
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.3-1/-8: 621.3.047.3
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-264-269

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ПАР КОНТАКТОВ ДЛЯ КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНОГО КОЛЬЦА

П. СИМОНОВ, М. В. АБРАМЧУК, И. А. БЖИХАТЛОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: psimonov@itmo.ru*

Приведены особенности построения концентрических токопроводящих колец с применением тел качения, в качестве которых планируется использовать конструкции, подобные подшипникам качения. Такая конструкция обладает преимуществами перед скользящими элементами, а именно: большой эксплуатационный ресурс, высокая скорость вращения и низкий момент сопротивления. Подробно рассмотрены причины возникновения электрического шума в работающих контактных кольцах на примере электрических схем, содержащих подключенные параллельно резисторы. На примере исследуемой электрической схемы, в которую добавлена пара контактов, определена зависимость величины сопротивления в контактных кольцах от числа подведенных к ним контактов.

Ключевые слова: *контактные кольца, скользящие контакты, электрический шум, резисторы, сопротивление*

Введение. Стандартные конструкции контактных колец [1—4] содержат либо скользящие по токопроводящему кольцу щетки/пластины, либо элементы, скользящие по(в) жидкости. Однако возможно создание конструкции концентрических токопроводящих колец с применением тел качения. В основу конструкции предлагается положить элементы, подобные элементам подшипника качения, в частности, шарикоподшипники. Преимуществами катящихся элементов перед скользящими являются большой эксплуатационный ресурс, высокая скорость вращения и низкий момент сопротивления. При этом на малых скоростях вращения ресурс подшипников возрастает за счет минимальной нагрузки, вызываемой центробежной силой. Перечисленные качества пригодятся в устройствах, в которых вращение постоянно и может достигать больших скоростей, например в башне ветрогенератора. Ветрогенераторы работают безостановочно, для этого необходима передача между подвижной частью конструкции и основанием как данных управления, так и генерируемого питания. Именно в таких установках и применяются контактные кольца, требования к надежности и сроку службы которых высоки [5—9].

Электрический шум. Рассмотрим причины возникновения электрического шума в контактных кольцах. В отличие от обычных электрических проводников токопроводящие кольца имеют подвижные элементы, что делает их похожими на резисторы с переменным сопротивлением.

Для понимания того, как сопротивление меняется в токопроводящем контактном кольце, рассмотрим наиболее простую схему, в которой к контактному кольцу подходит один

подвижный скользящий элемент, а отходит один статичный. Таким образом, в этом кольце возможны три относительных положения „приближающегося“ и „отдаляющегося“ контактов (рис. 1): между контактами минимальное (слева) и максимальное расстояние (справа), промежуточное положение (в центре).

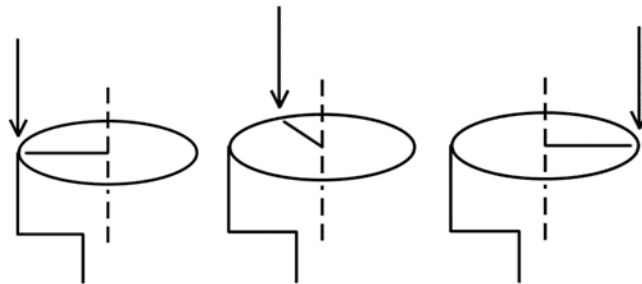


Рис. 1

Примем, что сопротивление в самих точках соприкосновения скользящего элемента с кольцом постоянное, а потому на величину сопротивления в устройстве не влияет, хоть и влияет на минимально возможное сопротивление контактного кольца. Исключим названное сопротивление из расчетов и таким образом получим представление о величине переменного сопротивления.

Когда расстояние между контактами устройства минимально, минимально и сопротивление. По мере перемещения скользящего элемента растет сопротивление. Кольцо можно представить двумя параллельно подключенными резисторами (рис. 2).

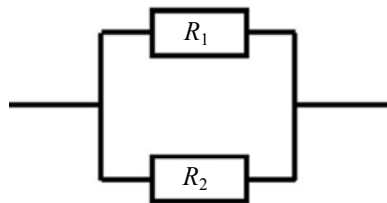


Рис. 2

Для простоты примем, что влияние формы и однородности материала кольца на сопротивление пренебрежимо мало, тогда сопротивление каждого из этих резисторов пропорционально длине пути между контактами устройства. Из этого получаем сопротивление каждого из участков кольца от угла поворота [10, 11]:

$$R_1(\theta) = \frac{\theta}{2\pi} R_k, \quad R_2(\theta) = R_k - R_1,$$

где $\theta \in [0, 2\pi]$ — угловая координата положения скользящего элемента, R_1 — сопротивление первого участка кольца, R_2 — сопротивление второго участка, R_k — сопротивление контактного кольца, представленного линейным проводником. Сопротивление всего контактного кольца определяется удельным сопротивлением материала, а также диаметром и площадью поперечного сечения кольца.

Так как кольцо рассматривается как два параллельных резистора, то общее сопротивление устройства рассчитывается следующим образом:

$$\begin{aligned} R_{\text{общ}}(\theta) &= \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_k - R_1} \right)^{-1} = \\ &= \left(\frac{1}{\frac{\theta}{2\pi} R_k} + \frac{1}{R_k - \frac{\theta}{2\pi} R_k} \right)^{-1} = R_k \left(\frac{1}{\frac{\theta}{2\pi}} + \frac{1}{1 - \frac{\theta}{2\pi}} \right)^{-1} = R_k \left[\frac{\theta}{2\pi} - \left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

По мере приближения скользящего контакта к координате $\theta = \pi$ (половине оборота) сопротивление устройства растет и достигает пикового значения

$$R_{\max} = R_{\text{общ}}(\pi) = R_k \left[\frac{\pi}{2\pi} - \left(\frac{\pi}{2\pi} \right)^2 \right] = R_k \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} \right)^2 \right] =$$

$$= R_k \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \right] = \frac{R_k}{4}.$$

После данной координаты сопротивление начинает падать до $\theta = 2\pi$:

$$R_{\text{общ}}(2\pi) = R_k \left[\frac{2\pi}{2\pi} - \left(\frac{2\pi}{2\pi} \right)^2 \right] = R_k [1 - 1^2] = 0.$$

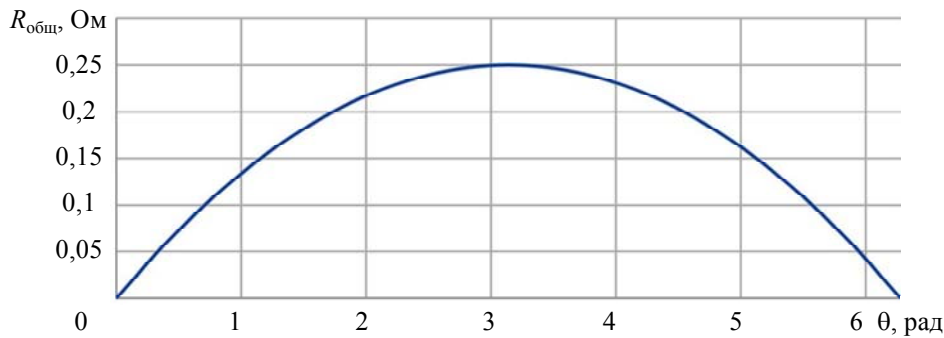


Рис. 3

Полученный закон для $R_k = 1$ может быть описан рис. 3. Таким образом, сопротивление устройства достигает максимального значения $R_{\max} = \frac{R_k}{4}$. Именно эта величина наиболее значима при рассмотрении возникающего при повороте устройства электрического шума в токопроводящих контактных кольцах.

Теперь следует понять, как сопротивление зависит от числа подведенных к кольцу контактов. Дополним представленную на рис. 1 схему парой контактов (рис. 4).

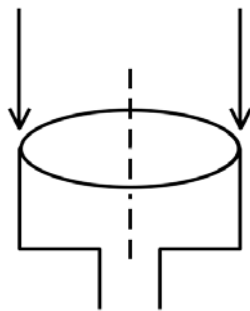


Рис. 4

Устройство может находиться в трех возможных положениях, что и устройство с одной парой контактов, но содержать не два, а четыре участка (рис. 5).

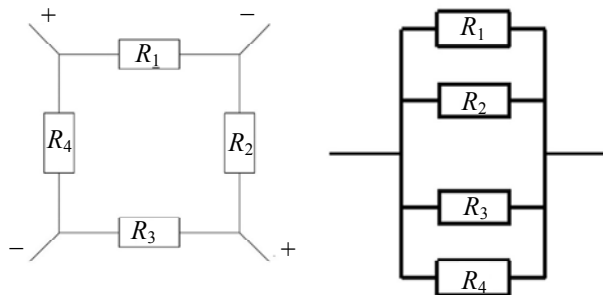


Рис. 5

Вид преобразованной схемы аналогичен полученному для устройства с одной парой контактов (см. рис. 2), но теперь это четыре последовательно подключенных резистора, где сопротивление каждого в положении максимального сопротивления устройства рассчитывается как $R_i = \frac{R_k}{4}$.

Тогда общее сопротивление устройства в этом состоянии

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{max}} = \left(4 \frac{1}{R_i}\right)^{-1} = \left(4 \frac{1}{\frac{R_k}{4}}\right)^{-1} = \left(\frac{16}{R_k}\right)^{-1} = \frac{R_k}{16}.$$

Из полученного расчета можно видеть, что сопротивление контактного кольца стало меньше в $\frac{R_k}{4} : \frac{R_k}{16} = 4$ раза. Добавляя пары контактов устройства, можно снижать сопротивление, дойдя до частного случая с бесконечным числом пар. На практике такое устройство представляло бы собой два соосно размещенных токопроводящих кольца, по всей длине которых проходит ток, а сопротивление равно нулю.

Можно вывести зависимость сопротивления контактного кольца от числа подведенных к нему пар контактов [12—14]. При добавлении пар электрическая схема будет претерпевать те же изменения, что и ранее (см. рис. 2, 5).

Обозначим число пар контактов n , тогда сопротивление каждого резистора будет рассчитываться как $R_i = \frac{R_k}{2n}$. Подставим это выражение в полученное ранее выражение для расчета R_{max} :

$$R_{\text{max}}(n) = \left(2n \frac{1}{R_i}\right)^{-1} = \left(2n \frac{1}{\frac{R_k}{2n}}\right)^{-1} = \left(\frac{4n^2}{R_k}\right)^{-1} = \frac{R_k}{4n^2}.$$

Для наглядности снова примем $R_k = 1$, зависимость сопротивления от числа пар контактов n , подведенных к кольцу, приведена на рис. 6.

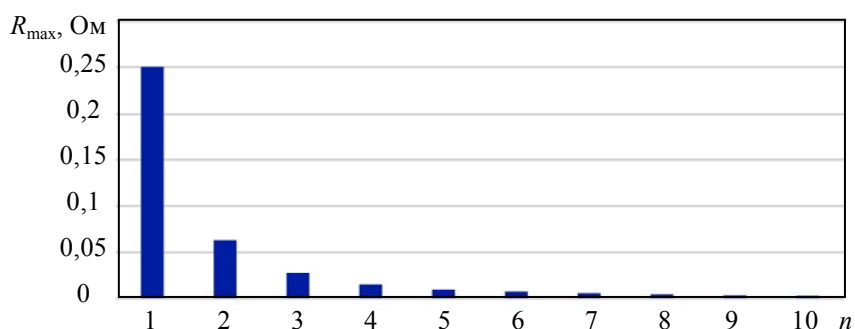


Рис. 6

Из диаграммы видно, что каждая следующая добавленная пара контактов все меньше влияет на сопротивление контактного кольца R_{max} , из чего можно сделать вывод, что оптимальное число пар 3 или 4.

Заключение. В работе приведен пример создания концентрических токопроводящих колец с применением тел качения на основе шарикоподшипников. Подобная конструкция имеет преимущества перед скользящими элементами, традиционно используемыми в токопроводящих контактных кольцах. Расчеты показали, что для разрабатываемого устройства оптимальное число пар контактов — 3 или 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Devine E. J. Rolling element slip rings for vacuum application. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1964.
2. Suzumura J. Prevention of electrical pitting on rolling bearings by electrically conductive grease // Quarterly Report of RTRI. 2016. Vol. 57, N 1. P. 42—47. DOI: https://doi.org/10.2219/rtrigr.57.1_42.
3. Deng Z., Li W., Li C. Slip-ring-based multi-transducer photoacoustic tomography system // Optics letters. 2016. Vol. 41, N 12. P. 2859—2862. DOI: 10.1364/OL.41.002859.
4. Avino F., Gaffinet B., Bommottet D., Howling A., & Furno I. Slip Ring Test Assembly with Increased Breakdown Voltage Limit for High-Voltage Bus Satellites // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2020. Vol. 35, N 8. P. 32—36. DOI: 10.1109/MAES.2020.2993388.
5. Egeto T., Farkas B. Model Reference Adaptive System for the Online Rotor Resistance Estimation in the Slip-Ring Machine Based Test-bench // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 2018. Vol. 62, N 4. P. 149—154. DOI: 10.3311/PPee.12495.
6. Zhang Q., Xie Z., Liu Y., & Liu H. Development of Bolt Screwing Tool Based on Pneumatic Slip Ring // Intern. Conf. on Intelligent Robotics and Applications. Springer, Cham, 2019. P. 462—469. DOI: 10.1007/978-3-030-27526-6_40.
7. Kulhari P., Soni R. K. Simulation and Analysis of the Slip Recovery Energy Method for the Speed Control of Three-phase Slip Ring Induction Motor // Intern. J. of Microwave Engineering and Technology. 2019. Vol. 5, N 1. P. 24—30. DOI: 10.37628/ijmet.v5i1.1086.
8. Astolfi D., Castellani F., Natili F. Wind turbine generator slip ring damage detection through temperature data analysis // Diagnostyka. 2019. Vol. 20, N 30. P. 3—9. DOI: 10.29354/diag/109968.
9. Zhu X., Cheng M. Design and analysis of 10 MW class HTS exciting double stator direct-drive wind generator with stationary seal // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 51129—51139. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2911298.
10. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Оникс 21 в., 2005. 463 с.
11. Герасимов В. Г., Кузнецов Э. В., Николаева О. В. Электротехника и электроника. Кн. 1. Электрические и магнитные цепи. М.: Энергоатомиздат, 1996. 288 с.
12. Осипов Ю. М., Петров Е. А. Анализ разветвленных цепей постоянного и переменного тока. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 42 с.
13. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. СПб: Лань, 2017. 544 с.
14. Усольцев А. А. Нелинейные электрические и магнитные цепи. СПб: НИУ ИТМО, 2018. 114 с.

Сведения об авторах

- Петр Симонов** — магистрант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: psimonov@itmo.ru
- Михаил Владимирович Абрамчук** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; преподаватель; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
- Ислам Асланович Бжихатлов** — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: bia@itmo.ru

Поступила в редакцию
07.12.2020 г.

Ссылка для цитирования: Симонов П., Абрамчук М. В., Бжихатлов И. А. Определение оптимального числа пар контактов для конструкции контактного кольца // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 264—269.

DETERMINING THE OPTIMAL NUMBER OF CONTACT PAIRS FOR A SLIP RING DESIGN

P. Simonov, M. V. Abramchuk, I. A. Bzhikhatlov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: psimonov@itmo.ru

Several features of constructing concentric conductive rings using rolling elements, which are planned to be used as structures like rolling bearings, are described. Such a design is reported to have advantages over sliding elements, including a large service life, high rotation speed, and low drag moment. The reasons for the occurrence of electrical noise in working slip rings are considered in detail using the example of electrical circuits containing resistors connected in parallel. Using the example of the investigated electrical circuit, to which a pair of contacts is added, the dependence of the resistance value in the slip rings on the number of contacts connected to them is determined.

Keywords: slip ring, contact ring, sliding contacts, electrical noise, resistors, resistance

REFERENCES

1. Devine E.J. *Rolling element slip rings for vacuum application*, Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration, 1964.
2. Suzumura J. *Quarterly Report of RTRI*, 2016, no. 1(57), pp. 42–47, DOI: https://doi.org/10.2219/rtriqr.57.1_42.
3. Deng Z., Li W., Li C. *Optics letters*, 2016, no. 12(41), pp. 2859–2862, DOI: 10.1364/OL.41.002859.
4. Avino F., Gaffinet B., Bommottet D., Howling A., & Furno I. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, no. 8(35), pp. 32–36, DOI: 10.1109/MAES.2020.2993388.
5. Egeto T., Farkas B. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2018, no. 4(62), pp. 149–154, DOI: 10.3311/PPee.12495.
6. Zhang Q., Xie Z., Liu Y., & Liu H. *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Springer, Cham, 2019, pp. 462–469, DOI: 10.1007/978-3-030-27526-6_40.
7. Kulhari P., Soni R.K. *International Journal of Microwave Engineering and Technology*, 2019, no. 1(5), pp. 24–30, DOI: 10.37628/ijmet.v5i1.1086.
8. Astolfi D., Castellani F., Natili F. *Diagnostyka*, 2019, no. 30(20), pp. 3–9, DOI: 10.29354/diag/109968.
9. Zhu X., Cheng M. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 51129–51139, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2911298.
10. Matveyev A.N. *Elektrichestvo i magnetizm* (Electricity and Magnetism), Moscow, 2005, 463 p. (in Russ.)
11. Gerasimov V.G., Kuznetsov E.V., Nikolayeva O.V. *Elektrotehnika i elektronika. kniga 1. Elektricheskiye i magnitnyye tsepi* (Electrical and Electronics. Book 1. Electric and Magnetic Circuits), Moscow, 1996, 288 p. (in Russ.)
12. Osipov Yu.M., Petrov E.A. *Analiz razvetvlenykh tsepey postoyannogo i peremennogo toka* (AC and DC Branched Circuit Analysis), St. Petersburg, 2002, 42 p. (in Russ.)
13. Beletskiy A.F. *Teoriya lineynykh elektricheskikh tsepey* (Theory of Linear Electrical Circuits), St. Petersburg, 2017, 544 p. (in Russ.)
14. Usoltsev A.A. *Nelineynyye elektricheskiye i magnitnyye tsepi* (Non-Linear Electrical and Magnetic Circuits), St. Petersburg, 2018, 114 p. (in Russ.)

Data on authors

- Petr Simonov** — Undergraduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: psimonov@itmo.ru
- Mikhail V. Abramchuk** — канд. техн. наук; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Lecturer; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
- Islam A. Bzhikhatlov** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: bia@itmo.ru

For citation: Simonov P., Abramchuk M. V., Bzhikhatlov I. A. Determining the optimal number of contact pairs for a slip ring design. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 4. P. 264–269 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-4-264-269