

Анализ параметров активной зоны вентильного двигателя с дискретно-распределенной обмоткой для безредукторного привода

А.Н. Геращенко, Н.И. Куликов, А.Д. Куприянов

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния параметров активной зоны вентильного двигателя с дискретно-распределенной обмоткой на величины максимального потокосцепления фазы, амплитуду зубцовых моментов и гармонический состав кривой ЭДС, определяющих основные показатели качества вентильного двигателя для безредукторного электропривода.

Ключевые слова

безредукторный электропривод; вентильный двигатель; рабочие характеристики, дискретно-распределенная обмотка

При решении ряда производственных задач, в приводах механизмов вращения антенн и оптико-механических комплексов, в медицинском оборудовании требуется обеспечение высокой точности перемещений и плавности хода в широком диапазоне изменения частот вращения. Применение безредукторных приводов на базе вентильных двигателей (ВД) с дискретно-распределенной обмоткой позволяет удовлетворить высоким требованиям, предъявляемым к современному прямому электроприводу. К основным преимуществам таких ВД можно отнести [1-4] возможность обеспечения равномерного электромагнитного момента благодаря практически синусоидальной кривой ЭДС, малый вылет лобовых частей, обеспечивающий сокращение осевой длины машины и снижение активного и индуктивного

сопротивлений, малые зубцовые пульсации момента, упрощающие управление и стабилизацию на малых и сверхмалых скоростях вращения.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния параметров активной зоны ВД с дискретно-распределенной обмоткой на величины максимального потокосцепления фазы, амплитуду зубцовых моментов и гармонический состав кривой ЭДС определяющих основные показатели качества ВД для безредукторного электропривода. Объектом исследования является электродвигатель разработанный и изготовленный для проведения верификации математических моделей и экспериментального подтверждения возможности создания глубоко регулируемого прецизионного безредукторного привода на базе ВД с зубцовой активной зоной. Параметры исследуемого двигателя представлены в таблице 1, на рисунке 1 представлен эскиз активной зоны.

Таблица 1.

Номинальная мощность, Вт	500
Ном. частота вращения, об/мин	1000
Напряжение питания	3ф, 380 В, 50 Гц;
Наружный диаметр якоря, мм	130
Активная длина, мм	40
Число пар полюсов	8
Число пазов статора	18

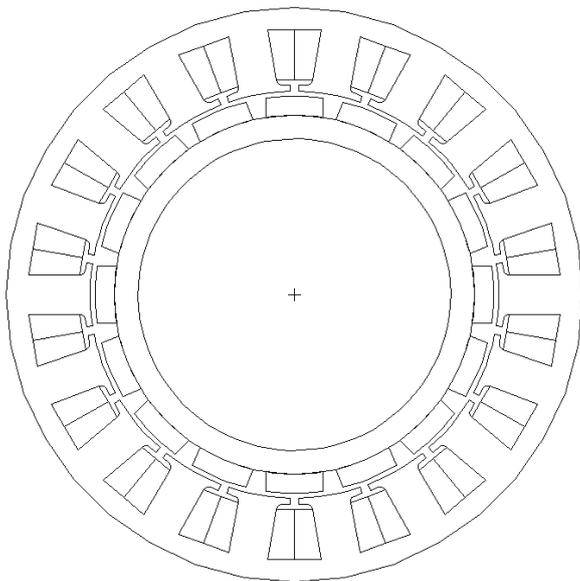


Рисунок 1. Эскиз активной зоны ВД

На пульсации зубцового момента оказывают влияние тип индуктора, способ намагничивания и коэффициент полюсного перекрытия постоянного магнита, ширина шлица паза, степень насыщения магнитной цепи, а также технологические факторы, обуславливающие неравномерность воздушного зазора.

Так как ширина шлица паза определяется диаметром провода и толщиной пазовой изоляции, а ее увеличение приводит к увеличению пульсаций момента, а коэффициент магнитной цепи машин с постоянными магнитами редко превышает 1,1 эти факторы из дальнейшего рассмотрения были исключены.

Выбор типа индуктора

В конструкции роторов ВД с радиально намагниченными ПМ могут применяться индукторы с призматическими профилированными (ППМ, рисунок 2а), секторными с радиальным намагничиванием (СПМР, рисунок 2б) и секторными с осевым (вдоль продольной оси) намагничиванием (СПМО, рисунок 1в) постоянными магнитами.

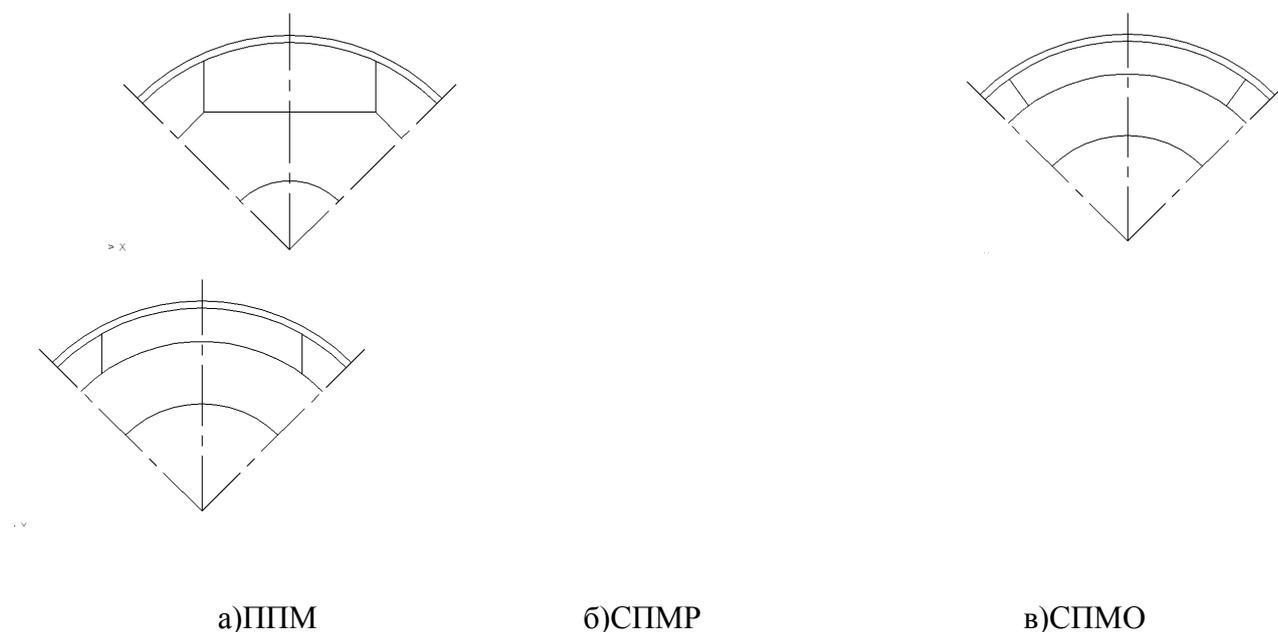


Рисунок 2. Схемы индукторов с радиально намагниченными ПМ.

Представляет интерес выбор наиболее рационального типа индуктора с точки зрения обеспечения максимального потокосцепления и, в то же время, наилучшего гармонического состава кривой ЭДС. Традиционные расчетные модели на базе схем замещения магнитной цепи не позволяют решить поставленную задачу. Достоверно определить величину потокосцепления и гармонический состав ЭДС можно на основе численного расчета магнитных полей методом конечных элементов.

Для расчета магнитных полей построены конечноэлементные модели активных зон с исследуемыми типами индукторов, при этом высота магнитов принята равной $h_m = 4$ мм, коэффициент полюсного перекрытия – максимально возможный для каждого из рассматриваемых типов. Результаты проведенных расчетов потокосцеплений (при фиксированном числе витков) приведены в таблице 2, на рисунке 3 представлен гармонический состав фазной ЭДС.

Таблица 2. Амплитуды потокосцеплений и действующие значения ЭДС основной гармонической

Тип ПМ	$\Psi, \text{Вб}$	$E_1, \text{В}$
ППМ	0,3298	187,5
СПМР	0,3212	181,6
СПМО	0,3302	187,9

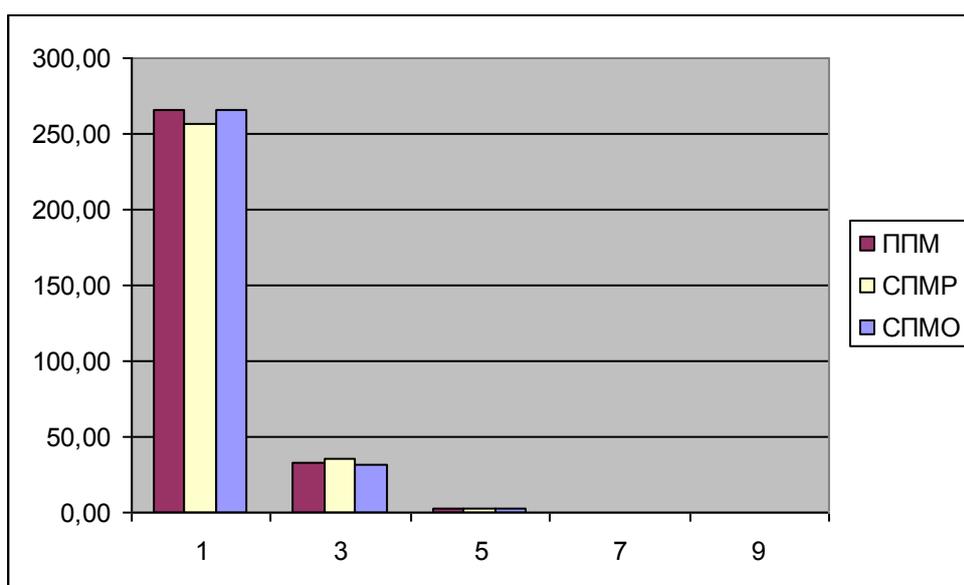


Рисунок 3. Гармонический состав фазной ЭДС

Из таблиц видно, что наибольшее (на 3%) потокосцепление обеспечивают призматический и СПМО магниты за счет меньшего потока межполюсного рассеяния, при этом гармонический состав кривой ЭДС несколько лучше у секторного. Таким образом, в электрических машинах с дискретно распределенной обмоткой и питанием от источника синусоидального напряжения, рационально применять секторные постоянные магниты с осевым намагничиванием.

Влияние коэффициента полюсного перекрытия на гармонический состав кривой ЭДС и зубцовый момент

Гармонический состав кривой ЭДС при питании ВД от источника синусоидального напряжения определяет форму тока и, соответственно, пульсации электромагнитного момента. В связи с этим, для реализации высокоточного электропривода важно минимизировать амплитуду высших гармонических кривой ЭДС. В связи с вышеизложенным, представляет интерес влияние на гармонический состав кривой ЭДС и зубцовый момент коэффициента полюсного перекрытия.

В таблице 3 сведены результаты исследования гармонического состава кривых фазной ЭДС при различных коэффициентах полюсного перекрытия. Из таблицы видно, что наибольшую амплитуду (достигающую 10-15% от амплитуды основной гармоники) имеет 3-я гармоника. Учитывая, что гармоники кратные 3-м будут проявлять себя лишь при достаточно редко применяемой схеме соединения обмоток в треугольник, можно признать гармонический состав кривой ЭДС удовлетворительным при $\alpha > 0.7$, для которых амплитуда высших гармонических не превышает 1% от амплитуды основной гармоники.

Таблица 3. Гармонический состав кривой фазной ЭДС

№ гармоники	Амплитуда ЭДС, В			
	$\alpha = 0,5;$ $b_m = 8 \text{ мм}$	$\alpha = 0,61;$ $b_m = 10 \text{ мм}$	$\alpha = 0,74;$ $b_m = 12 \text{ мм}$	$\alpha = 0,9;$ $b_m = 14,6 \text{ мм}$
1	190.096733	222.879668	246.572668	265.716725
3	26.213341	7.592696	12.974685	31.830105
5	2.483302	3.482744	1.735479	2.032216

7	0.416508	0.177319	0.290562	0.239824
9	0.001003	0.000368	0.019514	0.140878
11	0.107501	0.162212	0.064628	0.129206
13	0.104611	0.056407	0.127959	0.072427
15	0.037902	0.075716	0.223355	0.107406

Для определения зависимости зубцового момента от α проведена серия параметрических расчетов, суть которых заключалась в вычислении зубцового момента при различных положениях ротора. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.

Из рисунка видно, что зубцовый момент ВД с дискретно-распределенной обмоткой в десятки раз ниже зубцового момента двигателей традиционной конструкции с $q = 1$ и при этом имеет ярко выраженный минимум при $\alpha = 0,8$. Следует отметить, что полученный результат справедлив для исследуемой конфигурации активной зоны. При проектировании машины с другими параметрами, для определения коэффициента полюсного перекрытия обеспечивающего минимальные пульсации зубцового момента, подобное исследование следует повторить.

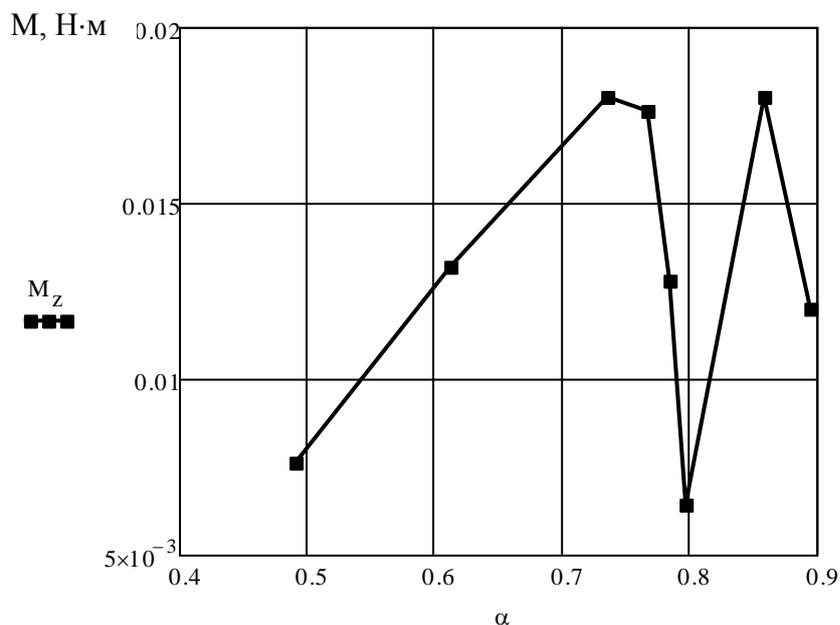


Рисунок 4. Зубцовый момент в зависимости от коэффициента полюсного перекрытия α

Таким образом, выбор рационального коэффициента полюсного перекрытия на основе расчета магнитных полей позволяет снизить амплитуду зубцовых моментов до величины, составляющей десятые доли процента от номинального момента электродвигателя.

Влияние технологических факторов на величину пульсаций момента

Из всего многообразия причин возникновения пульсаций момента обратим внимание на эллиптичность расточки статора (результаты, полученные для эллиптичности могут быть распространены и на эксцентриситет ротора). Особенностью машин с $q < 1$ при значительном числе пар полюсов является возможность существенного снижения высоты ярма якоря, т.к. магнитный поток замыкается по соседним зубцам. С точки зрения эффективного использования электротехнической стали, высота ярма якоря выбирается равной половине ширины зубца. При этом снижается жесткость пакета, что может привести к его деформации при сварке и, в результате к значительной неравномерности воздушного зазора.

Величина воздушного зазора у исследуемой машины составляет 1 мм. Для оценки влияния эллиптичности расточки якоря в расчетную модель введена неравномерность зазора путем обрезки на 0,2 мм по высоте 4-х зубцов статора, расположенных симметрично (2 сверху, 2 снизу). Пульсации момента, обусловленные неравномерностью зазора, представлены на рисунке 5.

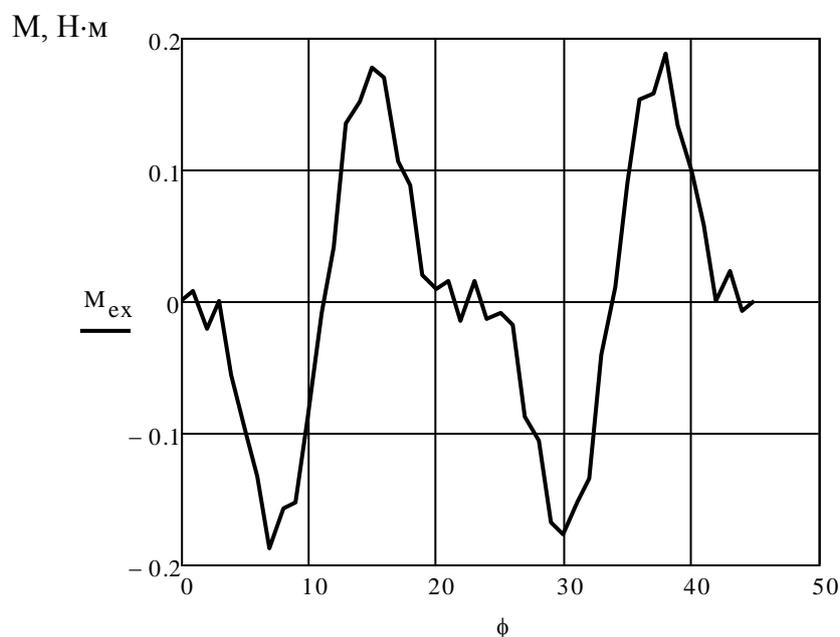


Рисунок 5. Пульсации момента, вызванные неравномерностью зазора

Эллиптичность статора обуславливает появление дополнительного момента, амплитуда которого (в расчетной модели составляет $M_{ex} \sim 0,18$ Нм,) на порядок выше

амплитуды зубцовых моментов при расточке статора, являющейся идеальной окружностью. Период момента, обусловленного эллиптичностью статора, составляет 22,5 градуса.

1. Исходя из вышеизложенного, при проектировании электрических машин с $q < 1$ выбор достаточной высоты спинки ярма якоря определяется обеспечением должной жесткости статора, в противном случае, из-за эллиптичности расточки, возможно появление дополнительных знакопеременных пульсаций момента, амплитуда которых значительно превышает амплитуду зубцовых моментов.
2. Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:
3. В ВД с постоянными магнитами максимальное потокосцепление и наилучший гармонический состав кривой ЭДС обеспечивает применение секторных постоянных магнитов с осевым намагничиванием.
4. Зубцовый момент двигателей с дискретно-распределенной обмоткой в несколько десятков раз меньше зубцовых моментов электрических машин традиционного конструктивного исполнения без скоса пазов или магнитов имеет хотя бы один минимум, определяемый рациональным выбором коэффициента полюсного перекрытия.
5. Наилучшим образом требованиям по гармоническому составу кривой ЭДС отвечают машины с коэффициентом полюсного перекрытия $\alpha > 0,7$.
6. При проектировании электрических машин с $q < 1$ выбор достаточной высоты спинки ярма якоря определяется обеспечением должной жесткости статора, в противном случае возможно появление значительных знакопеременных пульсаций момента.

Библиографический список

1. Захаренко А.Б. Создание высокомоментных электрических машин с постоянными магнитами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008 .
2. Патент RU 2 280 936. Бесконтактная электрическая машина. Дубских Николай Иванович, Дубских Александр Николаевич. 23.03.04.

3. D. Ishak, Z. Q. Zhu, and D. Howe, “High torque density permanent magnet brushless machines with similar slot and pole numbers,” in Proc. Int. Conf. Magnetism, Rome, Italy, 2003, p. 536.
4. J. Cros and P. Viarouge, “Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 17, no. 2, pp. 248–253, Jun. 2002.

Сведения об авторах

Герашенко Анатолий Николаевич, д.т.н., профессор, ректор Московского авиационного института (государственного технического университета).
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,
тел. (499)1584140; E-mail: aet@mai.ru

Куликов Николай Иванович, д.б.н, к.т.н профессор Московского авиационного института (государственного технического университета).
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,
тел. (499)1584698, E-mail: nik@mai.ru

Куприянов Андрей Дмитриевич, к.т.н., доцент Московского авиационного института (государственного технического университета).
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993,
тел. (499)1584698, E-mail: kupr_05@mail.ru