

М.Ю. Антипов¹, П.С. Данилович²

¹ Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ В СТЯГИВАЮЩЕЙ ШПИЛЬКЕ СОЛЕНОИДА НАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Объект и цель научной работы. Для швартовых испытаний генераторных агрегатов переменного тока применяются нагрузочные устройства с заданным коэффициентом мощности. Объектом исследования являются активно-индуктивные элементы в виде соленоидов с водяным охлаждением, разработанные для обеспечения приемлемых массогабаритных характеристик нагрузочных устройств. Цель исследования состоит в оценке потерь на тепловыделение в стягивающей шпильке соленоидов в новом конструктивном исполнении, помещенной внутрь соленоида для повышения надежности и технологичности.

Материалы и методы. Расчет активно-индуктивных параметров соленоида проводится с учетом известных рекомендаций. На основе закона Био – Савара – Лапласа определяется распределение магнитной индукции на оси соленоида. Представлены графики магнитной индукции по оси соленоида при разном соотношении его длины и диаметра. Производится оценка на тепловыделение в шпильке соленоида с учетом поверхностного эффекта в новом конструктивном исполнении нагрузочного устройства.

Основные результаты. Проведен расчет тепловыделения для шпилек, выполненных из меди, алюминия и стали.

Заключение. Проанализирована целесообразность применения стягивающей шпильки из нержавеющей стали, которая внедрена в соленоиды нового конструктивного исполнения.

Ключевые слова: нагрузочное устройство, потери на тепловыделение, стягивающая шпилька соленоида.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Антипов М.Ю., Данилович П.С. Оценка потерь в стягивающей шпильке соленоида нагрузочного устройства переменного тока с водяным охлаждением. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 76–80.

УДК 621.313

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-76-80

M. Antipov¹, P. Danilovich²

¹ TSNII SET Branch, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), Russia

LOSS ASSESSMENT IN CLAMPING PIN OF WATER-COOLED AC LOADING DEVICE (LOADBANK) SOLENOID

Object and purpose of research. Mooring tests of AC gensets are performed using loading devices (loadbank) with pre-set power coefficient. This paper studies water-cooled elements (solenoids) developed to ensure acceptable mass and size of loadbank. The purpose of this study is to assess heat emission losses in clamping solenoid pins of new design, installed into the solenoid active-inductive to enhance reliability and ease of manufacturing.

Materials and methods. Active-inductive parameters calculation are performed as per know recommendations for solenoid. Magnetic induction distribution over the solenoid axis is determined as per Biot-Savart-Laplace law. The plots are given for magnetic induction along the axis of solenoid with different length/diameter ratios. Heat emission of solenoid clamp is assessed taking into account the surface effect in the newly designed loading device.

Main results. Heat emission was calculated for the pins made of copper, aluminium and steel.

Conclusion. This paper analysed whether clamping pins of newly designed solenoids are practicable to make of stainless steel.

Key words: loadbank, heat emission losses, clamping pin of solenoid.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Antipov M., Danilovich P. Loss assessment in clamping pin of water-cooled AC loading device (loadbank) solenoid. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 76–80 (in Russian).

UDC 621.313

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-76-80

При швартовных испытаниях генераторных агрегатов обычно применяются специально разработанные нагрузочные устройства с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0,8$. Условия проведения испытаний (на палубе корабля или непосредственно на достроечной пристани) сильно ограничивают размеры и массу разрабатываемых устройств. Для обеспечения приемлемых габаритов обычно применяют нагрузочные устройства, охлаждаемые водой. Элементами нагрузки для таких устройств служат соленоиды, изготовленные из медной и нержавеющей проволоки на стеклотекстолитовом каркасе. До недавнего времени использовались трехслойные соленоиды (рис. 1а) с отводами, выполненными как на наружной (активной), так и на внутренней (индуктивной) частях, но такие элементы нагрузки отличались большим весом, сложным подводимым шинопроводом, малой технологичностью изготовления, высокой стоимостью, низкой надежностью стеклотекстолитового каркаса. Для устранения этих недостатков были разработаны новые элементы нагрузки (рис. 1б).

Новые элементы нагрузки имеют всего 2 слоя. Отводы выполнены только на внешней поверхности соленоида. В новой конструкции нижняя и верхняя панели с присоединенными гребенками, на которые навивается проволока, скреплены с помощью шпильки, выполненной из немагнитной нержавеющей стали. При изменении тока и магнитного поля в соленоиде внутри шпильки наводится вихревой ток, который приводит к ее нагреву. Потерю энергии внутри шпильки можно оценить по формуле, приведенной в главе 30 [1]:

$$P = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}} ul \frac{H_{me}^2}{2} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}} ul H_e^2, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; l – длина проводника; u – периметр; μ – магнитная проницаемость; γ – проводимость; H_{me} – амплитуда напряженности магнитного поля, направленного по касательной к поверхности шпильки; H_e – действующее значение напряженности магнитного поля.

Расчет напряженности магнитного поля проведем для элемента нагрузки трехфазного нагрузочного устройства мощностью 1250 кВт. Устройство имеет 5 ступеней мощности и состоит из 15 элементов нагрузки, размещенных в баке с водой, объединенных в звезду по три на каждую ступень. Активная мощность каждого соленоида – 83,3 кВт.

Ток через соленоид составит

$$I_C = \frac{P}{U_\Phi \cos\varphi} = \frac{P\sqrt{3}}{U_\Delta \cos\varphi} = \frac{\sqrt{3} \cdot 83300}{400 \cdot 0,8} = 451 \text{ A.}$$

Полное, активное и реактивное сопротивления соленоида, соответственно, будут равны

$$Z = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3} \cdot I_C} = \frac{400}{1,73 \cdot 451} = 0,51 \text{ Ом;}$$

$$R = \frac{P}{I_C^2} = \frac{83300}{451^2} = 0,41 \text{ Ом;}$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{0,51^2 - 0,41^2} = 0,3 \text{ Ом.}$$

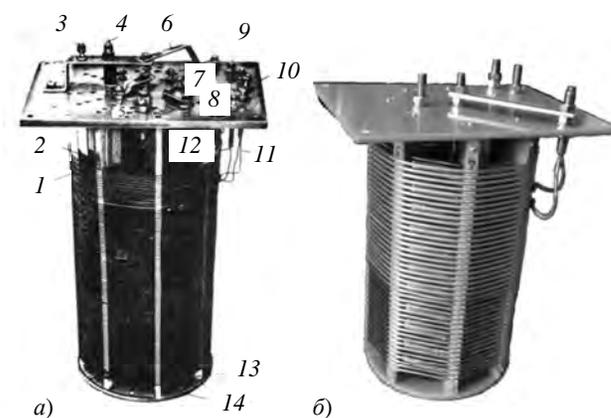


Рис. 1. Элементы нагрузки: а) элемент нагрузки старой конструкции; б) элемент нагрузки в новом конструктивном исполнении

Fig. 1. Loading elements: а) the old design; б) the new design

Тогда индуктивность соленоида равна

$$L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{0,3}{2\pi \cdot 30} = 0,96 \text{ мГн},$$

где f – частота.

Зная индуктивность, можно определить необходимое количество витков w в соленоиде. Будем считать, что диаметр D и длина h_C соленоида в нагрузочном устройстве конструктивно заданы посадочными местами в баке, равными 0,3 и 0,4 м.

Для определения индуктивности воспользуемся расчетным выражением, пригодным как для длинного, так и для короткого соленоидов, которое приведено в [2] без промежуточного обращения к табличным значениям в справочном руководстве [3]:

$$L = \mu_0 w^2 \frac{D}{2} \times \quad (2)$$

$$\times \left[\ln \left(1 + \frac{\pi D}{2h_C} \right) + \frac{1}{2,3004 + 3,437 \frac{h_C}{D} + 1,7636 \left(\frac{h_C}{D} \right)^2 - \frac{0,47}{\left(0,755 + \frac{D}{h_C} \right)^{1,44}}} \right],$$

где w – количество витков соленоида; D – диаметр соленоида; h_C – длина соленоида.

Можно использовать и другие формулы, некоторые из которых приведены в [4] – они дают весьма точные результаты, но требуют большего количества вычислений и не обладают универсально-

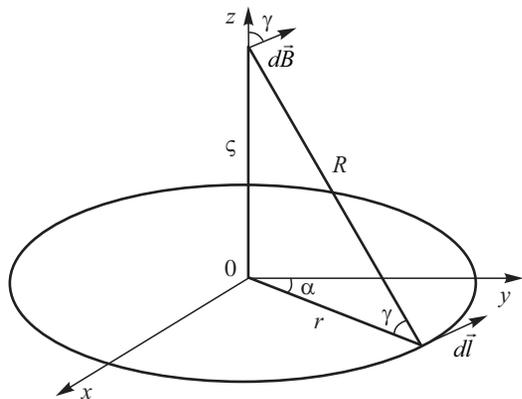


Рис. 2. К выводу магнитной индукции от элементарного витка с током

Fig. 2. To magnetic induction output from an elementary coil with current

стью. В результате вычислений, основанных на формуле (2), и последующим округлением числа витков до целочисленного значения получаем $w \approx 76$ витков.

Так как диаметр шпильки d значительно меньше диаметра соленоида D , будем полагать, что магнитная индукция на ее поверхности равна магнитной индукции на оси соленоида. Рассмотрим вклад в магнитную индукцию соленоида, оказываемую от элементарного витка с током. Из закона Био – Савара – Лапласа следует

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\vec{R} \times d\vec{l}}{|R|^3}; \quad (3)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_0^{2\pi} \frac{\vec{R} \times d\vec{l}}{|R|^3}. \quad (4)$$

Из рис. 2 видно что $R = \sqrt{r^2 + \zeta^2}$, $dl \approx r d\alpha$. Элементы тока кольца будут образовывать конус векторов магнитной индукции, так что результирующий вектор направлен вдоль оси Oz . Проекция магнитной индукции от одного элемента на ось Oz будет равна

$$dB_z = dB \cos \gamma = \frac{r}{R} dB, \quad (5)$$

а магнитная индукция от одного витка в точке, расположенной на оси Oz на расстоянии ζ , будет вычисляться по формуле

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_0^{2\pi} \frac{r^2 d\alpha}{R^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{r^2 \alpha}{R^3} \Big|_0^{2\pi} = \frac{\mu_0}{2} I \frac{r^2}{(r^2 + \zeta^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

Вывод формулы (6) приведен в [П1.16, 4].

Переход к определению магнитной индукции на оси соленоида на расстоянии h от его начала осуществляется интегрированием с использованием представления о поверхностном слое тока Iw/h_C . Если принять, что $r = \lambda_0 h_C$, $h = \lambda_h h_C$, то из этого следует

$$\begin{aligned} dB_C &= \frac{\mu_0 I w r^2 dh}{2h_C (h^2 + r^2)^{3/2}} = \\ &= \frac{\mu_0 I w (\lambda_0 h_C)^2 h_C d\lambda_h}{2h_C \left((\lambda_h h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{3/2}} = \\ &= \frac{\mu_0 I w (\lambda_0 h_C)^2 d\lambda_h}{2 \left((\lambda_h h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{3/2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя таблицу интегралов [(200, 03), 6], находим магнитную индукцию B по оси соленоида на расстоянии h от его начала:

$$\begin{aligned}
 B(\lambda_h) &= \int_0^{\lambda_h} \frac{\mu_0 I w (\lambda_0 h_C)^2 d\lambda}{2 \left((\lambda h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{3/2}} + \\
 &+ \int_0^{1-\lambda_h} \frac{\mu_0 I w (\lambda_0 h_C)^2 d\lambda}{2 \left((\lambda h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{3/2}} = \\
 &= \frac{\mu_0 I w (\lambda_0 h_C)^2}{2} \left(\int_0^{\lambda_h} \frac{d\lambda}{\left((\lambda h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{3/2}} + \right. \\
 &\left. + \int_0^{1-\lambda_h} \frac{d\lambda}{\left((\lambda h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{3/2}} \right) = \\
 &= \frac{\mu_0 I w (\lambda_0 h_C)^2}{2} \left(\frac{1}{(\lambda_0 h_C)^2} \frac{\lambda}{\left((\lambda h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{1/2}} \Big|_0^{\lambda_h} + \right. \\
 &\left. + \frac{1}{(\lambda_0 h_C)^2} \frac{\lambda}{\left((\lambda h_C)^2 + (\lambda_0 h_C)^2 \right)^{1/2}} \Big|_0^{1-\lambda_h} \right) = \\
 &= \frac{\mu_0 I w}{2 h_C} \left(\frac{\lambda_h}{(\lambda_h^2 + \lambda_0^2)^{1/2}} + \frac{1-\lambda_h}{\left((1-\lambda_h)^2 + \lambda_0^2 \right)^{1/2}} \right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

При $\lambda_h = h/h_C = 0$ и $\lambda_h = h/h_C = 1$ в выражении (8) равен нулю первый или второй член, а значение магнитной индукции минимально и соответствует концам соленоида (см. (9)), при $\lambda_h = h/h_C = 1/2$ соответствует середине соленоида (см. (10)):

$$B_C(0) = B_C(h_C) = \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^l \frac{\mu_0 I w r^2 dh}{2 h_C (h^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I w r^2}{2 h_C} \frac{1}{r^2} \frac{h}{(h^2 + r^2)^{1/2}} \Big|_0^{h_C} = \\
 &= \frac{\mu_0 I w}{2} \frac{1}{h_C (1 + \lambda_0^2)^{1/2}};
 \end{aligned}$$

$$B_C\left(\frac{l}{2}\right) = 2 \int_0^{h_C/2} \frac{\mu_0 I w r^2 dh}{2 h_C (h^2 + r^2)^{3/2}} = \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \frac{\mu_0 I w r^2}{2 h_C} \frac{1}{r^2} \frac{h}{(h^2 + r^2)^{1/2}} \Big|_0^{h_C/2} = \frac{\mu_0 I w}{2} \frac{1}{h_C \left(\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \lambda_0^2 \right)^{1/2}}.
 \end{aligned}$$

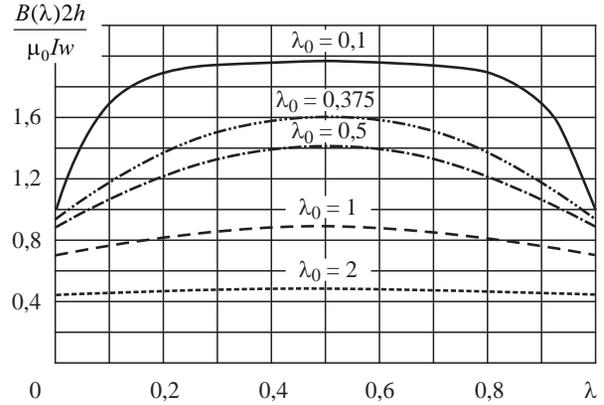


Рис. 3. График магнитной индукции, нормированной по величине $\mu_0 I w / 2 h_C$, на оси соленоида для $\lambda_0 = 0,1; 0,375; 0,5; 1; 2$

Fig. 3. Magnetic induction normalized by $\mu_0 I w / 2 h_C$, at the solenoid axis for $\lambda_0 = 0.1; 0.375; 0.5; 1; 2$

На рис. 3 приведен график нормированной по величине $\mu_0 I w / 2 h_C$ магнитной индукции на оси соленоида при отношении $\lambda_0 = r/h_C = 0,1; 0,375; 0,5; 1; 2$. Следует отметить, что при увеличении диаметра соленоида с сохранением его длины магнитная индукция на оси будет заметно уменьшаться.

С учетом выражения (8) можно записать формулу (1) в виде

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \gamma}} \left(\frac{I w}{h_C} \right)^2 \times \\
 &\times \frac{u}{4} \int_0^1 \left[\frac{\lambda}{(\lambda^2 + \lambda_0^2)^{1/2}} + \frac{1-\lambda}{\left((1-\lambda)^2 + \lambda_0^2 \right)^{1/2}} \right]^2 d\lambda. \quad (11)
 \end{aligned}$$

При проведении расчетов для нержавеющей немагнитной стали магнитная проницаемость и проводимость были взяты равными $\mu_{\text{нерж.}} = 1,0016 \mu_0$, $\gamma = 1,33 \cdot 10^6$ Сим/м, а для меди и алюминия – $\mu_{\text{медн.}} = 0,999912 \mu_0$, $\gamma_{\text{медн.}} = 58,1 \cdot 10^6$ Сим/м и $\mu_{\text{алюм.}} = 1,25665 \cdot 10^{-6} \mu_0$, $\gamma = 37 \cdot 10^6$ Сим/м соответственно. Магнитные и электрические свойства электротехнических материалов даны в справочнике [7]. Диаметр стягивающей шпильки $r = 0,016$ м.

Потери на тепловыделение вычислялись по выражению (11) в программе MathCad14. Для нержавеющей стали они составили 2206 Вт, для меди – 333 Вт, для алюминия – 417 Вт.

Анализируя полученные результаты, следует обратить внимание, что при изготовлении стягивающих шпилек из алюминиевых и медных сплавов требуется дополнительное дорогостоящее антикоррози-

онное покрытие. Из представленных выше графиков для магнитной индукции на оси соленоида можно сделать вывод, что большая часть тепловыделения происходит в средней зоне стягивающей шпильки. Поэтому в местах ее крепления с верхней и нижней панелями соленоида не должны наблюдаться какие-либо негативные последствия. Таким образом, установлено, что нахождение шпильки внутри соленоида не будет оказывать существенного влияния на его эксплуатационные характеристики. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о целесообразности применения нержавеющей стали при изготовлении стягивающей шпильки в конструкции новых соленоидов нагрузочных устройств.

Библиографический список

References

1. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. В 3-х т. Т. 3. СПб.: Питер, 2003. [K. Demirchan, L. Neiman, N. Korovkin, V. Chechurin. Theoretical fundamentals of electric engineering. In 3 vol. Vol. 3, St. Petersburg: Piter, 2003. (in Russian)].
2. Weaver R. Numerical methods for inductance calculation [Электрон. ресурс] / Сайт Bob's Electron Bunker. URL: <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods.html>.
3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивности. Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. [P. Kalantarov, L. Tseintlin. Inductance calculation. Reference book. Leningrad: Energoatomizdat (Leningrad Branch), 1986. (in Russian)].
4. Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю. Индуктивность тонко-слоистых катушек круговой и квадратной формы // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 6. [G. Tsitsikyan, M. Antipov. Inductance of thin-layered coils of circular and square shape // Proceedings of Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2017: 6. (in Russian)].
5. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. Основы расчета магнитных полей и сил. М.: Энергоатомиздат, 1985. [R. Tom, J. Tarr. Magnetic Systems of MHD-generators and Thermonuclear Installations Moscow: Energoatomizdat, 1985. (in Russian)].
6. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. СПб.: Лань, 2005. [H.B. Dwight. Tables of Integrals and Other Mathematical Data. St. Petersburg: Lan', 2005. (in Russian)].
7. Герасимов В.Г., Грудинский П.Г., Жуков Л.А. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т. 1 Общие вопросы. Электротехнические материалы. М.: Энергия, 1980. [V. Gerasimov, P. Grudinsky, L. Zhukov. Electric engineering. Reference book. In 3 vol. Vol. 1. General questions. Electrotechnical materials. Moscow: Energiya, 1980. (in Russian)].

Сведения об авторах

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

Данилович Павел Сергеевич, студент факультета электротехники и автоматики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Адрес: 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. Тел.: 8 (812) 346-44-87. E-mail: dps8558@gmail.com.

About the authors

Antipov, Mikhail Yu., 2nd Category Design Engineer, SET Branch, KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 369-94-91. E-mail: set@sp.ru.

Danilovich, Pavel S., Student, Faculty of Industrial Automation and Electrical Engineering, St. Petersburg, State Electrotechnical University (LETI). Address: 5, Professora Popova st., St. Petersburg, post code 197376. Tel.: 8 (812) 346-44-87. E-mail: dps8558@gmail.com.

Поступила / Received: 29.01.18
Принята в печать / Accepted: 01.06.18
© Антипов М.Ю., Данилович П.С., 2018