

И.Н. Радимов, канд. техн. наук,  
В.В. Рымша, д-р техн. наук,  
З.П. Процына

### КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЮСНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ТРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Наведено рекомендації щодо вибору геометричних співвідношень зубцового шару трифазного вентильно-реактивного двигуна. Розрахункові дослідження виконано на основі польових математичних моделей.*

*Приведены рекомендации по выбору коэффициентов полюсного перекрытия, для трех фазного вентильно-реактивного двигателя. Расчетные исследования выполнены на основе полевых математических моделей.*

*The recommendations for choice the geometrical ratio of the pole zone of the three-phase switched reluctance motor are offered.*

Вентильно-реактивные двигатели (ВРД) являются простейшими и технологичными преобразователями энергии, благодаря чему находят применение в различных сферах производства. В последнее десятилетие накоплен определенный опыт проектирования ВРД и в литературе присутствуют различные рекомендации по выбору геометрических размеров таких электрических машин. Однако эти рекомендации зачастую носят противоречивый характер. Например, при выборе коэффициентов полюсного перекрытия статора –  $\alpha_s$  и ротора –  $\alpha_r$ , проектировщики сталкиваются с тем, что рекомендуемые диапазоны изменения указанных коэффициентов не позволяют принять однозначное решение. Это наглядно показано в [1], где анализируется выбор указываемых коэффициентов для четырехфазного ВРД с соотношением чисел полюсов статора к ротору 8/6

При проектировании трехфазных ВРД правильный выбор коэффициентов полюсного перекрытия очень важен, так как это влияет на распределение магнитного поля ВРД и оказывает влияние на величину электромагнитного момента и уровень его пульсаций. От чего, в конечном итоге, зависят энергетические и рабочие свойства ВРД. Существующие рекомендации по выбору коэффициентов полюсного перекрытия

статора и ротора для трехфазных ВРД приведены в таблице.

Рекомендации по выбору коэффициентов полюсного перекрытия ВРД с соотношением чисел полюсов 6/4

Литературный источник	Коэффициенты	
	$\alpha_s$	$\alpha_r$
[2]	0.5	0.33 – 0.5
[3]	0.5	0.36
[6]	0.63	0.42
[7]	0.35 – 0.5	0.3 – 0.45
[8]	0.5 – 0.75	0.35 – 0.65

Рекомендации в [3] и [6 - 8] даны на основе аналитических моделей, которые обладают лишь некоторой степенью приближения к реальным процессам. В связи с этим представляет интерес получение рекомендаций по выбору коэффициентов полюсного перекрытия на основе полевых математических моделей, которые позволяют учесть реальную геометрию электромеханического преобразователя.

Для уточнения рекомендаций по выбору коэффициентов полюсного перекрытия  $\alpha_s$  и  $\alpha_r$ , а также с целью оценки их влияния на рабочие свойства двигателя были проведены расчетные исследования трехфазного ВРД с соотношением чисел полюсов статора и ротора 6/4 (рис.1). Геометрические размеры исследуемого ВРД, мм приведены ниже:

Размер	Значение
Наружный диаметр статора	82
Наружный диаметр ротора	41.7
Длина пакета статора	45
Высота полюса статора	13
Высота полюса ротора	6.2
Воздушный зазор	0.15

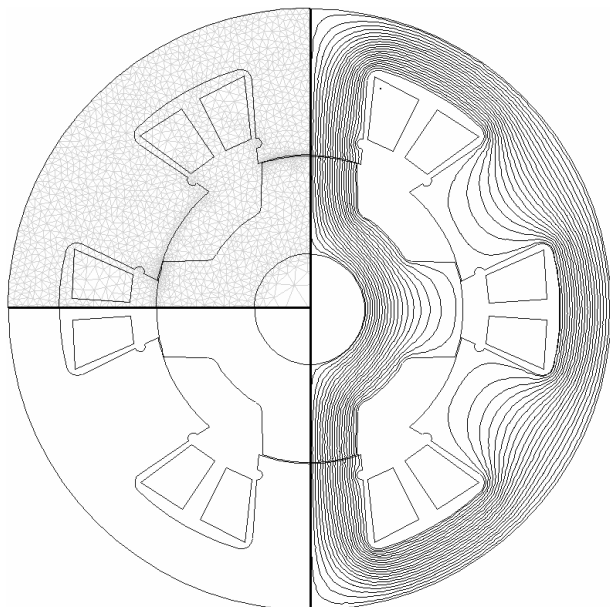


Рис. 1. Поперечное сечение трехфазного ВРД

За номинальный принято момент, развиваемый ВРД при МДС фазы двигателя 480 А.

Изменение электромагнитного момента  $M$  рассматривается в зависимости от угла поворота ротора  $\Theta = (0 \div 45)$  мех. град. Где  $\Theta = 0$  мех. град. соответствует полностью согласованному положению полюса ротора относительно статора, когда ось зубца статора совпадает с осью паза ротора. А  $\Theta = 45$  мех. град. соответствует полностью рассогласованному положению. Зависимости  $M = f(\Theta)$  для трех значений магнитодвижущей силы (МДС) фазы представлены на рис. 2. Включение фазы осуществляется при  $\Theta = 37.5^0$ , отключение – при  $\Theta = 7.5^0$ , т.е. период коммутации равен  $30^0$ .

Рабочие свойства ВРД можно оценить по критерию – минимум коэффициента пуль-

саций момента при максимуме среднего электромагнитного момента:

– среднее значение статического электромагнитного момента  $M_{cp}$ , получаемое интегрированием зависимости  $M = f(\Theta)$  на периоде коммутации

$$M_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{N}, \quad i \in [1, N];$$

– коэффициент пульсаций момента

$$K_{пульс} = \frac{\max(M_i) - \min(M_i)}{2 \cdot M_{cp}}, \quad i \in [1, N],$$

где  $M_i$  – значение мгновенного момента в  $i$ -ой точке зоны коммутации;  $N$  – число расчетных точек за период коммутации.

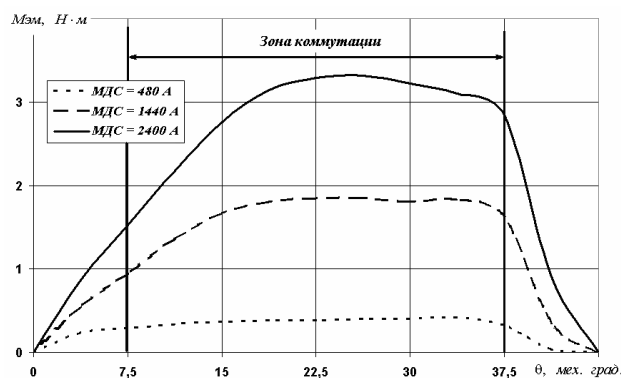


Рис. 2. Зависимости  $M = f(\Theta)$  для ряда значений МДС фазы

Указанные величины определяются на основе результатов расчета магнитного поля ВРД методом конечных элементов с использованием математической модели [4], при этом выполняется разбиение расчетной области на конечные элементы (см. рис. 1). Исходные данные для полевой модели готовятся в модуле параметризации геометрии (рис. 3), который входит в подсистему компьютерного моделирования ВРД [5].

Перемещение ротора осуществлялось от согласованного положения к полностью рассогласованному положению с шагом 3.75 градуса. Расчеты проводились для разных МДС фазы двигателя, от номинальной 480 А, до пятикратной перегрузки 2400 А.

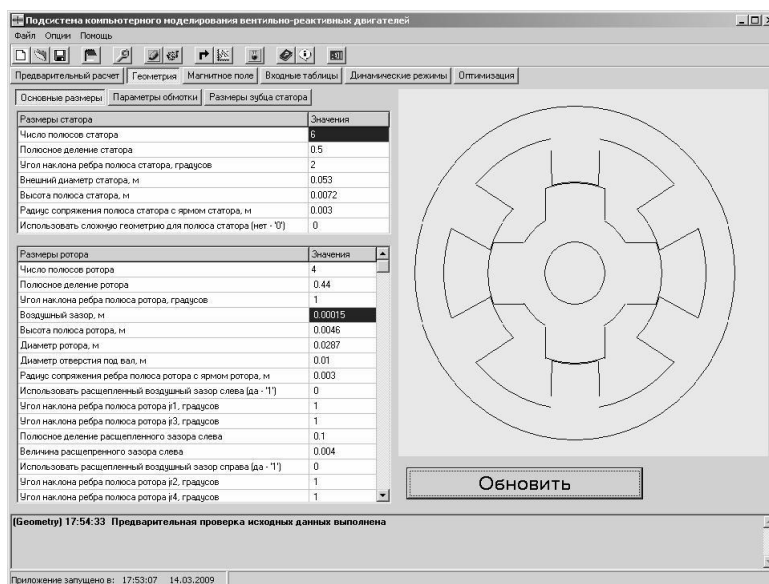


Рис. 3. Окно модуля параметризации геометрии ВРД

При проведении исследований диапазоны изменения коэффициентов  $\alpha_s$  и  $\alpha_r$  были приняты следующими:  $\alpha_r \in [0.25; 0.6]$ ;  $\alpha_s \in [0.3; 0.8]$ . Это позволило охватить практически всю область возможного изменения этих коэффициентов. Шаг изменения коэффициентов 0.01 о.е.

По результатам исследований построены линии равного уровня функций коэффициента пульсаций момента  $K_{пульс}$  и величины среднего момента  $M_{ср}$  от коэффициентов

полюсного перекрытия статора и ротора, полученные путем аппроксимации двухмерными сплайнами результатов расчета магнитного поля. Для номинальной МДС 480 А показаны линии уровня функций  $K_{пульс} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  (рис. 4) и  $M_{ср} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  (рис. 5).

При пятикратной перегрузке, т.е. при МДС 2400 А, приведены линии уровня функций  $K_{пульс} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  (рис. 6) и  $M_{ср} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  (рис. 7).

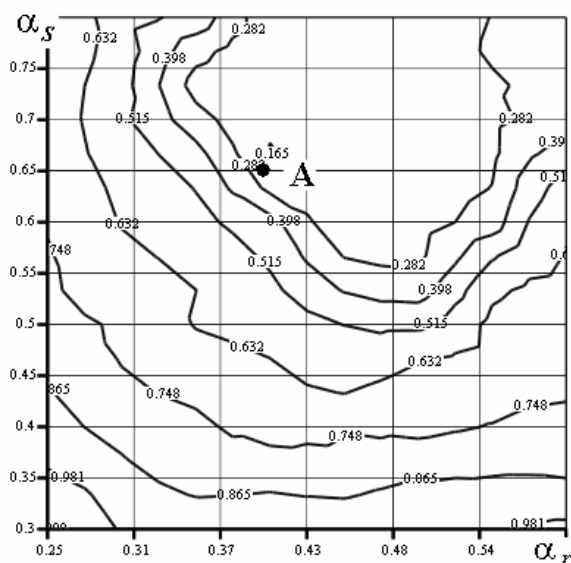


Рис. 4. Уровни коэффициента пульсаций момента ВРД,  $K_{пульс} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ , при МДС = 480 А

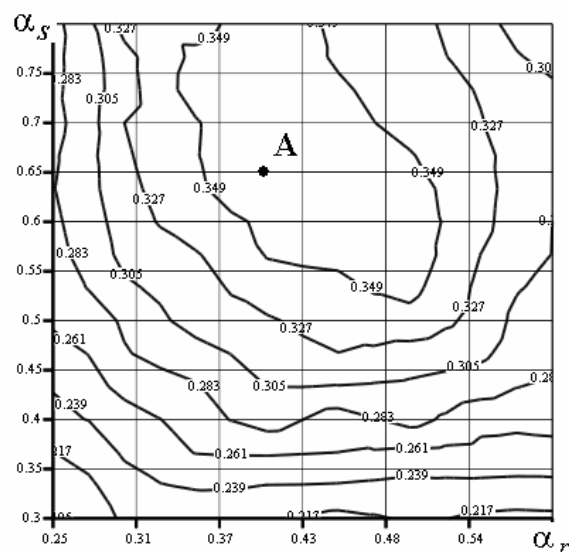


Рис. 5. Уровни среднего момента ВРД,  $M_{ср} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ , при МДС = 480 А

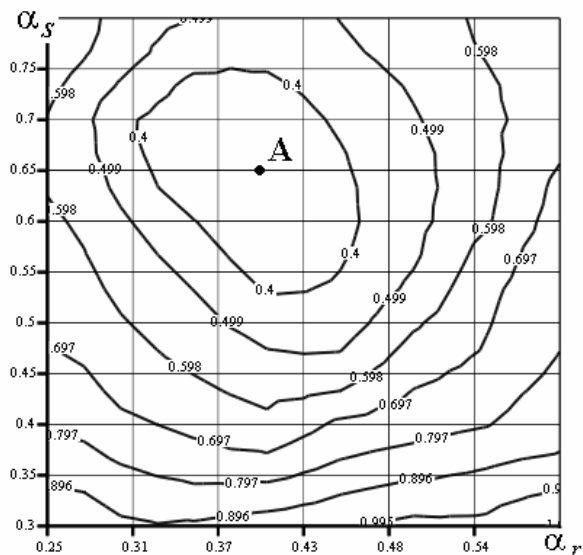


Рис. 6. Уровни коэффициента пульсаций момента ВРД,  $K_{пульс.} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ , при МДС = 2400 А

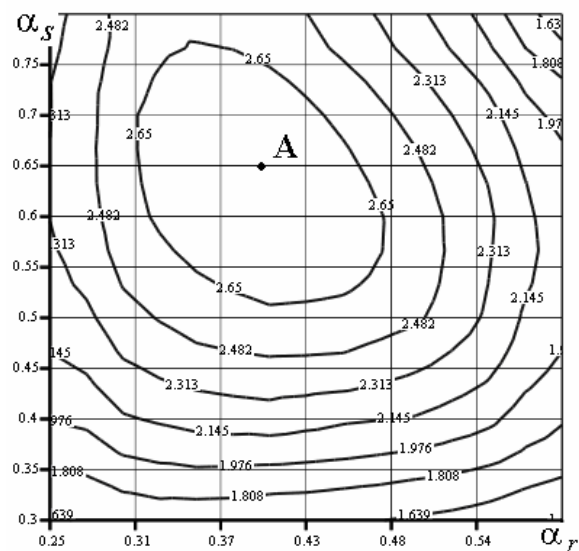


Рис. 7. Уровни среднего момента ВРД,  $M_{cp} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ , при МДС = 2400 А

Из представленного графического материала следует, что области экстремумов функций  $K_{пульс.} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  и  $M_{cp} = f(\alpha_s, \alpha_r)$  совпадают. Максимальный средний момент и минимальный уровень пульсаций обеспечиваются при коэффициентах полюсного перекрытия  $\alpha_s = 0.65$  и  $\alpha_r = 0.4$ , и эти величины при номинальной МДС составляют соответственно

$$M_{cp} = 0.35 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$K_{пульс.} = 0.32 \text{ j.o.e.}$ , что отмечено точкой А на рисунках 4 – 7.

Рассмотрим зависимость электромагнитного момента от положения ротора для электромеханического преобразователя ВРД, с рекомендованными в этой работе коэффициентами полюсного перекрытия статора и ротора (рис. 8). Для сравнения, приведем также зависимости момента, полученные по рекомендациям [3] и [6]. Зависимости момента от положения ротора при пятикратной перегрузке приведены на рис. 9.

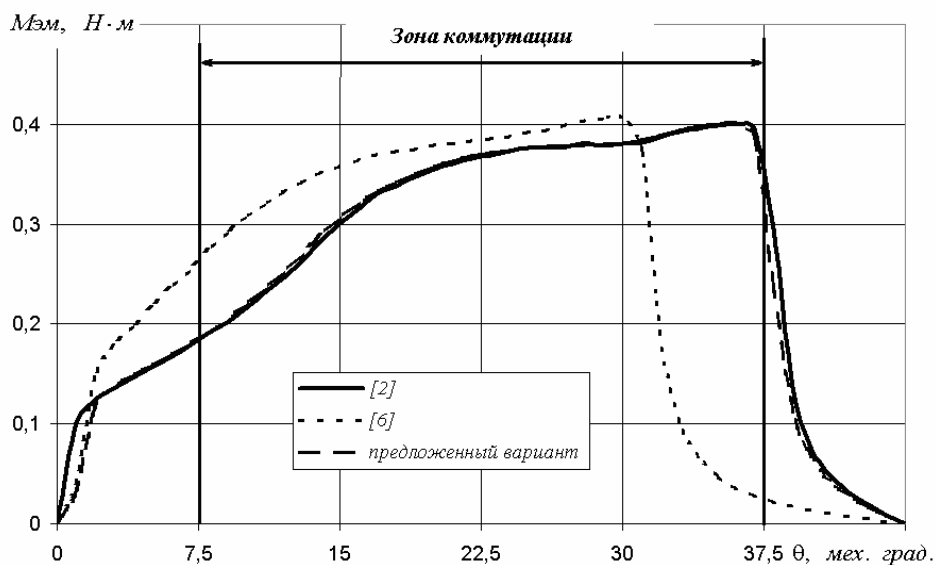


Рис. 8. Зависимости электромагнитного момента от положения ротора при номинальной МДС

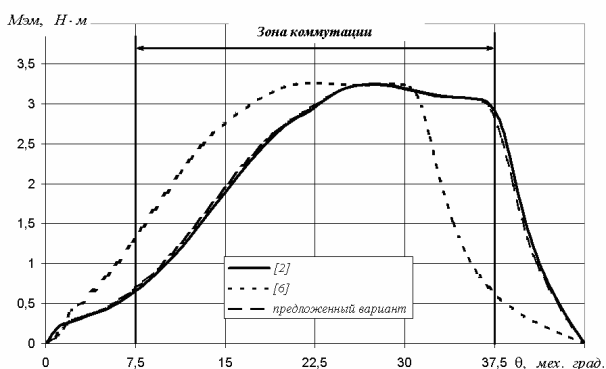


Рис. 9. Зависимости электромагнитного момента от положения ротора при пятикратной перегрузке

Из рисунков 8 и 9 видно, что максимальный средний момент и минимальный уровень пульсаций обеспечиваются при коэффициентах полюсного перекрытия  $\alpha_s = 0.65$  и  $\alpha_r = 0.4$ . Из существующих рекомендаций, приведенных в таблице 1, можно рекомендовать [6]. ВРД сконструированный с коэффициентами полюсного перекрытия [6],  $\alpha_s = 0.63$  и  $\alpha_r = 0.42$  при номинальной МДС обеспечивает средний момент  $M_{ср} = 0.34 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и коэффициент пульсаций  $K_{пульс.} = 0.33$ .

#### Список использованной литературы

1. Пуйло Г.В. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент вентильно-реактивного двигателя / Пуйло Г.В., Порайко А.С, Радимов И.Н. // Вестник НУ "Львовская политехника". Тематич. вып.: Электроэнергетич.и электромеханич. системы. –2003. – № 485. – С. 112 – 117.
2. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели / Голландцев Ю.А. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ "Электробор", 2003. – 148 с.
3. Кузнецов В.А. Вентильно-индукторные двигатели / Кузнецов В.А, Кузьмичев В.А. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
4. Радимов И.Н. Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя / Радимов И.Н., Рымша В.В., Малева-

ный О.Е. // Электротехніка і електромеханіка. – 2002. – №2. – С. 60-64.

5. Рымша В.В. Подсистема компьютерного моделирования вентильно-реактивных электродвигателей / Рымша В.В., Радимов И.Н., Процына З.П. // Вестник Херсонского нац. технич. ун-та. Вып. 2(25) 2006. – С. 437-442

6. Ткачук В. Электромеханотроніка: Навчальний посібник / Ткачук В. – Львів: Видавництво Нац. ун-ту "Львівська політехніка". 2001. – 404 с.

7. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications / Krishnan R. – CRC Press, 2001. – 398 p.

8. Miller T.J.E. Switched Reluctance Motors and their Control / Miller T.J.E. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. – 203 p.

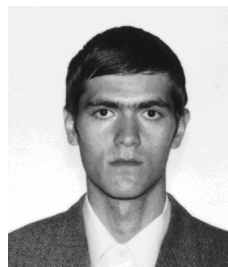
Получено 16.03.2009



Радимов  
Игорь Николаевич,  
канд. техн. наук,  
доцент, гл. конструктор  
НТЦ ООО. Завод  
"Электротехника".  
E-mail:  
mail@blpm-motors.com



Рымша  
Виталий Викторович,  
д-р техн. наук, проф.  
каф. электрич. машин  
Одесск.нац.политехн.ун-та. E-mail:  
rimsha61@gmail.com



Процына  
Зиновий Павлович,  
аспирант каф. электрич.  
машин Одесск. нац.  
политехн. ун-та.  
E-mail:  
procina.z@gmail.com