

УДК 631.313

БИРОТОРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА ДЛЯ МАЛОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

А. Б. Захаренко, Д. Ю. Носов

Проводится анализ использования бироторной электрической машины новой конструкции для привода ветроагрегата малой мощности – до десяти киловатт – в сравнении с традиционной однороторной электрической машиной. Критериями сравнения выбраны магнитодвижущая сила и электромагнитный момент. В результате получено, что электромагнитная мощность предлагаемой конструкции бироторной электрической машины без ярма на статоре практически в 2 раза больше по сравнению с традиционной однороторной машиной. Это дает возможность эквивалентно (с учетом коэффициента полезного действия) увеличить отдаваемую в нагрузку электрическую мощность. Это, в свою очередь, позволяет эффективно использовать ветровой поток с меньшим напором и расходом воздуха.

Ключевые слова: бироторная электрическая машина, постоянные магниты, магнитодвижущая сила.

В настоящее время в Западной Европе получила широкое распространение стратегия «зеленого перехода», которая нацелена на создание устойчивой и экологически чистой экономики, а также на решение глобальных проблем, связанных с изменением климата и истощением природных ресурсов. Важной частью этой стратегии является развитие ветроэнергетики. Одной из причин краха упомянутой стратегии является слабый напор и расход ветрового потока у поверхности Земли, что определяет необходимость повышения эффективности ветроагрегатов.

Задаче повышения эффективности служит создание бироторных ветроэнергетических установок [1, 2]. В частности, в работе [1] предлагается вращать ротор и «статор» ветрогенератора в разные стороны двумя ветроколесами. При малых скоростях ветрового потока это увеличивает скорость вращения ротора генератора относительно статора, что улучшает его энергетические показатели. Однако, генератор перестает быть бесконтактным, что снижает его надежность и определяет необходимость частого технического обслуживания.

Бироторная электрическая машина (БРЭМ) – это электромашина, имеющая два ротора в одном корпусе, её разновидность предложена в патенте [2]. В соответствии с ним БРЭМ в режиме ветрогенератора имеет горизонтальную ось вращения и установлена на поворотной топ-мачте 1 ветроагрегата (рис. 1).

Ориентация по направлению воздушного потока осуществляется стабилизатором 2. БРЭМ размещена в обтекаемой гондоле 3. Лопасти 4 и 5 первого и второго ветроколеса имеют противоположный угол атаки и обеспечивают встречно-направленные вращающие моменты $M_{ЭМ1}$ и $M_{ЭМ2}$. В работе [1] показано, что для обеспечения оптимальной степе-

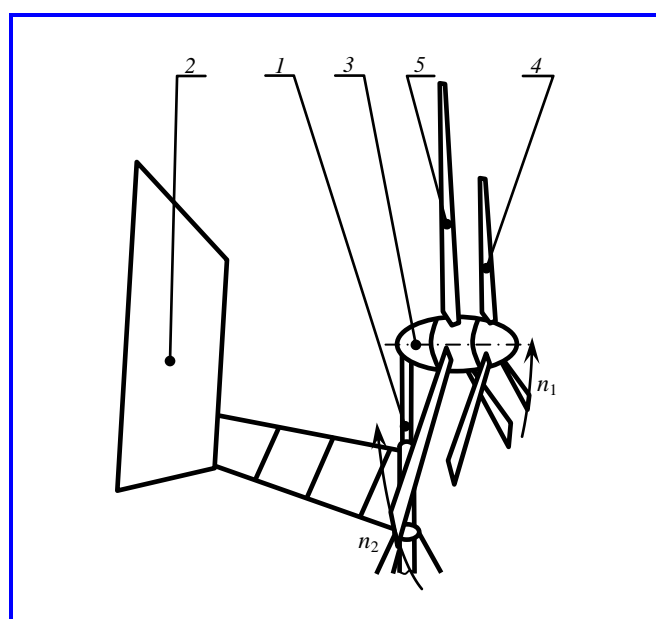


Рис. 1. Ветроагрегат двойного вращения с бироторной электрической машиной

ни экранирования первым ветроколесом второго диаметр ветроколеса 1 должен составлять, например, 1,4 м, а второго – 2,05 м. При наличии ветра благодаря стабилизатору 2 ветроагрегат ориентируется по направлению потока воздуха. Лопасти 4 и 5 вращаются в разные стороны и вращают первый и второй роторы БРЭМ с частотами вращения n_1 и n_2 .

На рис. 2 изображен эскиз активной части бироторной электрической машины (поперечного и продольного сечений) без ярма на статоре, а также схема зубцовой обмотки статора для электромашины с числом зубцов 1 сердечника статора $Z = 15$, на котором размещена трехфазная обмотка 2, соединенная в звезду. Здесь A, B, C – начала соответствующих фаз. Число пар полюсов (N – север, S – юг) первого ротора $p_1 = 7$, полюса первого ротора образованы

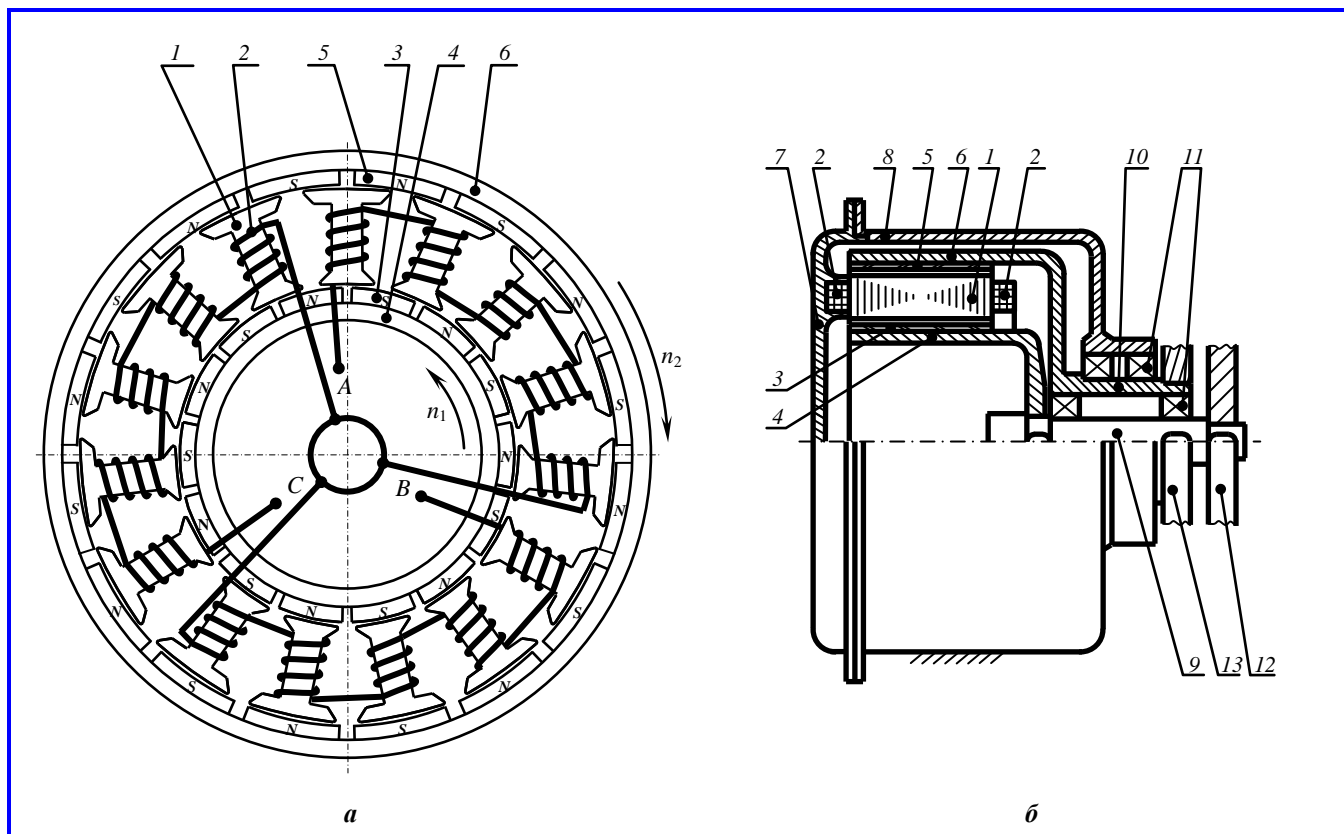


Рис. 2. Активная часть бироторной электрической машины:
а – поперечное сечение и схема обмотки; б – продольное сечение

при помощи семи пар постоянных магнитов 3, чередующейся полярности, прикрепленных к ярму первого ротора 4. Число пар полюсов второго ротора $p_2 = 8$, полюса второго ротора образованы при помощи восьми пар постоянных магнитов 5, чередующейся полярности, прикрепленных к ярму второго ротора 6. Соседние катушки в катушечной группе статора соединены встречно, поскольку они находятся в основном под полюсами ротора противоположной полярности. Катушки в катушечных группах и катушечные группы фаз соединяются между собой во всех фазах одинаково. Первый и второй валы роторов 9 и 10 закреплены в подшипниках 11. На валах закреплены лопасти ветроколеса 12 и 13.

Для бироторной электромашин с зубцовой обмоткой (см. рис. 2) имеются две гармоники магнитодвижущей силы (МДС) с наибольшей амплитудой [3, 4]:

$$F = F_{1m} \sin(\omega_1 t - p_1 \alpha) + F_{2m} \sin(\omega_2 t - p_2 \alpha), \quad (1)$$

где F_{1m} , F_{2m} – амплитуды гармоник с наибольшей амплитудой; ω_1 , ω_2 – угловые частоты вращения первого и второго ротора; p_1 , p_2 – числа периодов упомянутых гармоник, равные числу пар полюсов первого

и второго роторов; t – время; α – угол, характеризующий рассматриваемое положение, при этом:

$$\omega_1 = \pi n_1 / 30; \quad (2)$$

$$\omega_2 = \pi n_2 / 30. \quad (3)$$

Следует отметить, что для традиционной электромашин с одним ротором характерно использование лишь одной из волн МДС, то есть одного из слагаемых в формуле (1). Для БРЭМ при равных угловых частотах вращения роторов $\omega_1 = \omega_2$ формула (1) преобразуется к следующему виду:

$$F_p = 2F_m \sin\left(\omega_1 t - \frac{p_1 - p_2}{2} \alpha\right) \cos \frac{p_1 + p_2}{2} \alpha, \quad (4)$$

то есть использование в одной электромашине двух волн МДС путем введения двух роторов позволяет повысить результирующую МДС электромашин в 2 раза.

При этом электромашину необходимо оптимально проектировать, в том числе правильно выбрать число пар полюсов роторов. В таблице приводятся примеры выполнения машин с трехфазными обмотками, оптимальные варианты, согласно [4], выделены жирным курсивом. Зелёной заливкой отмечены данные, относящиеся к показанной на рис. 2 электромашине.

Таблица

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

| $\begin{matrix} Z \\ p \end{matrix}$ | 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 |

Максимальный электромагнитный момент БРЭМ для каждого из роторов определяется формулой [4]:

$$M_{ЭМ1} = \frac{p_1 Z}{\sqrt{2}} \Phi_m I w k_{об}; \quad (5)$$

$$M_{ЭМ2} = \frac{p_2 Z}{\sqrt{2}} \Phi_m I w k_{об}, \quad (6)$$

где Φ_m – максимальный магнитный поток, сцепленный с обмоткой статора; I – ток фазы статора; w – число последовательных витков фазы статора; $k_{об}$ – обмоточный коэффициент. Соответственно, электромагнитный момент второго ротора с большим числом пар полюсов p_2 – больше.

Электромагнитная мощность БРЭМ определяется по формуле:

$$P_{ЭМ} = \omega_1 (M_{ЭМ1} + M_{ЭМ2}). \quad (7)$$

Таким образом, применение предлагаемой конструкции БРЭМ без ярма на статоре позволяет увеличить электромагнитную мощность по сравнению с традиционной однороторной машиной практически в 2 раза. Это дает возможность эквивалентно (с учетом коэффициента полезного действия) увеличить отдаваемую в нагрузку электрическую мощность. Это позволяет более эффективно использовать ветровой поток с меньшим напором и расходом воздуха.

Реализация предлагаемого технического решения позволяет получить электрическую машину, практически не имеющую момента реакции опоры статора.

Выводы

1. Применение бироторной электрической машины без ярма на статоре позволяет увеличить электромагнитную мощность по сравнению с традиционной однороторной электромашиной практически в 2 раза, что дает возможность эквивалентно (с учетом коэффициента полезного действия) увеличить отдаваемую в нагрузку электрическую мощность.

2. Реализация предлагаемого технического решения позволяет получить электрическую машину, практически не имеющую момента реакции опоры статора.

Литература

- Кириллов, В. В. Разработка автономной бироторной ветроэнергетической установки малой мощности : специальность 05.14.08 «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кириллов Василий Владимирович ; Национальная академия наук Кыргызской республики. Институт автоматики. – Бишкек, 2004. – 133 с.
- Патент на изобретение № 2437196, Российская Федерация, МПК H02K 16/02(2006.01), H02K 1/06(2006.01), H02K 21/12(2006.01). Электрическая машина двойного вращения : № 2010140676/07 : заявл. 05.10.2010 : опубл. 20.12.2011 / Захаренко А. Б. – Бюл. № 35. – 10 с.
- Шевченко, А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробным $q < 1$ зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов / А. Ф. Шевченко // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 3 – 8.
- Шевченко, А. Ф. Электромеханические преобразователи энергии с модулированным магнитным потоком : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование», 05.09.01 «Электромеханика» : диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук / дарственный технический университет. – Новосибирск, Шевченко Александр Федорович ; Новосибирский госу- 1999. – 340 с.

Поступила в редакцию 18.12.2024

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

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

BIROTOR ELECTRIC MACHINE FOR LOW-POWER WIND ENERGY

A. B. Zakharenko, D. Yu. Nosov

A comparative analysis is being done on using of a new birotor electric machine assembly for a wind unit drive of low-power – up to ten kilowatts – in contrast to a traditional single-rotor electric machine. The criteria used to compare are magnetomotive force and electromagnetic torque. The electromagnetic power of this assembly of a birotor electric machine with no yoke on a stator is nearly double that of a traditional single-rotor machine, as a consequence. This allows to increase the electrical power supplied to the load in an equivalent way, taking into account the efficiency. This leads to an efficient utilization of wind flow with less pressure and air flow.

Key words: the birotor electric machine, permanent magnets, magnetomotive force.

References

1. Kirillov, V. V. Development of a new low-power birotor wind energy unit : speciality 05.14.08 Renewable energy units : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Kirillov Vasilii Vladimirovich ; National Academy of Sciences of the Republic of Kyrgyzstan. Institute of Automatics. – Bishkek, 2024. – 133 p.
2. Patent for invention No. 2437196, Russian Federation, IPC H02K 16/02(2006.01), H02K 1/06(2006.01), H02K 21/12(2006.01). Electric machine of double rotation : No. 2010140676/07: appl. date 05.10.2010 : publ. date 20.12.2011 / A. B. Zakharenko. – Bul. No. 35. – 10 p.
3. Shevchenko, A. F. Multi-pole synchronous machines with fractional $q < 1$ tooth windings with permanent magnet excitation / A. F. Shevchenko // Electromechanics. – 2007. – No. 9. – P. 3–8.
4. Shevchenko, A. F. Electromechanical energy converters with modulated magnetic flux : speciality 05.09.03 Electrotechnical complexes and systems, including their control and adjustment, 05.09.01 Electromechanics : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Shevchenko Aleksandr Fedorovich ; Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 1999. – 340 p.

Andrey Borisovich Zakharenko, doctor of technical sciences, associate professor, head of department, t. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.

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