

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-121-126
УДК 621.3.082.74:621.318.4

Г.Н. Цицикян, М.Ю. Антипов, Ю.Д. Баранов
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ДВУХСЛОЙНЫХ КАТУШКАХ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является двухслойный соленоид нагрузочного устройства. Цель работы состоит в корректной оценке электродинамических сил, воздействующих на крайние витки внутреннего и внешнего слоев соленоида.

Материалы и методы. Используются выражения для электродинамических сил, содержащие специальные функции.

Основные результаты. Разработан метод расчета электродинамических сил для двухслойных соленоидов с помощью вспомогательной функции, значения которой сведены в таблицу.

Заключение. Дан пример расчета электродинамических сил в соленоидах нагрузочных устройств, предназначенных для испытаний судовых электростанций.

Ключевые слова: двухслойный соленоид, электродинамические силы, нагрузочные устройства.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-121-126
UDC 621.3.082.74:621.318.4

G. Tsitsikyan, M. Antipov, Yu. Baranov
TsNII SET branch of Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ELECTRODYNAMIC FORCES IN TWO-LAYERED COILS

Object and purpose of research. This paper discusses two-layered solenoid of loading device. The purpose is to obtain correct estimate of electrodynamic forces acting on extreme loops of external and internal solenoid layers.

Materials and methods. The study follows the expressions for electrodynamic forces, with application of special functions.

Main results. Development of electrodynamic force calculation method for two-layered solenoids by means of an auxiliary functions (its values are given in tabular form).

Conclusion. The paper demonstrates an example of electrodynamic force calculations for loading device solenoids intended to test power plants of ships.

Keywords: two-layered solenoid, electrodynamic forces, loading devices.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

В статьях [1, 2] были рассмотрены взаимные индуктивности коаксиальных контуров различной конфигурации и электродинамические силы между ними. Рассматривался и коаксиальный соленоид с витком, расположенным вблизи торцевой плоскости соленоида для оценки силы, которая приходится на крайний виток [1, 2]. В двухслойной катушке слои располагаются близко, поэтому в [1] было выдвинуто предположение о том, что в этом случае силы, воздействующие на крайние витки внутрен-

него и внешнего слоев со стороны соответствующих внешнего и внутреннего слоев, будут незначительно отличаться от оценки на крайние витки, как при однослойной катушке. Однако детальный анализ этого вопроса показывает, что различие может оказаться достаточно заметным. Поскольку в [1–3] электродинамические силы представлены в замкнутой форме через присоединенные функции Лежандра второго рода с полуцелым индексом, то возникает потребность в их численной оценке при

Для цитирования: Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю., Баранов Ю.Д. Электродинамические силы в двухслойных катушках. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 3(389): 121–126.

For citations: Tsitsikyan G., Antipov M., Baranov Yu. Electrodynamic forces in two-layered coils. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 3(389): 121–126 (in Russian).

соблюдении минимальной погрешности. Этот вопрос здесь рассматривается подробно.

Вначале запишем выражение для силы взаимодействия соленоида с числом витков w и для его крайнего витка в соответствии с [2, 3]:

$$f = -\frac{\mu_0 i^2 (w-1)}{2s/R_1} \times \left[Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h-s}{R_1} \right)^2 \right) - Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h+s}{R_1} \right)^2 \right) \right].$$

Геометрические размеры указаны на рис. 1, где представлен соленоид длиной $2s$, радиусом R_1 и крайний виток на расстоянии от плоскости симметрии соленоида $s + \Delta s$ (Δs может быть приравнено к шагу намотки).

Тогда, с учетом того, что $h = s + \Delta s$, предыдущее выражение для силы взаимодействия соленоида и крайнего витка можно переписать в виде

$$f_{1,B1} = -\frac{\mu_0 i^2 w R_1}{2s} \times \left[Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(\Delta s)^2}{R_1^2} \right) - Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(2s + \Delta s)^2}{R_1^2} \right) \right]. \quad (1)$$

В выражениях для сил μ_0 – магнитная проницаемость, принимаемая равной $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; i – мгновенные значения тока в соленоиде и в витке; $Q_{1/2}(g)$ – обозначение сферической функции Лежандра второго рода с полуцелым индексом. Индекс (1, B1) приписан силе взаимодействия первого слоя с крайним витком этого же слоя.

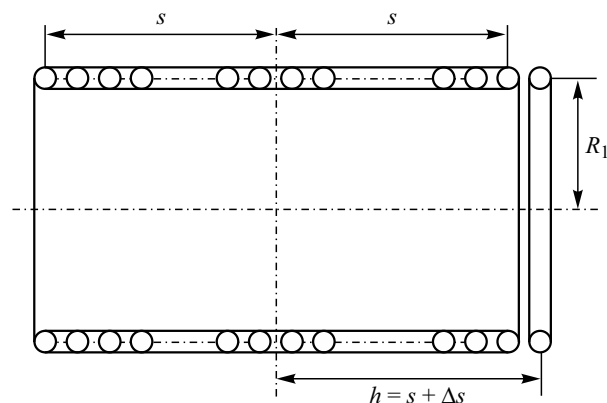


Рис. 1. Внешний слой катушки с крайним витком

Fig. 1. External layer of coil with extreme loop

С другой стороны, силу, действующую на крайний виток внутреннего слоя со стороны внешнего слоя (рис. 2), можно записать как [2]

$$f_{1,B2} = -\frac{\mu_0 i^2 w}{2s} (R_1 R_2)^{1/2} \times \left[Q_{1/2} \left(1 + \frac{(R_2 - R_1)^2}{2R_1 R_2} \right) - Q_{1/2} \left(1 + \frac{(2s)^2 + (R_2 - R_1)^2}{2R_1 R_2} \right) \right], \quad (2)$$

а силу, действующую на крайний виток второго слоя от своего слоя, записать так же как в (1), но с заменой индекса 1 на индекс 2 (рис. 3):

$$f_{2,B2} = -\frac{\mu_0 i^2 (w-1) R_2}{2s} \times \left[Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(\Delta s)^2}{R_2^2} \right) - Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(2s + \Delta s)^2}{R_2^2} \right) \right]. \quad (3)$$

Здесь предположено, что внутренний и внешний слой имеют одинаковое количество витков w , т.е. $w_1 = w_2 = w$, а длина слоев одинакова и равна $2s$.

Таким образом, по заданным значениям $R_1, R_2, 2s, \Delta s, w$ можно найти силы $f_{1,B1}, f_{1,B2}, f_{2,B2}$ через значения функций $Q_{1/2}$, входящих в (1)–(3).

Следует отметить, что $f_{1,B2} = f_{2,B1}$, т.к. замена R_1 на R_2 и R_2 на R_1 в (2) (рис. 4), не повлияет на результаты расчета.

Таким образом, диэлектрический остов, служащий для закрепления витков соленоида, будет претерпевать воздействие сжимающих сил в зоне размещения крайних витков, определяемых как сумма:

$$f = f_{1,B1} + 2f_{1,B2} + f_{2,B2}. \quad (4)$$

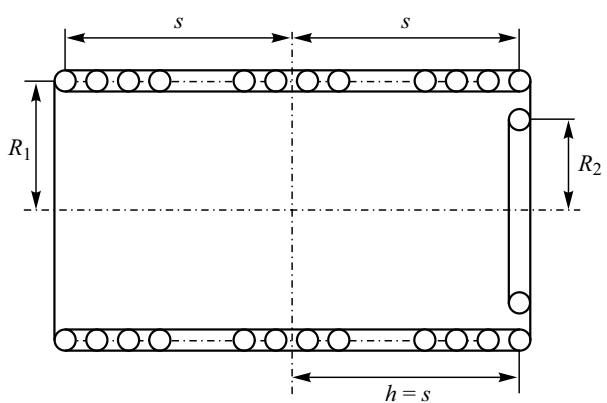


Рис. 2. Внешний слой и крайний виток внутреннего слоя

Fig. 2. External layer and extreme loop of internal layer

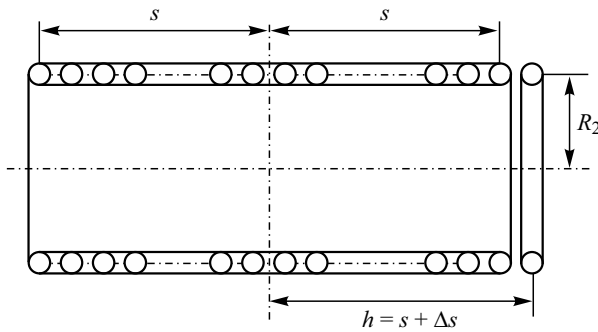


Рис. 3. Внутренний слой и его крайний виток

Fig. 3. Internal layer and its extreme loop

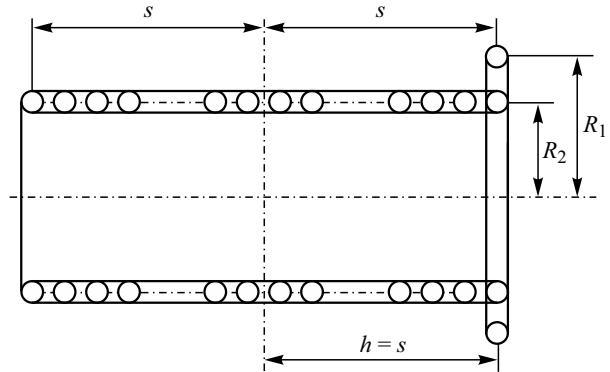


Рис. 4. Внутренний слой и крайний виток внешнего слоя

Fig. 4. Internal layer and extreme loop of external layer

Численные значения в соответствии с (4) можно получить, прибегая к использованию известных таблиц присоединенных функций Лежандра частично воспроизведенных в [4]. Однако это не единственная возможность для численной оценки. Здесь важно отметить, что коэффициент взаимной индукции двух коаксиальных витков определяется по формуле, записанной в [1, 2, 4] в виде

$$M = \mu_0 \sqrt{R_1 R_2} Q_{1/2}(g), \quad (5)$$

где $g = 1 + \frac{h^2 + (R_2 - R_1)^2}{2R_1 R_2}$; h – расстояние между витками.

С другой стороны, в [5] для этого случая приведено выражение

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{R_1 R_2} \Phi(m^2), \quad (6)$$

записанное здесь по сравнению с [5] с той разницей, что обозначение Φ используется вместо F в [5]; значения Φ находятся по значениям m^2 , где

$$m^2 = \frac{(R_1 - R_2)^2 + h^2}{(R_1 + R_2)^2 + h^2} = \frac{g-1}{g+1} = \frac{\Delta g}{2 + \Delta g} \quad (7)$$

$$\text{и } \Delta g = \frac{(R_1 - R_2)^2 + h^2}{2R_1 R_2}.$$

На основании (5) и (6) устанавливается соотношение между $Q_{1/2}(1 + \Delta g)$ и $\Phi(m^2)$ в следующем простом виде:

$$\frac{\Phi(m^2)}{4\pi} = \frac{\Phi\left(\frac{g-1}{g+1}\right)}{4\pi} = \frac{\Phi\left(\frac{\Delta g}{2 + \Delta g}\right)}{4\pi} = Q_{1/2}(1 + \Delta g), \quad (8)$$

что в случае готовой таблицы значений $\Phi(m^2)$ или $\Phi(\Delta g/(2 + \Delta g))$ позволяет находить $Q_{1/2}(1 + \Delta g)$. Такая таблица под номером 5.5 в [5] приведена здесь с учетом замены обозначения F на Φ .

Рассмотрим для примера случай, когда $g = 3,563$ и $\Delta g = 2,563$. Тогда

$$\frac{\Delta g}{2 + \Delta g} = \frac{2,563}{4,563} = 0,5617, \quad \Phi \cong 1,06, \\ Q_{1/2}(3,563) \cong 0,084,$$

что вполне согласуется со значением $Q_{1/2}(3,563)$, взятым по таблице в [4] (0,085).

Возможен и третий путь численной оценки, связанный с представлением присоединенных функций Лежандра с полуцелым индексом через полные эллиптические интегралы первого и второго рода [1]. Здесь для $Q_{1/2}(3,563)$ было найдено значение 0,079. Кроме того, в [1] дано выражение для $Q_{1/2}(1 + \Delta g)$ в виде

$$Q_{1/2}(1 + \Delta g) = \\ = \frac{1 + \frac{3}{8}\Delta g}{2} \left[\ln\left(\frac{2 + \Delta g}{\Delta g}\right) - 1,2274 \right] + \frac{3}{8}\Delta g, \quad (9)$$

которое можно использовать с хорошей точностью при вычислении, если $(\Delta s/R_1)^2$ меньше 0,4. Правильность выражения (9) будет продемонстрирована в Приложении 1.

Перейдем к примеру, ориентируясь на исходные данные, весьма близкие к конструкции двухслойной катушки, которая используется в нагрузочном устройстве с водяным охлаждением с мощностью ступени нагрузки 300 кВт, с коэффициентом мощности в пределах 0,7–0,9. Нагру-

Значения Φ от $\frac{g-1}{g+1} = \frac{\Delta g}{2+\Delta g}$

$\frac{g-1}{g+1} = \frac{\Delta g}{2+\Delta g}$	Φ	$\frac{g-1}{g+1}$	Φ	$\frac{g-1}{g+1}$	Φ	$\frac{g-1}{g+1}$	Φ
0,00	–	0,05	12,026	0,10	8,297	0,15	6,278
0,01	21,474	0,06	11,017	0,11	7,810	0,16	5,970
0,02	17,315	0,07	10,179	0,12	7,371	0,17	5,685
0,03	14,937	0,08	9,464	0,13	6,974	0,18	5,420
0,04	13,284	0,09	8,843	0,14	6,611	0,19	5,173
0,20	4,941	0,42	1,9821	0,64	0,7345	0,86	0,14450
0,21	4,723	0,43	1,9026	0,65	0,6966	0,87	0,12821
0,22	4,518	0,44	1,8259	0,66	0,6600	0,88	0,11276
0,23	4,325	0,45	1,7519	0,67	0,6246	0,89	0,09815
0,24	4,142	0,46	1,6805	0,68	0,5903	0,90	0,08438
0,25	3,969	0,47	1,6116	0,69	0,5571	0,91	0,07146
0,26	3,805	0,48	1,5451	0,70	0,5251	0,92	0,05940
0,27	3,649	0,49	1,4808	0,71	0,4971	0,93	0,04824
0,28	3,500	0,50	1,4186	0,72	0,4642	0,94	0,03798
0,29	3,359	0,51	1,3585	0,73	0,4353	0,95	0,02860
0,30	3,224	0,52	1,3004	0,74	0,4074	0,96	0,02035
0,31	3,095	0,53	1,2443	0,75	0,3805	0,97	0,01312
0,32	2,971	0,54	1,1900	0,76	0,3545	0,98	0,00708
0,33	2,853	0,55	1,1374	0,77	0,3295	0,99	0,00249
0,34	2,740	0,56	1,0865	0,78	0,3054	1,00	0,00000
0,35	2,6317	0,57	1,0373	0,79	0,2823		
0,36	2,5276	0,58	0,9897	0,80	0,25998		
0,37	2,4276	0,59	0,9436	0,81	0,23659		
0,38	2,3315	0,60	0,8990	0,82	0,21806		
0,39	2,2391	0,61	0,8558	0,83	0,19840		
0,40	2,1502	0,62	0,8141	0,84	0,17959		
0,41	2,0646	0,63	0,7736	0,85	0,16162		

зочные устройства предназначены для швартовых испытаний судовой электростанции. Положим $2s \cong 0,4$ м, $w = 45$ витков в каждом слое, действующее значение тока $I = 600$ А, выбранное для коэффициента мощности, ближе к указанному нижнему пределу, $R_1 = 0,16$ м, $R_2 \cong 0,9R_1 = 0,144$ м. Учитывая шаг намотки, положим $\Delta s \cong 0,009$ м. Тогда для (1)

$$g_1 = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta s}{R_1} \right)^2 \cong 1,0016,$$

$$g_2 = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{2s + \Delta s}{R_1} \right)^2 = 4,267,$$

и в соответствии с (7)

$$m_1^2 = \frac{0,0016}{2,0016} \cong 0,0008, \quad m_2^2 = \frac{3,267}{5,267} \cong 0,62,$$

а в соответствии с (8)

$$Q_{1/2}(1,0016) = \frac{1}{4\pi} \Phi(0,0008), \quad Q_{1/2}(4,267) = \frac{1}{4\pi} \Phi(0,62).$$

По воспроизведенной здесь табл. 5.5 из [5] для $Q_{1/2}(4,267)$ имеем $\sim 0,065$, а для вычисления $Q_{1/2}(1,0016)$ воспользуемся выражением (9). Получаем

$$Q_{1/2}(1,0016) \cong 0,5 \left[\ln \frac{2}{0,0016} - 1,2274 \right] = 2,952.$$

Тогда, в соответствии с (1), без учета знака «минус»

$$F_{1,B1} = \frac{\mu_0 \cdot 600^2 \cdot 44 \cdot 0,16}{0,4} [2,952 - 0,065] =$$

$$= 7,962 \cdot 2,887 \cong 22,98 \text{ Н} \cong 2,345 \text{ кгс},$$

где $F_{1,B1}$ – постоянная составляющая силы, притягивающая крайний виток внешнего слоя при действующем значении тока 600 А.

Теперь перейдем к расчету $F_{1,B2}$ в соответствии с (2) и рис. 2. Имеем

$$F_{1,B2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 600^2 \cdot 45}{0,4} (0,16 \cdot 0,144)^2 \times$$

$$\times \left[Q_{1/2} \left(1 + \frac{0,016^2}{2 \cdot 0,16 \cdot 0,144} \right) - Q_{1/2} \left(1 + \frac{0,4^2 + 0,016^2}{2 \cdot 0,16 \cdot 0,144} \right) \right] =$$

$$= 7,7256 [Q_{1/2}(1,056) - Q_{1/2}(4,478)] =$$

$$= \frac{7,7256}{4\pi} [\Phi(0,027) - \Phi(0,635)] \approx$$

$$\approx \frac{7,7256}{4\pi} (15,65 - 0,754) \approx 9,158 \text{ Н} = 0,934 \text{ кгс}.$$

Наконец, выполняя расчеты по выражению (3), получаем

$$F_{2,B2} = -\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 600^2 \cdot 44}{0,4} 0,144 \times$$

$$\times \left[Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{0,009}{0,144} \right)^2 \right) - Q_{1/2} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{0,409}{0,144} \right)^2 \right) \right] =$$

$$= 7,166 [Q_{1/2}(1,002) - Q_{1/2}(5,034)] =$$

$$= 7,166 \left[2,841 - \frac{1}{4\pi} \Phi(0,67) \right] \cong$$

$$\cong 7,166(2,841 - 0,05) = 20 \text{ Н} = 2,04 \text{ кгс}.$$

Суммируя результаты согласно (4), для постоянной составляющей стягивающей силы, приложенной к диэлектрическому каркасу в зоне крайних витков двухслойной катушки, найдем

$$F = 2,04 + 2 \cdot 0,934 + 2,345 = 6,253 \text{ кгс}.$$

С увеличением числа витков электродинамическая сила будет расти.

В завершение приводим выражение для электродинамической силы между двумя витками с токами i_1 и i_2 в замкнутой форме через

функцию Лежандра второго рода с полуцелым индексом [2]:

$$f = \mu_0 i_1 i_2 \frac{h}{\sqrt{R_1 R_2}} \frac{Q_{1/2}^1(g)}{(g^2 - 1)^{1/2}},$$

где h – расстояние между коаксиальными витками радиусов R_1 и R_2 ;

$$g = 1 + \frac{h^2 + (R_2 - R_1)^2}{2R_1 R_2}.$$

При $\Delta g < 0,4$ для получения численных значений можно воспользоваться формулой

$$Q_{1/2}^1(g) = Q_{1/2}^1(1 + \Delta g) = \frac{3}{16} (2\Delta g)^{\frac{1}{2}} \times$$

$$\times \left[\ln \left(\frac{2 + \Delta g}{\Delta g} \right) + 0,1059 \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{2 + \Delta g}{\Delta g} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{3}{8} (2\Delta g)^{\frac{1}{2}}.$$

Таким образом, выполнен расчет постоянной составляющей сил на крайние витки двухслойного соленоида.

Приложение 1

Annex 1

В обоснование выражения (9) для $Q_{1/2}(1 + \Delta g)$ при малом Δg отметим, что в [2, 3] получена замкнутая форма для коэффициента взаимной индукции двух коаксиальных контуров с радиусами R_1 и R_2 , с расстоянием h между ними по формуле (5), где $g = 1 + \Delta g$ и

$$\Delta g = \frac{h^2 + (R_2 - R_1)^2}{2R_1 R_2}.$$

При $R_1 = R_2 = R$ и $h < R$ введем обозначение $\xi = h/2R$, тогда $\Delta g = 2\xi^2$. В соответствии с (5-17) в [5] в этом случае коэффициент взаимной индукции может быть представлен в виде

$$M = \mu_0 R \left[\left(1 + \frac{3}{4} \xi^2 - \frac{15}{64} \xi^4 + \frac{35}{256} \xi^6 + \dots \right) \times \right.$$

$$\left. \times \ln \frac{4}{\xi} - 2 - \frac{1}{4} \xi^2 + \frac{31}{128} \xi^4 - \frac{247}{1536} \xi^6 + \dots \right]. \quad (\text{П.1})$$

Ограничимся членами ряда со степенью ξ не выше второй. Тогда

$$M \cong \mu_0 R \left[\left(1 + \frac{3}{4} \xi^2 \right) \ln \frac{4}{\xi} - 2 - \frac{1}{4} \xi^2 \right]. \quad (\text{П.2})$$

С учетом того, что $\xi^2 = \Delta g/2$, перепишем (П.2) в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 M &\approx \mu_0 R \left[\left(1 + \frac{3}{8} \Delta g \right) \ln 4 \sqrt{\frac{2}{\Delta g}} - 2 - \frac{1}{8} \Delta g \right] = \\
 &= \mu_0 R \left[\left(1 + \frac{3}{8} \Delta g \right) \frac{1}{2} \ln \frac{2}{\Delta g} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{3}{8} \Delta g \right) \ln 16 - 2 - \frac{1}{8} \Delta g \right] = \\
 &= \mu_0 R \left[\frac{1 + \frac{3}{8} \Delta g}{2} \left(\ln \frac{2}{\Delta g} + 2,7726 \right) - 2 - \frac{1}{8} \Delta g \right] = \\
 &= \mu_0 R \left[\frac{1 + \frac{3}{8} \Delta g}{2} \left(\ln \frac{2}{\Delta g} - 1,2274 \right) + 4 \frac{1 + \frac{3}{8} \Delta g}{2} - 2 - \frac{1}{8} \Delta g \right] = \\
 &= \mu_0 R \left[\frac{1 + \frac{3}{8} \Delta g}{2} \left(\ln \frac{2}{\Delta g} - 1,2274 \right) + \frac{3}{4} \Delta g - \frac{1}{8} \Delta g \right] = \\
 &= \mu_0 R \left[\frac{1 + \frac{3}{8} \Delta g}{2} \left(\ln \frac{2}{\Delta g} - 1,2274 \right) + \frac{5}{8} \Delta g \right]. \quad (\text{П.3})
 \end{aligned}$$

Из (П.3) видно, что при достаточно малом Δg результат вычислений $Q_{1/2}(1 + \Delta g)$ будет весьма близок к результату вычислений согласно выражению (9). Так, при $\Delta g = 0,1$ имеем в соответствии с (П.3) 0,9799, а в соответствии с (9) – 0,9802.

Библиографический список

1. Цицикян Г.Н. Взаимная индуктивность коаксиальных контуров и их электродинамическое взаимодействие // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2(384). С. 70–75.
2. Цицикян Г.Н. О взаимной индуктивности и электродинамических силах взаимодействия коаксиальных контуров // Известия Академии Наук. Энергетика. 2018. № 4. С. 40–45.
3. Цицикян Г.Н. Взаимные индуктивности и силы взаимодействия соосных контуров, соленоидов и катушек // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 6. С. 90–99.
4. Цицикян Г.Н. О коэффициентах взаимной индукции и силах взаимодействия коаксиальных контуров. Электричество, 2019, № 6, С. 59–65.
5. Калантаров П.А., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986.

References

1. G. Tsitsikyan. Mutual inductance of coaxial circuits and their electrodynamic interaction // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 2(384). P. 70–75 (in Russian).
2. G. Tsitsikyan. On mutual inductance and electrodynamic interaction forces of coaxial circuits // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Power engineering. 2018. No. 5. P. 40–45 (in Russian).
3. G. Tsitsikyan. Mutual inductances and interaction forces of coaxial circuits, solenoids and coils // USSR Academy of Sciences. Izvestiya. Power engineering and transport. 1985. No. 6. P. 90–99 (in Russian).
4. G. Tsitsikyan. About the mutual induction coefficients and interaction forces in circular coaxial loops. Elektrichestvo. 2019. No. 6. P. 59–65.
5. P. Kalantarov, L. Tseitlin. Calculation of inductances. Reference book. Leningrad: Energoatomizdat, 1986 (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, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-39. E-mail: George20021940@mail.ru.

Антипов Михаил Юрьевич, инженер-конструктор 2 категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 369-94-91. E-mail: set@sp.ru.

Баранов Юрий Дмитриевич, инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-39. E-mail: yustas215@yandex.ru.

About the authors

Georgy N. Tsitsikyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNI SET, affiliated branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-39. E-mail: George20021940@mail.ru.

Mikhail Yu. Antipov, 2nd Category Design Engineer, TSNI SET, affiliated branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 369-94-91. E-mail: set@sp.ru.

Yury D. Baranov, Engineer, TSNI SET, affiliated branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg 196128, Russia. Tel.: 8 (812) 748-52-39. E-mail: yustas215@yandex.ru.

Поступила / Received: 09.06.19
Принята в печать / Accepted: 18.07.19
© Коллектив авторов, 2019