

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-109-114
УДК 621.317.334.3

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

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ МЕЖДУ СООСНЫМИ ПЛОСКИМИ КАТУШКАМИ КРУГОВОЙ ФОРМЫ

Объект и цель научной работы. Бесконтактная трансмиссия электроэнергии для различных объектов морской техники.

Материалы и методы. В работе использованы методы теоретической электротехники.

Основные результаты. Даны расчетные оценки электродинамических сил, действующих на индуктивно связанные соосные плоские катушки круговой формы.

Заключение. Получены выражения для электродинамических сил для сопрягаемых индуктивно связанных катушек круговой формы при бесконтактной передаче электроэнергии.

Ключевые слова: индуктивная трансмиссия, беспроводная передача электроэнергии, плоские круговые катушки.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-109-114
UDC 621.317.334.3

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

ELECTRODYNAMIC FORCES BETWEEN FLAT CIRCULAR COAXIAL COILS

Object and purpose of research. Non-contact power transfer to various marine facilities.

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

Main results. This paper gives analytical estimates for electrodynamic forces acting on inductively-coupled coaxial flat coils of circular shape.

Conclusion. The study yielded the expressions for the electrodynamic forces in inductively coupled circular coils interfaced so as to perform non-contact power transfer.

Keywords: inductive transfer, non-contact power transfer, flat circular coils.
The authors declare no conflicts of interest.

Как отмечено в целом ряде публикаций [1–3, 5, 6], применение беспроводной передачи электроэнергии на основе индуктивной трансмиссии приобретает все большее распространение в области электротехники и силовой электроники, а также в сфере биомедицинского оборудования. Индуктивная трансмиссия предполагает применение катушек различной формы, в т.ч. квадратных и круглых.

В связи с этим возникает настоятельная необходимость в определении ряда ключевых величин, к числу которых прежде всего следует отнести коэффициент взаимной индукции. Из-за близости индуктивно связанных катушек большое значение приобретает оценка их силового взаимодействия, в т.ч. без магнитопровода, и здесь будут даны выражения для электродинамических сил с учетом геометрии сопрягаемых катушек.

Для цитирования: Цицикян Г.Н., Кунаев С.Н. Электродинамические силы между соосными плоскими катушками круговой формы. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 4(402): 109–114.

For citations: Tsitsikyan G.N., Kunaev S.N. Electrodynamical forces between flat circular coaxial coils. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 4(402): 109–114 (in Russian).

За основу принято выражение для взаимной индуктивности двух одинаковых плоских катушек круговой формы, записанное для конфигурации соосных плоских катушек круговой формы в [7] в виде выражения (7–36). Однако в силу предполагаемой малости размеров r и x по сравнению со средним диаметром d круговых плоских катушек (рис. 1) в выражении для взаимной индукции (7–36) сохранены только члены с ρ_2 и ξ^2 , где $\rho = r/d$ и $\xi = x/d$.

Это выражение с небольшим видоизменением записано как

$$M = \frac{\mu_0}{4} w^2 d \Phi, \quad (1)$$

где w – количество витков в сопрягаемых катушках, и предположено, что $\rho = r/d \leq 0,5$ и $\xi = x/d \leq 1/3$.

Учитывая сказанное,

$$\begin{aligned} \Phi = & \left[\left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{x^2}{d^2} + \frac{r^2}{24d^2} \right) \ln \left(\frac{16d^2}{x^2 + r^2} \right) + \right. \\ & + \frac{x^2}{r^2} \left(1 + \frac{5}{8} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) \ln \left(1 + \frac{r^2}{x^2} \right) - 4 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) \left(\frac{x}{r} \arctg \frac{r}{x} \right) - \\ & \left. - 1 + \frac{37}{24} \cdot \frac{x^2}{d^2} + \frac{43}{144} \frac{r^2}{d^2} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

и в пренебрежении членами более высокого порядка малости при ограничении по ρ и по ξ .

Заметим еще, что

$$\arctg \frac{r}{x} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{x}{r}. \quad (3)$$

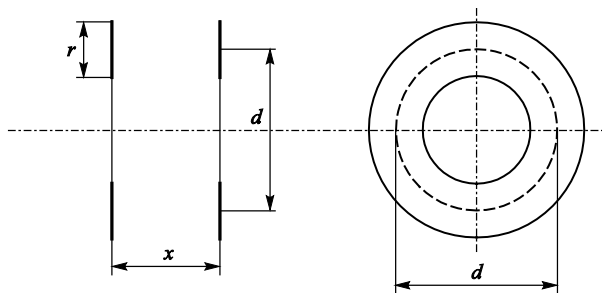


Рис. 1. Две сопрягаемые плоские катушки со средним диаметром d , шириной намотки r и расстоянием между плоскостями, равным x

Fig. 1. Two interfaced flat coils with average diameter d , winding width r and inter-plane distance x

Тогда на основании (1–3) для электродинамической силы взаимодействия f_x при токах в катушках i_1 и i_2 имеем:

$$\begin{aligned} f_x = & \frac{\mu_0 i_1 i_2 w^2 d}{4} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\mu_0 i_1 i_2 w^2 d}{4} \times \\ & \times \left[\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{x}{d^2} \right) \ln \left(\frac{16d^2}{x^2 + r^2} \right) - \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{x^2}{d^2} + \frac{r^2}{24d^2} \right) \cdot \frac{2x}{x^2 + r^2} + \right. \\ & + \left(\frac{2x}{r^2} + \frac{5}{2} \cdot \frac{x^3}{d^2 r^2} \right) \ln \left(1 + \frac{r^2}{x^2} \right) + \frac{x^2}{r^2} \left(1 + \frac{5}{8} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) \left(\frac{2x}{x^2 + r^2} - \frac{2}{x} \right) - \\ & - \frac{4}{r} \left(1 + \frac{2x^2}{d^2} \right) \arctg \left(\frac{r}{x} \right) - \frac{4x}{r} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) \frac{\partial}{\partial x} \times \\ & \times \left[\left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{x}{r} \right) + \frac{37}{12} \cdot \frac{x}{d^2} \right] = \frac{\mu_0 i_1 i_2 w^2}{4} \times \\ & \times \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{x}{d} \ln \left(\frac{16d^2}{x^2 + r^2} \right) - \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{x^2}{d^2} + \frac{r^2}{24d^2} \right) \frac{2xd}{x^2 + r^2} + \right. \\ & + \left(\frac{2xd}{r^2} + \frac{5}{2} \cdot \frac{x^3}{dr^2} \right) \ln \left(1 + \frac{r^2}{x^2} \right) - \left(1 + \frac{5}{8} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) \frac{2xd}{x^2 + r^2} - \\ & \left. - \frac{4d}{r} \left(1 + \frac{2x^2}{d^2} \right) \arctg \left(\frac{r}{x} \right) + \frac{4xd}{x^2 + r^2} \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) + \frac{37x}{12d} \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

После ряда преобразований f_x можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} f_x = & \frac{\mu_0 i_1 i_2 w^2}{4} \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{x}{d} \ln \left(\frac{16d^2}{x^2 + r^2} \right) + \frac{3x}{d} + \right. \\ & + \frac{xd}{r^2} \left(2 + \frac{5}{2} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) \ln \left(1 + \frac{r^2}{x^2} \right) - \frac{4d}{r} \left(1 + \frac{2x^2}{d^2} \right) \arctg \frac{r}{x} \left. \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

Теперь при $r \rightarrow 0$, $w = 1$ будем иметь:

$$\begin{aligned} f_x = & \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4} \left[3 \frac{x}{d} \ln \frac{4d}{x} + \frac{3x}{d} + \frac{d}{x} \left(2 + \frac{5}{2} \cdot \frac{x^2}{d^2} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{4d}{x} \left(1 + \frac{2x^2}{d^2} \right) \right] = \mu_0 i_1 i_2 \left(\frac{3x}{4d} \ln \frac{4d}{x} - \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{x} - \frac{5}{8} \cdot \frac{x}{d} \right). \quad (6) \end{aligned}$$

Воспользуемся теперь выражением для взаимной индуктивности двух витков, записанного как

(5–17) в [7], и, учитывая члены с x/d не выше второй степени, будем иметь:

$$M = \mu_0 \frac{d}{2} \left[\left(1 + \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right) \ln \frac{4d}{x} - 2 - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Определяя на основе (7) производную $\partial M/\partial x$, получим для силы f выражение (6). Тем самым проверяется и правильность выражения (5). Можно теперь оценить влияние конечной ширины r катушки, сопоставляя (5) и (6) без учета размерного коэффициента $\mu_0 i_1 i_2$ и при $w = 1$. В этом случае по выражению (6), принимая $x/d = 0,2$, получаем следующий численный результат:

$$\frac{3}{4} 0,2 \ln \frac{4}{0,2} - 0,5 \frac{1}{0,2} - 0,625 \cdot 0,2 =$$

$$= 0,4494 - 2,5 - 0,125 = -2,1756.$$

Теперь примем и отношение r/d равным 0,2. Тогда в соответствии с выражением (5) с учетом 1/4 найдем, что численная оценка для выражения в квадратных скобках (5), умноженная на 1/4, равна $-1,8746$. Полагая теперь, что $x/d = 0,2$, но $r/d = 0,4$, будем иметь оценку $-1,4544$. В таблице для трех значений r/d дана численная оценка безразмерного параметра, входящего в (5).

Таким образом, с увеличением отношения r/d при $x/d = 0,2$ оценка имеет тенденцию к снижению. Следовательно, численные значения заметно различаются, если учитывать конечный размер r сопрягаемых конструкций плоских катушек.

Следует заметить, что катушка с шириной намотки r и усредненным диаметром d испытывает растягивающие усилия, направленные вдоль радиусов из точки пересечения диаметров d с осевой линией (рис. 2) [8].

При $p = r/d \leq 0,2$ индуктивность L такой катушки можно записать в виде [8]

$$L = \frac{\mu_0 w^2 d}{2} \left(\ln \frac{4d}{r} - 0,5 \right)$$

соответственно силу по направлению s как

$$f_s = \frac{\mu_0 w^2 i^2}{2} \left(\ln \frac{4d}{r} + 0,5 \right).$$

Полагая $r/d = 0,2$, будем иметь для этой силы

$$f_s = \mu_0 w^2 i^2 \cdot 1,748,$$

где w – число витков и i – ток в витке.

Таблица. Численная оценка безразмерного параметра

Table. Numerical estimate of the non-dimensional parameter

r/d	0,2	0,3	0,4
$x/d = 0,2$	-1,875	-1,652	-1,454

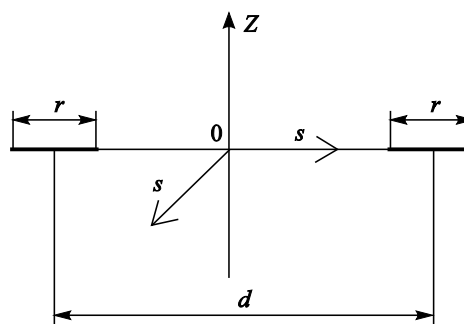


Рис. 2. Плоская катушка с шириной намотки r с усредненным диаметром d

Fig. 2. Flat coil with winding width r and average diameter d

Заметим еще, что при токах i_1 и i_2 , изменяющихся по синусоидальному закону как $\sqrt{2}I_1 \sin(\omega t)$ и $\sqrt{2}I_2 \sin(\omega t - \varphi)$, и тем самым $i_1 i_2 = I_1 I_2 [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$, средняя во времени сила взаимодействия будет определяться выражением $\frac{\mu_0 I_1 I_2 w^2 \cos \varphi}{4}$, умноженным на квадратную скобку в (5).

Уместно здесь рассмотреть и строгое выражение для коэффициента взаимной индукции соосных витков, в т.ч. разных радиусов.

Строгое выражение для взаимной индуктивности двух витков радиусами R_1 и R_2 известно и записано в виде [9]

$$M = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} Q_1 \left(\frac{g}{2} \right), \quad (8)$$

где $Q_1 \left(\frac{g}{2} \right)$ – присоединенная сферическая функция

Лежандра второго рода с полуцелым индексом,

$$g = \frac{x^2 + R_1^2 + R_2^2}{2R_1 R_2}$$

и x – расстояние между плоскостями расположения двух контуров.

Выражая R_1 и R_2 через $d_1/2$ и $d_2/2$, будем иметь для M :

$$M = \frac{\mu_0}{2} \sqrt{d_1 d_2} Q_1(g),$$

$$\text{где } g = 2 \frac{x^2 + \frac{d_1^2}{4} + \frac{d_2^2}{4}}{d_1 d_2}.$$

Полагая теперь $d_1 = d_2 = d$, запишем в этом частном случае

$$M = \frac{\mu_0}{2} d Q_1(g), \quad (9)$$

$$\text{где } g = \frac{2x^2 + d^2}{d^2} = 1 + \frac{2x^2}{d^2}. \quad (10)$$

Учитывая, что в [8] $Q_1(g)$ записано через полные эллиптические интегралы $K(k)$ и $E(k)$, а именно

$$Q_1(g) = Q_1\left(\frac{2-k^2}{k^2}\right) = \left(\frac{2}{k} - k\right) K(k) - \frac{2}{k} E(k), \quad (11)$$

и $g = \frac{2-k^2}{k^2}$, задаем $k^2 = \frac{2}{g+1}$. Предположим, что x/d , как и в ранее разобранном примере, равно 0,2.

Имеем

$$g = 1 + 2 \cdot 0,04 = 1,08 \text{ и } k^2 = \frac{2}{1,08+1} \cong 0,96.$$

Тогда, вычисляя $Q_1(g)$ через полные эллиптические интегралы $K(k)$ и $E(k)$ [8], получим:

$$Q_1(1,08) = \left(\frac{2}{\sqrt{0,96}} - \sqrt{0,96}\right) K(0,96) - \frac{2}{\sqrt{0,96}} E(0,96) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{0,96}} [1,04 \cdot 3,016 - 2 \cdot 1,05] \cong \frac{3,137 - 2,1}{\sqrt{0,96}} \cong 1,058,$$

и, следовательно, (9) равно $\mu_0 \frac{d}{2} \cdot 1,058$.

Теперь проведем сравнение с численным результатом, вытекающим из выражения (7), при $x/d = 0,2$ имеем:

$$M = \mu_0 \frac{d}{2} \left[\left(1 + \frac{4}{3} \cdot 0,04\right) \ln \frac{4}{0,2} - 2 - \frac{1}{4} \cdot 0,04 \right] =$$

$$= \mu_0 \frac{d}{2} [2,996 - 2 - 0,01] = \mu_0 \frac{d}{2} \cdot 0,986.$$

Эти оценки достаточно близки (1,058 и 0,986).

Аналогично можно сопоставить выражения для электродинамической силы между двумя витками с токами i_1 и i_2 одинакового радиуса $d/2$ [9]. Тогда в соответствии с [9]:

$$F = \mu_0 i_1 i_2 \frac{2x}{d} \left[\frac{(1-k^2)^{\frac{1}{2}}}{k} K(k) - \frac{2-k^2}{2k(1-k^2)^{\frac{1}{2}}} E(k) \right], \quad (12)$$

и при $k^2 = 0,96$ для численного значения F получим:

$$F = \mu_0 i_1 i_2 \cdot 0,4 \left[\frac{(1-0,96)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{0,96}} K(0,96) - \right.$$

$$\left. - \frac{2-0,96}{2 \cdot \sqrt{0,96} (1-0,96)^{\frac{1}{2}}} E(0,96) \right] =$$

$$= \mu_0 i_1 i_2 \cdot 0,4 \left[\frac{0,2}{0,98} \cdot 3,016 - \frac{1,04}{2 \cdot 0,98 \cdot 0,2} \cdot 1,05 \right] =$$

$$= \mu_0 i_1 i_2 \cdot 0,4 [0,6155 - 2,7857] \cong -\mu_0 i_1 i_2 \cdot 0,868.$$

Можно теперь сопоставить этот результат с результатом, вытекающим в соответствии с (6), но при $r = 0$ и $x/d = 0,2$:

$$F = \mu_0 i_1 i_2 \left[\frac{3}{4} \cdot 0,2 \ln \frac{4}{0,2} - 0,5 \cdot \frac{1}{0,2} - 0,625 \cdot 0,2 \right] \cong$$

$$\cong \mu_0 i_1 i_2 [0,449 - 2,5 - 0,125] = \mu_0 i_1 i_2 \cdot 0,87.$$

Данные оценки практически совпадают.

Выводы

Conclusions

Дана оценка влияния конечного размера r сопрягаемых плоских дисковых катушек круговой формы (рис. 1) с током на величину электродинамических сил (выражения (5–6) с примерами расчетов). Записаны строгие выражения для коэффициентов взаимной индуктивности и электродинамических сил одинаковых соосных контуров и проведены соответствующие сопоставления с известными приближениями.

Оценки электродинамических сил для соосных контуров по строгому выражению (12) и приближенному выражению (6) при $x/d = 0,2$ при протекании токов в контурах практически совпадают, а оценки коэффициентов взаимной индукции при $x/d = 0,2$ достаточно близки. Пример применения системы бесконтактного заряда в морской технике описан в недавно опубликованной работе [10].

Список использованной литературы

1. *Soma M., Galbraith D.C., White R.L.* Radio-Frequency Coils in Implantable Devices: Misalignment Analysis and Design Procedure // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1987. Vol. 34, No. 4. P. 276–282. DOI: 10.1109/TBME.1987.326088.
2. Restoring Force Between Two Noncoaxial Circular Coils / *Ki-Bong Kim, E. Levi, Z. Zabar, L. Birenbaum* // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1996. Vol. 32, No. 2. P. 478–484. DOI: 10.1109/20.486535.
3. Design of a Contactless Energy-Transfer System for Desktop Peripherals / *P. Meyer, P. Germano, M. Markovic, Y. Perriard* // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011. Vol. 47, No. 4. P. 1643–1651. DOI: 10.1109/TIA.2011.2153812.
4. *Grover F.W.* Inductance Calculations: Working formulas and Tables. New York: Van Nostrand, 1947. XIV. 236 p.
5. *Ren Y.* Magnetic Force Calculation Between Misaligned Coils for a Superconducting Magnet // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010. Vol. 20, No. 6. P. 2350–2353. DOI: 10.1109/TASC.2010.2068297.
6. Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Applications / *S. Raju, R. Wu, M. Chan, C.P. Yue* // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. Vol. 29, No. 1. P. 481–490. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2253334.
7. *Калантаров П.А., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 487, [1] с.
8. *Цицикян Г.Н.* Оценка стягивающих и растягивающих сил в тороидальных и линейных накопителях электроэнергии // *Труды Крыловского гос. науч. центра*. 2021. Вып. 4(398). С. 123–128. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-123-128.
9. *Цицикян Г.Н.* О коэффициентах взаимной индукции и силах взаимодействия круговых коаксиальных контуров // *Электричество*. 2019. № 6. С. 59–65. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-6-59-65.
10. *Герасимов В.А., Комлев А.В., Филоженко А.Ю.* Новая методика расчета силового трансформатора для системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного робота // *Труды Крыловского гос. науч. центра*. 2022. Вып. 2(400). С. 116–126. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-116-126.
2. Restoring Force Between Two Noncoaxial Circular Coils / *Ki-Bong Kim, E. Levi, Z. Zabar, L. Birenbaum* // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1996. Vol. 32, No. 2. P. 478–484. DOI: 10.1109/20.486535.
3. Design of a Contactless Energy-Transfer System for Desktop Peripherals / *P. Meyer, P. Germano, M. Markovic, Y. Perriard* // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011. Vol. 47, No. 4. P. 1643–1651. DOI: 10.1109/TIA.2011.2153812.
4. *Grover F.W.* Inductance Calculations: Working formulas and Tables. New York: Van Nostrand, 1947. XIV. 236 p.
5. *Ren Y.* Magnetic Force Calculation Between Misaligned Coils for a Superconducting Magnet // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010. Vol. 20, No. 6. P. 2350–2353. DOI: 10.1109/TASC.2010.2068297.
6. Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Applications / *S. Raju, R. Wu, M. Chan, C.P. Yue* // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. Vol. 29, No. 1. P. 481–490. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2253334.
7. *Kalantarov P., Tseitlin L.* Calculation of inductances. Reference book. 3rd ed., rev. and enl. Leningrad: Energoatomizdat, 1986 (*in Russian*).
8. *Tsitsikyan G.* Estimation of compressive and tensioning forces in linear storages of electric power // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2021. Vol. 4(398). P. 123–128 (*in Russian*).
9. *Tsitsikyan G.* On reciprocal induction coefficients and interaction forces of circular coaxial circuits // *Elektrichestvo (Electricity)*. 2019. No. 6. P. 59–65 (*in Russian*).
10. *Gerasimov V., Komlev A., Filozhenko A.* New design method for power transformer in contactless charging of storage batteries for undersea robot // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2022. Vol. 2(400). P. 116–126 (*in Russian*).

References

1. *Soma M., Galbraith D.C., White R.L.* Radio-Frequency Coils in Implantable Devices: Misalignment Analysis and Design Procedure // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1987. Vol. 34, No. 4. P. 276–282. DOI: 10.1109/TBME.1987.326088.
2. Restoring Force Between Two Noncoaxial Circular Coils / *Ki-Bong Kim, E. Levi, Z. Zabar, L. Birenbaum* // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1996. Vol. 32, No. 2. P. 478–484. DOI: 10.1109/20.486535.
3. Design of a Contactless Energy-Transfer System for Desktop Peripherals / *P. Meyer, P. Germano, M. Markovic, Y. Perriard* // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011. Vol. 47, No. 4. P. 1643–1651. DOI: 10.1109/TIA.2011.2153812.
4. *Grover F.W.* Inductance Calculations: Working formulas and Tables. New York: Van Nostrand, 1947. XIV. 236 p.
5. *Ren Y.* Magnetic Force Calculation Between Misaligned Coils for a Superconducting Magnet // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2010. Vol. 20, No. 6. P. 2350–2353. DOI: 10.1109/TASC.2010.2068297.
6. Modeling of Mutual Coupling Between Planar Inductors in Wireless Power Applications / *S. Raju, R. Wu, M. Chan, C.P. Yue* // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. Vol. 29, No. 1. P. 481–490. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2253334.
7. *Kalantarov P., Tseitlin L.* Calculation of inductances. Reference book. 3rd ed., rev. and enl. Leningrad: Energoatomizdat, 1986 (*in Russian*).
8. *Tsitsikyan G.* Estimation of compressive and tensioning forces in linear storages of electric power // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2021. Vol. 4(398). P. 123–128 (*in Russian*).
9. *Tsitsikyan G.* On reciprocal induction coefficients and interaction forces of circular coaxial circuits // *Elektrichestvo (Electricity)*. 2019. No. 6. P. 59–65 (*in Russian*).
10. *Gerasimov V., Komlev A., Filozhenko A.* New design method for power transformer in contactless charging of storage batteries for undersea robot // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2022. Vol. 2(400). P. 116–126 (*in Russian*).

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, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

Кунаев Семен Николаевич, инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: semen-kunaev@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1756-0760>.

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>.

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. <https://orcid.org/0000-0003-1756-0760>.

Поступила / Received: 26.07.22
Принята в печать / Accepted: 14.10.22
© Цицикян Г.Н., Кунаев С.Н., 2022