DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-123-128
УДК 621.3.011.3+621.314.225

Г.Н. Цицикян
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА СТЯГИВАЮЩИХ И РАСТЯГИВАЮЩИХ СИЛ В ТОРОИДАЛЬНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ НАКОПИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Объект и цель научной работы. Даны и сопоставлены оценки для электромагнитных сил в тонкостенных катушках тороидального типа и в обычных катушках различного поперечного сечения (круговых, квадратных, дисковых, сферических).
Материалы и методы. Использованы методы теоретической электротехники.
Основные результаты. Установлено различие в характере сил для тороидальных и для обычных катушек. В первых имеет место эффект центростремительного сжатия, во вторых – эффект центробежного растяжения.
Заключение. Указанные эффекты необходимо учитывать в конструктивном исполнении катушек, которые не должны деформироваться или разрушаться под воздействием стягивающих или растягивающих сил.
Ключевые слова: тороидальные катушки, коэффициенты самоиндукции, стягивающие силы, обычные катушки, растягивающие силы.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-123-128
UDC 621.3.011.3+621.314.225

G. Tsitsikyan
SET Branch of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ESTIMATION OF COMPRESSIVE AND TENSIONING FORCES IN LINEAR STORAGES OF ELECTRIC POWER

Object and purpose of research. Electromagnetic forces in thin-walled coils of toroidal type and common type of different cross-sections (circular, rectangular, disk, spherical) are estimated and compared.
Materials and methods. Methods of theoretical electric engineering are used.
Main results. It is established that forces for toroidal and common coils have different character. First, there is an effect of centripetal compression, secondly, there is an effect of centripetal tensioning.
Conclusions. These effects should be taken into account in the coil design, which have to withstand deformation or damage under compressive or tensioning forces.
Key words: toroidal coils, self-induction coefficient, compressive forces, common coils, tensioning forces.
The author declares no conflicts of interest.

Как известно, тороидальные накопители электроэнергии, несмотря на усложненную конструкцию, не проявляют себя практически через внешнее магнитное поле, что в ряде случаев может оказаться определяющим при их использовании в автономных электроэнергетических системах [1, 2]. В [3] подчеркиваются преимущества интегрированной бесперебойной системы электроснабжения вместе с накопительной системой электроэнергии (Battery Energy Storage System).

Рассмотрим плотно навитый тонкостенный тороид кругового сечения с числом витков w (рис. 1).

Запишем круговую компоненту магнитной индукции B_φ для области, охваченной тором с равно-

Для цитирования: Цицикян Г.Н. Оценка стягивающих и растягивающих сил в тороидальных и линейных накопителях электроэнергии. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; 4(398): 123–128.
For citations: Tsitsikyan G. Estimation of compressive and tensioning forces in linear storages of electric power. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; 4(398): 123–128 (in Russian).

мерно и плотно намотанными витками w с током i в витках:

$$B_\varphi = \frac{\mu_0 iw}{2\pi}\frac{1}{\frac{D}{2}+\rho\cos\psi}. \quad (1)$$

Поток вектора магнитной индукции через верхнюю площадь сечения тора ($Z > 0$) (рис. 1) находится интегрированием по площади сечения.

$$\frac{\Phi}{2} = \int B_\varphi ds = \frac{\mu_0 iw}{2\pi}\int_{\psi=0}^{\pi}\int_{\rho=0}^{d/2}\frac{\rho d\rho d\psi}{\frac{D}{2}+\rho\cos\psi} =$$

$$= \frac{\mu_0 iw}{2\pi}\int_{\rho=0}^{d/2}\rho d\rho\int_0^{\pi}\frac{d\psi}{\frac{D}{2}+\rho\cos\psi}. \quad (2)$$

Используя интеграл с номером 446.00 таблиц [4], с учетом условия, что $(D/2)^2 > \rho^2$, имеем:

$$\int_0^{\pi}\frac{d\psi}{\left(\frac{D}{2}+\rho\cos\psi\right)} = \frac{2}{\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2-\rho^2\right)^{1/2}}\times$$

$$\times\operatorname{arctg}\left(\left(\frac{\frac{D}{2}-\rho}{\frac{D}{2}+\rho}\right)^{1/2}\operatorname{tg}\frac{\psi}{2}\right)\Bigg|_0^{\pi} = \frac{\pi}{\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2-\rho^2\right)^{1/2}}.$$

Подставляя полученный результат в (2) и используя интеграл с номером 321.01 таблиц [4], найдем:

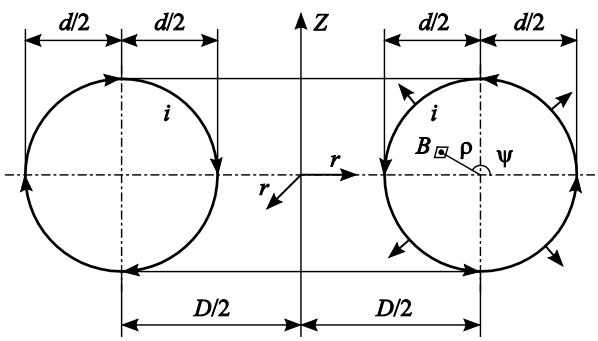

Рис. 1. Сечение круговой тороидальной катушки плоскостью, проходящей через ось Z с расстоянием между центрами окружностей, равным D, и диаметром окружностей, равным d

Fig. 1. Section of toroidal coil by plane crossing Z-axis at distance between centers of circles equal to D and diameters of circles equal to d

$$\frac{\Phi}{2} = -\frac{\mu_0 iw}{2}\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2-\rho^2\right)^{1/2}\Bigg|_{\rho=0}^{d/2} =$$

$$= \frac{\mu_0 iw}{2}\left[\frac{D}{2}-\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2-\left(\frac{d}{2}\right)^2\right)^{1/2}\right].$$

Соответственно, для индуктивности тороидальной катушки находим:

$$L = \frac{\mu_0 w^2}{2}D(1-(1-\gamma^2)^{1/2}), \quad (3)$$

где $\gamma = d/D$ в соответствии с формулой (3-6) в [1], а также формулой (9–29) в [5], которую можно получить из (3) умножением и делением на $[1 + (1 - \gamma^2)^{1/2}]$. Тогда имеем:

$$L = \frac{\mu_0 w^2}{2}D\frac{\gamma^2}{1+(1-\gamma^2)^{1/2}} = \frac{\mu_0 w^2}{2}\frac{d^2}{D\left(1+(1-\gamma^2)^{1/2}\right)} =$$

$$= \frac{\mu_0 w^2}{2}\frac{d^2}{D+\sqrt{D^2-d^2}}. \quad (4)$$

Формула (3) приведена в [2] с номером 2.123, а также в виде формулы (147) в [6].

В работе [2] дано выражение для нахождения стягивающей силы в направлении, перпендикулярном оси Z, в виде

$$f_r = \frac{1}{2}i^2\frac{\partial L}{\partial\frac{D}{2}} = i^2\frac{\partial L}{\partial D},$$

где на основании (4) запишем:

$$f_r = \frac{\mu_0 i^2 w^2}{2}\frac{\partial L}{\partial D} = \frac{\mu_0 i^2 w^2 d^2}{2}\frac{\partial}{\partial D}\left(D+\sqrt{D^2-d^2}\right)^{-1}. \quad (5)$$

Преобразовывая выражение под знаком производной в (5), имеем:

$$\frac{\partial}{\partial D}\left(D+\sqrt{D^2-d^2}\right)^{-1} = \frac{1}{d^2}\frac{\partial}{\partial D}\left(D-\sqrt{D^2-d^2}\right)$$

и для f_r получаем (рис. 1)

$$f_r = \frac{\mu_0 i^2 w^2}{2}\frac{\partial}{\partial D}\left(D-\sqrt{D^2-d^2}\right) =$$

$$= \frac{\mu_0 i^2 w^2}{2}\left(1-\frac{1}{\left(1-\frac{d^2}{D^2}\right)^{1/2}}\right) = -\frac{\mu_0 i^2 w^2}{2}\left(\frac{1}{(1-\gamma)^{1/2}}-1\right), \quad (6)$$

где, как и ранее, $\gamma = d/D$.

Полученный результат можно прокомментировать следующим образом. Магнитная индукция внутри тора (рис. 1) направлена вдоль окружностей в плоскостях, перпендикулярных оси *Z*, а результирующая составляющая элементарных сил, действующих на симметрично расположенные элементы верхней и нижней половины границ тора с током вдоль окружности сечения тора, дают компоненты радиальных сил в направлении стрелок (рис. 1). Их геометрическая сумма равна элементарной стягивающей силе, перпендикулярной оси *Z* вдоль $r = D/2$.

Предположим, что ток i изменяется по закону $i = I_m \sin\omega t$ и $i^2 = I_m^2 \dfrac{1-\cos 2\omega t}{2}$. Тогда средняя во времени сила по направлению r (рис. 1), будет равна

$$F_{rcp} = -0,5\mu_0 I^2 w^2 \left(\frac{1}{(1-\gamma^2)^{1/2}} - 1 \right). \qquad (7)$$

При $\gamma = d/D = 0,85$ результат для $F_{rcp} = -0,5\mu_0 I^2 w^2\, 0,898$.

Предположим, $w = 250$ и $I = 20$ А. Согласно (7) средняя во времени сила, действующая по направлению, перпендикулярном к оси *Z* (рис. 1), равна

$$F_{rcp} = -0,5 \cdot 400 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 250^2 \cdot 0,898 =$$

$$= -14,106 \text{ Н} \cong -1,439 \text{ кГс}.$$

Тороидальная катушка наряду с каркасом кругового сечения может быть и с каркасом прямоугольного сечения (рис. 2).

Выражение для индуктивности тонкостенной тороидальной катушки прямоугольного сечения известно и дано в [5]:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} w^2 a \ln \frac{D+b}{D-b}. \qquad (8)$$

Тогда стягивающая сила в направлении, перпендикулярном оси *Z*, равна

$$f_r = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial\left(\dfrac{D}{2}\right)} = \frac{\mu_0 i^2 w^2 a}{2\pi}\left(\frac{1}{D+b} - \frac{1}{D-b} \right) =$$

$$= -\frac{\mu_0 i^2 w^2 ab}{\pi(D^2 - b^2)}. \qquad (9)$$

При $a = b = d$ из (9) имеем:

$$f_r = -\frac{\mu_0 i^2 w^2 \gamma^2}{\pi(1-\gamma^2)}, \qquad (9a)$$

где $\gamma = d/D$.

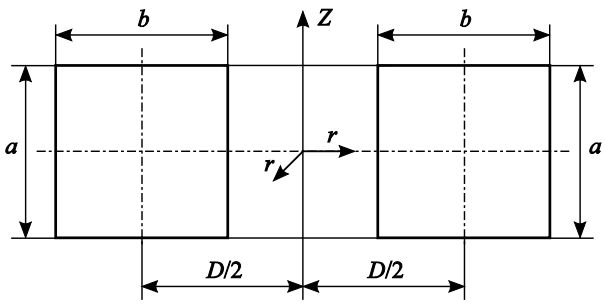

Рис. 2. Тонкостенная тороидальная катушка прямоугольного сечения

Fig. 2. Thin-walled toroidal coil of rectangular section

Теперь сопоставим численные значения соответственно по выражениям (6) и (9*a*) без учета общего множителя $(-\mu_0 i^2 w^2)$, т.е. $\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{(1-\gamma^2)^{1/2}} - 1 \right)$ и $\dfrac{\gamma^2}{\pi(1-\gamma^2)}$ для трех значений $\gamma = 0,5$, 0,7 и 0,9 и результаты расчетов сведем в таблицу.

Как видно, стягивающие силы для тонкостенного тороида квадратного сечения значительно больше, чем для тонкостенного тороида кругового сечения. Для толстых тороидальных катушек кольцевого сечения выражение для f_r дано в [2].

Стягивающие силы характерны для тороидальных катушек, в отличие от обычных катушек кругового и квадратного сечения, в которых обнаруживается прямо противоположный растягивающий эффект. На рис. 3 показана катушка кругового сечения.

С учетом [5] выражение для индуктивности такой катушки может быть записано в виде (формула (6-25) в обозначениях рис. 3)

$$L = \frac{\mu_0}{2} w^2 D \left[\left(1 + \frac{\gamma_1^2}{2} \right) \ln \frac{4}{\gamma_1} - 1,75 + \frac{\gamma_1^2}{6} \right], \qquad (10)$$

где $\gamma_1 = d/2D$ и $\gamma_1 < 0,5$.

Результаты сопоставления численных значений для γ = 0,5, 0,7 и 0,9

Results of numerical value comparison for γ = 0.5, 0.7 and 0.9

$\gamma = d/D$	0,5	0,7	0,9
$\frac{1}{2}\left((1-\gamma^2)^{-1/2} - 1\right)$	0,0774	0,2001	0,6471
$\pi^{-1}(1-\gamma^2)^{-1}\gamma^2$	0,1061	0,3058	1,357

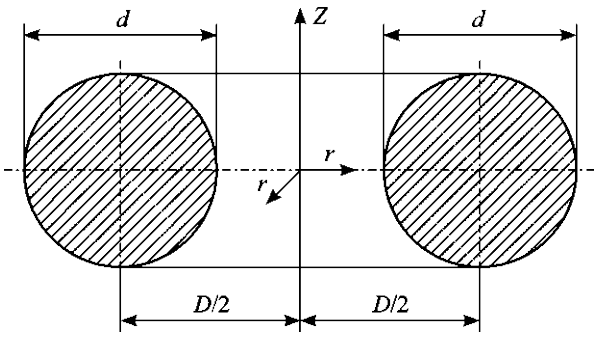

Рис. 3. Катушка кругового сечения с диаметром сечения *d* и с расстоянием между центрами *D*

Fig. 3. Coils of circular section with the section diameter *d* and distance between circle centers *D*

Силу растяжения в радиальном направлении находим по выражению

$$f_{\text{раст.}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial (r)} = i^2 \frac{\partial L}{\partial (D)}.$$

В итоге имеем

$$f_{\text{раст.}} = \frac{\mu_0 w^2 i^2}{2} \left[\left(1 - \frac{\gamma_1^2}{2} \right) \ln \frac{4}{\gamma_1} - 0,75 + \frac{\gamma_1^2}{3} \right]. \qquad (11)$$

Рассмотрим численный пример для $f_{\text{раст.}}$. Пусть $\gamma_1 = 0,2$, тогда

$$f_{\text{раст.}} = \frac{\mu_0 w^2 i^2}{2} \left[(1 - 0,02) \ln \frac{4}{0,2} - 0,75 + \frac{0,04}{3} \right] =$$

$$= \mu_0 w^2 i^2 1,0996.$$

Средняя во времени растягивающая сила в радиальном направлении при действующем значении синусоидального тока *I*, соответственно, равна

$$F_{\text{ср}} = 0,5 \mu_0 w^2 I^2 \left[\left(1 - \frac{\gamma_1^2}{2} \right) \ln \frac{4}{\gamma_1} - 0,75 + \frac{\gamma_1^2}{3} \right]. \qquad (12)$$

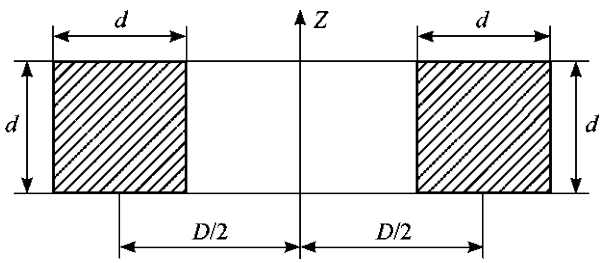

Рис. 4. Катушка квадратного сечения

Fig. 4. Coil of square section

Тогда при $\gamma_1 = 0,2$, $I = 20$ А и $w = 250$:

$$F_{\text{ср}} = 15,708 \text{ Н} \cong 1,602 \text{ кГс}.$$

Заметим, что величина тока и число витков выбраны только с целью сопоставления.

Теперь перейдем к катушке квадратного сечения со стороной квадрата, равной *d*, и расстоянием между центрами сечений, равным *D* (рис. 4). При этом воспользуемся выражением для индуктивности этой катушки, записанным в виде (6–13) с учетом (6–14) в [5]. В обозначениях рис. 4 имеем

$$L = \frac{\mu_0}{4} w^2 D \left[\left(1 + \frac{1}{6} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \ln \left(8 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right) - 1,6967 + 0,4082 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]. \qquad (13)$$

Дифференцирование выражения (13) по *D* дает

$$\frac{\partial L}{\partial D} = \frac{\mu_0}{4} w^2 \left\{ \left(1 + \frac{1}{6} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \ln \left(8 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right) - \right.$$

$$- 1,6967 + 0,4082 \left(\frac{d}{D} \right)^2 + D \left[\left(1 + \frac{1}{6} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) 2 \frac{1}{D} - \right.$$

$$\left. \left. - \ln \left(8 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right) \frac{d^2}{6} 2 D^{-3} - 2 \cdot 0,4082 d^2 D^{-3} \right] \right\} =$$

$$= \frac{\mu_0}{4} w^2 \left[\left(1 - \frac{1}{6} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \ln \left(8 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right) + \right.$$

$$\left. + 0,3033 + \left(\frac{1}{3} - 0,4082 \right) \frac{d^2}{D^2} \right] =$$

$$= \frac{\mu_0}{4} w^2 \left[\left(1 - \frac{1}{6} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \ln \left(8 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right) + \right.$$

$$\left. + 0,3033 - 0,0749 \frac{d^2}{D^2} \right].$$

Сила растяжения при этом будет определяться выражением

$$f_{\text{раст.}} = \mu_0 w^2 i^2 \frac{1}{4} \left[\left(1 - \frac{1}{6} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \ln \left(8 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \right) + \right.$$

$$\left. + 0,3033 - 0,0749 \frac{d^2}{D^2} \right]. \qquad (14)$$

Теперь, если $D/d = 3$ (катушка Брукса), то результат оказывается равным

$$f_{\text{раст.}} = \mu_0 w^2 i^2 1{,}1235.$$

Заметим, что для катушки кругового сечения при $D/d = 2{,}5$ было получено

$$f_{\text{раст.}} = \mu_0 w^2 i^2 1{,}0996.$$

При $d/2D = \gamma_1 = 1/6$ сила растяжения для катушки кругового сечения равна

$$f_{\text{раст.}} = \mu_0 w^2 i^2 \frac{1}{2}\left[\left(1-\frac{1}{72}\right)\ln\frac{4\cdot 6}{1} - 0{,}75 + \frac{\left(\frac{1}{6}\right)^2}{3}\right] =$$

$$= \mu_0 w^2 i^2 1{,}1966.$$

Остановимся на индуктивности сферической катушки [5]. Как сказано в [2], в сферическом накопителе витки охватывают общую ось и размещаются на поверхности сферы так, что максимальный ток оказывается в диаметральной плоскости (рис. 5).

Индуктивность сферической катушки в [5]

$$L_{\text{сф}} = \frac{\pi}{9}\mu_0 w^2 D. \qquad (15)$$

Сила растяжения в сферической катушке равна

$$f_{\text{раст.сф.}} = \frac{\pi}{9}\mu_0 w^2 i^2 = \mu_0 i^2 w^2 0{,}3491 \qquad (16)$$

и оказывается меньшей, чем по оценкам, данным для случая $D/d = 3$, т.е. для катушки Брукса, и для катушки кругового сечения при $D/d = 2{,}5$.

Рассмотрим теперь дисковую катушку (рис. 6).

Для оценки растягивающей электродинамической силы в этом случае воспользуемся выражением для индуктивности, данным в [5], где при малых значениях $\rho = d/D$ ($\rho < 0{,}5$) величину ψ, входящую в выражение для индуктивности, в виде

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} w^2 D\psi \qquad (17)$$

можно оценить в соответствии с формулой

$$\psi = 4\pi\left[\left(1+\frac{\rho^2}{24}+\ldots\right)\ln\frac{4}{\rho} - 0{,}5 + \frac{43}{288}\rho^2 + \ldots\right].$$

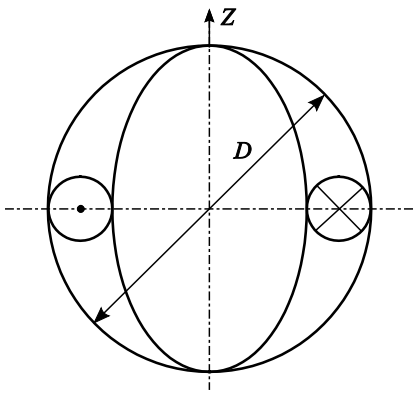

Рис. 5. Сферическая катушка с максимальным током в диаметральной плоскости, перпендикулярной оси Z с радиусом $D/2$ и с нулевым током на пересечении с этой осью

Fig. 5. Spherical coil with maximum current and centerline plane normal to Z-axis with the radius $D/2$ and zero current at intersection with this axis

При $\rho \le 0{,}2$ индуктивность L может быть записана в упрощенном виде [7], известной как аппроксимирующая формула Уилера:

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} w^2 D 4\pi\left(\ln\frac{4D}{d} - 0{,}5\right) = \frac{\mu_0 w^2 D}{2}\left(\ln\frac{4D}{d} - 0{,}5\right). \qquad (18)$$

Растягивающая сила для дисковой катушки в простейшем случае с учетом (18) определяется выражением

$$f_r = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial\left(\frac{D}{2}\right)} = \frac{\mu_0 w^2 i^2}{2}\left(\ln\frac{4D}{d} + 0{,}5\right). \qquad (19)$$

Полагая теперь $d/D = \rho = 0{,}2$, будем иметь следующую оценку:

$$f_r = \frac{\mu_0 w^2 i^2}{2}(\ln 20 + 0{,}5) \cong \mu_0 w^2 i^2 1{,}748.$$

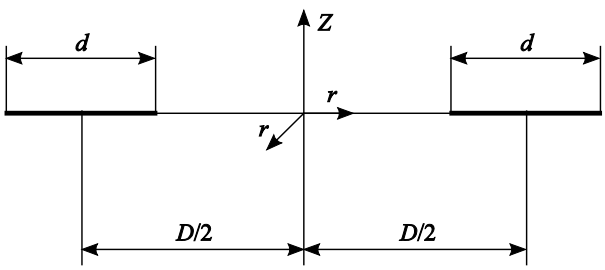

Рис. 6. Дисковая катушка

Fig. 6. Disk coils

Вывод

Conclusion

Целесообразность применения тороидальных катушек кругового и квадратного сечений обусловлена слабым проявлением внешнего магнитного поля. Даны выражения для стягивающих сил в тороидальных катушках кругового и прямоугольного сечений и проведено сопоставление их численных значений. Для тороидальной катушки кругового сечения получена оценка для средних во времени стягивающих сил при синусоидальном процессе с действующим значением тока 20 А и числом витков 250. Рассмотрен растягивающий эффект для катушек кругового сечения и даны численные оценки. Сопоставлены растягивающие силы в катушке Брукса и в сферической катушке. Эффекты центростремительного сжатия и центробежного растяжения должны быть учтены в конструктивном исполнении катушек.

Список использованной литературы

1. *Том Р., Тарр Дж.* Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. Основы расчета магнитных полей и сил. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 268 с.
2. Накопители энергии / *Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В.* Москва: Энергоатомиздат, 1991. 398, [1] с.
3. A Naval Integrated Power System with a Battery Energy Storage System: Fuel efficiency, reliability, and quality of power / *S.-Y. Kim, S. Choe, S. Ko, S.-K. Sul* // IEEE Electrification Magazine. 2015. Vol. 3, № 2. P. 22–33. DOI: 10.1109/MELE.2015.2413435.
4. *Двайт Г.Б.* Таблицы интегралов и другие математические формулы. Изд. 9-е, стер. Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2005. 228 с.
5. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. 487, [1] с.
6. *Grover F.W.* Inductance calculations: working formulas and tables. New York: Nostrand, 1947. XIV, 236 p.
7. *Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю.* Сопоставительный анализ выражений по расчету индуктивностей катушек с симметрией вращения // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 4. С. 58–66. DOI: 10.1134/S0002331019040150.

References

1. *R. Tom, J. Tarr*. Magnetic Systems of MHD-generators and Thermonuclear Installations (*Russian translation*). Moscow: Energoatomizdat, 1985. 268 p.
2. *D. But, B. Alievsky, S. Mizyurin, P. Vasyukevich*. Power accumulators. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 398 [1] p. (*in Russian*).
3. A Naval Integrated Power System with a Battery Energy Storage System: Fuel efficiency, reliability, and quality of power / *S.Y. Kim, S. Choe, S. Ko, S.K. Sul* // IEEE Electrification Magazine, 2015. Vol. 3, № 2. P. 22–33. DOI: 10.1109/MELE.2015.2413435.
4. *H.B. Dwight*. Tables of Integrals and Other Mathematical Data (*Russian translation*). St. Petersburg: Lan', 2005. 228 p.
5. *P. Kalantarov, L. Tseitlin*. Calculation of inductances. Reference book. 3rd ed., rev. and enl. Leningrad, Energoatomizdat, 1986. 487 p. (*in Russian*).
6. *Grover F.W.* Inductance calculations: working formulas and tables. New York: Nostrand, 1947. XIV. 236 p.
7. *G. Tsitsikyan, M. Antipov*. Comparative analysis of inductance calculation expressions for coils with rotation symmetry // Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering, 2019. No. 4. P. 58–66 (*in Russian*). DOI: 10.1134/S0002331019040150.

Сведения об авторе

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: George20021940@mail.ru. https://orcid.org/0000-0002-8813-6003.

About the author

Georgy N. Tsitsikyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, 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.

Поступила / Received: 29.07.21
Принята в печать / Accepted: 26.10.21
© Цицикян Г.Н., 2021