

УДК 621.313

Л. А. ВАСИЛЬЕВ (канд.техн.наук, доц.), Ю. В. МНУСКИН (канд.техн.наук, доц.),
А. Е. БОЕВ

Государственное высшее учебное заведение
«Донецкий национальный технический университет»
boev-anatoliy@mail.ru

СПОСОБЫ КОММУТАЦИИ ФАЗ ОБРАЩЕННОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Рассмотрен принцип действия и отличительные признаки вентильных реактивных двигателей с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз. Представлены результаты сопоставительного анализа статических характеристик обращенного вентильного реактивного двигателя с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз при однополярной и двухполярной коммутации с характеристиками вентильного реактивного двигателя традиционного исполнения.

Ключевые слова: *вентильный реактивный двигатель, обращенная конструкция, взаимная индуктивность, однополярная коммутация, двухполярная коммутация, магнитное поле, электромагнитный момент.*

Постановка проблемы. Современный этап развития электромеханики характеризуется высоким уровнем интеграции элементов электропривода, стремлением к функциональному и конструктивному объединению исполнительного органа, электромеханического преобразователя и средств управления в единый мехатронный комплекс. Известно, что применение систем прямого привода с непосредственной передачей мощности от электродвигателя к рабочему органу является перспективным техническим решением. Исключение редукторов, кинематических передач и других элементов, участвующих в передаче мощности между двигателем и приводимой во вращение нагрузкой, позволяет повысить надежность и технико-экономические показатели электропривода, оптимизировать занимаемое оборудованием пространство.

В этом отношении обращенные электрические машины перспективны для широкого класса промышленных и транспортно-технологических механизмов не только с точки зрения упрощения конструкции механической части и исключения потерь мощности между двигателем и рабочим органом, но и за счет повышения эффективности электромеханического преобразования энергии при смещении точек приложения электромагнитного момента на больший радиус внешнего ротора.

Одним из наиболее перспективных направлений в области регулируемого электропривода являются вентильные реактивные двигатели (ВРД). Отсутствие постоянных магнитов, технологичная конструкция сосредоточенной обмотки статора, простая конструкция безобмоточного ротора, а также широкие возможности для формирования характеристик в квазиустановившихся и переходных режимах способствуют расширению области применения ВРД в традиционном и обращенном исполнении [1-8]. Вместе с тем, повышение уровня требований к регулируемому электроприводу в отношении перегрузочной способности, массогабаритных и энергетических показателей обуславливают поиск новых эффективных модификаций электромеханических преобразователей ВРД.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. В последние годы предложены различные конструктивные исполнения ВРД, среди которых следует отметить ВРД с U-образными элементами, в которых намагничивающие катушки фазы располагаются на смежных зубцах статора, выполненных с параллельными стенками. U-образная конструкция характеризуется меньшей длиной силовых линий основного магнитного потока по сравнению с традиционной конструкцией, в которой намагничивающие обмотки расположены на диаметрально противоположных зубцах [9, 10]. Подобный характер распределения магнитного поля и характеристики могут быть получены в ВРД с сегментным ротором, в которых контур замыкания основного магнитного потока формируется за счет выполнения вращающейся части из изолированных в магнитном отношении секторов [11]. Предложен ряд модификаций ВРД в торцевом и линейном исполнении [12, 13].

Данные типы электромеханических преобразователей (ЭМП) объединяет общий принцип действия, основанный на циклическом изменении собственных индуктивностей фаз при изменении углового положения ротора. Функционирование ВРД основывается на последовательной коммутации фаз с синхронизацией по изменению индуктивностей. Для создания однонаправленного электромагнитного момента интервалы возбуждения фаз должны быть разграничены таким образом, чтобы импульсы тока совпадали с участками, где наблюдается выраженное изменение проводимости воздушного зазора: $d\Lambda/d\theta > 0$ для двигательного или $d\Lambda/d\theta < 0$ для тормозного режима работы. При этом дискретно-пульсирующее магнитное поле формируется,

главным образом, за счет магнитодвижущих сил (МДС) отдельных фаз на интервалах времени, где не наблюдается перекрытие токов в смежных фазах электрохимического преобразователя. Фазы ЭМП работают автономно, что объясняется характерным для ВРД распределением рабочего магнитного потока между диаметрально противоположными возбужденными зубцами статора. Взаимная индуктивность практически не оказывает влияния и находится на уровне 5-12% в зависимости от конфигурации и геометрических размеров магнитной системы [14]. Одновременное возбуждение нескольких фаз принципиально не изменяет характер распределения магнитного поля и величину основного магнитного потока между взаимодействующими зубцами статора и ротора из-за относительно слабой магнитной связи фаз в ВРД.

В связи с этим, перспективным представляется использование модификации ВРД, в которой создание электромагнитного момента основано на изменяющейся взаимной индуктивности между фазами [15]. Для обозначения данного класса электрических машин в зарубежных источниках используется различная терминология: *mutually coupled switched reluctance motor (MCSRМ)* – вентильный реактивный двигатель с магнитосвязанными фазами, или *fully pitched switched reluctance motor* – вентильный реактивный двигатель с обмоткой с диаметрально противоположным шагом [15, 16].

Основной конструктивный признак, который отличает ВРД традиционного исполнения от данной модификации, заключается в изменении схемы обмотки. В ВРД фазные обмотки располагаются на противоположных зубцах статора. В MCSRМ дискретная структура зубцово-пазовых слоев сохраняет конструктивные признаки ВРД, но обмотка выполняется с диаметрально противоположным шагом. При этом формирование основного магнитного потока осуществляется совместным действием МДС нескольких фаз, что позволяет распределить токовую нагрузку и в ряде случаев повысить полезную мощность ЭМП [17, 18]. Однако переход от катушечной обмотки к обмотке, выполненной с диаметрально противоположным шагом, приводит к повышению расхода меди и увеличению электрических потерь за счет большей длины лобовых частей. Относительное увеличение электрических потерь зависит от соотношения сопротивлений пазовой и лобовой частей обмотки и определяется геометрическими размерами и относительной длиной магнитной системы $\lambda = l_g / D$. В меньшей степени увеличение сопротивления фазы проявляется в обращенном исполнении электрической машины ввиду компактности обмотки, расположенной на внутреннем статоре. В качестве примера на рис. 1 представлены поперечные сечения активной зоны обращенного ВРД традиционного исполнения и ВРД с обмоткой с диаметрально противоположным шагом для конфигурации 6/8 (6 полюсов на обращенном статоре и 8 полюсов на внешнем роторе).

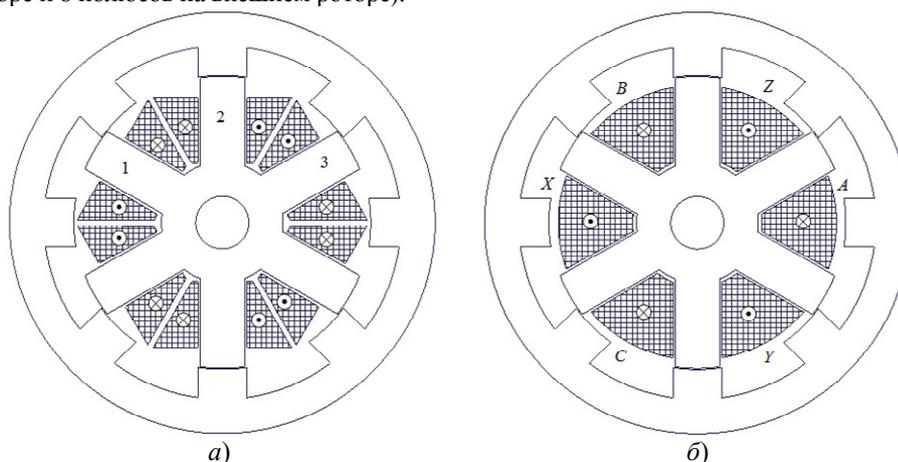


Рисунок 1 – Магнитная система ВРД традиционного исполнения (а) и ВРД с обмоткой с диаметрально противоположным шагом обращенной конструкции (б)

Для обозначения данной модификации ВРД представляется корректным использование термина «вентильный реактивный двигатель с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз» с учетом того, что создание электромагнитного момента в этих электрических машинах основывается именно на изменении взаимной индуктивности между фазами и при этом сохраняется характерная для вентильных реактивных двигателей дискретность цикла электрохимического преобразования энергии.

Рассматриваемая конфигурация ВРД 6/8 с изменяющейся взаимной индуктивностью имеет на статоре трехфазную обмотку. В зависимости от реализуемого режима работы фазы могут получать питание однополярными или двухполярными импульсами, что позволяет рассматривать возможность питания фаз от серийных трехфазных мостовых инверторов, широко распространенных в современных преобразователях частоты [15]. Вместе с тем, вопросы, связанные с влиянием способов возбуждения фаз на характеристики ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью, с нашей точки зрения, не нашли должного отражения в технической литературе.

Целью статьи является сопоставление статических характеристик обращенного ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при однополярной и двухполярной коммутации фаз с характеристиками обращенного ВРД традиционного исполнения.

Материал и результаты исследований. В общем случае электромагнитный момент содержит составляющие, обусловленные изменениями собственных индуктивностей L и составляющие, вызванные изменениями взаимных индуктивностей между фазами M . На линейном участке магнитных характеристик

$$M_{\text{эм}} = \frac{1}{2} \left[i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} + i_B^2 \frac{dL_B}{d\theta} + i_C^2 \frac{dL_C}{d\theta} \right] + i_A i_B \frac{dM_{AB}}{d\theta} + i_B i_C \frac{dM_{BC}}{d\theta} + i_C i_A \frac{dM_{CA}}{d\theta}. \quad (1)$$

Собственные и взаимные индуктивности могут быть получены на основе анализа магнитного поля. В качестве примера на рис. 2 представлены проводимости зубцовых контуров, полученные с помощью метода конечных элементов для обращенного ВРД 6/8 мощностью 130 Вт.

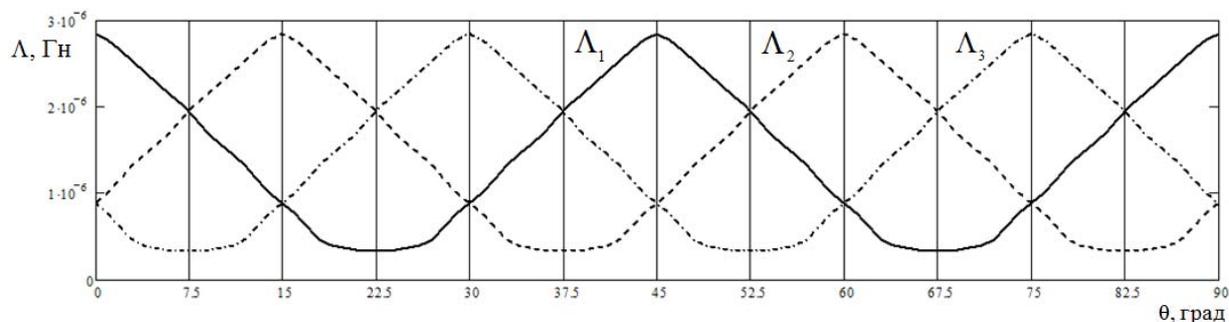


Рисунок 2 – Магнитные проводимости зубцовых контуров ВРД

Представленные зависимости имеют характерный для электромеханических преобразователей с двойной зубчатостью воздушного зазора «трапецеидальный» вид: положению «зубец-паз» соответствует минимальная магнитная проводимость, в зоне частичного перекрытия полюсов наблюдается выраженное изменение проводимости зубцового контура с максимальным значением в согласованном положении зубцов. Магнитные проводимости, соответствующие собственным и взаимным индуктивностям фаз, могут быть выражены через проводимости зубцовых контуров с учетом направления магнитных потоков [19, 20]. Для обращенного ВРД с конфигурацией 6/8 (рис. 1 б):

$$\Lambda_A(\theta) = \Lambda_B(\theta) = \Lambda_C(\theta) = \frac{1}{2} [\Lambda_1(\theta) + \Lambda_2(\theta) + \Lambda_3(\theta)], \quad \Lambda_{AB}(\theta) = \frac{1}{2} [-\Lambda_1(\theta) - \Lambda_2(\theta) + \Lambda_3(\theta)],$$

$$\Lambda_{BC}(\theta) = \frac{1}{2} [\Lambda_1(\theta) - \Lambda_2(\theta) - \Lambda_3(\theta)], \quad \Lambda_{CA}(\theta) = \frac{1}{2} [-\Lambda_1(\theta) + \Lambda_2(\theta) - \Lambda_3(\theta)].$$

Полученные угловые зависимости представлены на рис. 3. Период изменения магнитных проводимостей определяется соотношением чисел зубцов статора и ротора. Для рассматриваемой конфигурации магнитной системы полный период изменения собственных индуктивностей фаз составляет 15 градусов; для взаимных индуктивностей – 45 градусов.

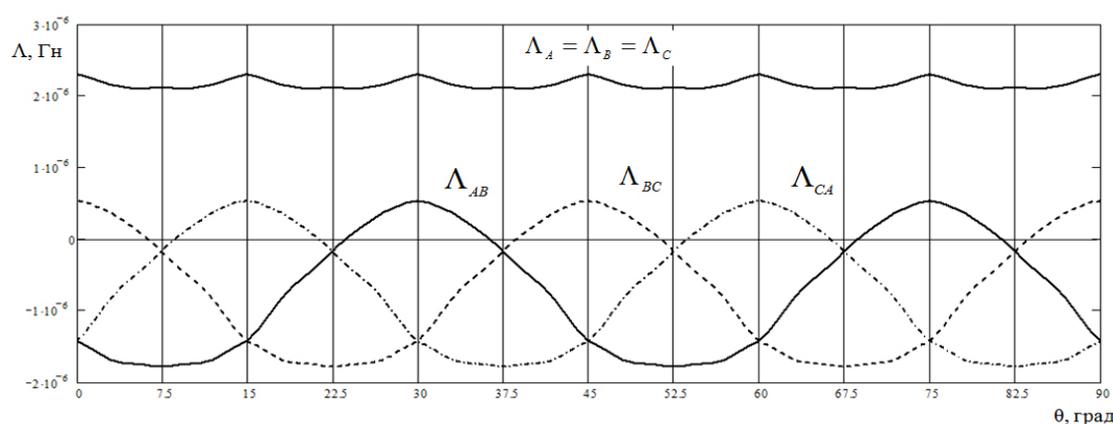


Рисунок 3 – Изменение магнитных проводимостей, соответствующих собственным и взаимным индуктивностям

Из рис. 3 следует, что собственные индуктивности на интервале коммутации изменяются незначительно, поскольку суммарная площадь перекрытия полюсов, относящихся к фазе, выполненной с диаметральной шаг, остается практически постоянной при вращении ротора. В то же время наблюдается выраженное гармоническое изменение взаимной индуктивности между фазами, определяющее величину развиваемого электромагнитного момента (1).

Приведенные зависимости позволяют сформировать диаграммы фазных токов ВРД. На рис. 4 приведена идеализированная форма магнитодвижущих сил ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при однополярном и двухполярном возбуждении фаз. При однополярном питании рассматривалась парная симметричная коммутация, при которой в каждый момент времени возбуждены две фазы ЭМП (АВ-ВС-СА...) и электромагнитный момент развивается на участках с возрастающей взаимной индуктивностью (рис. 4 а). Двухполярная коммутация фаз позволяет использовать для создания однонаправленного момента участки и с возрастающей и с убывающей взаимной индуктивностью за счет инвертирования токов (рис. 4 б), но, вместе с тем, требует построения силового полупроводникового преобразователя по мостовой схеме.

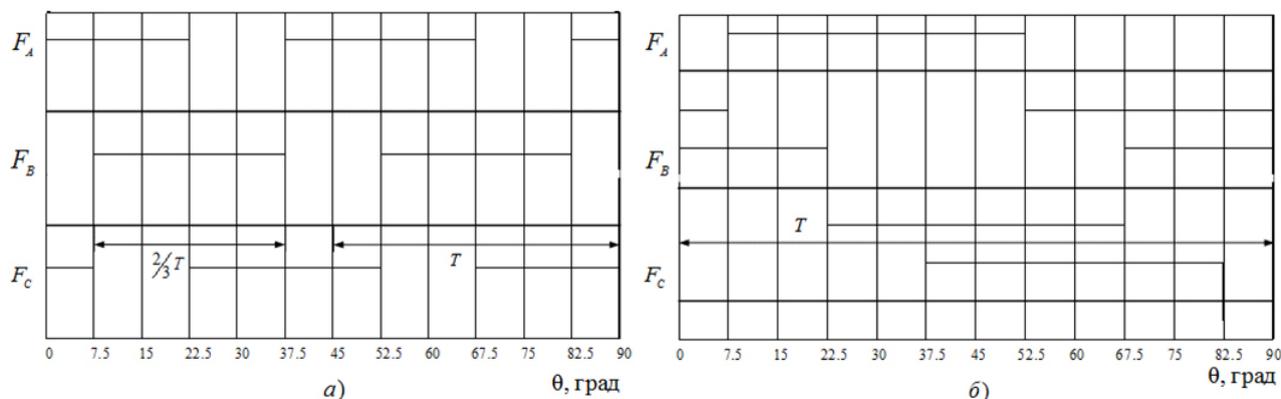


Рисунок 4 – Диаграмма работы фаз ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз при однополярном (а) и двухполярном возбуждении (б)

Сопоставим статические характеристики ВРД традиционного исполнения с характеристиками ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз в одинаковых размерах магнитной системы и при одинаковых значениях эффективных токов фаз. При этом следует учитывать, что в трехфазном ВРД при использовании симметричной одиночной коммутации фаза возбуждается током $1/3$ периода. В ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при однополярном питании интервал времени, в течение которого фаза находится в возбужденном состоянии составляет $2/3$ периода (рис. 4 а), а при двухполярном питании – в течение всего цикла (рис. 4 б). Поэтому при одинаковом значении эффективного фазного тока амплитудное значение тока фазы ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при однополярном возбуждении будет уменьшено в $\sqrt{2}$ раз, а при двухполярном – в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с ВРД традиционного исполнения.

На рис. 5 а представлены зависимости статического электромагнитного момента, полученные с помощью метода конечных элементов для ВРД традиционного исполнения $M = f(\theta)$, а также для ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз при одинаковых эффективных значениях фазных токов, равных 3,5 А. На рис. 5 б приведены моментные характеристики $M_{cp} = f(I)$.

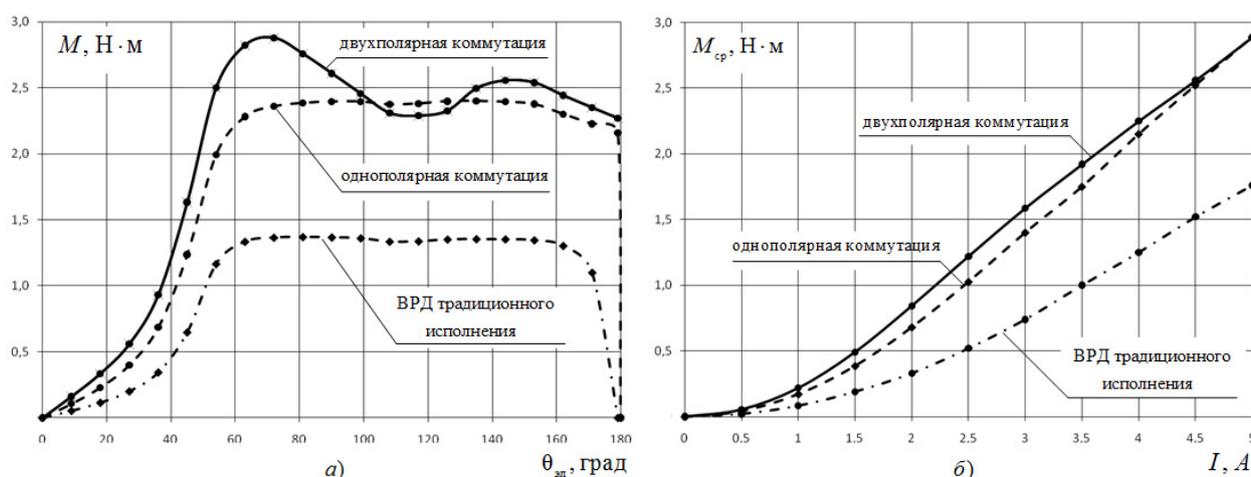


Рисунок 5 – Статические характеристики $m = f(\theta)$ для ВРД традиционного исполнения и ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз при однополярном и двухполярном питании (углы отложены в электрических градусах) (а) и моментные характеристики $M_{cp} = f(I)$ (б)

Из вида кривых, представленных на рис. 5, следует, что при одинаковых значениях эффективного фазного тока ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью развивает больший электромагнитный момент. Так, при

действующем значении тока, равном 3,5 А, средний электромагнитный момент ВРД традиционного исполнения составляет 1,0 Н·м, момент ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при однополярном возбуждении – 1,4 Н·м и при двухполярном возбуждении – 1,6 Н·м. При этом амплитудное значение токов фаз ВРД составляет 6,1 А, ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при однополярном возбуждении – 4,3 А и при двухполярном – 3,5 А. Необходимо учитывать, что данный критерий определяет установленную мощность силового полупроводникового преобразователя и его стоимость.

Увеличение электромагнитного момента в ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью объясняется совместным действием источников магнитодвижущих сил нескольких фаз в создании основного магнитного потока и электромагнитного момента. В табл. 1 приведены значения магнитных потоков в основании полюсов статора и соотношение электромагнитных моментов, развиваемых ВРД при различных способах возбуждения и значениях эффективных токов фаз.

Таблица 1 – Сопоставление статических характеристик ВРД на коммутационном интервале

$I_{эф}$, А	ВРД традиционного исполнения			ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз – однополярное возбуждение			ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз – двухполярное возбуждение			$\frac{M_{cp2}}{M_{cp1}}$, о. е.	$\frac{M_{cp3}}{M_{cp1}}$, о. е.
	I_{max1} , А	Φ_z , мВб	M_{cp1} , Н·м	I_{max2} , А	Φ_z , мВб	M_{cp2} , Н·м	I_{max3} , А	Φ_z , мВб	M_{cp3} , Н·м		
2,0	3,5	0,24	0,33	2,5	0,33	0,68	2,0	0,38	0,84	2,1	2,5
3,5	6,1	0,39	1,0	4,3	0,48	1,75	3,5	0,52	1,92	1,8	1,9
5,0	8,7	0,48	1,76	6,1	0,59	2,90	5,0	0,62	2,90	1,6	1,6

Представленные в табл. 1 данные показывают, что ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при одинаковых значениях эффективных токов имеют большие магнитные нагрузки по сравнению с ВРД традиционного исполнения за счет одновременного протекания токов в нескольких фазах ЭМП. Величина магнитного потока в основании полюса статора при эффективном фазном токе 3,5 А для ВРД с двухполярным возбуждением фаз в 1,33 раза больше по сравнению с ВРД традиционного исполнения, что позволяет сделать вывод, что насыщение в большей мере оказывает влияние на статические характеристики ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью.

Полученная форма момента ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз со ступенчатым изменением при угловом положении 180 электрических градусов объясняется принятым допущением о прямоугольной форме фазных токов на интервале коммутации (рис. 5 а). Необходимо отметить, что распределение магнитного поля в ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз имеет отличия от характерного для ВРД распределения. В качестве примера на рис. 6 приведены картины силовых линий магнитного поля ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью при однополярной и двухполярной коммутации фаз при промежуточном угловом положении ротора на интервале коммутации – 90 электрических градусов.

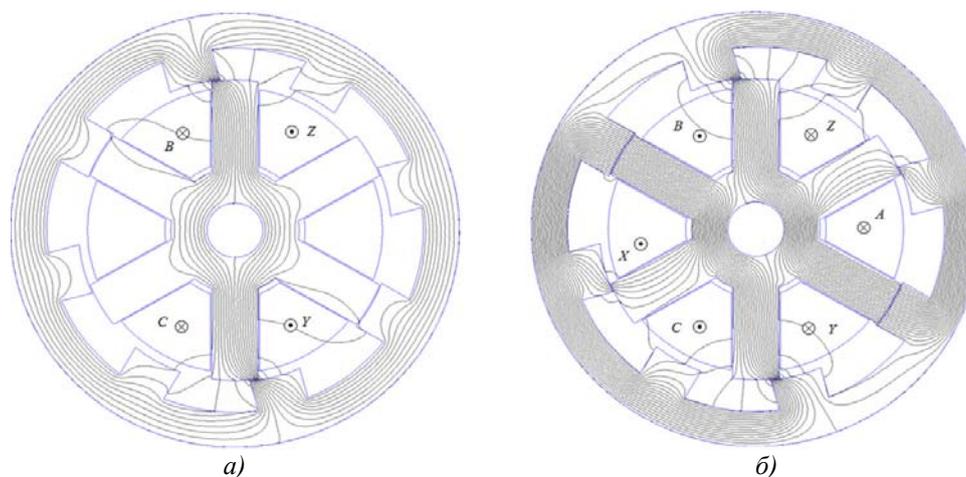


Рисунок 6 – Распределение магнитного поля ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью фаз при однополярном питании (а) и двухполярном питании фаз (б) в середине коммутационного интервала (90 электрических градусов)

В случае однополярного возбуждения основной магнитный поток под действием пазовых МДС проходит по диаметрально противоположным зубцам статора (рис. 6 а). При двухполярном питании фаз (рис. 6 б) характер распределения поля изменяется и магнитный поток неравномерно распределен между всеми зубцами ЭМП. При этом в возбужденном состоянии находятся зубцовые контуры, развивающие не только двигательные, но и тормозные моменты, что объясняет провалы в кривой статического момента (рис. 5 а). Практический интерес представляет определение оптимального распределения магнитодвижущих сил по фазам ВРД с целью минимизации тормозных моментов, создаваемых отдельными полюсами, и эффективного распределения токовой нагрузки между фазами.

При однополярном и двухполярном питании наблюдается различное распределение потоков на участках ярма статора и ротора. При однополярном возбуждении по ярмам проходит половина магнитного потока, создаваемого возбужденными фазами. В случае двухполярного питания изменяются контуры замыкания силовых линий и магнитные потоки в спинках статора и ротора практически равны основному магнитному потоку, что следует учитывать при выборе сечений участков магнитной системы.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что питание фаз ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью может осуществляться однополярными и двухполярными импульсами тока, что позволяет использовать распространенную схему мостового инвертора.

При одинаковом эффективном значении фазного тока ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью развивают больший электромагнитный момент по сравнению с ВРД традиционного исполнения при меньших амплитудных значениях фазных токов. В то же время ВРД с изменяющейся взаимной индуктивностью имеют большие электрические потери в обмотках из-за увеличения длины лобовых частей и характеризуется большим уровнем магнитных нагрузок, что должно учитываться при выборе геометрических размеров магнитной системы и обмоточных данных двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Квятковский И. А. Реактивный индукторный двигатель мотор-колеса легкого транспортного средства : Дис. канд. техн. наук. 05.09.01 / И. А. Квятковский. - Новочеркасск. - 1999. - 154 с.
2. Ваткин В. А. Разработка вентильных индукторных электромеханических систем автотранспортного назначения : Дис. канд. техн. наук. 05.09.01 / В. А. Ваткин. - Чебоксары. - 2007. - 171 с.
3. Кузьмичев В. А. Проектирование вентильно-индукторного электродвигателя для электровелосипеда / В. А. Кузьмичев, Е. В. Нестеров // Электричество. - 2004. - № 4. - С. 51-53.
4. Ильинский Н. Ф. Вентильно-индукторный привод для легких электрических транспортных средств / Н. Ф. Ильинский, М. Г. Бычков // Электротехника. - 2000. - № 2. - С. 28-31.
5. Ткачук В. І. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму: монографія / В. І. Ткачук, І. С. Біляковський, О. В. Макарчук, Л. В. Каша, О. В. Грещук; Нац. ун-т "Львів. політехніка". Л., 2011. — 287 с.: рис., табл. — Бібліогр.: С. 263-265.
6. Cakir K. In-wheel motor design for electric vehicle / K. Cakir, A. Sabanovic // IEEE international workshop on advanced motion control. - 2006. - P. 613-618.
7. Lin J. Experimental investigation of in-wheel switched reluctance motor driving system for future electric vehicles / J. Lin, K. W. Cheng, Z. Zhang, X. Xue // International conference on power electronic systems and applications. - 2009. - P. 1-6.
8. Fujishiro, S. Design of outer-rotor-type multipolar switched reluctance motor for electric vehicle / S. Fujishiro, K. Ishikawa, S. Kikuchi, K. Nakamura, O. Ichinokura // Journal of applied physics. - 2006. - № 8. - P. 241-243.
9. Ткачук В. І. Електромеханотроніка: Підручник / В. І. Ткачук - Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. - 440 с. - Бібліогр.: С. 433-439.
10. Khor M. T. A 3-phase 12/10 asymmetrical switched reluctance motor / M. T. Knor, R. Sotudeh // European Conference on Power Electronics and Applications. - Dresden, 2005. - P. 1-9.
11. Bal G. A novel switched reluctance motor with U-type segmental rotor pairs: design, analysis and simulation results / G. Bal, D. Uygun // World academy of science, engineering & technology. - 2010. - Vol. 64. - P. 189-193.
12. Бут Д. А. Модификации вентильно-индукторных двигателей и особенности их расчетных моделей / Д. А. Бут // Электричество. - 2000. - № 7. - С. 34-44.
13. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications / R. Krishnan - CRC Press, 2001. - 416 p.
14. Власенко В. А. Дослідження взаємодукції фаз вентильно-індукторного двигуна / В. А. Власенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - № 55. - С. 3-8.
15. Mecrow B. C. Inverter topologies and current sensing methods for short pitched and fully pitched winding SR motors / B. C. Mecrow, A. C. Clothier // Applied power electronics conference and exposition. - Dallas, 1999. - Vol. 1. - P. 416-423.
16. Clothier A. C. Switched reluctance motor drives with fully pitched windings : A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. Newcastle upon Tyne. 2000. - 328 с.

17. Cinar M. A. Design and torque profile analysis of an outer-rotor SR motor with different winding configuration / M. A. Cinar, F. E. Kuyumcu // Przegląd elektrotechniczny. – 2012. – № 2. – P. 328–331.
18. Yilmaz K. Comparison between short-pitched and unipolar excited fully-pitched switched reluctance motors for equal electrical losses / K. Yilmaz, E. Mese // The Arabian journal for science and engineering. – 2008. – № 2. – P. 473–486.
19. Иванов-Смоленский А. В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский, Ю. В. Абрамкин, А. И. Власов, В. А. Кузнецов – М. : Энергоатомиздат. – 1986. – 216 с. – Библиогр.: С. 210–213.
20. Коник Б. Е. Учет дискретности активной зоны в электрических машинах / Б. Е. Коник – Haifa : Gutenberg, 2008. – 229 с. – Библиогр.: С. 215–229.

REFERENCES

1. Kvjatkovskij I. A. In-wheel switched reluctance motor of a light-load vehicle. Thesis for the degree of candidate of science. 05.09.01. Novocherkassk, 1999. 154 p.
2. Vatkin V. A. Design of switched reluctance electromechanical systems for transport purposes. Thesis for the degree of candidate of science 05.09.01. Cheboksary, 2007. 171 p.
3. Kuz'michev V. A., Nesterov E. V. Design of switched reluctance motor for electric bicycle. Elektrichestvo. 2004; 4: 51–53.
4. Il'inskij H. F., Bychkov M. G. Switched reluctance drive for light-load vehicles. Elektrotehnika. 2000; 2: 28–31.
5. Tkachuk V. I., Biljakovs'kij I. E., Makarchuk O. V., Kasha L. V., Greshuk O. V. Theory and synthesis of converter-fed direct current motors. Lviv: "Lviv. politehnika", 2011. 287 p.
6. Cakir K., Sabanovic A. In-wheel motor design for electric vehicle. IEEE international workshop on advanced motion control, 2006. p. 613–618.
7. Lin J., Cheng K. W., Zhang Z., Xue X. Experimental investigation of in-wheel switched reluctance motor driving system for future electric vehicles. International conference on power electronic systems and applications, 2009, p. 1–6.
8. Fujishiro S., Ishikawa K., Kikuchi S., Nakamura K., Ichinokura O. Journal of applied physics. 2006; 8: 241–243.
9. Tkachuk V. I. Electromechanotronics. Lviv: "Lviv. politehnika", 2006. 440 p.
10. Khor M. T., Sotudeh R. A 3-phase 12/10 asymmetrical switched reluctance motor. European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, 2005, p. 1–9.
11. Bal G., Uygun D. A novel switched reluctance motor with U-type segmental rotor pairs: design, analysis and simulation results. World academy of science, engineering & technology. 2010; 64: 189–193.
12. But D. A. Modifications of switched reluctance motors and peculiarities of their design models. Elektrichestvo. 2000; 7: 34–44.
13. Krishnan, R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. CRC Press, 2001. 416 p.
14. Vlasenko V. A. Research of mutual inductance between phases of switched reluctance motor. Visnik Nacionalnogo tehničnogo universitetu. Harkiv «HPI». 2010; 55: p. 3–8.
15. Mecrow B. C., Clothier A. C. Inverter topologies and current sensing methods for short pitched and fully pitched winding SR motors. Applied power electronics conference and exposition. Dallas. 1999; 1: 416–423.
16. Clothier A. C. Switched reluctance motor drives with fully pitched windings. Thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. Newcastle upon Tyne, 2000. 328 p.
17. Cinar M. A., Kuyumcu F. E. Design and torque profile analysis of an outer-rotor SR motor with different winding configuration. Przegląd elektrotechniczny. 2012; 2: 328–331.
18. Yilmaz K., Mese E. Comparison between short-pitched and unipolar excited fully-pitched switched reluctance motors for equal electrical losses. The Arabian journal for science and engineering. 2008; 2: 473–486.
19. Ivanov-Smolenskij A. V., Abramkin U. V., Vlasov A. I., Kuznecov V. A. Universal method for electromagnetic processes calculations in electric machines. Moscow. Energoatomizdat, 1986. 216 p.
20. Konik B. E. Discrecity of active zone of electric machines. Haifa. Gutenberg, 2008. 229 p.

Надійшла до редакції 27.03.2013

Рецензент: О.П. Ковальов

Л.О. ВАСИЛЬЄВ, Ю.В. МНУСКІН, А.Є. БОЄВ

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

Способи комутації фаз вентиляного реактивного двигуна оберненої конструкції зі змінною взаємною індуктивністю фаз. Розглянуто принцип дії і відмітні ознаки вентиляних реактивних двигунів зі змінною взаємною індуктивністю фаз. Представлені результати порівняльного аналізу статичних характеристик оберненого вентиляного реактивного двигуна зі змінною взаємною індуктивністю фаз при однополярній і двополярній комутації з характеристиками вентиляного реактивного двигуна традиційного виконання.

Ключові слова: вентиляний реактивний двигун, обернена конструкція, взаємна індуктивність, однополярна комутація, двополярна комутація, магнітне поле, електромагнітний момент.

L. VASILIEV, U. MNUSKIN, A. BOYEV

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Commutation Modes of Inverted Switched Reluctance Motor with Variable Mutual Inductance. Area of application of conventional and inverted switched reluctance motors is spreading in the recent years. Switched reluctance motors have certain advantages over other types of electric machines due to the simple and reliable construction, low cost of electromechanical energy converter and ability to operate in a wide range of speed. These factors make them preferable for industrial and lift-and-carry machinery. The main distinctive feature of this type of electric machines is a small magnetic coupling between phases. Torque is generated due to the rate of change of self-inductance of windings. Phases contribute to positive torque over a limited time interval with rising self-inductance. In this regard switched reluctance motors with mutually coupled phases in a number of cases can have better characteristics than conventional switched reluctance motors. In comparison to conventional switched reluctance motor phases in motor with variable inductance contribute to torque production over 2/3 of the period for unidirectional excitation and for the whole period for bipolar operation. This paper presents comparison of static torque characteristics of inverted switched reluctance motor with variable mutual inductance with unidirectional and bipolar supply with static characteristics of conventional switched reluctance motor in single pulse mode operation. It is shown that inverted motor with variable inductance with the same dimensions of magnetic system and effective values of phase currents develops higher torque. Comparison is made by numerical field analysis with finite element method on the basis of idealized square-shaped phase currents waveforms. It is also shown that motor with variable mutual inductance with bipolar supply has different magnetic field distribution in comparison with conventional switched reluctance motor and tends to have higher magnetic loads because of the simultaneous excitation of several phases.

Key words: *switched reluctance motor, inverted construction, mutual inductance, unidirectional commutation, bipolar commutation, magnetic field, electromagnetic torque.*