

В.В. Рымша, д-р техн. наук,  
И.Н. Радимов, канд. техн. наук,  
Чан Тхи Тху Хыонг, З.П. Процина

*Выполнен поиск геометрических соотношений активной зоны вентильного двигателя с постоянными магнитами и дополнительными полюсами, обеспечивающих минимизацию величины реактивного момента.*

*Виконано пошук геометричних співвідношень активної зони вентильного двигуна з постійними магнітами, які забезпечують мінімізацію величини реактивного моменту.*

*The search of the geometrical ratio of the active zone of the brushless DC motor, which are provide the minimization of the cogging torque.*

### **ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ВЕНТИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И ДОБАВОЧНЫМИ ПОЛЮСАМИ**

Вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ), применяемые в системах автоматики, имеют разнообразные конструктивные исполнения [1,2]. К таким исполнениям относятся ВДПМ с распределенной обмоткой статора и сосредоточенной катушечной обмоткой статора. Двигатели с сосредоточенной обмоткой, катушки которой наматываются непосредственно на полюс статора, находят все большее распространение благодаря более простой технологии изготовления (рис.1).

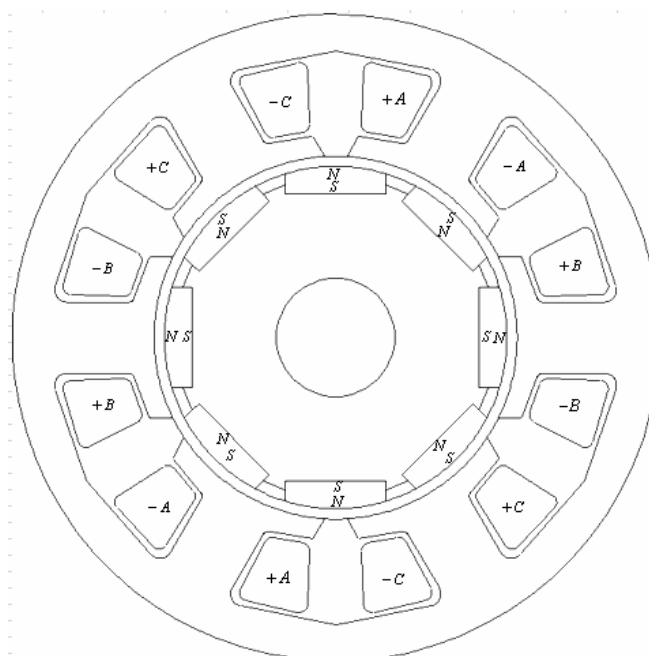


Рис. 1.

В то же время явнополюсная структура статора ВДПМ и связанная с этим неравномерность воздушного зазора приводит к возникновению реактивных моментов как от действия МДС постоянных магнитов, так и от действия МДС реакции якоря. Наиболее

существенное влияние на свойства и характеристики электроприводов с ВДПМ оказывает реактивный момент  $M_p$  от действия МДС постоянных магнитов, уменьшению которого посвящены нижеприведенные исследования.

Существует ряд способов уменьшения отрицательного влияния этого реактивного момента, а именно: скос зубцов (пазов) статора, либо скос ПМ, находящихся на роторе; сдвиг ПМ в несколько ступеней [3,4]. Указанные способы являются эффективным инструментом в борьбе с реактивным моментом. Однако их применение ведет к усложнению технологии изготовления ВДПМ.

Для уменьшения реактивного момента  $M_p$  известны и более простые, с точки зрения технологии изготовления, способы [3]. К примеру, выполнение вырезов на полюсных наконечниках статора, имитирующих увеличение числа пазов (зубцов) статора.

Эффекта снижения реактивного момента можно также достичь путем установки между главными полюсами (ГП), на которых располагаются катушки обмотки, дополнительных полюсов (ДП) (рис. 2).

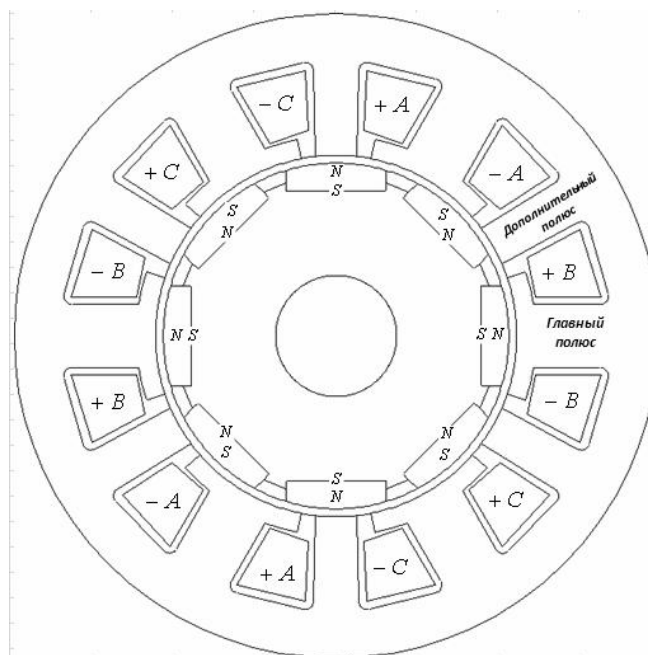


Рис. 2.

Известно применение ВДПМ с дополнительными полюсами в микроэлектроприводах [5]. На сегодняшний день вентильные двигатели с дополнительными полюсами разработаны фирмой Lenze для электроприводов мощностью до 10 кВт [6].

По информации, представленной на Интернет-сайте фирмы, двигатели такой конструкции имеют следующие преимущества:

- малая величина реактивных моментов от МДС постоянных магнитов, что обеспечивает хорошие характеристики электропривода;
- катушки обмотки статора изолированы друг от друга, обмотка статора – компактна и виброустойчива.

Однако сама по себе установка ДП еще не гарантирует снижение величины реактивного момента. На момент  $M_p$  существенное влияние оказывает сочетание геометрических размеров активной зоны двигателя. Задача настоящего исследования состоит в подборе таких геометрических соотношений, которые обеспечивают минимально возможный реактивный момент при МДС статора  $F_s = 0$ .

Решение сформулированной задачи проведем для двигателя с наружным

диаметром статора 81 мм и длиной пакета 45 мм. Материал постоянных магнитов – NdFeB. Номинальный момент двигателя – 1,2 Нм.

В качестве исходных варьируемых геометрических размеров (переменных) примем (рис. 3):

- полюсную дугу магнита  $\alpha_{\text{маг}}$  ;
- дугу главного полюса  $\alpha_{\text{ГП}}$  ;
- дугу дополнительного полюса  $\alpha_{\text{ДП}}$  ;
- длину воздушного зазора  $\delta$  .

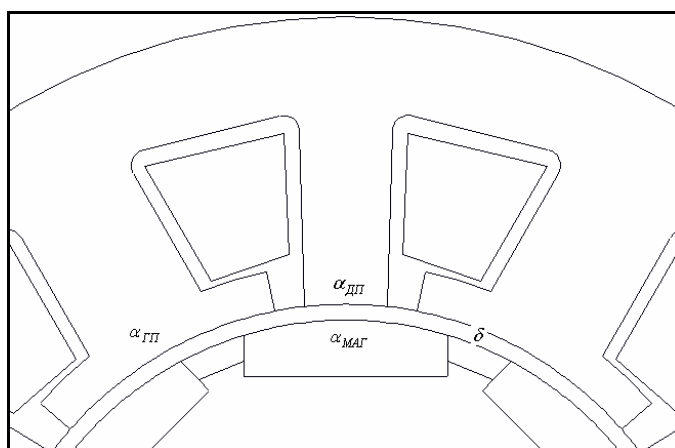


Рис. 3.

В качестве технологического ограничения, обеспечивающего проведение проводника обмотки через шлиц, принята дуга шлица –  $\alpha_{\text{шл}} \geq 4,5$  градуса.

Целевой функцией служит минимальная величина амплитуды реактивного момента  $M_{P_{\text{max}}}$ , т.е.  $M_{P_{\text{max}}} \Rightarrow \min$ , определяемая по результатам расчета магнитного поля ВДПМ методом конечных элементов (рис. 4).

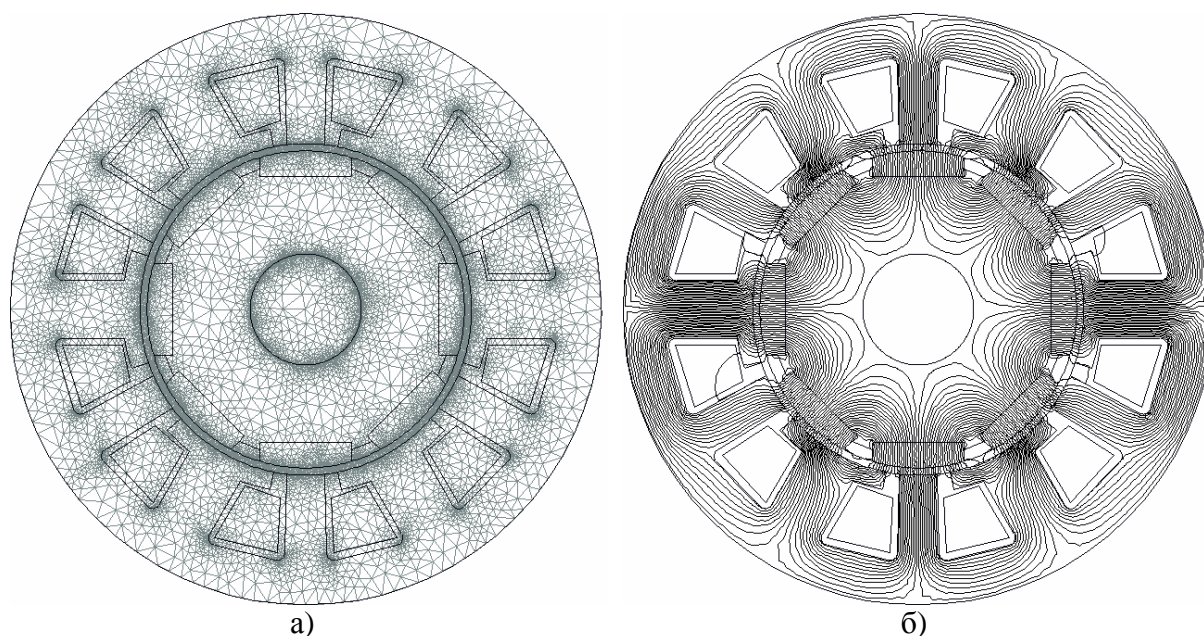


Рис. 4. Разбивка расчетной области на конечные элементы (а) и распределение магнитного поля для одного из расчетных вариантов (б)

Расчетные исследования были проведены при вариации указанных выше переменных на 5 уровнях (табл. 1).

Таблица 1

Переменная	Размерность	Уровни изменения переменных				
		1	2	3	4	5
$\alpha_{маг}$	град.	26	28,5	31	33,5	36
$\alpha_{ГП}$	град.	30	32	34	36	38
$\alpha_{ДП}$	град.	9	10	11	12	13
$\delta$	мм	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2

Классическая схема полного исследования влияния четырех переменных, каждая из которых может принимать пять различных значений, требует расчета  $N_{ВАР} = 5^4 = 625$  различных вариантов. На рис. 5 представлена графическая информация о результатах полевых расчетов 625 вариантов, при которых определялась величина  $M_{Pmax}$ .

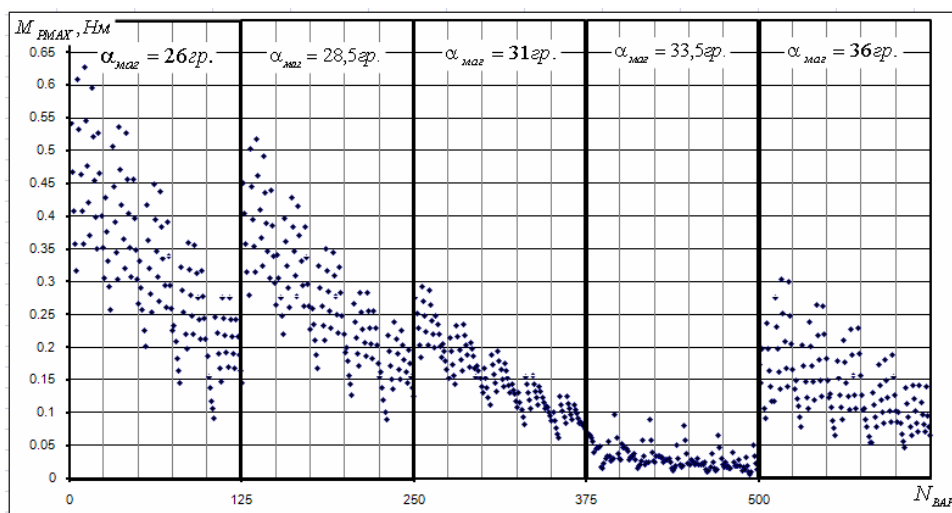


Рис. 5.

График на рис. 5 имеет пять зон, в каждой из которых  $\alpha_{маг}$  принимает фиксированные значения, а остальные геометрические размеры являются переменными.

Видно, что величина амплитуды реактивного момента существенно зависит от комбинации геометрических размеров активной зоны двигателя и изменяется в достаточно широких пределах: от 0,0063 Нм до 0,63 Нм, т.е в 100 раз. Область минимальных значений  $M_{Pmax}$  принадлежит такой комбинации размеров, в которой  $\alpha_{маг} = 33,5$  градуса.

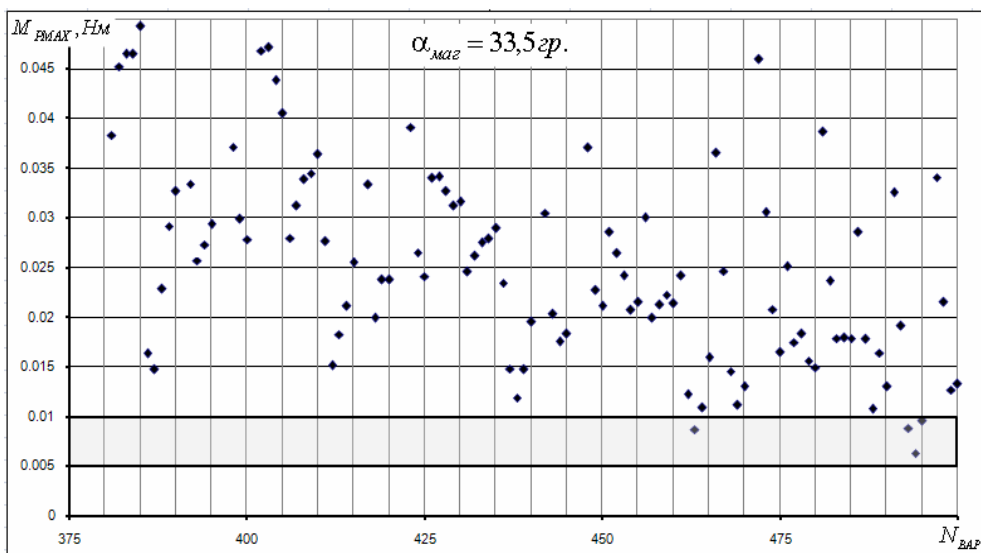


Рис. 6.

Фрагмент этой области отдельно показан на рис. 6, где выделена зона с моментами  $M_{P_{\max}} \leq 0,01$  Нм. Вариантов, которые находятся в выделенной зоне, всего 4 (табл. 2).

Таблица 2

Вариант №	Переменные				$M_{P_{\max}}$ , Нм
	$\delta$ , мм	$\alpha_{\text{маг}}$ , гр.	$\alpha_{\text{ГП}}$ , гр.	$\alpha_{\text{ДП}}$ , гр.	
1 (463)	1	33,5	34	12	0,0087
2 (493)	1	33,5	36	13	0,0088
3 (494)	1,1	33,5	36	13	0,0063
4 (495)	1,2	33,5	36	13	0,0096

Из данных табл. 2 следует, что лучшим при принятом критерии является вариант № 3. Остальные выбранные варианты существенно не отличаются от него по величине  $M_{P_{\max}}$  и, следовательно, все варианты геометрических соотношений, представленные в табл. 2, могут быть использованы при изготовлении ВДПМ.

На рис. 7 представлено семейство зависимостей электромагнитного момента  $M = f(\Theta)$  при различных значениях МДС статора  $F_S$ , рассчитанных для сочетания геометрических размеров, соответствующих варианту № 3 (494) из табл. 2.

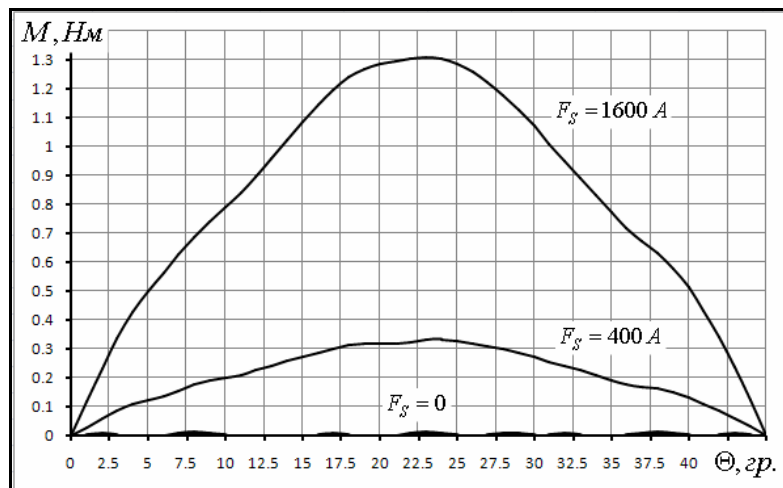


Рис. 7.

Из данных зависимостей видно, что проведенная минимизация  $M_{P_{\max}}$  позволила практически исключить влияние реактивного момента на форму  $M = f(\Theta)$  в рабочем диапазоне МДС статора  $F_S$ . Это подтверждается данными табл. 3, из которых следует, что для всех выбранных вариантов отношение  $M_{P_{\max}}$  к максимальному моменту при номинальной МДС статора  $F_S = 1600\text{А}$  не превышает 0,8%.

Таблица 3

Вариант №	$M_{P_{\max}}$ , Нм	$M_{\max}^{F_S=1600}$ , Нм	$(M_{P_{\max}} / M_{\max}^{F_S=1600}) * 100, \%$
1 (463)	0,0087	1,345	0,647
2 (493)	0,0088	1,35	0,652
3 (494)	0,0063	1,307	0,482
4 (495)	0,0096	1,267	0,758

#### Список использованной литературы

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. СПб.: КОРОНА-Век, 2007. – 336 с.
2. Ткачук В. Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2006. – 440 с.
3. Bolognani S., Bianchi N., Malesani L., Zigliotto M., Cervaro S. Brushless motor drives for ventilation // Department of Electrical Engineering, University of Padova, Italy, 2003.
4. Радимов И.Н., Рымша В.В., Гулый М.В., Процина З.П., Чан Тхи Тху Хьонг Разработка вентильных двигателей с постоянными магнитами на базе штампа статора реактивной машины // Электротехника и электромеханика. – 2008. - № 1. – С. 41-43.
5. Кенио, Нагамори
6. [www.lenze.com](http://www.lenze.com)