



УДК 621.313.17

© 2009

А. А. Афонин, В. В. Гребеников

Исследования беспазовых электрических машин с постоянными магнитами

(Представлено академиком НАН Украины А. В. Кириленко)

Наведено результати дослідження розподілу магнітного поля і електромагнітних моментів для трьох типів магнітних систем електричних машин з постійними магнітами циліндричної конфігурації. Запропонований і проаналізований підхід до побудови магнітних систем ротора складної конфігурації, що складається з постійних магнітів і ферромагнітних сегментів. Показано, що використання таких магнітних систем дозволяє набувати підвищених значень як індукції магнітного поля в повітряному зазорі, так і електромагнітних моментів в циліндричних електричних машинах з подвійним ротором.

В течение последних лет проводятся исследования новых типов магнитных систем электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) с повышенной величиной магнитной индукции и требуемым законом распределения магнитного поля в рабочем зазоре [1–6]. Эти исследования стимулируются как непрерывно растущими техническими требованиями к характеристикам наукоемкой продукции, так и ставшими особо актуальными в последнее время задачами энерго- и ресурсосбережения. Из обзора современных технических решений ЭМПЭ и их приложений в робототехнике, автоматике, автоматизированном электроприводе, транспортных системах, океанотехнике, электромагнитных накопителях энергии следует отметить технологию ThinGap [6], которая представляет особый интерес для разработчиков. В этой технологии используются трехфазные беспазовые обмотки управления специального типа и ротор с постоянными магнитами и ферромагнитными замыкателями магнитных потоков.

Фирма ThinGap разработала новую технологию с целью улучшения показателей электрических машин и обеспечения высоких значений КПД и большой величины отношения электромагнитного момента к массе ЭМПЭ. При этом фирма использует собственное оригинальное оборудование для производства отдельных компонентов, в частности обмоток управления, а сам технологический процесс производства является уникальным и обеспечивает высокую точность изготовления, что является важным для получения малых воздушных зазоров с целью максимизации величины магнитной индукции. Поскольку двигатели

не имеют пакетов стали и зубцов, в них исключены паразитные моменты, потери в железе и другие нежелательные явления. Такая технология находит применение там, где требуется электропривод небольшой мощности с большими величинами развиваемого момента и высокими значениями КПД энергопреобразования.

Цель работы заключается в исследовании и сопоставлении результатов моделирования трех типов магнитных систем ЭМПЭ: модели 1, являющейся аналогом технологии Thin-Gap, модели 2 с двухсторонним расположением постоянных магнитов (ПМ), модели 3 с двухсторонним расположением ПМ и концентраторами магнитных потоков.

Показанные на рис. 1–3 результаты моделирования моделей 1–3 свидетельствуют о том, что конфигурация магнитных систем существенно влияет на показатели ЭМПЭ. В моделях 1–3 величины размеров статора являются идентичными, количество полюсов равно $2p = 16$, а результаты моделирования сопоставляются при равных величинах линейной токовой нагрузки. В качестве материала ротора использована электротехническая сталь с относительно большой магнитной проницаемостью.

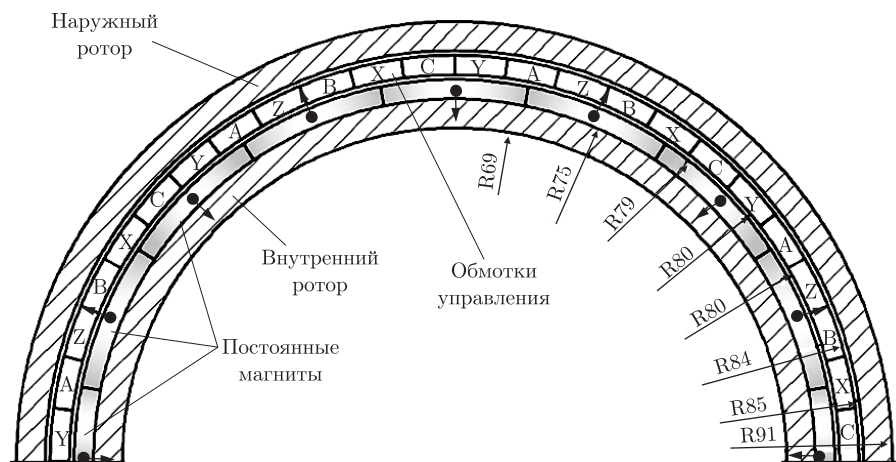
На рис. 1, а показан ЭМПЭ цилиндрической конфигурации, состоящий из статора с системой трехфазных обмоток и двухстороннего ротора с наборами радиально намагниченных ПМ на внутренней части и ферромагнитным сердечником на внешней части. Рис. 1, б демонстрирует распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля, а рис. 1, в — пример специального исполнения располагаемых в области статора ЭМПЭ трехфазных обмоток управления.

На рис. 2 изображена структура цилиндрического ЭМПЭ с двухсторонним ротором. Система магнитного возбуждения ротора состоит из намагниченных в радиальном направлении с формированием переменного-полюсной поляризации высокоэнергетических постоянных магнитов типа NdFeB, имеющих, как и в примере на рис. 1, остаточную магнитную индукцию $B_r = 1,256$ Тл, коэрцитивную силу $H_{CB} = 1000$ кА/м и собственную магнитную проницаемость $\mu_{PM} = 1,03\mu_0$.

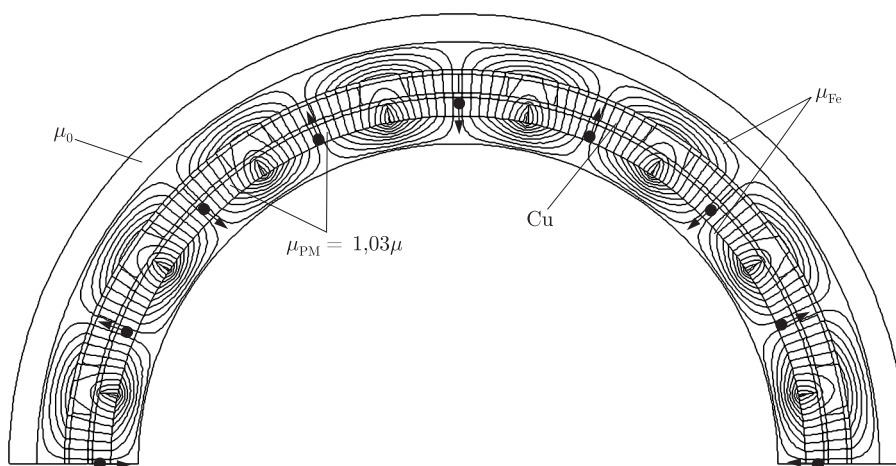
Следующий этап повышения характеристик ЭМПЭ заключается в применении магнитных систем с концентраторами магнитного поля. При этом можно получать как высокие значения радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре $B_{\delta r}$, так и линейной токовой нагрузки A_a . Обычно для получения высокого коэффициента использования объема ЭМПЭ увеличивают один из параметров — $B_{\delta r}$ или A_a . В рассматриваемых ЭМПЭ с постоянными магнитами максимизация произведения $A_a \cdot B_{\delta r}$ связана с альтернативой. Так, с одной стороны, выбор малого воздушного зазора δ с целью получения высокой индукции $B_{\delta r}$ ведет к ограничению количества меди и уменьшению линейной токовой нагрузки A_a . Выбор же большой величины δ ведет к росту A_a , однако при этом уменьшается $B_{\delta r}$. Для устранения этого противоречия предлагается вместо традиционных структур применять магнитные системы с двухсторонним расположением постоянных магнитов и концентраторов магнитного поля (см. рис. 3), в которых величины как $B_{\delta r}$, так и A_a могут достигать высоких значений.

На рис. 3 показана двухсторонняя магнитная система с соответствующим расположением ПМ, позволяющим обеспечить концентрацию магнитного поля в рабочем зазоре ЭМПЭ.

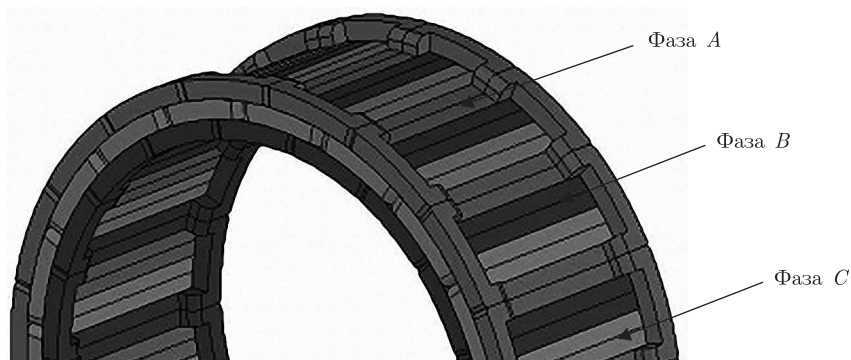
На рис. 4 представлены графики распределения радиальных компонент индукции магнитного поля на образующей, выбранной посередине обмоток управления для трех исследуемых моделей 1–3. Результаты приведены для интервала в пределах трех полюсных делений $3\tau_S$. Из сопоставления графиков видно, что магнитное поле в модели 3 (с двухсторон-



a



б



в

Рис. 1. Модель 1 с двухсторонним ротором и наборами ПМ на внутренней и ферромагнитным сердечником на внешней частях: а — геометрия модели 1; б — картина магнитного поля модели; в — обмотки управления

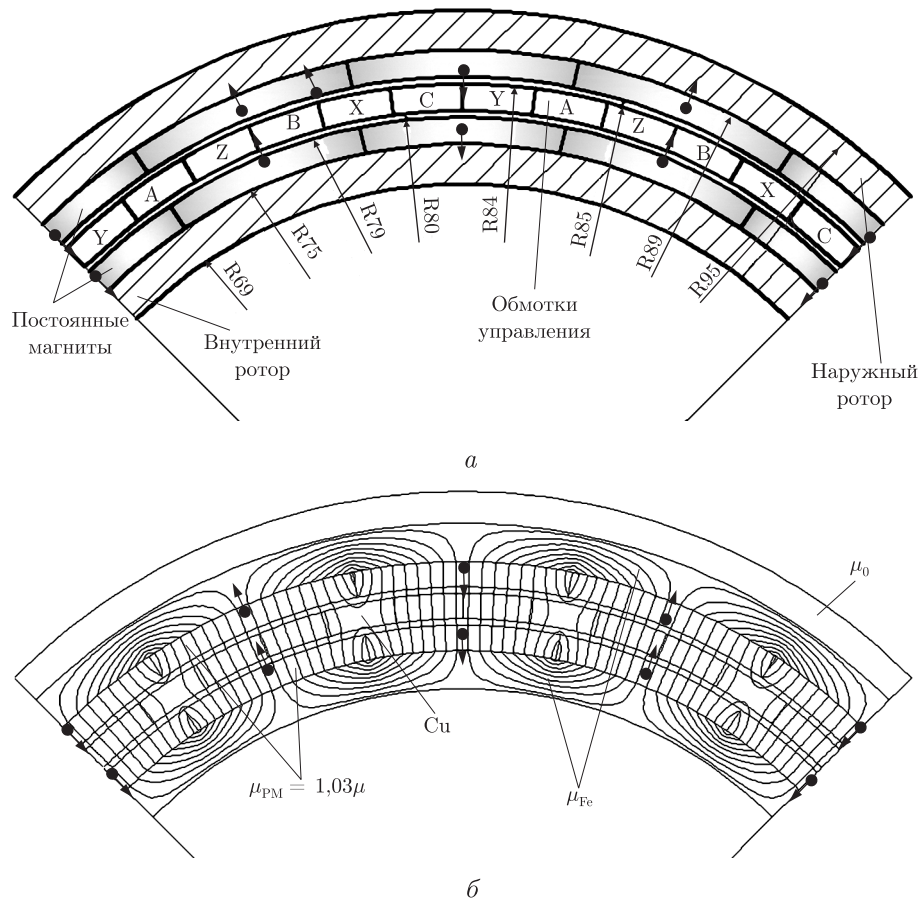


Рис. 2. Модель 2 цилиндрического ЭМПЭ с двухсторонним ротором: а — геометрия модели; б — картина магнитного поля модели

ним ротором и концентраторами магнитного поля) существенно больше как по сравнению с моделью 2 (с двухсторонним ротором), так и по сравнению с моделью 1 (с односторонней магнитной системой и ферромагнитным замыкателем на внешней стороне).

Предлагаемые конструкции характеризуются высокой динамикой и низким уровнем шумов и вибраций ввиду прецизионного размещения элементов обмоток управления и естественного сглаживания распределения величины магнитного потока в рабочем зазоре. Таким способом можно даже получить постоянную величину развиваемого момента, не зависящего от положения ротора.

Заметим, что охлаждение в рассматриваемых примерах конструкций ЭМПЭ может быть весьма эффективным, поскольку как вокруг внешней, так и внутренней поверхностей неподвижного статора свободно перемещаются воздушные потоки. Предложенные структуры обмоток управления имеют очень малые величины сопротивления, благодаря чему можно значительно уменьшить омические потери ЭМПЭ.

В табл. 1 приводятся величины электромагнитных моментов M_e и максимальной индукции магнитного поля $B_{n \max}$ на образующей посредине обмоток управления для трех исследуемых моделей при вариации величиной плотности токов J_{Cu} в обмотках управления и осевой длине ЭМПЭ, составляющей $L_a = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

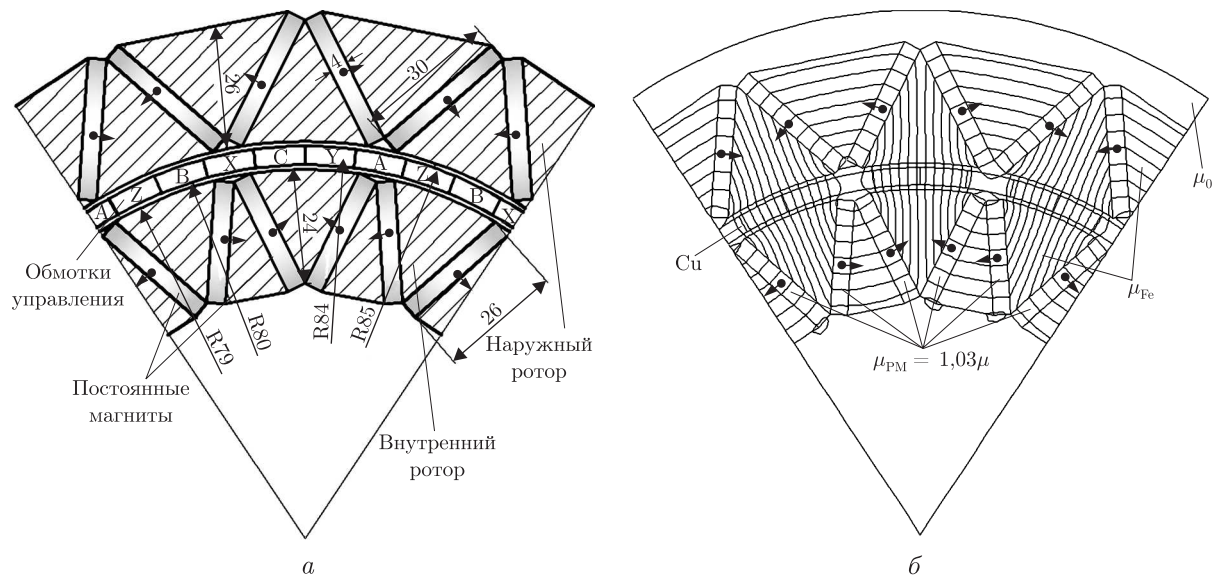


Рис. 3. Модель 3 цилиндрического ЭМПЭ с двухсторонним ротором и концентраторами магнитного поля: *a* — геометрия модели; *б* — картина магнитного поля модели

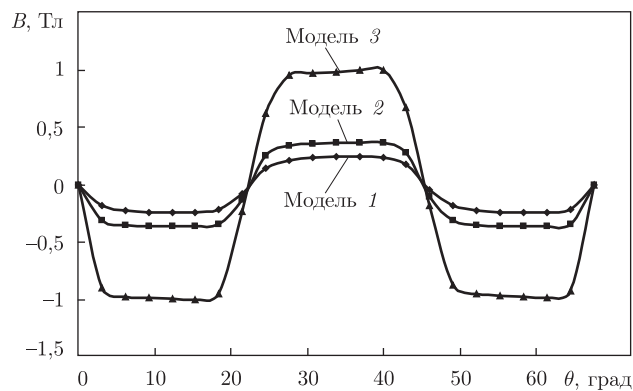


Рис. 4. Распределение магнитной индукции на линии посередине обмоток управления для трех моделей ЭМПЭ

Из таблицы видно, что наиболее высокие показатели электромагнитных моментов M_e и максимальной индукции магнитного поля $B_{n \max}$ имеются в модели 3 с концентраторами магнитного поля, в моделях 1 и 2 эти показатели значительно меньше, причем показатели в моделях 1 и 2 близки. Следует отметить также, что в моделях 1–3 величина максимальной индукции магнитного поля $B_{n \max}$ практически не зависит от величины плотности токов J_{Cu} в обмотках управления, что свидетельствует о превалировании магнитного поля ПМ. Ре-

Таблица 1

Номер модели	$J_{Cu} = 1,5 \text{ A/мм}^2$		$J_{Cu} = 2,0 \text{ A/мм}^2$		$J_{Cu} = 2,5 \text{ A/мм}^2$		$J_{Cu} = 3,0 \text{ A/мм}^2$	
	$B_{n \max}$, Тл	M_e , Нм	$B_{n \max}$, Тл	M_e , Нм	$B_{n \max}$, Тл	M_e , Нм	$B_{n \max}$, Тл	M_e , Нм
1	0,246	1,86	0,247	2,48	0,248	3,1	0,249	3,71
2	0,365	2,78	0,365	3,72	0,367	4,66	0,368	5,6
3	0,98	7,71	0,99	10,29	0,99	12,88	1,0	15,49

зультаты моделирования показывают, что в модели 3 наблюдаются наибольшая плотность магнитной энергии и величина электромагнитного момента и поэтому следует ожидать, что КПД ЭМПЭ будет очень высоким. Обмотки управления, составляющие статор моделей 1–3, имеют очень малые постоянные времени, что существенно влияет на повышение динамических характеристик. Отметим, что все железные части ротора вращаются вместе с постоянными магнитами, а момент удерживания и пульсации электромагнитного момента минимальны. Отсутствие железа в статоре исключает радиальные силы между статором и ротором, что очень существенно для тех приложений, в которых стабильность скорости ротора очень важна. ЭМПЭ быстро реагируют на сигналы системы управления и имеют низкий уровень гармоник.

Итак, выполненные исследования показывают, что структура магнитной системы значительно влияет на величину магнитной индукции в зазоре и, следовательно, на электромагнитные характеристики ЭМПЭ. Можно утверждать, что ЭМПЭ перспективного типа должен представлять собой систему, состоящую из гладкого беспазового статора, выполненного в виде трехфазных обмоток управления, и двухстороннего ротора, состоящего из магнитных систем, образованных наборами ПМ и ферромагнитных концентраторов магнитного поля.

1. *Afonin A. A., Gieras J., Szymczak P.* Permanent magnet brushless motors with innovative excitation systems. – Proc. 6th Intern. Conf. on Unconventional Electromech. and Electric. Systems UEES'04. – Alushta, Ukraine, September 24–29, 2004. – Vol. 1. – P. 27–38.
2. *Afonin A. A.* Cylindrical-type permanent magnet electrical machines // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2007. – No 11. – P. 149–152.
3. *Афонин А. А.* Магнитные системы электромеханических преобразователей энергии с вариацией векторов намагниченности постоянных магнитов // *Техн. електродинаміка*. – 2004. – № 1. – С. 47–55.
4. *Afonin A.* Permanent magnet brushless motors with innovative excitation systems // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Electromech. and Electric. Systems UEES'04. – Ukraine, 2004. – Vol. 1. – P. 27–38.
5. *Гребеников В.* Исследование магнитных полей в электрических машинах с различной ориентацией векторов намагниченности постоянных магнитов // *Техн. електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки*. – 2004. – Ч. 5. – С. 47–50.
6. <http://www.thingap.com/news/articles/pr052306.htm>.

*Щецинский политехнический институт, Польша
Институт электродинамики НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 09.09.2008

A. A. Afonin, V. V. Grebenikov

Research of slotless electric machines with permanent magnets

The research results on the magnetic field distribution and electromagnetic torques for three cylindrical types of magnetic systems of electrical machines with permanent magnets of cylindrical configuration are presented. An approach to design combined magnetic systems with complex configurations of a rotor consisting of permanent magnets and ferromagnetic segments is proposed and analyzed. It has been shown that the application of the proposed magnetic systems allows one to improve the magnetic flux density in the air gap and electromagnetic torques in cylindrical electric machines with double rotor.