

УДК 621.313

СРАВНЕНИЕ БИРОТОРНОЙ И ТРАДИЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОМАШИН ДЛЯ ПРИВОДА ДВОЙНОГО ВРАЩЕНИЯ

COMPARISON OF A BIROTOR AND A TRADITIONAL ELECTRIC MACHINE FOR A DOUBLE-ROTATION DRIVE

Н. А. БЕЛОКУРОВА, Д. Ю. НОСОВ, А. Б. ЗАХАРЕНКО

АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва, Россия

N. A. Belokurova, D. Yu. Nosov, A. B. Zakharenko

JSC "VNIIEEM Corporation", Moscow, Russia

Аннотация. Для специальных электроприводов, где требуется отсутствие реактивного вращающего момента на статоре электромашины (электроторпеды, атмосферные летательные аппараты с нечетным числом винтомоторных групп, вращательные приводы космических аппаратов), применяются бироторные электрические машины. Поскольку в бироторных электрических машинах используется сосредоточенная обмотка, то они обладают обширным гармоническим составом и большими магнитными потерями, чего нет у аналогичных машин с распределённой обмоткой. Представляет интерес сравнение синхронной бироторной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой, предназначенной для прямого электропривода направленной антенны с компенсацией реактивного момента, действующего на космический аппарат, с аналогичной электромашиной с распределённой обмоткой по критерию суммарной длины, состоящей из двух электромашин с распределённой обмоткой, расположенных на одной оси.

Ключевые слова: электрическая машина, зубцовая обмотка, распределённая обмотка, постоянные магниты, расчет магнитного поля, лобовая часть обмотки.

Для цитирования: Белокурова Н. А., Носов Д. Ю., Захаренко А. Б. Сравнение бироторной и традиционной электромашин для привода двойного вращения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 210. № 1. С. 3–6.

Annotation. Birotor electric machines are used for special electric drives that require the absence of reactive torque on the electric machine stator (electric torpedoes, atmospheric aircraft with an odd number of propeller groups, and spacecraft rotary drives). Since Birotor electric machines use a concentrated winding, they have a wide harmonic content and high magnetic losses, which is not the case with similar machines with a distributed winding. Of interest is the comparison of a synchronous Birotor electric machine with permanent magnet excitation and a fractional tooth winding, designed for direct electric drive of a directional antenna with compensation for the reactive torque acting on the spacecraft, with a similar electric machine with a distributed winding based on the total length criterion, consisting of two electric machines with distributed windings located on the same axis.

Key words: electric machine, tooth winding, distributed winding, permanent magnets, magnetic field calculation, end-face winding.

For citation: Belokurova N. A., Nosov D. Yu., Zakharenko A. B. Comparison of a birotor and a traditional electric machine for a double-rotation drive // Electromechanical matters. VNIIEEM studies. 2026. Vol. 210. № 1. Pp. 3–6.

Для ряда специальных электроприводов, где требуется отсутствие реактивного вращающего момента на статоре электромашины, применяются бироторные электрические машины (БРЭМ) [1]. Такие электромашины с возбуждением от постоянных магнитов имеют статор с дробной зубцовой обмоткой (с числом пазов на полюс и фазу $q < 1$) и два ротора, вращающиеся в разные стороны, в одном корпусе. Недостатком БРЭМ является обширный гармонический состав. Для снижения магнитных потерь и достижения приемлемого значения коэффициента полезного действия (КПД) сердечник БРЭМ выполняют из аморфного сплава на основе железа, что ведёт к удорожанию. Задачу, решаемую одной БРЭМ, способны решить две традиционные электромашины с расположенными на одной оси роторами, вращающимися в противоположные стороны. Это может быть реализовано при питании обеих электромашин от одной системы управления, но чередование фаз в верхней и нижней электромашинах – разное. Например, в верхней – A, C, B , а в нижней – A, B, C .

Целью данной статьи является проектирование традиционной электромашины, сравнение её характеристик с показателями БРЭМ, предложенной в статье [2], и выбор наилучшего варианта. Следует отметить, что в статье [2] спроектирована БРЭМ, предназначенная для привода двойного вращения – для антенно-фидерной системы (АФС) космического назначения, при этом компенсируется вращающий момент, передаваемый на космический аппарат. Сравнение осуществляется при равном внешнем диаметре электромашин. Космическое назначение определяет необходимость минимизации длины проектируемой электромашины и связанной с ней массы.

Для удобства сравнения число полюсов в традиционной электромашине выбрано таким же, как в нижнем роторе сравниваемой БРЭМ, то есть $2p = 16$. Кроме того, размеры внешнего ротора в проектируемой и сравниваемой БРЭМ – одинаковы. В частности, внешние диаметры обеих машин также одинаковы.

Традиционная электромашина должна иметь распределённую обмотку с числом пазов на полюс

и фазу $q \geq 1$. Из-за ограниченного внешнего диаметра электромашины, встраиваемой в АФС, для получения наименьшего числа зубцов статора выбираем однослойную обмотку с $q = 1$. По известной формуле [3] проводится расчет числа зубцов (пазов) статора:

$$z = 2pqt, \quad (1)$$

где t – число фаз, $t = 3$. Таким образом, должна быть спроектирована электромашина со следующими основными характеристиками: с числом полюсов $2p = 16$ и числом зубцов $z = 48$.

Схема обмотки статора представлена на рис. 1, а, где A, B, C – начала соответствующих фаз; X, Y, Z – их концы. На рис. 1, б, представлена временная диаграмма магнитодвижущей силы (МДС) обмотки статора для произвольного момента времени, для которого векторная диаграмма токов статора приведена на рис. 1, в.

Для удобства сравнения необходимо выбрать активную длину ротора в сравниваемой БРЭМ ($l_{R-БРЭМ}$) и величину воздушного зазора традиционной электромашины ($l_{\delta-трад}$) одинаковыми: $l_{R-БРЭМ} = l_{\delta-трад} = 17$ мм, $\delta = 1$ мм.

Для обеспечения площади паза, необходимой для размещения обмотки, отсутствия технологических ограничений на минимальную ширину зубца, выбираем ширину зубца $b_z = 1,5$ мм.

Расчетная модель. Математическое моделирование магнитного поля традиционной электромашины было проведено в программном комплексе *ANSYS Maxwell*. Была решена двумерная задача вращения ротора типа *Transient*. В качестве граничного условия принято, что векторный магнитный потенциал на внешней границе расчетной области (окружности) равен нулю ($A = 0$) (рис. 2). Расчетная модель возбуждена радиально-намагниченными постоянными магнитами ротора чередующейся полярности и плотностью тока обмотки статора. Для рассмотренного на рис. 2 произвольного момента времени красным обозначена плотность тока ($3,6$ А/мм²), синим – минус ($-3,6$ А/мм²), зеленым – нулевая плотность тока.

При этом амплитудное значение плотности тока и площадь паза в традиционной электромашине и сравниваемой БРЭМ – одинаковы.

Заданы следующие материалы элементов магнитной системы: постоянные магниты – неодим-железо-бор NdFeB, марки N40UH (коэрцитивная сила $H_c = 900$ кА/м), материал катушек обмотки – медь, в зазорах между статором и ротором – воздух, для сердечников статора и ротора выбрана кремниевая электротехническая сталь 2214.

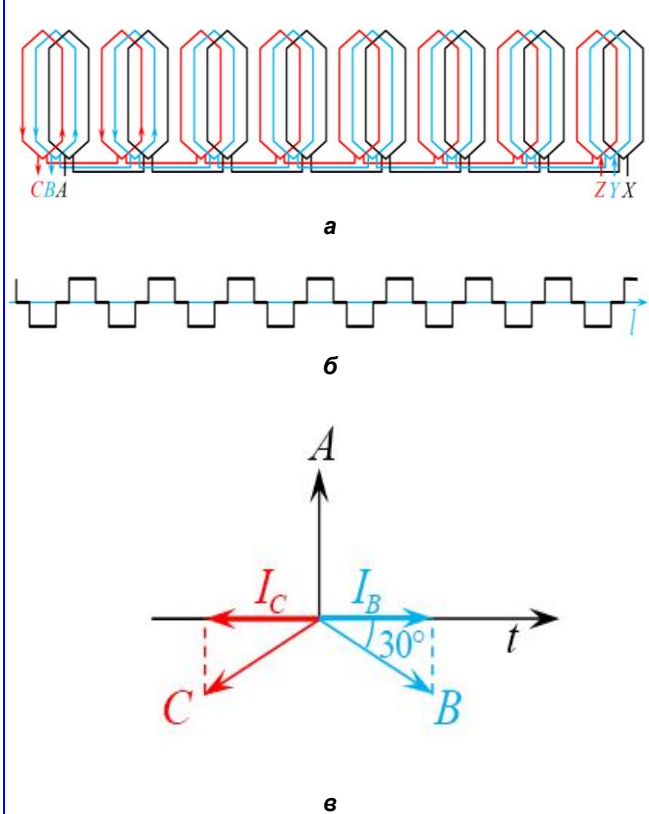


Рис. 1. Схема обмотки (а), пространственная диаграмма магнитодвижущей силы (б) и векторная диаграмма токов статора (в)

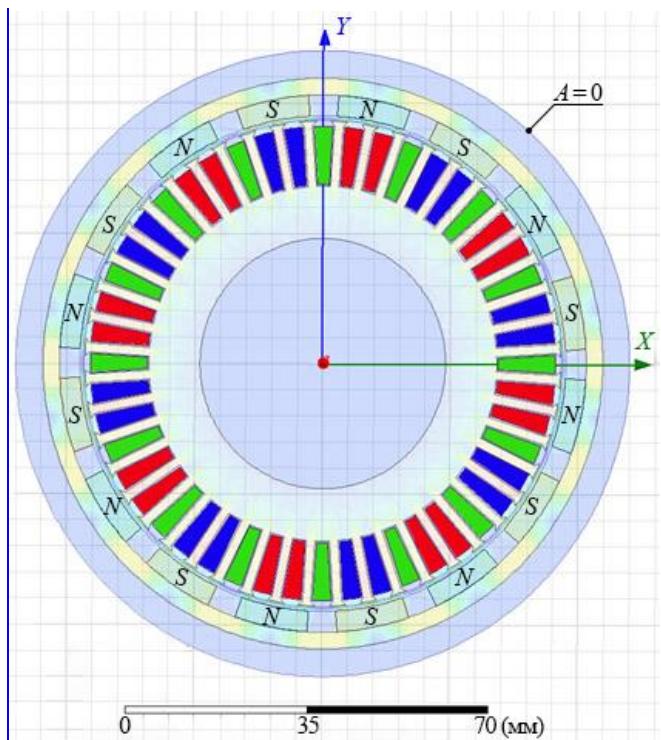


Рис. 2. Расчетная модель

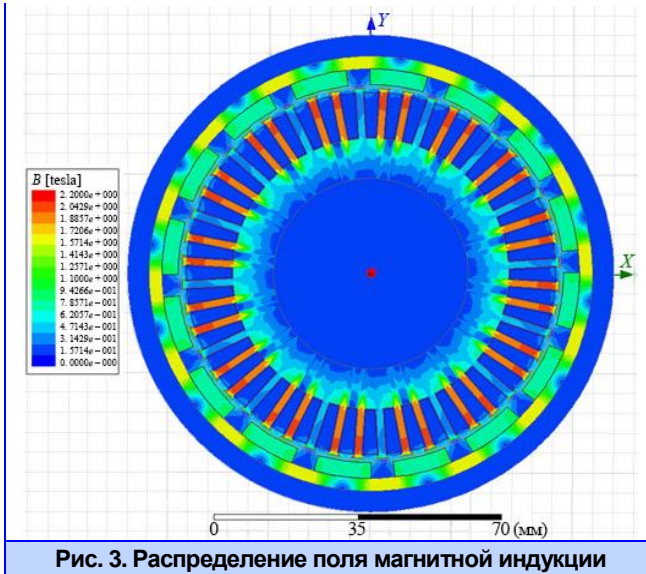


Рис. 3. Распределение поля магнитной индукции

Результат расчета магнитного поля для произвольного момента времени представлен на рис. 3.

В результате расчетов получено среднее значение вращающего момента традиционной электромашин: 1,896 Н·м. Аналогичный момент нижнего ротора БРЭМ, рассчитанный в [2], составил 1,557 Н·м. Увеличение вращающего момента на 21,8% вызвано большей долей меди в поперечном сечении традиционной электромашин и лучшим использованием её сердечника за счет увеличения максимальной магнитной индукции в зубцах с 1,8 до 2,2 Тл (на 22,2%). Это позволяет дать рекомендацию на уменьшение активной длины традиционной электромашин с 17 до 14 мм.

Следует отметить, что в БРЭМ вылет лобовой части обычно не превышает ширины паза обмотки статора, так как шаг обмотки равен единице и катушка плотно наматывается на пазовую и лобовую изоляции зубца для наилучшего теплоотвода. В рассматриваемой БРЭМ эта величина: $l_{\text{выл}} \leq 6$ мм.

Проведём *расчет вылета лобовых частей* распределённой обмотки традиционной электромашин.

Средняя ширина катушки обмотки статора определяется [3] формулой:

$$b_{\text{кт}} = \frac{\pi D_{\text{пер}}}{2p} \beta, \quad (2)$$

где $D_{\text{пер}}$ – средний диаметр паза; β – относительное укорочение шага обмотки (в рассматриваемой обмотке $\beta = 1$).

Вылет лобовых частей обмотки:

$$l_{\text{выл}} = k_{\text{выл}} b_{\text{кт}} + B_{\text{выл}}, \quad (3)$$

где $B_{\text{выл}}$ – длина вылета прямолинейной части обмотки.

Прямолинейная часть обмотки необходима для обеспечения приемлемой надежности распределённой обмотки. Обычно выбирают $B_{\text{выл}} = 10 \dots 15$ мм. При $\beta = 1$ и $2p \geq 8$, согласно [3], для изолированных лобовых частей $k_{\text{выл}} = 0,72$.

Для рассматриваемой распределённой обмотки со средним диаметром паза $D_{\text{пер}} = 80$ мм, средней шириной катушки $b_{\text{кт}} = 16$ мм получаем длину вылета лобовой части по формуле (3) $l_{\text{выл}} = 22$ мм. Таким образом, в рассматриваемой распределённой обмотке вылет лобовых частей больше пазовой части $l_{\text{выл}} > l_{\delta\text{-трад}}$, что часто имеет место. Даже с учетом возможного уменьшения $l_{\delta\text{-трад}}$ до 14 мм общая длина электромашин составит $l_{\text{общ-трад}} = 58$ мм, согласно формуле:

$$l_{\text{общ-трад}} = 2l_{\text{выл}} + l_{\delta\text{-трад}}. \quad (4)$$

С учетом того, что для компенсации реактивного момента, действующего на корпус космического аппарата, необходимы две традиционные электромашин, их общая активная длина составит не менее 116 мм, а длина БРЭМ с учетом вылета верхней и нижней лобовых частей составит $l_{\text{общ-БРЭМ}} = 56,5$ мм:

$$l_{\text{общ-БРЭМ}} = 2l_{\text{выл}} + l_s, \quad (5)$$

где $l_s = 44,5$ мм – длина активной части статора БРЭМ, согласно [2].

Более чем двукратное увеличение длины комплекса традиционных электромашин по сравнению с БРЭМ для космического привода недопустимо, так как приводит к увеличению массы не только самих электромашин, но и электроприводного устройства в целом.

Выводы

1. Проведено сравнение синхронной бироторной электромашин с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой, предназначенной для прямого электропривода направленной антенны и компенсации реактивного момента, действующего на космический аппарат с аналогичной электромашин с распределённой обмоткой, выполняющей те же функции за счет увеличения количества до двух штук.

2. За счет вылета лобовых частей обмотки бироторная электромашин с дробной зубцовой обмоткой обладает значительно меньшей суммарной длиной и массой и рекомендуется для привода космического назначения. Более чем двукратное увеличение длины комплекса традиционных электромашин по сравнению с БРЭМ за счет вылета лобовых частей обмотки приводит к увеличению массы не только самих электромашин, но и электроприводного устройства в целом.

Список источников

1. Патент на изобретение № 2854053 Российская Федерация, МПК H02K 16/02 (2006.01), H02K 1/02 (2006.01). Синхронная бироторная электромашинa : № 2025117637 : заявл. 26.06.2025 : опубл. 29.12.2025 / А. Б. Захаренко, Д. Ю. Носов. Бюл. № 1. 12 с.
2. Захаренко А. Б., Носов Д. Ю. Проектирование бироторного электродвигателя // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 209. № 6. С. 3–7.
3. Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / И. П. Копылов [и др.] : под ред. И. П. Копылова. М. : Изд-во Юрайт, 2015. 767 с.

References

1. Patent for Invention No. 2854053 Russian Federation, IPC H02K 16/02 (2006.01), H02K 1/02 (2006.01). Synchronous birotor electric machine : No. 2025117637 : application 26.06.2025 : published on 12.29.2025 / A. B. Zakharenko, D. Y. Nosov. Byul. No. 1. 12 p.
2. Zakharenko A. B., Nosov D. Yu. Design of a birotored electric motor // Electromechanical matters. VNIIEEM studies. 2025. Vol. 209. No. 6. P. 3–7.
3. Design of electrical machines : textbook for bachelors / I. P. Kopylov [et. al] : ed. I. P. Kopylova. M. : Yurayt Publishing House, 2015. 767 p.

Поступила в редакцию 30.12.2025

The article was submitted 30.12.2025

Информация об авторах

Нина Андреевна Белокурова – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, т. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru;

Дмитрий Юрьевич Носов – аспирант, начальник сектора, т. 8 (495) 365-54-38, e-mail: npc14@mcc.vniiem.ru;

Андрей Борисович Захаренко – доктор технических наук, доцент, начальник отдела, т. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.

Information about the authors

Nina Andreevna Belokurova – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Department, t. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru;

Dmitriy Yurevich Nosov – Postgraduate Student, Head of Sector, t. 8 (495) 365-54-38, e-mail: npc14@mcc.vniiem.ru;

Andrey Borisovich Zakharenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, t. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.