



УДК 621.313.17

© 2008

А. А. Афонин, В. В. Гребеников

**Инновационные технологии электрических машин
с постоянными магнитами и двухсторонним
возбуждением магнитного поля**

(Представлено академиком НАН Украины А. В. Кириленко)

The research results for the magnetic systems of cylindrical-type permanent-magnet electrical machines are presented. An approach to the design of combined magnetic systems with complex configurations of permanent magnets and ferroceramic stator frameworks is proposed and analyzed. It has been shown that the application of the proposed magnetic systems allows one to increase the magnetic flux density in air gaps and the linear electric loading of electric machines with double rotor.

В настоящее время наблюдается тенденция возрастания технических показателей исполнительных устройств за счет разработки и внедрения новых технологий в современных электромеханических преобразователях энергии (ЭМПЭ), обеспечивающих полное использование материалов и улучшенные коэффициенты использования объема ЭМПЭ [1–3].

Проводимые нами работы в этом направлении предусматривали разработку и реализацию следующих научно-технических заданий:

инновационные системы возбуждения на основе нормальных и тангенциальных сегментов постоянных магнитов и ферромагнитных концентраторов магнитных потоков со специальными, соответствующими поставленной задаче формами и поперечными сечениями, обеспечивающими значительное повышение величины плотности магнитной энергии в области энергопреобразования;

синтез заданного распределения продольной компоненты магнитной индукции в воздушном зазоре ЭМПЭ: синусоидального — для машин типа BLDC (Brushless Direct Current) и трапецеидального — для машин типа PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor); синтез однородного магнитного поля в рабочей области магнитных систем цилиндрической конфигурации;

концепция построения и теоретические основы оптимального проектирования ЭМПЭ контрроторного движения, обеспечивающих совмещение в одном устройстве применяемых

до сих пор двух классических электрических машин, развитие теории нетрадиционных ЭМПЭ дисковой конфигурации;

процедуры проектирования и компьютерное моделирование с целью разработки адекватных математических моделей;

экспериментальные исследования на физических моделях с целью проведения выбора наиболее рациональных конструктивных решений с учетом следующих критериев: минимальная масса и габариты ЭМПЭ, энергосбережение и энергоэффективность, высокие динамические характеристики;

способы минимизации пульсаций электромагнитного момента в зубцово-пазовых структурах, улучшение технических и эксплуатационных характеристик электрических машин нового поколения с максимальным удельным электромагнитным моментом, минимальными габаритными размерами, высоким КПД энергопреобразования и минимальными уровнями шумов и вибраций;

принципы конструирования и построения нового типа ЭМПЭ с концентрацией энергии магнитного поля в рабочем зазоре;

технология производства ЭМПЭ нового поколения.

Поскольку в последнее время накоплена новая база знаний в области современной электромеханики и получены новые результаты в электронике, микропроцессорной технике и материаловедении, то в течение последних лет наше внимание было сконцентрировано на исследованиях инновационных магнитных систем ЭМПЭ с повышенной плотностью магнитной энергии и заданным характером распределения магнитного поля [1, 2, 4]. Эти исследования стимулируются непрерывно растущими техническими требованиями к характеристикам наукоемкой продукции, а также ставшими актуальными задачами энергосбережения и ресурсосбережения. Из обзора современных решений ЭМПЭ и их приложений в робототехнике, автоматике, автоматизированном электроприводе, транспортных системах, океанотехнике, электромагнитных накопителях энергии следует отметить, что особый интерес для разработчиков представляют технологии SEMA (Segmented Electromagnetic Array) и концепция Клауса Хальбаха [3]. На основе сопоставления и критического анализа существующих разработок можно утверждать, что одним из перспективных типов ЭМПЭ является гладкая беспазовая структура статора с увеличенным зазором для размещения в нем обмоток управления и двухсторонней магнитной системой составного ротора с наборами постоянных магнитов. Увеличенный рабочий зазор позволяет разместить в нем достаточно большое количество активных проводников и обеспечить высокую линейную токовую нагрузку без повышения плотности токов в проводниках обмоток управления, приводящего к росту потерь (потери пропорциональны квадрату плотности тока) и, как следствие, к снижению КПД ЭМПЭ.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана и апробирована технология инновационных электрических машин нового поколения, характеризующихся следующими показателями:

высокие значения КПД преобразования электрической энергии в механическую η (0,95–0,99);

возможность получения высоких значений продольной компоненты магнитной индукции в области электромеханического преобразования энергии (в рабочем зазоре), достигающих величин $B_{\delta n} = (1,9 \div 2,1)$ Тл, и ограниченных только явлениями, связанными с насыщением известных ферромагнитных материалов, что значительно превышает обычно достигаемые величины, составляющие около 1,1 Тл. На примере магнитной системы с кон-

центраторами магнитного поля установлено, что хотя используемые в эксперименте постоянные магниты имеют величину остаточной магнитной индукции $B_r = 1,23$ Тл, в рабочем зазоре может быть получена величина продольной компоненты магнитной индукции в зазоре $B_{y\max} = 1,991$ Тл, что свидетельствует о возможности построения магнитных систем с высокой плотностью магнитной энергии;

рекордно высокие удельные показатели по мощности на единицу активной массы $p_{em} = P_{ev}/m$ и на единицу активного объема $p_{ev} = P_{ev}/V$, составляющие, например $p_{em} = (5,0 \div 6,0)$ кВт/кг $p_{em} = (30,0 \div 40,0)$ кВт/л при скорости вращения $n = 6000$ об/мин;

высокие удельные показатели по развиваемому электромагнитному моменту на единицу активной массы $M_{em} = M_{ev}/m$ и на единицу активного объема $M_{ev} = M_{ev}/V$;

малые как электромагнитные T_e , так и электромеханические T_{em} постоянные времени электрических машин;

высокие динамические показатели и высокое качество движения согласно заданной траектории с управлением динамическими состояниями, высокая точность позиционирования;

отсутствие пульсаций электромагнитного момента;

практическое отсутствие магнитных шумов и минимальный уровень вибраций, обусловленных только погрешностями изготовления сопряженных механических частей;

отсутствие потерь как на гистерезис, так и на перемагничивание ферромагнитных элементов магнитной системы, практическое отсутствие реакции якоря;

облегченные условия работы подшипниковых узлов;

линейная зависимость между током питания и величиной развиваемого на валу электрической машины электромагнитного момента;

Вместе с тем достигаемые показатели не являются предельными и могут быть повышены, если применить конструкцию статора с измельченной структурой активного токового слоя.

На рис. 1 показан пример ЭМПЭ цилиндрической конфигурации, который содержит статор с системой трехфазных обмоток, расположенных на каркасе из ферромагнитной керамики, и двухсторонний ротор с наружной и внутренней частями и наборами радиально намагниченных постоянных магнитов, охватывающих статор с обеих сторон (рис. 1, а). На рис. 1, б показан пример расположения в пазах феррокерамического каркаса двухслойных трехфазных обмоток статора. Можно также использовать двойную двухслойную (четырёхъярусную) структуру обмоток, при которой в каждом, как внутреннем, так и наружном пазу статора располагается своя собственная двухслойная структура обмоток управления.

В качестве материала для каркаса статора выбрана керамика с наполнителем из ферромагнитного материала с относительной магнитной проницаемостью $\mu_k = (30 \div 100)\mu_0$, $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Для каркаса также можно использовать материалы фирмы Hovanas на основе ферромагнитных порошков типа Somaloy500 и Somaloy700, которые имеют величины относительной магнитной проницаемости соответственно: $\mu_{kS500} = 500\mu_0$, $\mu_{kS700} = 700\mu_0$ и в настоящее время широко доступные на рынке для промышленного применения. Система возбуждения состоит из намагниченных в радиальном направлении с формированием переменного-полосной поляризации высокоэнергетических постоянных магнитов типа NdFeB, имеющих остаточную магнитную индукцию $B_r = 1,256$ Тл, коэрцитивную силу $H_{cB} = 1000$ кА/м и $\mu_{PM} = 1,3\mu_0$.

На рис. 2 показаны кривые распределения магнитных силовых линий в исследуемой модели g320 30 при плотности тока в обмотках управления $j_{Cu} = 2,5$ А/мм². Можно заметить, что магнитные потоки в основном замыкаются по радиальным клиньям феррокера-

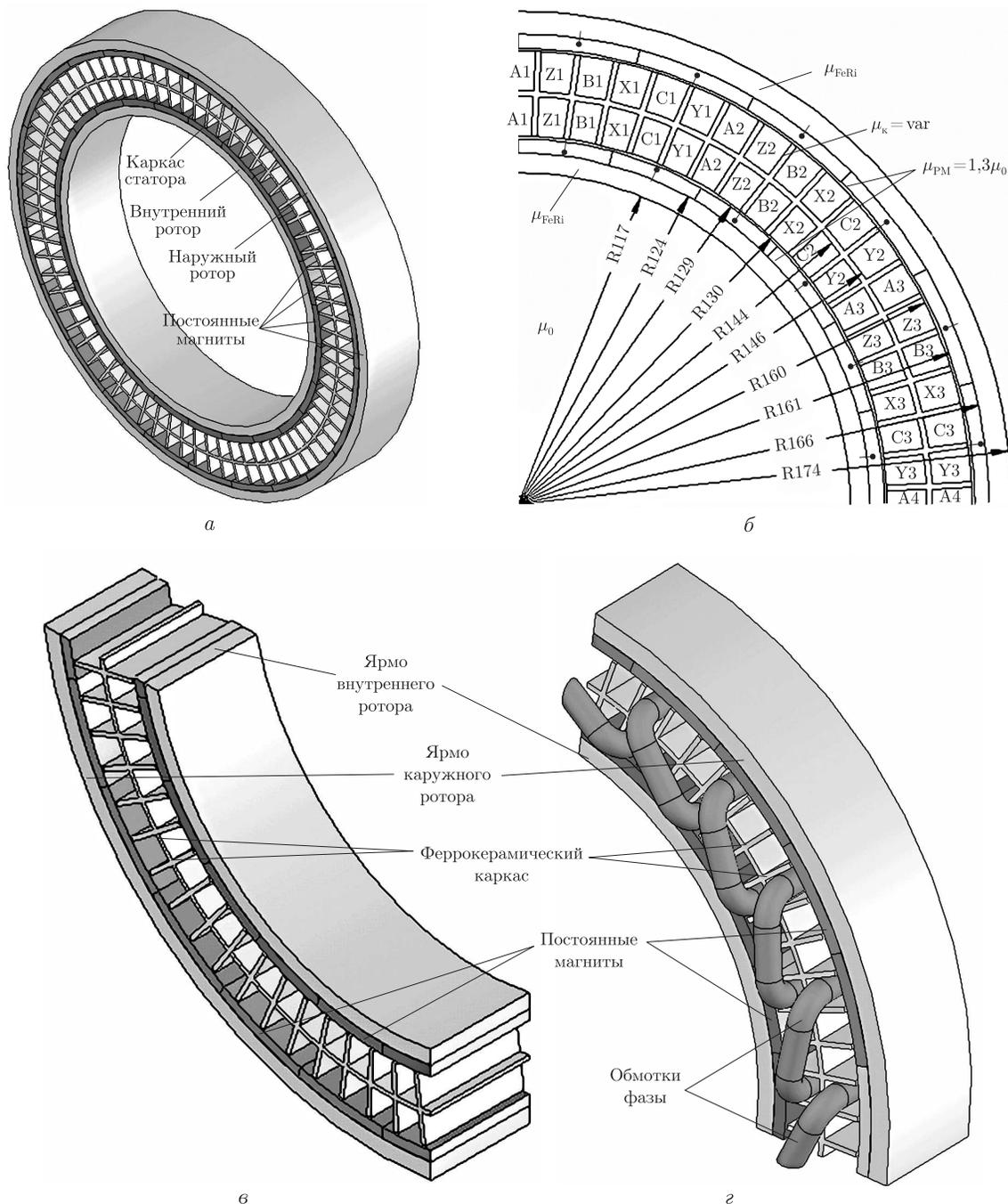


Рис. 1. Пример ЭМПЭ цилиндрической конфигурации: *a* — структура цилиндрического ЭМПЭ; *б* — геометрия модели; *в* — конструктивное исполнение феррокерамического каркаса; *г* — способ укладки обмоток фазы

мического каркаса статора и величина потоков, протекающих в азимутальном направлении, является малой и практически ею можно пренебречь.

На рис. 3 приведена зависимость нормальной составляющей индукции $B_{\delta r}$ в наружном зазоре вдоль двух полюсных делений при плотности тока $J_{Cu} = 2,5 \text{ A/mm}^2$, из рассмотрения

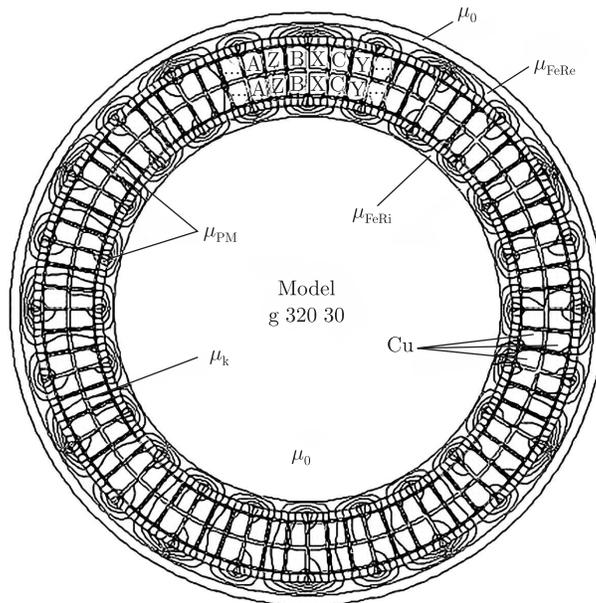


Рис. 2. Кривые распределения магнитного поля в магнитной системе модели g320 30 при плотности тока в обмотках управления $j_{Cu} = 2,5 \text{ A/mm}^2$

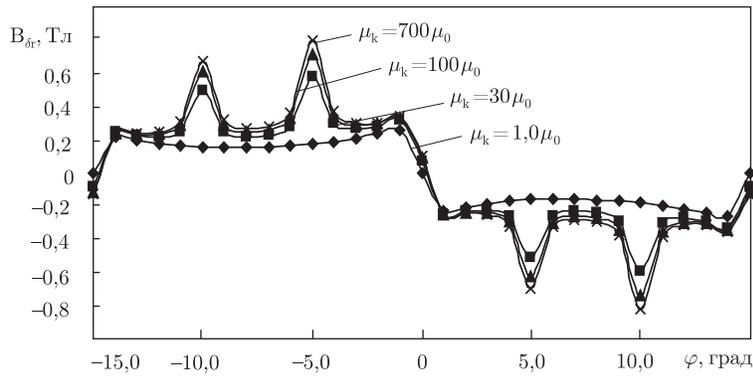


Рис. 3. Графики зависимости нормальной составляющей индукции $B_{\delta r}$ в наружном зазоре ($r = 160,5 \text{ мм}$) вдоль двух полюсных делений $2\tau_S$ при плотности тока в обмотках управления $J_{Cu} = 2,5 \text{ A/mm}^2$

которого заметно, что введение феррокерамического каркаса статора позволяет повысить величину магнитной индукции в зазоре.

Электромагнитный момент определяется путем интегрирования по области статора в радиальном направлении от $r_i = 130 \text{ мм}$ (внутренний радиус статора) $r_e = 160 \text{ мм}$ (внешний радиус статора) и в азимутальном направлении (по координате φ) от 0 до 2π

$$M_{ed} = \int_{r_i=130}^{r_e=160} \int_0^{2\pi} k_B k_A B_{\delta}(r, \varphi) A_a(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (1)$$

где k_B — коэффициент функции распределения магнитной индукции; k_A — коэффициент функции распределения линейной токовой нагрузки; B_{δ} — величина магнитной индукции; A_a — величина линейной токовой нагрузки статора.

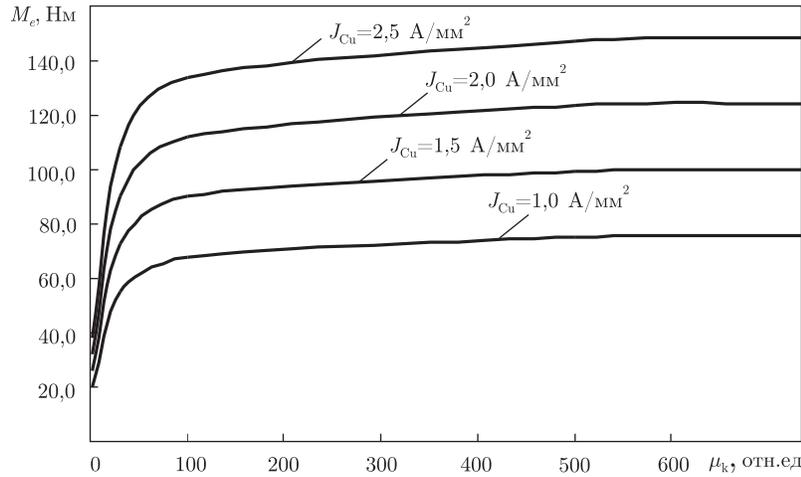


Рис. 4. Графики зависимости развиваемого ЭМПЭ электромагнитного момента от магнитной проницаемости феррокерамического каркаса

Электромагнитный момент ЭМПЭ равен:

$$M_e = M_{ed}L_{эф}, \quad (2)$$

где $L_{эф}$ — эффективная длина ЭМПЭ в аксиальном направлении.

Электромагнитная мощность ЭМПЭ составляет

$$P_e = M_e\omega. \quad (3)$$

Здесь ω — циклическая частота вращения ротора ЭМПЭ, $\omega = 2\pi n/60$; n — скорость вращения вала ротора в об/мин (число оборотов в минуту).

В табл. 1 приведены величины электромагнитного момента M_e и максимальных значений продольной компоненты магнитной индукции в зазоре $M_{n\max}$ при вариации величинами плотности тока в обмотках управления $J_{Cu} = [(1,5 \div 3,0) \text{ А/мм}^2]$ для разных значений магнитной проницаемости феррокерамического каркаса $\mu_k = [(1,0 \div 700,0)\mu_0]$. Следует отметить, что введение каркаса с магнитной проницаемостью $\mu_k = 30,0\mu_0$ при плотности тока $J_{Cu} = 2,5 \text{ А/мм}^2$ приводит к росту электромагнитного момента:

$$M_e(\mu_k = 30)/M_e(\mu_k = \mu_0) = 90,6/32,2 = 2,81 \text{ раза.}$$

На рис. 4 показаны графики зависимости развиваемого электромагнитного момента ЭМПЭ с аксиальной длиной $L_{эф} = 50 \text{ мм}$ от магнитной проницаемости феррокерамического каркаса.

Таблица 1

μ_k	$J_{Cu} = 1,5 \text{ А/мм}^2$		$J_{Cu} = 2,0 \text{ А/мм}^2$		$J_{Cu} = 2,5 \text{ А/мм}^2$		$J_{Cu} = 3,0 \text{ А/мм}^2$	
	$M_e, \text{ Нм}$	$M_{n\max}, \text{ Тл}$						
1	19,95	0,251	26,05	0,255	32,2	0,259	38,4	0,263
30	55,15	0,594	72,75	0,599	90,6	0,583	108,25	0,620
100	68,15	0,696	90,1	0,708	112	0,721	133,8	0,733
500	75,2	0,768	99,4	0,782	123,45	0,796	147,5	0,810
700	75,75	0,774	100,15	0,788	124,4	0,802	148,65	0,855

Можно заметить, что применение ферромагнитных каркасов даже с относительно невысокой относительной магнитной проницаемостью $\mu_k = 30\mu_0$ позволяет получить величину развиваемого электромагнитного момента $M_e = 100$ Нм и при скорости $n = 3000$ об/мин мощность такого ЭМПЭ составит свыше 30 кВт.

Таким образом, можно утверждать, что использование ферромагнитных каркасов толщиной, например, $\delta_k = 2$ мм, позволяет формировать структуры ЭМПЭ с повышенными значениями линейной токовой нагрузки и получать при этом весьма высокую индукцию магнитного поля в областях зазора и статорного каркаса. При этом за счет применения известного способа скоса пазов ферромагнитных каркасов можно добиться уменьшения уровня пульсаций электромагнитного момента.

1. *Афонин А. А.* Магнитные системы электромеханических преобразователей энергии с вариацией векторов намагниченности постоянных магнитов // Техн. электродинамика. – 2004. – № 1. – С. 47–55.
2. *Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P.* Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną. – Szczecin: Wyd. Politechniki Szczecińskiej, 2000. – 242 s.
3. *Afonin A.* Permanent magnet brushless motors with innovative excitation systems // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Electromechanical and Electrical Systems UEES'04. – Ukraine, 2004. – Vol. 1. – P. 27–38.
4. *Гребеников В. В.* Исследование магнитных полей в электрических машинах с различной ориентацией векторов намагниченности постоянных магнитов // Техн. электродинамика. Тем. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2004. – Ч. 5. – С. 47–50.

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

Поступило в редакцию 10.09.2007

УДК 621.3.(575)

© 2008

Член-корреспондент НАН Украины **А. Е. Божко**

О новых формулах средних значений напряжения, тока и мощности в электроцепи с управляемыми диодами

On the basis of the singular expansion of a jump-like function, the mean value of a sinusoidal voltage shifted by phase is obtained.

Управляемое напряжение постоянного тока, получаемое в результате двухполупериодного выпрямления переменного синусоидального напряжения сети с помощью управляемых диодов (тиристоров), широко используется в различных областях промышленности: гальваническое производство, зарядка аккумуляторных батарей, химическое производство, для источников управляемого постоянного напряжения и т. д.

В основном в указанных производствах технологические процессы формируются посредством действия среднего значения выпрямляемого и управляемого синусоидального напряжения $U(t) = U_a \sin \omega t$, где U_a — амплитуда; ω — круговая частота ($\omega = 2\pi f$, f — частота, Гц); t — время. При управлении выходного напряжения выпрямителя последнее $U_{\text{вых}}$ сдвигается относительно нуля на угол φ , т. е. на угол открывания управляемого диода. Вид такого напряжения приведен на рис. 1. Здесь же показано среднее напряжение $U_{\text{ср}}$.