

БИРОТОРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА С НАИМЕНЬШИМИ ПОТЕРЯМИ В СТАЛИ

А. Б. Захаренко, Д. Ю. Носов

Электромашин с дробным числом пазов на полюс и фазу обладают обширным гармоническим составом магнитного поля, в котором присутствуют не только высшие гармоники, но и субгармоники, которые существенно влияют на коэффициент полезного действия. В статье проведен выбор бироторных электрических машин с наименьшими потерями в стали. Для этого выполнен анализ обмоточных коэффициентов статора, а также потерь в стали от высших гармоник магнитного поля и субгармоник для ряда известных из литературных источников электрических машин с дробными зубцовыми обмотками. В результате проведенных расчетов найдены варианты бироторных электрических машин, у которых минимальны относительные потери в стали без учета частоты перемагничивания сердечников статора, а также варианты бироторных электрических машин с минимальными потерями в стали с учетом перемагничивания сердечников статора.

Ключевые слова: бироторная электрическая машина, добавочные потери, обмоточный коэффициент.

Бироторные электрические машины (БРЭМ) применяются для ряда специальных приводов, назначение которых приведено в табл. 1. Под малогабаритными подводными устройствами понимаются устройства, момент инерции которых соизмерим с моментом инерции гребного винта.

БРЭМ может быть построена на основе статора электромашин с дробной зубцовой обмоткой и двух роторов, вращающихся в разные стороны. Эта обмотка имеет дробное число пазов на полюс и фазу q , при этом $q < 1$. Дробное число пазов на полюс и фазу определяется выражением:

$$q = \frac{c_q}{d_q}. \quad (1)$$

Каждый из роторов должен иметь число полюсов, равное числу периодов гармоники с наибольшей амплитудой. Таких гармоник обычно две для одной зубцовой обмотки. Оптимальные числа пазов на полюс и фазу для известных Z и p были рассчитаны в работе [1] и приведены в табл. 2.

Электромашин с дробным числом пазов на полюс и фазу обладают обширным гармоническим составом магнитного поля, в котором присутствуют не только высшие гармоники $v > 1$, но и субгармоники $v < 1$. Обширный гармонический состав определяет значительные добавочные потери в стали (потери от гармоник с $v \neq 1$), которые существенно влияют на коэффициент полезного действия этих электромашин.

Задачей данной статьи является выбор наилучших вариантов БРЭМ из известных, приведенных в табл. 2, исходя из минимизации потерь в стали: от первой и высших гармоник, а также субгармоник.

Для решения поставленной задачи необходимо провести расчет обмоточного коэффициента и потерь в стали для электромашин, расположенных на диагонали в табл. 2 (выделены зеленым цветом), и выявить наиболее оптимальные варианты.

Таблица 1

Приводы бироторных электрических машин

№	Наименование привода	Назначение привода
1	Ветроагрегаты	Повышение эффективности при работе с малым напором и расходом ветрового потока
2	Малогабаритные подводные устройства	Минимизация реактивного момента, действующего на закреплённый статор электромашин
3	Устройства компенсации возмущения на корпус космического аппарата от поворота/вращения исполнительного органа	

Таблица 2

**Число пазов на полюс и фазу $q < 1$
для трехфазных машин**

Z/p	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39
1	1/2											
2	1/4	3/4										
4		3/8		5/8		7/8						
5		3/10	2/5		3/5	7/10	4/5	9/10				
7			2/7	5/14	3/7		4/7	9/14	5/7	11/14	6/7	13/14
8				5/16		7/16		9/16	5/8	11/16		13/16
10						7/20		9/20		11/20		13/20
11					3/11	7/22	4/11	9/22	5/11		6/11	13/22
13							4/13	9/26	5/13	11/26	6/13	
14								9/28		11/28		13/28
16										11/32		13/32
17										11/34	6/17	13/34

Для дробных зубцовых обмоток гармонический состав характеризуется набором дробных номеров гармоник [2], которые присутствуют также и в обмотках с целым q :

$$v = \frac{2m}{d_q} k + 1, \quad (2)$$

где m – число фаз; $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$. Четные гармоники в обоих гармонических рядах отсутствуют.

Коэффициент распределения для ν -й гармоники магнитного поля рассчитывается согласно традиционной формуле [3]:

$$k_{pv} = \frac{\sin\left(\frac{\pi\nu}{2m}\right)}{c_q \sin\left(\frac{\pi\nu}{2mc_q}\right)}. \quad (3)$$

Следует отметить, что в [2] приводится анализ ещё двух формул для коэффициента распределения, используемых для анализа дробного ν и одного численного метода. Показано, что формула (3) дает максимальные значения коэффициента распределения из известных формул и метода, что вполне достаточно для анализа максимального значения добавочных потерь.

Относительный шаг по пазам $\beta = y/\tau$. При этом абсолютный шаг по пазам $y = D/Z$; полюсное деление $\tau = D/2p$, где D – диаметр статора, поэтому $\beta = 2p/Z$.

Коэффициент укорочения (удлинения) для ν -й гармоники магнитного поля [3]:

$$k_{yv} = \sin\left(\frac{\pi\nu\beta}{2}\right) = \sin\left(\frac{\pi\nu p}{Z}\right). \quad (4)$$

Обмоточный коэффициент:

$$k_{обv} = k_{yv}k_{pv}. \quad (5)$$

Потери в стали для первой гармоники магнитного поля определяются формулой [3]:

$$P_{ст1} = k_T p_{1/50} B_1^2 \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.3} G, \quad (6)$$

где k_T – технологический коэффициент увеличения потерь из-за наклепа при штамповке сердечника и других технологических факторов; $p_{1/50}$ – удельные потери в сердечнике при 1 Тл и 50 Гц; B_1 – первая гармоника магнитной индукции; f_1 – частота перемагничивания сердечника статора от первой гармоники магнитного поля; G – масса сердечника.

Для удобства сравнения электромашин с различными Z , p , q примем допущения, что у всех сравниваемых вариантов одинаковы:

- амплитудное значение магнитной индукции в сердечнике (B_m);
- сталь сердечника статора и удельные потери в ней ($p_{1/50}$);
- масса сердечника (G);
- технологический коэффициент (k_T).

Кроме того, магнитная система является линейной.

В случае, если магнитная система является линейной, потери в стали от ν -й гармоники магнитного поля определяются формулой [4]:

$$P_{ст\nu} \equiv B_v^2 f_v^{1.3}. \quad (7)$$

Действительно, для приводов № 2 (см. табл. 1) магнитная система БРЭМ может быть не насыщена, так как подводные устройства часто должны иметь нулевую плавучесть, поэтому масса БРЭМ сверху практически не ограничена. Для космических приводов № 3 (см. табл. 1) магнитная система БРЭМ, наоборот, сильно насыщена из-за существенных ограничений по массе. В обоих случаях магнитная система линейна.

Соответственно, потери в стали от ν -й гармоники магнитного поля:

$$P_{ст\nu} = P_{ст1} \left(\frac{B_v}{B_1}\right)^2 \left(\frac{f_v}{f_1}\right)^{1.3}. \quad (8)$$

С учетом того, что $B_v \equiv \frac{B_m k_{обv}}{\nu}$, $B_1 \equiv B_m k_{об1}$, $f_v = \nu f_1$, B_m – амплитудное значение магнитной индукции для первой гармоники, получаем относительную величину потерь в стали для ν -й гармоники:

$$P_{ст\nu}^* = \frac{P_{ст\nu}}{P_{ст1}} = \left(\frac{k_{обv}}{k_{об1}}\right)^2 \frac{1}{\nu^{0.7}}. \quad (9)$$

Следует отметить, что похожая формула была получена также в работе [4].

Таким образом, относительные потери в стали определяются формулой:

$$P_{ст}^* = \sum_{\nu}^{300} P_{ст\nu}^*. \quad (10)$$

Расчет относительных величин потерь в стали был проведён для электромашин, приведённых в табл. 2. Результаты расчетов по формуле (9) представлены на рисунке. В формуле (10) суммирование было проведено по первым 300-м гармоникам, так как ряды относительных потерь в стали быстро сходятся (см. рисунок), изменение потерь в стали при $\nu \approx 300 \pm 1$ происходит во втором-третьем знаке после запятой. На рисунке значения ν по оси абсцисс ограничены величинами 45, 60, 150 соответственно для удобства восприятия графиков.

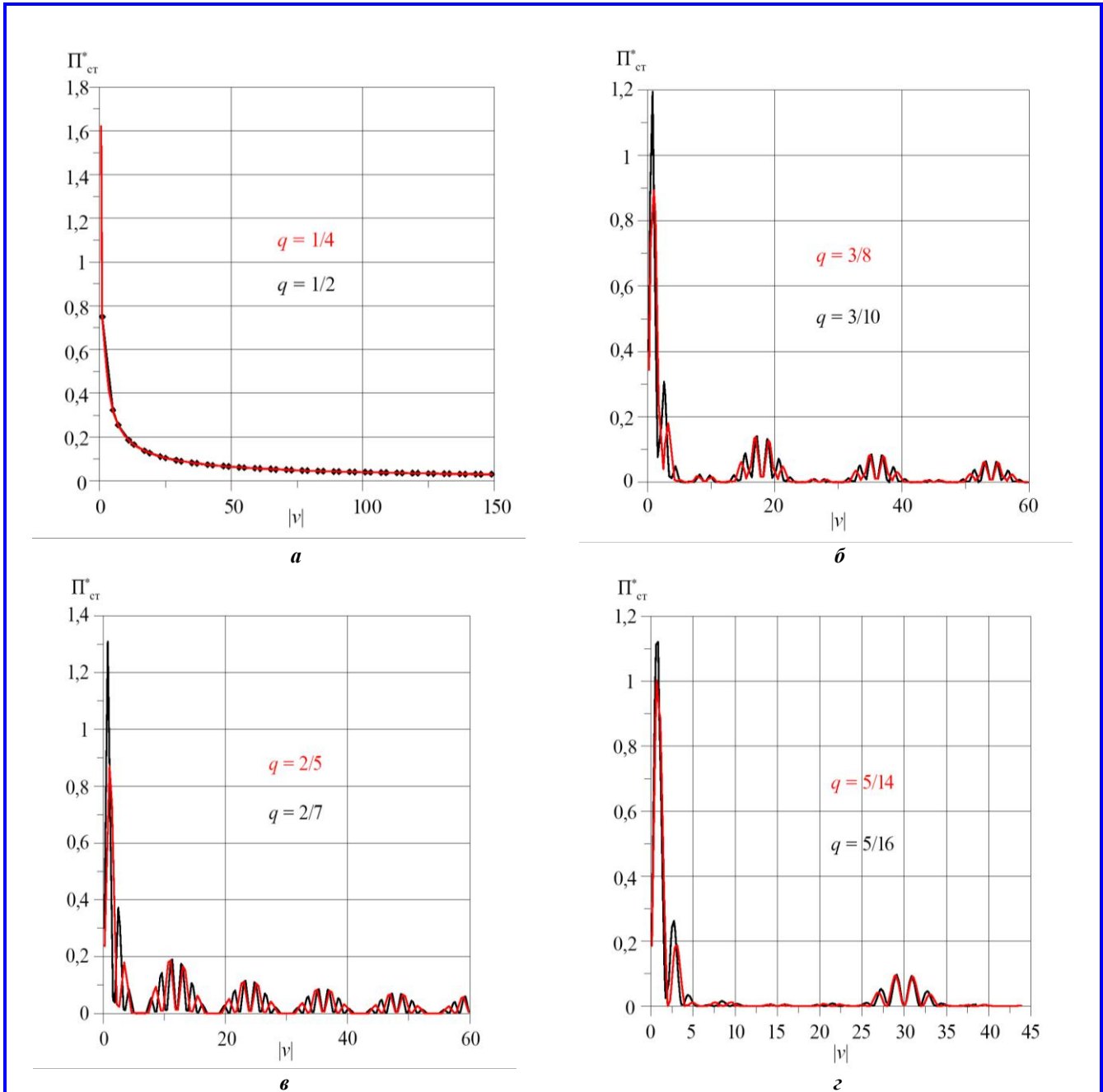


Рисунок. Относительные потери в стали для бироторных электрических машин

с $q = 1/4$ и $q = 1/2$ (а); $q = 3/8$ и $q = 3/10$ (б);
 $q = 2/5$ и $q = 2/7$ (в); $q = 5/14$ и $q = 5/16$ (г)

Результаты расчетов по формуле (10) сведены в табл. 3. Для снижения относительных потерь в стали для всех приводов наиболее перспективным является выполнение трехфазной БРЭМ с числом зубцов $Z = 9$ и числом пар полюсов $p = 4$ и $p = 5$, при этом число пазов на полюс и фазу $q = 3/8$ и $q = 3/10$, а также с $Z = 12$ и числом пар полюсов $p = 5$ и $p = 7$, при этом число пазов на полюс и фазу $q = 2/5$ и $q = 2/7$.

Следует отметить, что частота вращения гребного винта большинства морских судов и малогаба-

ритных подводных устройств $n = 200 \div 300$ об/мин. Для определённости примем $n = 250$ об/мин.

Частота перемагничивания сердечника статора, соответствующая первой гармонике магнитного поля, при условии прямого электропривода гребного винта определяется формулой:

$$f_1 = \frac{pn}{60}. \quad (11)$$

Таблица 3

Потери в стали для ряда трехфазных бироторных электрических машин

№	Z	p	q	$\Pi_{\text{ст}}^*$	Σ	$f_1, \text{Гц}$ при $n = 250 \text{ об/мин}$	$\Pi_{\text{ст}}$ по формуле (12)	Σ
1	3	1	1/2	5,35	22,06	4,17	0,1585	1,379
	3	2	1/4	16,71		8,33	1,2206	
2	9	4	3/8	9,08	20,82	16,67	1,9461	5,307
	9	5	3/10	11,74		20,83	3,3609	
3	12	5	2/5	8,25	20,17	20,83	2,3001	7,447
	12	7	2/7	11,92		29,17	5,1475	
4	15	7	5/14	11,72	25,39	29,17	5,2661	12,572
	15	8	5/16	13,67		33,33	7,3061	
5	21	10	7/20	14,38	30,43	41,67	10,307	23,332
	21	11	7/22	16,05		45,83	13,025	

С учетом принятых допущений формула (6) преобразуется к виду:

$$\Pi_{\text{ст}} \equiv k_{\text{огл}}^2 \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,3} \Pi_{\text{ст}}^* \quad (12)$$

В результате анализа табл. 3 получено, что для снижения потерь в стали от высших гармоник и субгармоник магнитного поля БРЭМ для малогабаритных подводных устройств наиболее перспективным является выполнение трехфазной БРЭМ с числом зубцов $Z = 3$ и числом пар полюсов $p = 1$ и $p = 2$, при этом число пазов на полюс и фазу $q = 1/2$ и $q = 1/4$.

В табл. 3 сведено 5 вариантов с числами зубцов сердечника статора $Z = 3, 9, 12, 15, 21$. Дальнейшее увеличение Z ведёт к увеличению добавочных потерь. Рассмотрение этих вариантов не представляет интереса.

Выводы

Для снижения относительных потерь в стали (без учета частоты перемагничивания) для всех приводов наиболее перспективным является выполнение трехфазной БРЭМ с числом зубцов $Z = 9$ и числом пар полюсов $p = 4$ и $p = 5$, при этом число пазов на полюс и фазу $q = 3/8$ и $q = 3/10$, а также с $Z = 12$ и числом пар полюсов $p = 5$ и $p = 7$, при этом число пазов на полюс и фазу $q = 2/5$ и $q = 2/7$.

Для снижения потерь в стали для БРЭМ малогабаритных подводных устройств наиболее перспек-

тивным является выполнение трехфазной электромашины с числом зубцов $Z = 3$ и числом пар полюсов $p = 1$ и $p = 2$, при этом число пазов на полюс и фазу $q = 1/2$ и $q = 1/4$.

Литература

1. Шевченко, А. Ф. Электромеханические преобразователи энергии с модулированным магнитным потоком : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» ; 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шевченко Александр Федорович ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1999. – 340 с.
2. Сидоров, А. О. Исследование синхронных машин с постоянными магнитами с пониженными уровнями вибрации : специальность 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сидоров Антон Олегович ; Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Москва, 2019. – 149 с.
3. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин [и др.] ; под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2005. – 767 с.
4. Казаков, Ю. Б. Зависимость потерь в асинхронных двигателях от параметров широтно-импульсного регулирования напряжения / Ю. Б. Казаков, А. А. Шумин, В. А. Андреев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина. – 2007. – Вып. 3. – С. 50–53.

Поступила в редакцию 09.01.2025

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, доцент, начальник отдела,
т. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otchel18@mcc.vniiem.ru.

Дмитрий Юрьевич Носов, аспирант, начальник сектора,
т. 8 (495) 365-54-38, e-mail: npc14@mcc.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

BIROTOR ELECTRIC MACHINE WITH THE LEAST LOSSES IN STEEL

A. B. Zakharenko, D. Yu. Nosov

Electric machines with a fractional number of slots per pole and phase have an extensive harmonic composition of the magnetic field, which contains not only higher harmonics, but also subharmonics, which significantly affect the efficiency. The article selects birotor electric machines with the lowest losses in steel. For this purpose, an analysis of the stator winding coefficients, as well as losses in steel from higher harmonics of the magnetic field and subharmonics for a number of electric machines with fractional tooth windings known from literary sources, is performed. As a result of the calculations, variants of birotor electric machines with minimal relative losses in steel without taking into account the frequency of remagnetization of the stator cores, as well as variants of birotor electric machines with minimal losses in steel taking into account the remagnetization of the stator cores, are found.

Key words: birotor electric machine, additional losses, winding coefficient.

References

1. Shevchenko, A. F. Electromechanical energy converters with modulated magnetic flux: specialty 05.09.03 «Electrotechnical complexes and systems» ; 05.09.01 «Electromechanics and electrical apparatus» : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Shevchenko Alexander Fedorovich ; Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 1999. – 340 p.
2. Sidorov, A. O. Study of synchronous machines with permanent magnets with reduced vibration levels : specialty 05.09.01 «Electromechanics and electrical apparatus» : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Sidorov Anton Olegovich ; National Research University «MPEI». – Moscow, 2019. – 149 p.
3. Kopylov, I. P. Design of electrical machines : textbook for universities / I. P. Kopylov, B. K. Klovov, V. P. Morozkin [et al.] ; edited by I. P. Kopylova. – 4th ed., revised and additional. – Moscow : Higher School, 2005. – 767 p.
4. Kazakov, Yu. B. Dependence of losses in asynchronous motors on the parameters of pulse-width voltage regulation / Yu. B. Kazakov, A. A. Shumin, V. A. Andreev // Bulletin of the Ivanovo State Energy University. – Ivanovo : Ivanovo State Energy University named after V. I. Lenin. – 2007. – Issue. 3. – P. 50–53.

*Andrey Borisovich Zakharenko, doctor of technical sciences, associate professor, head of department,
t. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otel18@mcc.vniem.ru.*

*Dmitriy Yurievich Nosov, head of sector, postgraduate student,
t. 8 (495) 365-54-38, e-mail: npc14@mcc.vniem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*