и (2) следующие значения: $s_w = 0,008$ м, $w = 50$, $r = 0,15$ м. Сопоставляя (1) и (2), приходим к заключению, что результаты вычислений можно сравнивать по выражениям:

$$[4r^2 + (w-1)^2 s_w^2]^{-1/2} \text{ и } [(w-1)s_w]^{-1} K_\alpha.$$

Пусть $r = 0,15$ м, $(w-1) = 49$, $s_w = 0,008$ м. Тогда (3) равно $\cong 1,3067$ и $\alpha^{-1} \cong 0,7653$.

По [2, табл. 6.2] имеем

$$K_\alpha = 0,7439 \text{ и } \frac{K_\alpha}{(w-1)s_w} \cong \frac{0,7439}{49 \cdot 0,008} \cong 1,8977 \text{ м}^{-1}.$$

Сопоставим с величиной

$$(4r^2 + l^2)^{-1/2} = [4 \cdot 0,15^2 + (49 \cdot 0,008)^2]^{-1/2} \cong$$

$$\cong 2,0257 \text{ м}^{-1} > 1,8977 \text{ м}^{-1}.$$

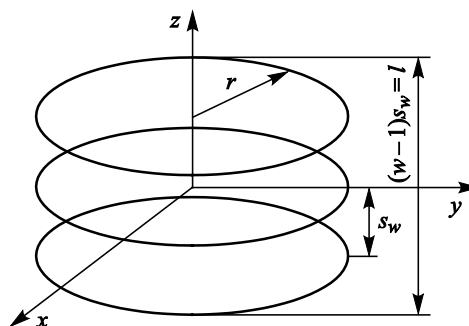


Рис. 1. Однослойная катушка в виде совокупности тонких витков без учета угла намотки

Fig. 1. Single-layer coil as a totality of thin loops (winding angle not considered)

Поэтому, умножая на общий множитель ($\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,15^2 \cdot 50^2$), будем иметь соответственно по (1) $0,4498 \cdot 10^{-3}$ Гн и по (2) $0,4214 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Для соленоидов с отношением длины l к диаметру d , большим 0,4 ($\alpha = l/d > 0,4$), рекомендовано простое выражение [3]:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} w^2 d \frac{\pi^2}{\alpha + 0,45}, \quad (4)$$

которое дает удовлетворительные результаты при указанных ограничениях.

При $l = (w-1)s_w = 49 \cdot 0,008 = 0,392$ м, $d = 0,3$ м, $\alpha = l/d = 1,3067$ получим:

$$L = 10^{-7} \cdot 50^2 \cdot 0,3 \frac{\pi^2}{1,3067 + 0,45} = 0,42137 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

т.е. имеем практическое совпадение с результатом по формуле (2), но без использования таблиц. Формулу (4) можно видоизменить и записать так [4]:

$$L = \frac{\pi \mu_0 w^2 r}{l + 0,9r}. \quad (4')$$

Между тем, строгое выражение для индуктивности соленоида записано в нескольких видоизменениях в системе SI. Одно из них дано в виде [5]:

$$L = \frac{8\mu_0 r^3 w^2}{3l^2} \left[\frac{2k^2 - 1}{k^3} E(k) + \frac{1 - k^2}{k^3} K(k) - 1 \right], \quad (5)$$

$$\text{где } k^2 = \frac{4r^2}{4r^2 + l^2}. \quad (6)$$

* Это т.н. SI-версия представления по Лоренцу.

Другой вариант записи имеется в [2] и может быть представлен в виде:

$$L = \mu_0 w^2 \frac{2r}{3} \left[\sqrt{\alpha^2 + 1} \left(K + \frac{1 - \alpha^2}{\alpha^2} E \right) - \frac{1}{\alpha^2} \right], \quad (7)$$

$$\text{где } \alpha^2 = \frac{1 - k^2}{k^2}. \quad (8)$$

Преобразуем (7) с учетом (8) к следующему виду:

$$\begin{aligned} L &= \mu_0 w^2 \frac{2r}{3} \left[\frac{1}{k} \cdot \left(K + \frac{2k^2 - 1}{1 - k^2} E \right) - \frac{k^2}{1 - k^2} \right] = \\ &= \mu_0 w^2 \frac{2r}{3} \cdot \frac{k^2}{1 - k^2} \left[\frac{2k^2 - 1}{k^3} E + \frac{1 - k^2}{k^3} K - 1 \right]. \end{aligned}$$

Поскольку $\frac{k^2}{1 - k^2} = \frac{4r^2}{l^2}$, то снова приходим к формуле (5).

Третий вариант записи имеется в [6]:

$$L = \frac{\mu_0 w^2 r^2}{3l} \left[\frac{l \sqrt{4r^2 + l^2}}{r^2} \cdot (K(k) - E(k)) + \frac{4 \sqrt{4r^2 + l^2}}{l} E(k) - \frac{8r}{l} \right], \quad (9)$$

$$\text{где, как и прежде, } k^2 = \frac{4r^2}{4r^2 + l^2}.$$

Вынося за квадратную скобку $8r/l$, нетрудно убедиться в идентичности формул (5) и (9).

Еще одна модификация выражения (5) для индуктивности L дана в работе [7]. В принятых обозначениях она выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 w^2}{3} \cdot \sqrt{4r^2 + l^2} \cdot \left[K - E + \frac{4r^2}{l^2} \left(E - \frac{2r}{\sqrt{4r^2 + l^2}} \right) \right] = \\ &= \frac{\mu_0 w^2}{3} \cdot \sqrt{d^2 + l^2} \cdot \left[K - E + \frac{d^2}{l^2} (E - k) \right], \end{aligned}$$

где $d = 2r$.

При $d = l$ будем иметь $k^2 = \frac{1}{2}$ и

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 w^2}{3} d \sqrt{2} \left[K \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} \right] = \\ &= \frac{\mu_0 w^2}{3} d \sqrt{2} (1,8541 - 0,7071) = \mu_0 w^2 d \cdot 0,5407, \end{aligned}$$

а по формуле (4): $\mu_0 w^2 d \cdot 0,5416$.

Следует подчеркнуть, что строгие выражения для индуктивности соленоидов с круговой формой сечения могут быть представлены и через другие специальные функции. В руководстве [8] записано строгое выражение для индуктивности через сферические функции Лежандра второго рода с полуцелым индексом, а именно:

$$L = \frac{\mu_0 w^2 d}{3} \left(\frac{2}{g - 1} \right) \left[\begin{aligned} &-1 + \frac{3(g^2 - 1)}{4} \cdot Q_{1/2}(g) - \\ &-\frac{3g - 1}{2} (g^2 - 1)^{1/2} Q_{1/2}^1(g) \end{aligned} \right], \quad (10)$$

где

$$Q_{1/2}^1(g) = (g^2 - 1)^{1/2} \frac{dQ_{1/2}(g)}{dg} = \frac{gQ_{1/2}(g) - Q_{-1/2}(g)}{2(g^2 - 1)^{-1/2}} \quad (11)$$

и $g = 2 \left(\frac{l}{d} \right)^2 + 1$, l – длина соленоида, d – его диаметр.

Эти функции связаны с полными эллиптическими интегралами соотношениями

$$Q_{-1/2}(g) = kK(k)(g^2 - 1)^{1/2},$$

$$Q_{1/2}(g) - gQ_{-1/2}(g) = -\frac{2}{k} E(k) \text{ и } k^2 = 2(1 + g)^{-1}.$$

Расчет индуктивностей двухслойных катушек

Inductance calculation for double-layer coils

Перейдем к оценке индуктивности двухслойного концентрического соленоида. Его индуктивность, как известно, определяется выражением:

$$L = L_1 + L_2 + 2M_{12}, \quad (12)$$

где L_1 и L_2 – индуктивности внешнего и внутреннего слоев; M_{12} – взаимная индуктивность соленоидов с общей осью (рис. 2).

Индуктивности слоев вычисляются по приведенным формулам и зависимостям, а основным вопросом остается определение взаимной индуктивности слоев. Этому вопросу достаточно внимания уделено в справочнике [2] и в работе [9].

В работе [10] приведено относительно простое выражение для взаимной индуктивности концентрического двухслойного соленоида. В справочнике [2] для слоев одинаковой длины расчет можно произвести по выражению (7–9) при

Рис. 2. Двухслойный соленоид с симметричным расположением слоев относительно центральной плоскости, $2s_1$ и $2s_2$ – длина соответственно внешнего и внутреннего слоев, R_1 и R_2 – радиусы этих слоев

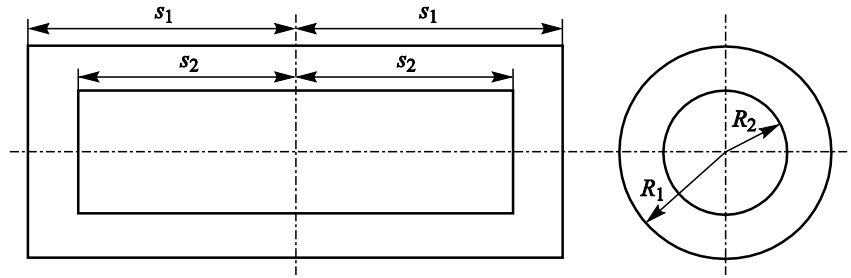


Fig. 2. Double-layer solenoid with symmetric arrangement of layers with respect to the central plane, $2s_1$ and $2s_2$ – length of external and internal layer accordingly; R_1 and R_2 – radii of these layers

одинаковом числе витков в слоях w , записанному в виде:

$$M = \frac{\pi}{4} \mu_0 w^2 \left(\frac{d}{l} \right)^2 (b_1 F_1 - b_2 F_2), \quad (13)$$

где (рис. 2): $b_1 = \frac{1}{2} \sqrt{4R_1^2 + 16s_1^2} = \sqrt{R_1^2 + 4s_1^2}$ и $b_2 = R_1$.

Тогда при $2s_1 = 0,392$ м и $R_1 = 0,16$ м будем иметь $b_1 = 0,4234$ м и $b_2 = 0,16$ м.

При $\delta = \frac{0,28}{0,32} = 0,875$, $\lambda_2^2 = 1,0$ и

$\lambda_1^2 = \left(\frac{R_1}{b_1} \right)^2 = \left(\frac{0,16}{0,4234} \right)^2 = 0,1428$ для выражения,

записанного под номером (13), имеем:

$$M = \frac{\pi}{4} \mu_0 w^2 \left(\frac{0,28}{0,392} \right)^2 (0,4234 F_1 - 0,16 F_2),$$

где F_1 и F_2 подбираются по [2, табл. 7.1] для $\delta = 0,875$, $\lambda_1^2 = 0,1428$ и $\lambda_2^2 = 1,0$.

Тогда $F_1 = 0,997$ и $F_2 = 0,8914$, и результат расчета оказывается равным:

$$M \cong 0,3515 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Альтернативой выражению (13) могут служить формулы для M_{12} , исключаящие применение табличных значений. Первая формула записывается в виде:

$$M_{12} = \frac{\pi \mu_0 w_1 w_2 R_2}{(2s_1 / R_1) \cdot (2s_2 / R_2)} \times \left\{ \sum_{k=1}^2 (-1)^{k-1} \left[(q_k^2 + 1)^{1/2} - \frac{1}{8} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 (q_k^2 + 1)^{-3/2} - \frac{1}{64} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^4 (1 - 4q_k^2)(q_k^2 + 1)^{-7/2} - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{5}{1024} \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^6 (8q_k^4 - 12q_k^2 + 1)(q_k^2 + 1)^{-11/2} \dots \right\}, \quad (14)$$

где $q_1 = -\frac{s_1 + s_2}{R_1}$ и $q_2 = \frac{s_1 - s_2}{R_1}$.

При $s_1 = s_2 = s$ будем иметь: $q_1 = -\frac{2s}{R_1}$ и $q_2 = 0$.

Дополнительно считаем, что $w_1 = w_2 = w$.

Теперь подставим значения $2s$, R_1 , R_2 ($s = 0,392$, $R_1 = 0,16$ м, $R_2 = 0,14$ м, $w = 50$) в (14).

Результат вычислений при ограничении первыми тремя членами ряда для M_{12} оказывается равным $0,3517 \cdot 10^{-3}$ Гн, т.е. весьма близким к значению, полученному ранее ($0,3515 \cdot 10^{-3}$ Гн).

Для сопоставления результатов воспользуемся также формулой для M в [10], а именно:

$$M = \frac{\pi \mu_0 w^2 R_2^2}{2d} \left[1 + \frac{R_1^2 R_2^2}{8d} \left(3 - \frac{l^2}{R_2^2} \right) \right], \quad (15)$$

где $d = \sqrt{R_1^2 + \frac{l^2}{4}}$, R_1 и R_2 – внешний и внутренний радиусы двухслойной катушки; l – общая длина.

Полагая, как и прежде, $w_1 = w_2 = 50$, $R_1 = 0,16$ м, $R_2 = 0,14$ м (рис. 2) и $l = 0,392$ м, имеем $d \cong 0,253$ м и значение $M \cong 0,354 \cdot 10^{-3}$ Гн, близкое численному результату, полученному ранее с помощью табличных значений.

Следует подчеркнуть, что в работе [1], в разделе Stacked multiple layers, приводится выражение для расчета индуктивности двухслойной катушки с учетом конечного радиуса витков, обозначенного как b . Для расчета индуктивности двухслойного соленоида с эквидистантным расстоянием между витками в слое (рис. 3) в [1] приведена формула (10a), которая в используемых здесь обозначениях

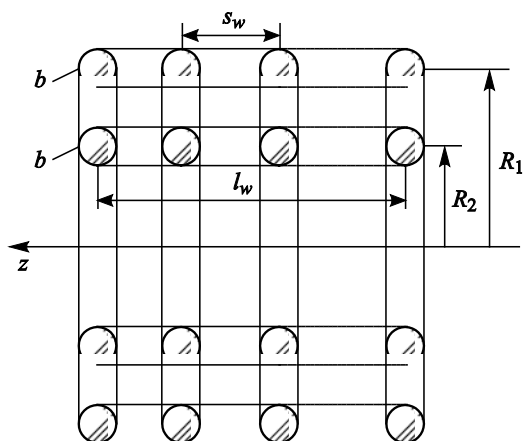


Рис. 3. Двухслойный соленоид с межвитковым расстоянием по оси z : $d_z = s_w$, R_2 и R_1 – радиусы внутреннего и внешнего слоев

Fig. 3. Double-layer solenoid with loop interval along Z axis $d_z = s_w$, R_2 and R_1 – radius of internal and external layer

и одинаковом числе витков в слоях w может быть записана в виде:

$$L = \frac{\pi \mu_0 r_0^3 \cdot (2w)^2}{r_0(w-1)s_w + 0,9r_0^2 + 0,32(w-1)s_w t + 0,84r_0 t} \quad (16)$$

Здесь s_w – шаг намотки в направлении оси z (рис. 3); $r_0 \cong R_2 + b$ и R_2 – радиус внутреннего слоя, принимаемый равным 0,14 м; b – радиус сечения витка. Радиус внешнего слоя R_1 (рис. 3) принят равным 0,16 м. Шаг намотки, как и прежде, равен 0,008 м, и при $w = 50$ имеем $l_w = (w-1) s_w = 0,392$ м.

Величину t в формуле, как это и предписано в [1], имея в виду, что число слоев в направлении оси x , перпендикулярной оси z , равно 2, берем равным $t = 4b$, и $b = 0,004$ м, т.е. за половину шага намотки.

Для сопоставления расчетов по приведенной формуле рассмотрим два варианта: когда $r_0 = 0,14 + b$ и когда $r_0 = 0,14 + 2b$, т.е. принимаем следующие численные значения: 0,144 м и 0,148 м. Наконец, учтем, что $t = 0,016$ м. Подставляя значения r_0 , l_w и t в формулу (16), будем иметь для первого варианта $L \cong 1,491 \cdot 10^{-3}$ Гн, а для второго варианта $L \cong 1,566 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Тогда как взаимная индуктивность concentрических соленоидов одинаковой длины при тех же значениях внутреннего и внешнего радиусов соленоидов (0,14 м и 0,16 м) с тем же ко-

личеством витков в слое (50 витков) и с шагом намотки (0,008 м), рассчитанная на основе рекомендаций справочника [2], оказывается равной $1,54 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Заключение

Conclusion

Апробация рекомендаций по расчету индуктивностей однослойных и двухслойных катушек не только не выявила существенных расхождений в оценке индуктивности, но и расставила приоритеты по их применению.

Целесообразно отказаться от использования табличных значений и выражений, содержащих специальные функции, которые также обусловлены наложением ряда идеализированных представлений.

Для индуктивности однослойной катушки с расстоянием s_w между витками можно пользоваться формулой (1), а для двухслойной катушки при $2s_1 = 2s_2 = l$ – формулой (16). Что же относится к численным методам, описанным, например, в [5] и ограниченным рамками, предписанными для точных решений, то вопросы, связанные с учетом шага намотки, скрутки и многослойности, все еще требуют окончательного разрешения.

Список использованной литературы

1. Magnetic field, Force and Inductance computations for an axially symmetric solenoid / Y.E. Lane, R.C. Youngquist, C.D. Immer, Y.C. Simpson. Hanover : NASA Center for AeroSpace Information, 2001. VI, 16 p. (NASA/TM–2013; № 217918).
2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. 487, [1] с.
3. Thompson M.T. Inductance calculation techniques. Pt. 2: Approximation and handbook methods // PCIM: power electronic systems: components, technology, applications. 1999. Dec. P. 1–11.
4. Ramo S., Whinnery J.R., Duzer T. van. Field and waves in communication electronics. 3rd ed. New York : Wiley, 1994. XIX. 844 p.
5. Weaver R.S. Numerical Methods for Inductance Calculation [Electronic resource] // Bob's Electron Bunker : [site]. [S. l.], 2021. URL: <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods.html> (accessed: 03.12.2021).
6. Wheeler H.A. Inductance Formulas for Circular and Square Coils // Proceedings of the IEEE. 1982.

- Vol. 70. № 12. P. 1449–1451. DOI: 10.1109/PROC.1982.12504.
7. *Snow C.* Formulas for Computing Capacitance and Inductance. National Bureau of Standards Circular 544, 1954. 69 p.
 8. *Цицикян Г.Н., Бобровников П.В., Антипов М.Ю.* Руководство по расчету индуктивностей и электродинамических сил в токоведущих частях электротехнических комплексов. Санкт-Петербург : Крыловский гос. науч. центр, 2020. 118 с.
 9. *Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю.* Коэффициенты взаимной индукции и самоиндукции коаксиальных круговых контуров и соленоидов // Известия Рос. Академии наук. Энергетика. 2019. № 5. С. 80–87. DOI: 10.1134/S0002331019050157.
 10. *Miki A., Hosoya T., Okuyama K.* A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer winding // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1978. Vol. 97, No. 3. P. 930–939. DOI: 10.1109/TPAS.1978.354566.
 11. *Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю.* Расчет индуктивности однослойного и двухслойного соленоидов с учетом особенностей практического применения // Электричество. 2019. № 10. С. 48–53. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-10-48-53.
 7. *Snow C.* Formulas for Computing Capacitance and Inductance. National Bureau of Standards Circular 544, 1954. 69 p.
 8. *G. Tsitsikyan, P. Bobrovnikov, M. Antipov.* Guide-book on calculation of inductances and electrodynamic forces in live parts of electric systems. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2020, 118 pp. (in Russian).
 9. *G. Tsitsikyan, M. Antipov.* Mutual induction and self-induction coefficients in coaxial close-loop circuits and solenoids // Izvestiya of Russian Academy of Sciences. Power Engineering 2019, No. 5, pp. 80–87 (in Russian).
 10. *Miki A., Hosoya T., Okuyama K.* A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer winding // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1978. Vol. 97, No. 3. P. 930–939. DOI: 10.1109/TPAS.1978.354566.
 11. *G. Tsitsikyan, M. Antipov.* Inductance calculation for single- and double-layer solenoid taking into account operational specifics // *Elektrichestvo* (Electricity), 2019, No. 10, pp. 48–53 (in Russian).

References

1. Magnetic field, Force and Inductance computations for an axially symmetric solenoid / *Y.E. Lane, R.C. Youngquist, C.D. Immer, Y.C. Simpson.* Hanover : NASA Center for AeroSpace Information, 2001. VI, 16 p. (NASA/TM–2013; № 217918).
2. *P. Kalantarov, L. Tseilin.* Calculation of inductances. Reference book. 3rd ed., rev. and enl. Leningrad, Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
3. *Thompson M.T.* Inductance calculation techniques. Pt. 2: Approximation and handbook methods // PCIM: power electronic systems: components, technology, applications. 1999. Dec. P. 1–11.
4. *Ramo S., Whinnery J.R., Duzer T. van.* Field and waves in communication electronics. 3rd ed. New York : Wiley, 1994. XIX. 844 p.
5. *Weaver R.S.* Numerical Methods for Inductance Calculation [Electronic resource] // Bob’s Electron Bunker : [site]. [S. l.], 2021. URL: <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods.html> (accessed: 03.12.2021).
6. *Wheeler H.A.* Inductance Formulas for Circular and Square Coils // Proceedings of the IEEE. 1982. Vol. 70. № 12. P. 1449–1451. DOI: 10.1109/PROC.1982.12504.

Сведения об авторах

Цицикян Георгий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

Антипов Михаил Юрьевич, инженер-конструктор 2 категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 6. Тел.: +7 (812) 369-94-91. E-mail: set@sp.ru.

Кунаев Семен Николаевич, инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 6. E-mail: semen-kunaev@mail.ru.

About the authors

Georgy N. Tsitsikyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

Mikhail Yu. Antipov, 2nd Category Design Engineer, TSNII SET, affiliated branch of Krylov State Research

Centre.Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 369-94-91. E-mail: set@sp.ru.

Semyon N. Kunaev, Engineer, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: semen-kunaev@mail.ru.

Поступила / Received: 01.12.21

Принята в печать / Accepted: 09.03.22

© Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю., Кунаев С.Н., 2022