

**И.Н. РАДИМОВ**, канд. техн. наук, **В.В. РЫМША**, д-р техн. наук,  
**ЧАН ТХИ ТХУ ХЫОНГ**, аспирантка (г. Одесса)

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ МОДИФИКАЦИЙ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Наведено результати порівняльного аналізу електромагнітних та робочих властивостей двох конструктивних модифікацій вентильних двигунів з постійними магнітами.

The results of the comparative analysis of the electromagnetic and working features of two constructive modifications of the brushless dc motors with permanent magnets are present.

В [1,2] представлены результаты исследования вентильных двигателей с постоянными магнитами (ВДПМ) двух конструктивных модификаций (рис. 1). Обе конструкции выполняются с трехфазной обмоткой, состоящей из шести катушек, каждая из которых наматывается на полюс (зубец) статора. Число полюсов ротора  $2p=8$ . Отличие модификации, показанной на рис. 1,б, от «классической», изображенной на рис. 1,а состоит в расположении между главными полюсами (ГП) статора дополнительных полюсов (ДП).

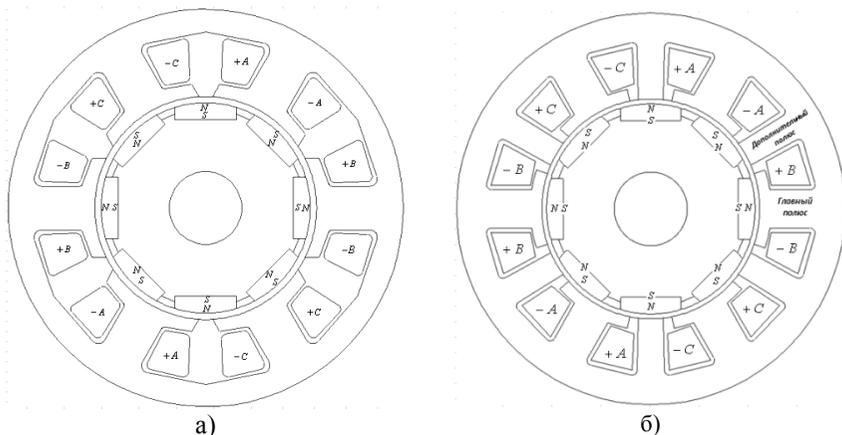


Рис. 1. Поперечное сечение ВДПМ

В результате проведенных исследований [1,2] для указанных модификаций ВДПМ найдена такая геометрия активного слоя (воздушный зазор, полюсные дуги магнитов, главных и дополнительных полюсов), при

которой обеспечивается незначительная величина момента от зубцовых гармонических, не оказывающая существенного влияния на основной электромагнитный момент.

Следующей задачей исследования является проведение сопоставительного анализа электромагнитных и рабочих свойств рассматриваемых конструктивных модификаций ВДПМ. При анализе будем исходить из оптимальной геометрии, полученной в [1] для «классической» конструкции, и в [2] для конструкции с ДП. Эти данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические размеры конструктивных модификаций ВДПМ

Геометрические размеры	«Классическая»	с ДП
Внешний диаметр статора, мм	81	81
Внутренний диаметр статора, мм	46	46
Воздушный зазор, мм	1,25	1,1
Активная длина, мм	45	45
Полюсная дуга магнита, град.	34	33,5
Дуга зубца статора, град.	52	36
Дуга дополнительного полюса, град.	-	13
Высота постоянного магнита, мм	3,5	3,5

Материал постоянных магнитов – NdFeB. Число витков катушки обмотки статора  $n_k = 275$  для этих модификаций ВДПМ.

При указанных в табл. 1 геометрических размерах момент от зубцовых гармонических составил:

- для «классической» конструкции – 0,0088 Нм;
- для конструкции с ДП – 0,0063 Нм.

Видно, что при величине расчетного значения номинального момента на уровне 1 Нм моменты от зубцовых гармонических составляют менее 1% в обоих случаях.

Для анализа свойств и характеристик конструктивных модификаций ВДПМ используется система уравнений, записанная в координатных осях (d;q) [3]:

$$\begin{cases} u_d = r_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q; \\ u_q = r_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_m; \\ M_{\mathcal{E}} = \frac{3}{2} p [i_q \Psi_m + i_d i_q (L_d - L_q)]; \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\mathcal{E}} - M_C, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_s$  - активное сопротивление обмотки статора;  $L_d, L_q$  - продольная и поперечная индуктивности;  $\Psi_m$  - максимальное потокоцепление обмотки статора с потоком ротора;  $\omega$  - скорость вращения ротора;  $M_{\Sigma}$  - электромагнитный момент;  $J_{\Sigma}$  - суммарный момент инерции;  $M_C$  - момент сопротивления.

Для решения системы уравнений (1) необходимо знать индуктивности  $L_d, L_q$  и потокоцепление  $\Psi_m$ , которые могут быть получены в результате решения полевой задачи. Полевая модель является достаточно точной для этих целей, т.к. позволяет учесть реальную геометрию ВДПМ, насыщение стали, характеристики постоянных магнитов. При разработке полевых математических моделей использовано лицензионное программное обеспечение ELCUT [4], отличительной особенностью которого является высокое быстродействие благодаря заложенному в нем методу геометрической декомпозиции, результатом применения которого является почти линейный (в степени 1,1) рост времени решения задачи с возрастанием числа конечных элементов – против близкого к квадратичному росту, характерному для стандартных пакетов программ конечноэлементного анализа магнитных полей. Иными словами, магнитное поле в пакете ELCUT можно рассчитать быстрее чем, например, в известном пакете FEMM [5], что иллюстрируется графиками на рис. 2, где показаны зависимости времени расчета модельной задачи в пакетах ELCUT и FEMM от числа узлов конечноэлементной сетки  $N$ .

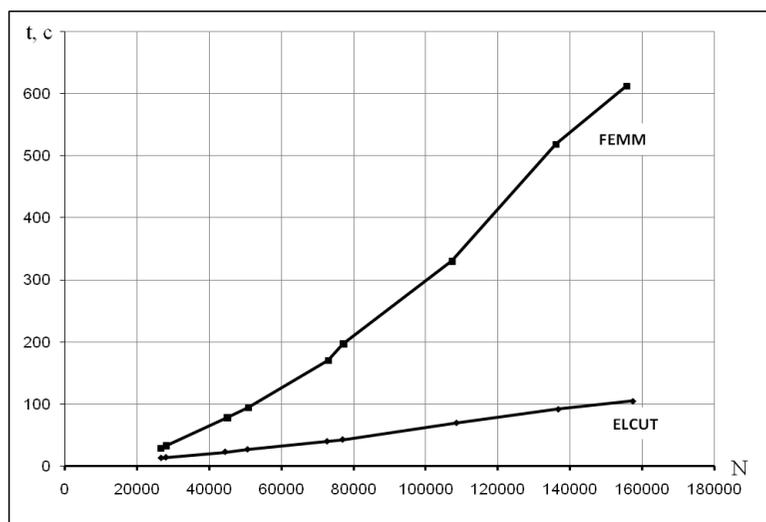


Рис. 2. К сопоставлению программных пакетов ELCUT и FEMM

Это делает пакет ELCUT предпочтительным при проведении многовариантных расчетов и оптимизации электрических машин на основе полевых математических моделей.

На рис. 3 показаны картины распределения магнитного поля для рассматриваемых конструктивных модификаций ВДПМ.

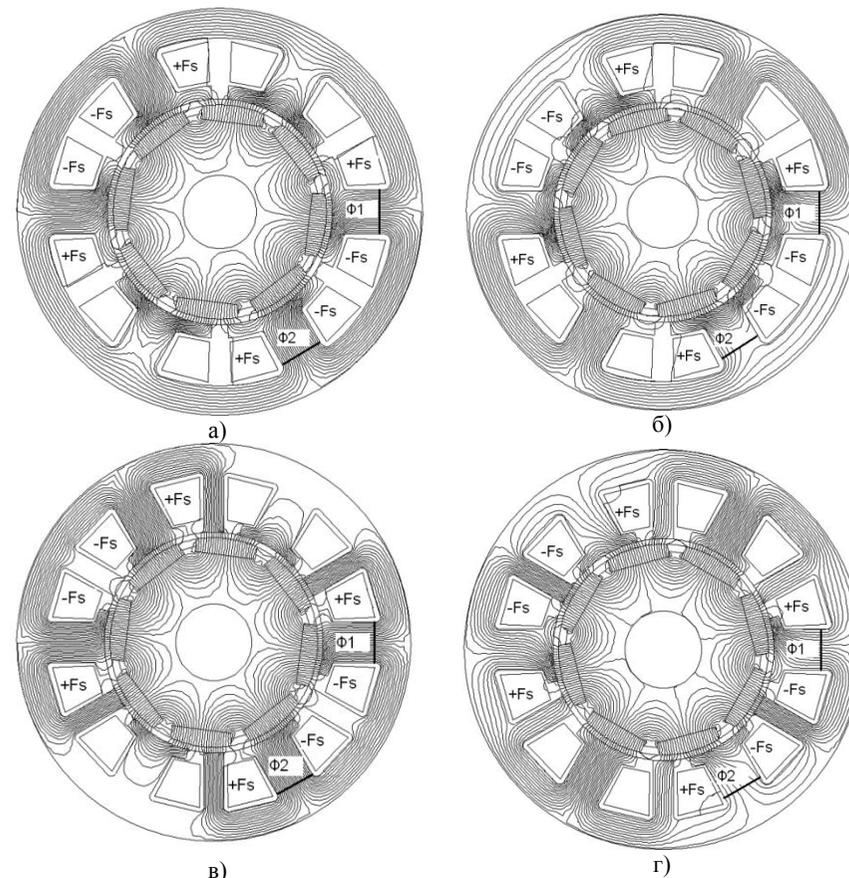


Рис. 3. Картины магнитного поля

Причем, на рис. 3,а,б показано распределение магнитного поля в «классической» модификации, соответственно, по осям d и q, а на рис. 3,в,г – аналогичное распределение для модификации ВДПМ с ДП.

При расчете магнитного поля две фазы обмотки статора были включены последовательно, т.е. из шести катушек было задействовано четыре. МДС катушки обмотки статора  $F_S = 200A$ .

Максимальное потокосцепление  $\Psi_m$  обмотки статора с потоком ротора:

$$\Psi_m = 2 \cdot n_k \cdot (\Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=0}}), \quad (2)$$

где  $n_k$  - число витков катушки обмотки статора,  $\Phi_{1_{F_s=0}}$ ,  $\Phi_{2_{F_s=0}}$  - магнитные потоки через зубцы статора (см. рис. 3) при МДС катушки обмотки статора  $F_s=0$  А.

Индуктивность  $L_d$  по продольной оси по данным полевого расчета определяется следующим образом:

$$L_d = \frac{2 \cdot n_k^2 \cdot (\Phi_{1_{F_s=200}} - \Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=200}} - \Phi_{2_{F_s=0}})}{F_s}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{1_{F_s=200}}$ ,  $\Phi_{2_{F_s=200}}$  - магнитные потоки при  $F_s=200$  А.

Аналогичным образом выполняется расчет индуктивности  $L_q$  по поперечной оси.

Результаты определения максимального потокосцепления по (2) и индуктивностей по осям d и q по (3) сведены в табл. 2.

Таблица 2  
Потокоосцепление и индуктивности конструктивных модификаций ВДПМ

Модификация ВДПМ	$\Psi_m$	$L_d$	$L_q$
	Вб	мГн	мГн
«Классическая»	0,364	0,077	0,0673
с ДП	0,436	0,0564	0,061

Из данных табл. 2 следует:

- для каждой из модификаций ВДПМ значения индуктивностей по осям d и q достаточно близки;

- для «классической» модификации  $L_d$  на 14% больше  $L_q$ , а для модификации с ДП  $L_d$  на 8% меньше  $L_q$ . При таких соотношениях  $L_d$  к  $L_q$  не ожидается существенной величины реактивного момента, обусловленного разными проводимостями по осям d и q;

- максимальное потокосцепление  $\Psi_m$  в конструкции с ДП в 1,2 раза больше, чем в «классической» конструкции.

Отличие потокосцеплений можно пояснить, воспользовавшись фрагментами картин магнитного поля рассматриваемых модификаций ВДПМ (см. рис. 3,а,в), приведенными на рис. 4.

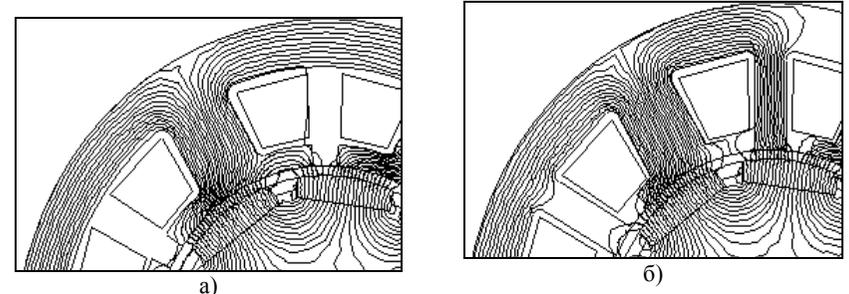


Рис. 4. Фрагменты картин магнитного поля модификаций ВДПМ

Из представленных фрагментов распределения магнитного поля видно, что в «классической» конструкции часть магнитного потока замыкается между постоянными магнитами ротора через полюсные наконечники зубцов статора, тем самым уменьшая потокосцепление обмотки статора (рис. 4,а). В конструкции с ДП такого уменьшения потокосцепления практически не наблюдается и, следовательно, потокосцепление в этой модификации ВДПМ больше.

На основе распределения магнитного поля рассчитывался электромагнитный момент для двух модификаций ВДПМ через тензор натяжений Максвелла. Расчет проводился при МДС катушки обмотки статора  $F_s = 200$  А. Шаг по углу  $\Theta$  составлял 1 механический градус. Результаты расчета момента  $M_{\Theta}$  от углового положения ротора  $\Theta$  представлены на рис. 5 и в табл. 3. В табл. 3  $M_{\Theta_{\max}}$  - максимальное значение электромагнитного момента,  $M_{\Theta_{cp}}$  - среднее значение электромагнитного момента за период коммутации (15-30 мех. градусов).

Таблица 3  
Электромагнитный момент конструктивных модификаций ВДПМ

Модификация ВДПМ	$M_{\Theta_{\max}}$	$M_{\Theta_{cp}}$
	Нм	Нм
«Классическая»	1,064	1
с ДП	1,287	1,2

Из данных табл. 3 следует, что модификация ВДПМ с ДП развивает электромагнитный момент примерно на 20% выше, чем ВДПМ «классической» конструкции, что объясняется большим значением  $\Psi_m$  у ВДПМ с ДП.

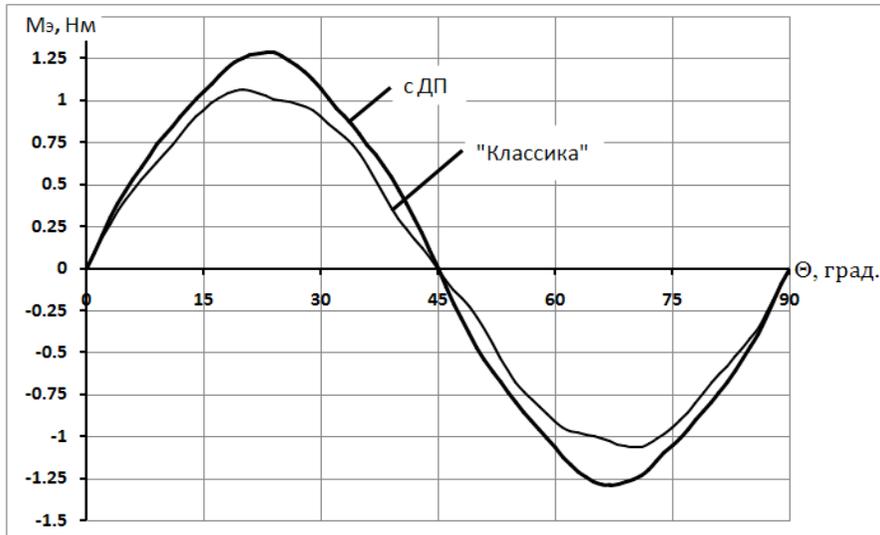


Рис. 5. Зависимости  $M_{э} = f(\Theta)$

Используя полученные выше значения  $L_d, L_q, \Psi_m$  по системе уравнений (1) были рассчитаны «естественные» механические характеристики  $n = f(M_C)$  и зависимости КПД от момента на валу двигателя  $\eta = f(M_C)$ , приведенные, соответственно, на рис. 6,7.

Из рис. 6 видно, что ВДПМ с ДП имеет более жесткую механическую характеристику, что делает его применение в электроприводах предпочтительным. Кроме того, такая конструктивная модификация ВДПМ обеспечивает более высокий КПД (см. рис. 7) во всем диапазоне изменения момента сопротивления даже при том, что мощность на валу ВДПМ с ДП при одинаковом моменте сопротивления несколько меньше, чем у ВДПМ «классической» модификации.

**Список литературы:** 1. Радимов И.Н., Рымиша В.В., Чан Тхи Тху Хьонг, Процина З.П. «Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами» // Электротехника і електромеханіка. – 2008. - № 5. – С. 26-28. 2. Рымиша В.В., Радимов И.Н., Чан Тхи Тху Хьонг, Процина З.П. «Рациональные соотношения геометрических размеров в вентильном двигателе с постоянными магнитами и дополнительными полюсами» // Электромашинобуд. та електрообладн. – 2008. – Вип. 70. – С. 50-54. 3. Столов Л.А., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с. 4. www.tor.ru 5. femm.foster-miller.net

Поступила в редколлегию

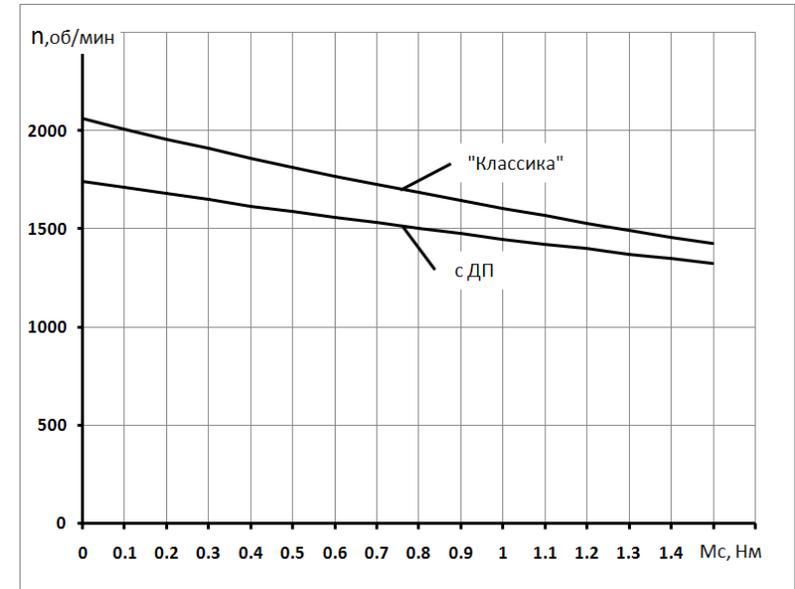


Рис. 6. Механические характеристики модификаций ВДПМ  $n = f(M_C)$

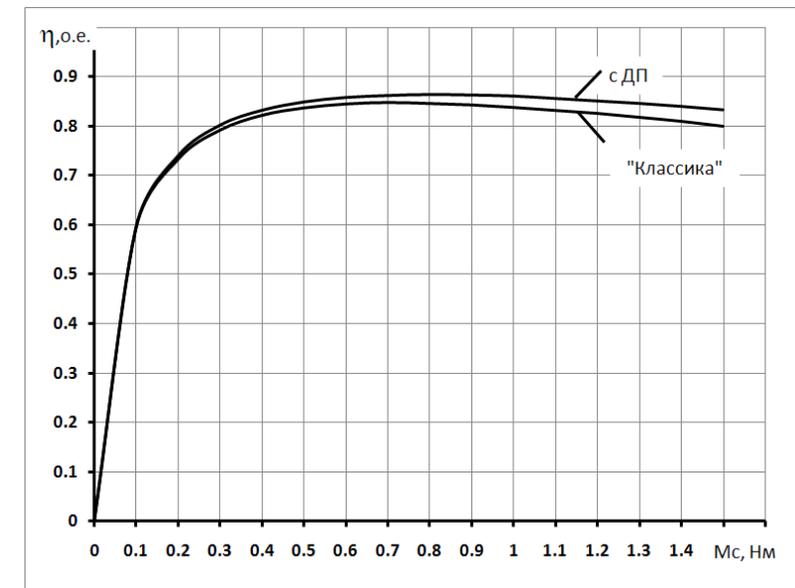


Рис. 7. Зависимости  $\eta = f(M_C)$  для двух модификаций ВДПМ

**Авторы.**

1. Радимов Игорь Николаевич, кандидат технических наук, доцент, главный конструктор НТЦ ООО «Завод «Электротехника» (г. Одесса).



2. Рымша Виталий Викторович, Одесский национальный политехнический университет, институт электромеханики и энергоменеджмента, кафедра электрических машин, доктор технических наук, профессор.



3. Чан Тхи Тху Хьонг, Одесский национальный политехнический университет, институт электромеханики и энергоменеджмента, кафедра электрических машин, аспирантка.

