



УДК 621.313.17

© 2007

**А. А. Афонин**

**Способ повышения магнитной индукции в зазоре  
электромеханических преобразователей энергии  
с постоянными магнитами**

*(Представлено академиком НАН Украины А. В. Кириленко)*

*An approach to the design of combined magnetic systems with complex configurations of permanent magnets and concentrators of a magnetic flow is proposed. It is shown that such systems allow one to increase the magnetic flow densities in the air gaps of electromechanical energy converters with inner 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 [1–3].

Цель настоящей работы была мотивирована и сформулирована представителями электротехнической промышленности, занимающимися разработкой электродвигателей широкого назначения. При этом необходимо было получить ответы на два вопроса: во-первых, можно ли отказаться от применения высокоэнергетических постоянных магнитов (ПМ), наличие которых приводит к существенному росту стоимости электротехнического изделия, и получить в магнитных системах на основе относительно недорогих магнитотвердых материалов типа оксидно-бариевых ферритов высокую величину интенсивности магнитного поля в области электромеханического преобразования энергии, и, во-вторых, указать, какова при этом должна быть структура ЭМПЭ.

При ограниченной величине пространства, заполняемого проводниками обмоток управления, возможность повышения электромагнитного момента и мощности может быть реализована повышением плотности магнитной энергии в области электромеханического преобразования энергии при сохранении неизменной линейной токовой нагрузки. В работе представлены результаты исследования моделей магнитных систем ЭМПЭ с ПМ в роторе цилиндрической конфигурации (рис. 1–4) с одинаковыми геометрическими размерами диаметра ротора  $D_R = 222,74$  мм. Вначале приведены результаты исследования двух моделей беспазовых магнитных систем как традиционного исполнения  $Vp1\ concR$  (рис. 1), так и выполненных на модели с концентраторами магнитных потоков  $Vp2\ concR$  (рис. 2).

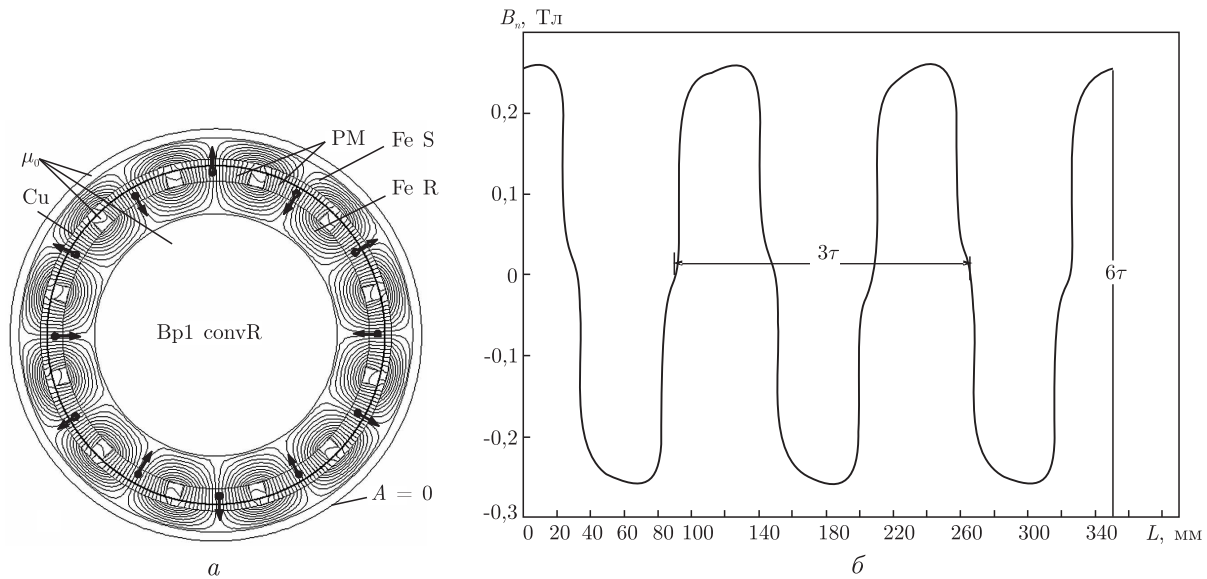


Рис. 1

На рис. 1, *a* показаны линии равного магнитного потенциала в магнитной системе с традиционным расположением ПМ в модели Вр1 convR. Величина технологического зазора  $\delta_0 = 0,53$  мм, а толщина слоя меди обмоток управления составляла  $\delta_{Cu} = 4,1$  мм ( $D_{eCu} = 111,9$  мм;  $D_{iCu} = 116,0$  мм). В качестве источников мдс использованы плоские сегменты ПМ типа оксидно-барьерных ферритов толщиной  $\Delta = 10,0$  мм, коэрцитивная сила которых составляет  $H_{CB} = 300,0$  кА/м, остаточная магнитная индукция  $B_r = 0,38$  Тл, а магнитная проницаемость выбрана равной  $\mu_{PM} = 1,3\mu_0$ . Электротехническая сталь статора и ротора имеет нелинейные магнитные характеристики с индукцией насыщения  $B_S = 1,6$  Тл.

На рис. 1, *б* показан график распределения нормальной (радиальной)  $B_n = B_r$  компоненты магнитной индукции посередине технологического зазора  $R = 111,635$  мм на протяжении шести полюсных делений  $6\tau$ . Магнитная система ротора содержит шесть пар полюсов  $p = 6$  при общем числе полюсов магнитной системы  $2p = 12$ . Полюса образованы с помощью установленных на внешней поверхности ротора ПМ, а статор имеет трехфазную многополюсную систему обмоток управления, имеющих беспазовую гладкую структуру. Заданная величина плотности тока в обмотках фаз составляла  $j_{Cu} = 2,0$  А/мм<sup>2</sup>. Величина продольной компоненты магнитной индукции в зазоре вдоль образующей по радиусу  $R = 111,635$  мм составляла  $B_{1n\max} = 0,26$  Тл и  $B_{1n\min} = -0,26$  Тл. Величина развиваемого при этом на единицу длины ротора электромагнитного момента  $M_{1eR} = 130,19$  Нм/м.

На рис. 2 показаны результаты моделирования в магнитной системе Вр2 concR с концентраторами магнитного потока в роторе. Как технологический зазор  $\delta_0 = 0,53$  мм, толщина слоя меди в обмотках управления  $\delta_{Cu} = 4,1$  мм, так и магнитные свойства постоянных магнитов и заданная величина плотности тока в обмотках фаз  $j_{Cu} = 2,0$  А/мм<sup>2</sup> остались такими же, как в модели Вр1 convR. На рис. 2, *a* показана топография магнитного поля, а на рис. 2, *б* — графики распределения нормальной компоненты магнитной индукции  $B_{2n} = f(\vartheta, R = 111,635$  мм) вдоль шести полюсных делений  $6\tau$ . Экстремальные значения нормальной компоненты магнитной индукции в зазоре вдоль образующей посередине тех-

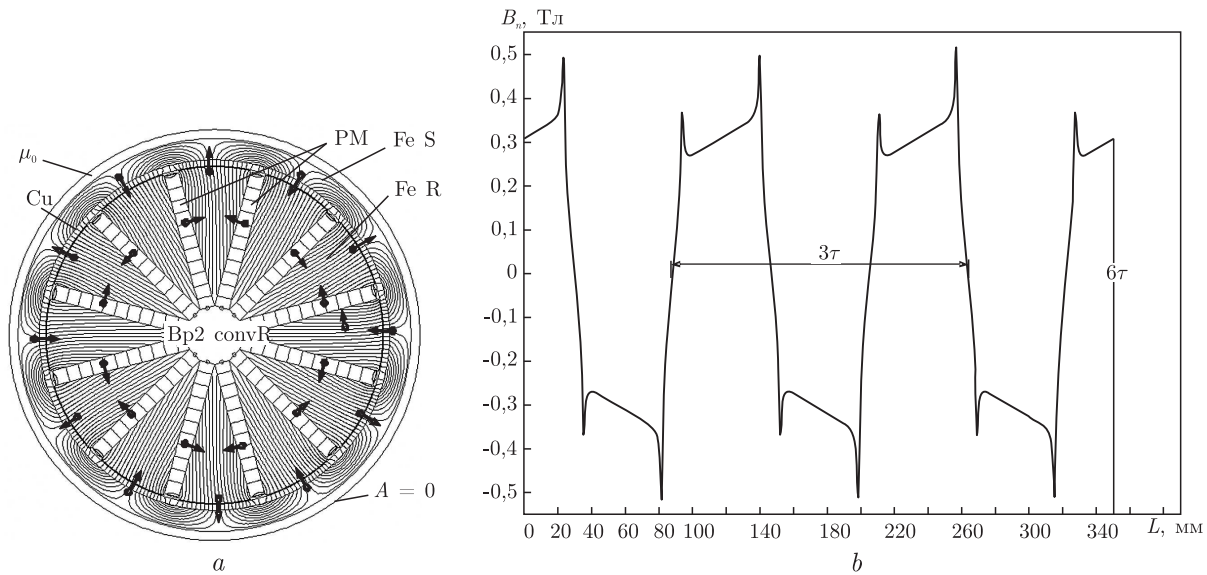


Рис. 2

нологического зазора принимают значения:  $B_{2n \max} = 0,515$  Тл;  $B_{2n \min} = -0,515$  Тл. При этом повышенные пиковые значения магнитной индукции достигаются в областях стыковки сегментов постоянных магнитов с ферромагнитными концентраторами магнитного потока. Величина развиваемого в модели Br2 convR действующего на единицу длины ротора электромагнитного момента за счет применения концентраторов и значительного увеличения массы ПМ возросла только на 47,6% по сравнению с моментом в модели Br1 convR и составила  $M_{2eR} = 192,17$  Нм/м. Отметим, что ЭМПЭ с беспазовым статором имеют по сравнению с зубцово-пазовыми структурами следующие преимущества: отсутствие клеящего момента (англ. cogging torque) и пульсаций, являющихся следствием наличия зубцов, приводящих к изменениям реактивного сопротивления в магнитной системе при движении ротора, отсутствие потерь на гистерезис и перемагничивание, тихая бесшумная работа двигателя, лучшие динамические параметры вследствие меньших электромагнитной и электромеханической постоянных времени.

Применение концентраторов в системах подобного типа не дает значительного выигрыша и логически напрашивается переход от беспазовых к зубцово-пазовым структурам статора (рис. 3, 4). На этом пути сразу же проявляются эффекты преобразования моделей, так, например, значительно возрастают не столько величина нормальной компоненты магнитной индукции в зазоре, как электромагнитный момент. В модели Zp3 convR (см. рис. 3) с зубцово-пазовой структурой статора и традиционным расположением сегментов постоянных магнитов на роторе величины нормальной компоненты магнитной индукции в зазоре составляют соответственно:  $B_{3n \max} = 0,565$  Тл и  $B_{3n \min} = -0,565$  Тл.

При этом в модели Zp3 convR для уменьшения пульсаций электромагнитного момента в область пазов статора внедрены ферромагнитные клинья толщиной 2 мм, имеющие постоянную величину относительной магнитной проницаемости  $\mu_{kl} = 4\mu_0$  ( $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6}$  Гн/м). При этом величина электромагнитного момента возрастает весьма существенно  $M_{3eR} = 1005,0$  Нм/м, т. е. в 7,72 раза по сравнению с моделью Br1 convR.

А вот результаты исследования модели Zp4 convR (см. рис. 4) с зубцово-пазовой структурой статора, концентраторами магнитного потока и магнитными клиньями показали,

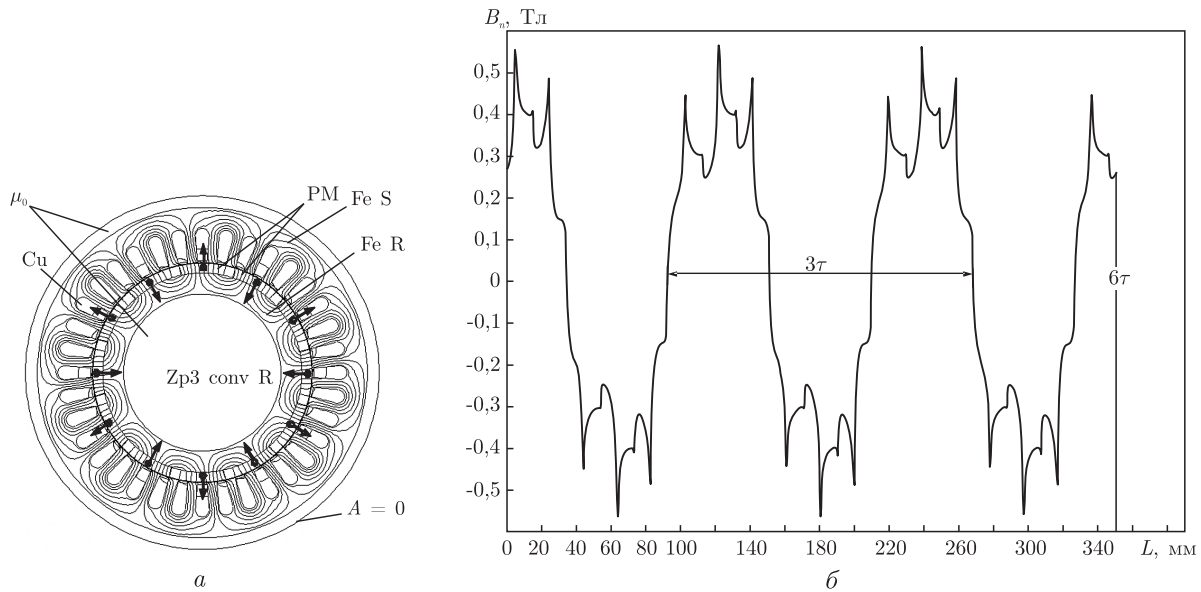


Рис. 3

что величины нормальной компоненты магнитной индукции в зазоре существенно возросли и варьируются в диапазоне от  $B_{n\max} = 1,71$  Тл до  $B_{n\min} = -1,71$  Тл, т.е. достигают области насыщения магнитных материалов, а величина электромагнитного момента составила  $M_{eR} = 2570,8$  Нм/м, т.е. в 19,74 раза больше по сравнению с выбранной в качестве базовой для сравнения моделью Vp1 convR.

Для удобства сопоставления результаты исследований моделей сгруппированы в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что в магнитных системах с зубцово-пазовой структурой статора и магнитными клиньями можно добиться высоких значений магнитной индукции в зазоре и электромагнитных моментов.

Таким образом, результаты исследования беспазовых структур показывают, что использование невысокоэнергетических ПМ как в системах с концентраторами, так и в особенности без них, не позволяет добиться высоких магнитных нагрузок в ЭМПЭ.

В то же время применение зубцово-пазовых структур с инновационными магнитными системами на основе различного типа концентраторов магнитного потока обеспечивает высокие удельные показатели ЭМПЭ даже с такими ПМ, и магнитная индукция в зазоре может быть столь высока, что даже превышать по величине остаточную магнитную индукцию используемых ПМ, а стоимость используемых магнитотвердых материалов при этом весьма снижается.

Таблица 1

Наименование модели	Физические параметры модели				
	$B_{\delta n \max}$ , Тл	$B_{\delta n \min}$ , Тл	$M_e$ , Нм/м	$K_{M1} = \frac{M_{e\text{mod}}}{M_{e\text{baz}}}$	$K_{M2} = \frac{M_{e\text{conc}}}{M_{e\text{conv}}}$
Vp1 conv R	0,26	0,26	130,19	1,0	1,0
Vp2 conc R	0,515	0,515	192,17	1,476	1,476
Zp3 conv R	0,565	0,565	1005,0	7,72	1,0
Zp4 conc R	1,71	1,71	2570,8	19,74	2,6

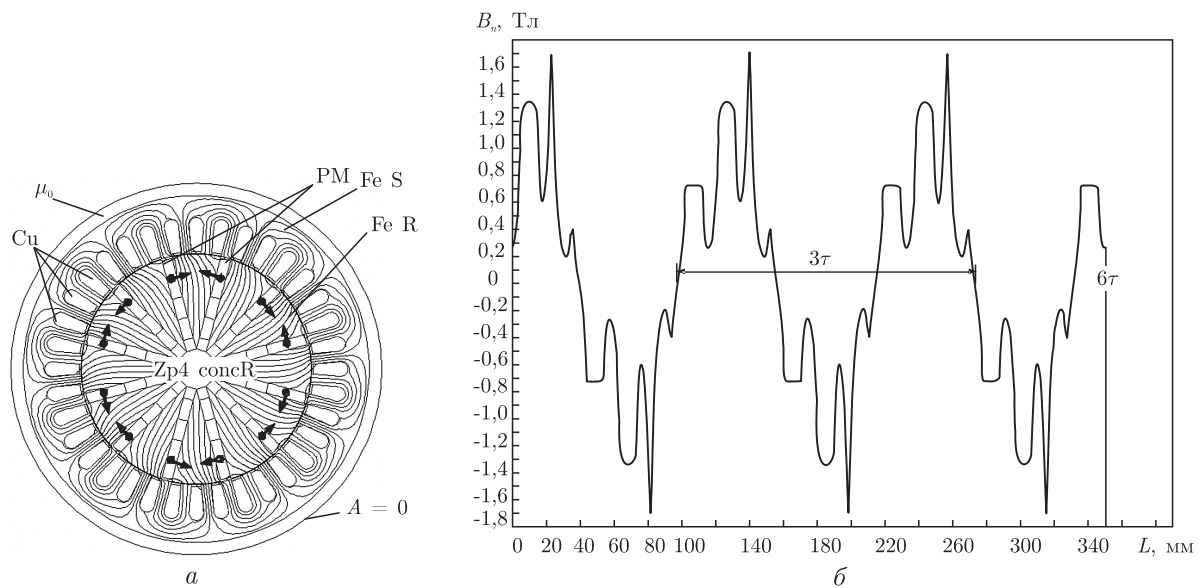


Рис. 4

При использовании зубцово-пазовых магнитных систем статора традиционного и нового типа с целью снижения пульсаций электромагнитного момента целесообразно применять внедряемые в области пазов магнитные клинья с определенной величиной магнитной проницаемости ферромагнитного материала, которая должна выбираться на основе результатов компьютерного моделирования.

Представленные результаты относятся к ЭМПЭ цилиндрической конфигурации, хотя область применения изложенных положений может быть значительно шире.

1. *Афонин А. А.* Магнитные системы электромеханических преобразователей энергии с вариацией векторов намагниченности постоянных магнитов // Техн. электродинаміка. – 2004. – № 1. – С. 47–55.
2. *Afonin A.* Permanent magnet brushless motors with innovative excitation systems // Proc. of the 6<sup>th</sup> Intern. Conf. on Electromechanical and Electrical Systems UEES'04. – Ukraine, 2004. – 1. – P. 27–38.
3. *Gieras J. F., Wing M.* Permanent magnet motor technology. – New York: Marcel Dekker, 2002. – 590 p.

Щецинский политехнический институт,  
Польша

Поступило в редакцию 04.01.2007