

## Учет потерь на вихревые токи в обмотках электродвигателей с полым якорем

Наталья В. Прибылова <sup>1</sup>	n.pribylova@mail.ru
Сергей А. Филонов <sup>1</sup>	filonovser@yandex.ru
Екатерина Ю. Желтоухова <sup>2</sup>	Katsturova@gmail.com

<sup>1</sup> Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Реферат.** Приведено обоснование целесообразности учета потерь на вихревые токи в обмотках малоинерционных электродвигателей постоянного тока с беспазовыми магнитоэлектрическими системами. Возросшая за последнее время мощность этих электродвигателей (за счет применения высококоэрцитивных постоянных магнитов) вызвала увеличение объема меди в воздушном зазоре, а также величины магнитной индукции. Всё это явилось причиной возникновения существенных вихревых токов в обмотках, вынесенных в воздушный зазор, и, следовательно, необходимости учёта потерь от этих токов. Экспериментально получена зависимость потерь на вихревые токи от частоты вращения для электродвигателя постоянного тока с полым якорем мощностью 350 Вт. Величина этих потерь может достигать 30% от номинальной мощности электродвигателя. Рассмотрен механизм возникновения потерь. Вихревые токи возникают в зонах с переменной магнитной индукцией и вызывают появление силы, которая направлена навстречу вектору скорости и тормозит якорь. Показаны направления этих токов, векторы магнитной индукции, напряжённости магнитного поля и силы, действующей на проводник обмотки и тормозящей якорь. Предложены методы уменьшения потерь: дробление контуров вихревых токов, а также достижение равномерного распределения магнитной индукции в межполюсном пространстве электродвигателя. Показаны их сильные и слабые стороны. При дроблении контуров обмотки возникают уравнивающие токи. Для устранения потерь на уравнивающие токи необходимо обязательно применять транспозицию проводников. Приведена уточненная формула для нахождения потерь на вихревые токи в обмотке якоря, проводники которого выполнены в виде жгута из нескольких проволок. Формула показала хорошую сходимость с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** электродвигатели постоянного тока с полым якорем, потери в обмотках на вихревые токи

## The count of losses by eddy currents in the windings of electric motors with hollow anchor

Natalia V. Pribylova <sup>1</sup>	n.pribylova@mail.ru
Sergei A. Filonov <sup>1</sup>	filonovser@yandex.ru
Ekaterina Y. Zheltoukhova <sup>2</sup>	Katsturova@gmail.com

<sup>1</sup> Voronezh state agrarian university named after Emperor Peter I, Michurina str., 1, Voronezh, 394087, Russia

<sup>2</sup> Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Summary.** Given the rationale of taking into account losses on eddy currents in the windings of a low-inertia DC motors with offered magnetolectric systems. Increased in recent years, the power of these motors (through the use of highly coercive magnets permanent) caused an increase in the volume of copper in the air gap and the magnetic induction values. All this has values given rise to significant eddy currents in the windings made in the air gap, and hence the necessity of taking into account losses from these currents. The experimentally obtained dependence of the losses on eddy currents on the frequency of rotation for a DC motor with a hollow anchor with a power of 350 watts. The magnitude of these losses can reach 30% of the nominal power of the motor. Described mechanism of occurrence of losses. Eddy currents occur in areas with variable magnetic flux and cause the appearance of force, which is directed toward the velocity vector and inhibits the anchor. The directions of these currents, the vectors of magnetic induction, magnetic field and force acting on the conductor winding and a braking anchor. The proposed methods reduce losses: crushing contours of eddy currents and achieve uniform distribution of magnetic induction in the interpolar space of the motor. Shows their strengths and weaknesses. The crushing circuits of windings occur surge currents. To eliminate the losses on the surge currents it is necessary to apply a transposition of the conductors. Given a refined formula for finding the losses on eddy currents in the armature winding, the conductors of which is made in the form of a harness of several wires. Formula has shown a good convergence with experimental data.

**Keywords:** DC motors with hollow anchor, losses in the windings for the eddy currents

### Введение

В настоящее время во многих устройствах и механизмах, используемых, в том числе и в сельскохозяйственном производстве, актуально применение малоинерционных электродвигателей постоянного тока с беспазовыми магнитоэлектрическими системами. В связи с ростом их габаритов и мощности, появилась необходимость учёта дополнительных потерь на вихревые токи

в обмотках, вынесенных в воздушный зазор. Это связано с повышением рабочей частоты вращения, возрастанием числа пар полюсов магнитных систем, и, главное, с увеличением объема меди обмоток в относительно больших немагнитных воздушных зазорах с одновременным ростом магнитной индукции (из-за использования высококоэрцитивных магнитных материалов).

### Для цитирования

Прибылова Н.В., Филонов С.А., Желтоухова Е.Ю. Учет потерь на вихревые токи в обмотках электродвигателей с полым якорем // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 3. С. 31–34. doi:10.20914/2310-1202-2017-3-31-34

### For citation

Pribylova N.V., Filonov S.A., Zheltoukhova E.Yu. The count of losses by eddy currents in the windings of electric motors with hollow anchor. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 3. pp. 31–34. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-3-31-34

Целью работы является обоснование возникновения вихревых токов в обмотках электродвигателей с полым якорем и необходимости их учёта, а также определение оптимального способа для уменьшения потерь от вихревых токов.

До сих пор считалось, что в беспазовых компоновках такие потери необходимо учитывать при проектировании высокооборотных и весьма мощных преобразователей энергии в десятки киловатт и выше [1, 2] или более одного киловатта [3]. Однако, практика показывает, что значительные дополнительные потери на вихревые токи могут возникать и в обмотках машин меньшей мощности [4].

На рисунке 1 приведена экспериментально полученная зависимость потерь на вихревые токи  $P_{\text{вихр.т.}}/P_{\text{ном}}$  от частоты вращения  $n$  для электродвигателя постоянного тока с полым якорем мощностью 350 Вт [5].

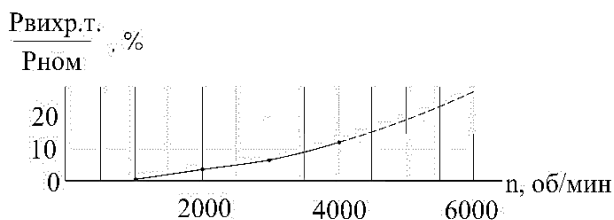


Рисунок 1. Добавочные потери на вихревые токи в процентах от номинальной мощности

Figure 1. Additional eddy current losses as a percentage of the rated power

Из зависимости, приведённой на рисунке 1, видно, что потери мощности на вихревые токи имеют квадратичную зависимость от скорости вращения и при частоте вращения 6000 об/мин составляют величину около 100 Вт (пунктирная линия).

Рассмотрим подробнее механизм возникновения вихревых токов.

При вращении якоря с поднятыми щетками вихревые токи возникают в тех проводниках, в которых  $dB/dt \neq 0$  (т. е. при большой крутизне возрастания магнитной индукции). На рисунке 2 показаны направления этих токов. Под северным полюсом слева они препятствуют возрастанию поля, а справа – поддерживают его исчезновение. Плотность вихревых токов

$$j = -\frac{dH}{dy}, \quad (1)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $x, y$  – оси координат.

В проводниках, находящихся в центре полюса, вихревые токи не возникают, если магнитная индукция неизменна. В этих проводниках наводится основная ЭДС, под действием

которой ток в проводниках не протекает, так как при поднятых щетках все проводники можно условно считать разомкнутыми.

На рисунке 3 укрупненно показана одна проволока жгута обмотки якоря. Вихревые токи, направленные в одну сторону под северным полюсом и находящиеся в зоне с большими значениями магнитной индукции  $B_1$ , вызывают появление силы  $F_1$ , которая направлена навстречу вектору скорости и тормозит якорь. Плотность вихревых токов в зоне  $B_2$  намного меньше и, соответственно, меньше сила  $F_2$ .

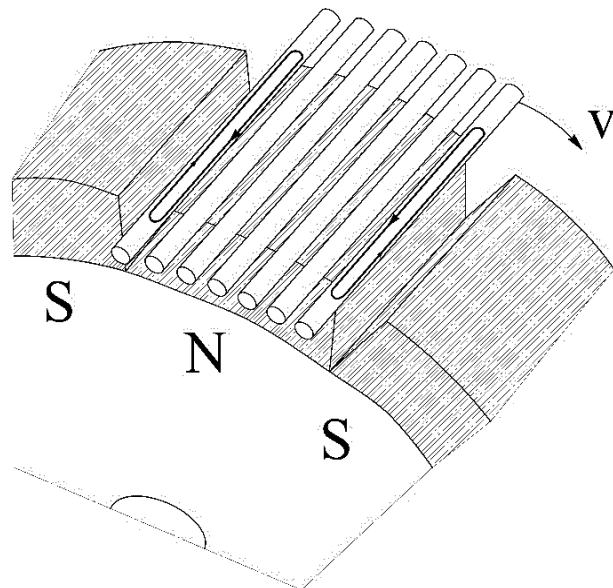


Рисунок 2. Распределение вихревых токов в обмотке полого якоря, равномерно вращающегося с поднятыми щетками в магнитном поле

Figure 2. The distribution of eddy currents in the winding of a hollow armature uniformly rotating with raised brushes in a magnetic field

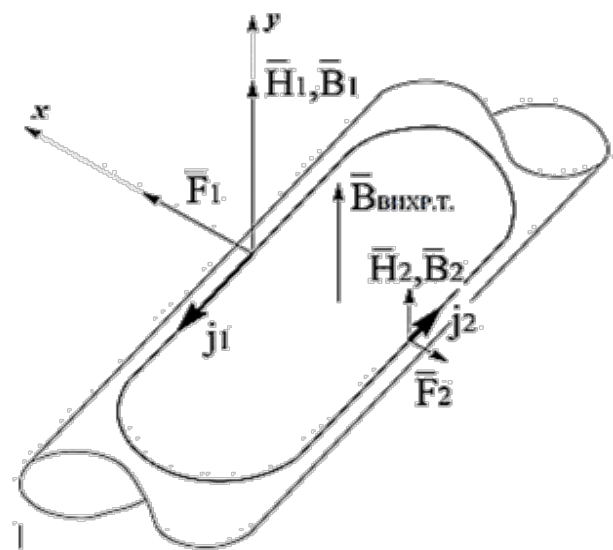


Рисунок 3. К определению сил, тормозящих якорь (под северным полюсом справа)

Figure 3. Determine forces that retard the anchor (under the north pole on the right)

Существует несколько способов борьбы с потерями на вихревые токи:

1. Применяется дробление контуров вихревых токов, т. е. каждую секцию обмотки выполняют в виде жилы из нескольких изолированных проволок.

2. Достигается более плавное распределение магнитной индукции в межполюсном пространстве, без участков с большой крутизной.

В литературе [6, 7, 8, 9, 10] приводятся формулы для определения потерь на вихревые токи, которые не представляется возможным использовать в нашем случае. Достаточно удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными показала полученная нами уточненная формула.

Таким образом, потери на вихревые токи в обмотке полого якоря, проводники  $N$  которого выполнены не в «навал», а в виде жгута (жилы) из нескольких проволок, уложенных параллельно образующей цилиндра («расчесанных») и трапецеидальной индукции в зазоре можно вычислить по следующей формуле

$$P_{\text{вихр.т}} = \frac{\pi^3 N l_a d_{np}^4 a f^2 B_m^2}{16 \rho}, \text{ Вт} \quad (2)$$

где  $N$  – полное число проводников обмотки, выполненных в виде жгута (жилы) из нескольких проволок, параллельных образующей цилиндра якоря;  $l_a$  – длина каждого проводника в пределах магнитного поля по оси якоря, м;  $d_{np}$ ,  $a$  – диаметр круглой проволоки и число параллельных проволок в жгуте;  $f$  – частота перемагничивания проводников  $f = np/60$ ;  $n$  – частота вращения,

об/мин;  $p$  – число пар полюсов магнитной системы;  $B_m$  – амплитудное значение магнитной индукции в зазоре, Тл, при  $c/b = 0,45$ ;  $c$ ,  $b$  – основания трапеции;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление меди,  $\rho = 0,0173 \times 10^{-6}$  Ом·м.

При первом способе, кроме потерь на вихревые токи, определенных по формуле (2), в проволоках, соединенных между собой параллельно, на коллекторе, текут еще уравнивающие токи. Это связано с тем, что все они находятся в разных магнитных условиях под полюсами, причем, чем больше проволок в жгуте, тем большее тормозное действие они оказывают на якорь. Для устранения потерь на уравнивающие токи необходимо обязательно применять транспозицию, например – скручивание проволок перед намоткой секций, что увеличивает трудоемкость изготовления якоря.

При втором способе, в результате уменьшения магнитного потока в воздушном зазоре, ухудшаются удельные характеристики и параметры электродвигателя.

### Заключение

В современных электродвигателях с полым якорем необходимо учитывать потери на вихревые токи в обмотках, вынесенных в воздушный зазор. Такие обмотки необходимо выполнять в виде жгутов из нескольких проволок, обязательно применяя транспозицию проводников. При трапецеидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре эти потери рассчитываются по уточнённой формуле (2), которая показала хорошую сходимость с экспериментальными данными.

### ЛИТЕРАТУРА

1 Антонов А.Е., Киреев В.Г., Петухов И.С. Потери от уравнивающих токов в многожильных обмотках беспазовых электрических машин // Техническая электродинамика. 2011. № 3. С. 33–39.

2 Васильковский Ю.Н., Титко А.И. Математическое моделирование вихревых токов и потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора // Техническая электродинамика. 2013. № 3. С. 50–56.

3 Данилина Э.М., Володин Г.И., Бреславец В.П. Потери энергии на вихревые токи в электромагнитных аппаратах вихревого слоя и способы их снижения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 1. С. 43–47.

4 Хомяк В.А., Прибылова Н.В. Анализ потерь в обмотке якоря электродвигателя постоянного тока // Энергия – XXI век. 2014. № 4 (88). С. 56–59.

5 Прибылова Н.В., Филонов С.А., Аксенов И.И. Потери на вихревые токи в обмотках электрических машин, вынесенных в воздушный зазор // В сборнике: Наука вчера, сегодня, завтра. Материалы научно-практической конференции. 2016. С. 236–239.

6 Макачук А.В. Аналитический расчет потерь мощности от вихревых токов в роторах с постоянными магнитами // Техническая электродинамика. 2015. № 6. С. 41–45.

7 Афанасьев А.А. Расчет магнитных потерь электромеханических устройств // Электричество. 2016. № 6. С. 25–33.

8 Li Jian et al. Effects of MMF harmonics on rotor eddy-current losses for inner-rotor fractional slot axial flux permanent magnet synchronous machines // Magnetics, IEEE Transactions on 48.2. 2012. P. 839–842.

9 Makarchuk A. Eddy currents losses in a rotor of the high-speed generator with the permanent magnet excitation // Tekhnichna Elektrodynamika. 2013. № 1. P. 56–61.

10 Yamazaki, Katsumi, Fukushima Effect of eddy-current loss reduction by magnet segmentation in synchronous motors with concentrated windings // Industry Applications, IEEE Transactions on 47.2. 2011. P. 779–788.

### REFERENCES

1 Antonov A.E., Kireev V.G., Petukhov I.S. Loss from surge currents in the multiconductor windings of electrical machines offered. *Tekhnicheskaya elektrodynamika* [Technical electrodynamics] 2011. no. 3. pp. 33–39. (in Russian)

2 Vaskovsky Yu. N., Titko A.I. Mathematical modeling of eddy currents and losses in the extreme packages stator core of a turbogenerator *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics] 2013. no. 3. pp. 50-56. (in Russian)

3 Danilina E. M., Volodin G. I., Breslavets V. P. The energy Loss due to eddy currents in electromagnetic apparatuses of a vortex layer and methods of their reduction. *Izvestiya vuzov* [News of higher educational institutions. Electrician] 2014. no. 1. pp. 43-47. (in Russian)

4 Номык В.А., Н.В. Прибылова Analysis of the loss in the armature winding of the electric motor DC. *Energiya – XXI vek*. [Energy – XXI century] 2014. no. 4 (88). pp. 56–59. (in Russian)

5 Pribylova N.V., Filonov S.A., Aksenov I.I. Losses on vortex currents in windings of electrical machines, made in the air gap. *Nauka vchera, segodnya, zavtra* [Science yesterday, today and tomorrow. Proceedings of scientific-practical conference] 2016. pp. 236–239. (in Russian)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Наталья В. Прибылова** к.т.н., доцент, кафедра электротехники и автоматики, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, n.pribylova@mail.ru

**Сергей А. Филонов** к.т.н., доцент, кафедра электротехники и автоматики, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия, filonovser@yandex.ru

**Екатерина Ю. Желтоухова** к.т.н., доцент, кафедра жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, Katsturova@gmail.com

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 11.05.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 28.07.2017

6 Makarchuk V. A. Analytical calculation of power losses from eddy currents in the rotor with permanent magnets. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics] 2015. no. 6. pp. 41-45. (in Russian)

7 Afanas'ev A. A. The calculation of magnetic losses in Electromechanical devices. *Elektrichestvo* [Electricity] 2016. no. 6. pp. 25-33. (in Russian)

8 Li, Jian, et al. Effects of MMF harmonics on rotor eddy-current losses for inner-rotor fractional slot axial flux permanent magnet synchronous machines. *Magnetics, IEEE Transactions on* 48.2. 2012. pp. 839-842.

9 Makarchuk A. Eddy currents losses in a rotor of the high-speed generator with the permanent magnet excitation. *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2013. no. 1. pp. 56-61.

10 Yamazaki, Katsumi, Fukushima Effect of eddy-current loss reduction by magnet segmentation in synchronous motors with concentrated windings. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 47.2. 2011. pp. 779-788.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Natalia V. Pribylova** candidate of technical sciences, assistant professor, electrical engineering and automatics department, Voronezh state agrarian university named after Emperor Peter I, Michurina str., 1, Voronezh, 394087, Russia, n.pribylova@mail.ru

**Sergei A. Filonov** candidate of technical sciences, assistant professor, electrical engineering and automatics department, Voronezh state agrarian university named after Emperor Peter I, Michurina str., 1, Voronezh, 394087, Russia, filonovser@yandex.ru

**Ekaterina Y. Zheltoukhova** candidate of technical sciences, assistant professor, fat, processes and devices of chemical and food industries department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, Katsturova@gmail.com

#### CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 5.11.2017

ACCEPTED 7.28.2017