

## РАДИАЛЬНЫЕ СИЛЫ В ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Рымша В.В., д.т.н., доц.

Одесский национальный политехнический университет  
Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин  
Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"  
Украина, 65005, Одесса, ул. Дальницкая, 23  
тел.(048) 738-58-55, E-mail: rimsha@omsp.od.ua, pro@omsp.od.ua

Радимов И.Н., к.т.н., доц.

Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"  
Украина, 65005, Одесса, ул. Дальницкая, 23  
тел.(048) 738-58-55, E-mail: pro@omsp.od.ua

Чан Тхи Тху Хыонг

Одесский национальный политехнический университет  
Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин

*Наведено результати розрахунку радіальних електромагнітних сил (ЭМС), що виникають в наслідок ексцентриситету ротору, для двох варіантів чотирифазних вентильно-реактивних двигунів (ВРД) з числами полюсів 8/6 та 16/12. Показано, що по критерію мінімуму радіальних ЭМС переважною є конструкція 16/12.*

*Представлены результаты расчета радиальных электромагнитных сил (ЭМС), возникающих в результате эксцентриситета ротора, для двух вариантов четырехфазных вентильно-реактивных двигателей (ВРД) с числами полюсов 8/6 и 16/12. Показано, что по критерию минимума радиальных ЭМС предпочтительной является конструкция ВРД 16/12.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вентильно-реактивные двигатели (ВРД) являются объектом интенсивных исследований в связи с расширением сфер их применения в системах регулируемого электропривода [1,2]. ВРД интересны тем, что имеют простую и технологичную конструкцию электромеханического преобразователя энергии, отличающуюся наличием катушечной обмотки на статоре и безобмоточным ротором. Исходя из того, что магнитный поток в этих машинах создается только МДС обмотки статора, для уменьшения тока намагничивания воздушный зазор ВРД должен выполняться минимально возможным по технологическим соображениям. В этом случае такие факторы, как допуски и посадки при изготовлении деталей ВРД, допуск на радиальное смещение внутреннего кольца подшипника и износ подшипников в процессе эксплуатации двигателя, изменение размеров посадочных мест в результате ремонта ВРД и т.д., оказывают существенное влияние на равномерность воздушного зазора. Эксцентриситет воздушного зазора приводит к перераспределению магнитного поля и, как следствие, к небалансу радиальных электромагнитных сил (ЭМС), действующих на ротор ВРД [3]. Небаланс радиальных ЭМС вызывает увеличение нагрузки на подшипники, деформацию статора и ротора, усиление вибрации и шума. Исходя из этого важной для практики задачей является исследование и анализ радиальных ЭМС при эксцентриситете ротора в различных конструктивных исполнениях ВРД.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований приняты два конструктивных исполнения четырехфазных ВРД:

- с числом полюсов статора  $Z_S = 8$ , ротора  $Z_R = 6$  (ВРД 8/6) (рис. 1,а);

- с числом полюсов статора  $Z_S = 16$ , ротора  $Z_R = 12$  (ВРД 16/12) (рис. 1,б).

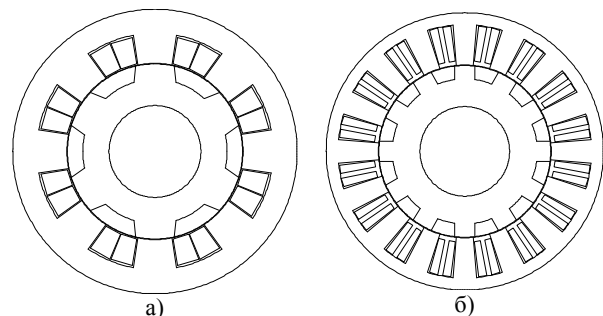


Рис. 1. Конструктивные исполнения ВРД

Каждый из указанных конструктивов имеет свои преимущества. Так, ВРД 8/6, по сравнению с ВРД 16/12, имеет меньшую частоту переключения фаз и, следовательно, меньшие потери в стали, вдвое меньшее число воздушных зазоров для проведения магнитного потока, он проще в изготовлении. В то же время ВРД 16/12 отличается улучшенным теплоотводом от катушек обмотки статора благодаря меньшему сечению каждой катушки фазы и меньшему вылету лобовых частей.

Исследуемые ВРД выполнены с геометрическими размерами, приведенными в табл. 1.

Радиальные ЭМС исследовались при смещении ротора от оси вращения на величину  $\Delta\delta = (10,20,\dots,80)\% \cdot \delta$ , где  $\delta = 0,25$  мм - воздушный зазор при отсутствии эксцентриситета.

Таблица 1

Основные геометрические размеры		
Наименование	8/6	16/12
Внешний диаметр статора, мм	130	130
Диаметр ротора, мм	80	80
Активная длина, мм	80	80
Воздушный зазор, мм	0,25	0,25
Ширина зубца статора, мм	16	8
Ширина зубца ротора, мм	17,6	8,8
Сечение меди катушки, мм <sup>2</sup>	47,4	34

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования радиальных ЭМС выполнялись на основе конечноэлементных полевых математических моделей [4] (рис. 2).

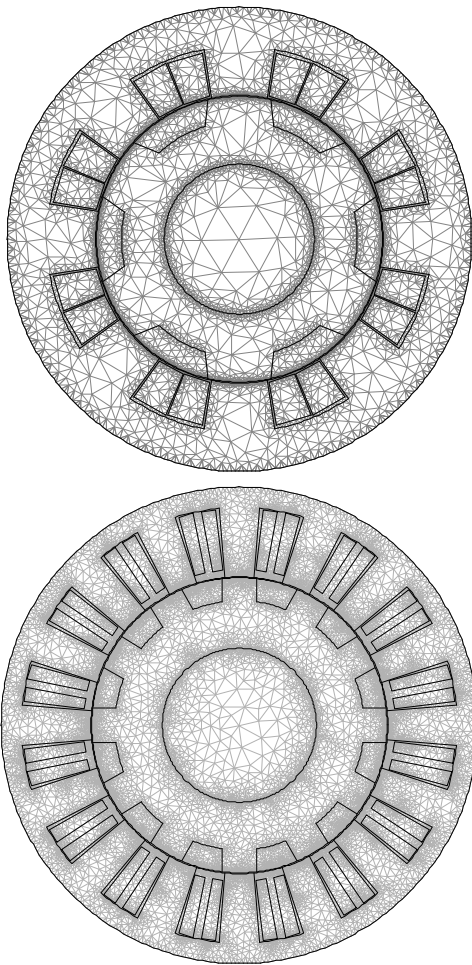
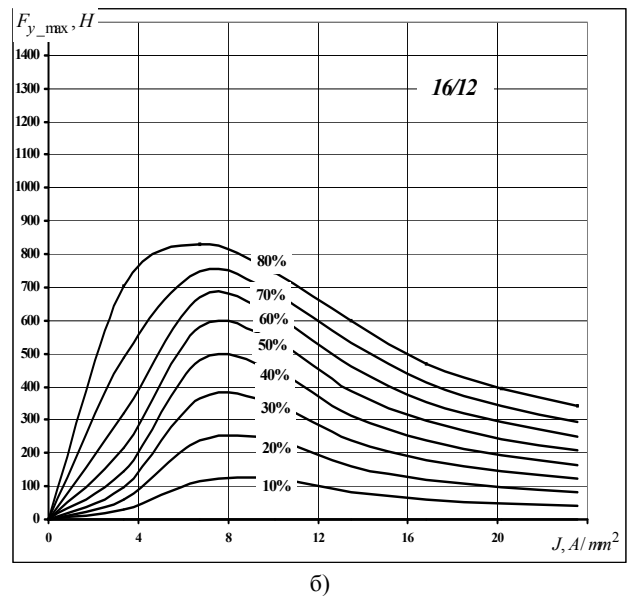
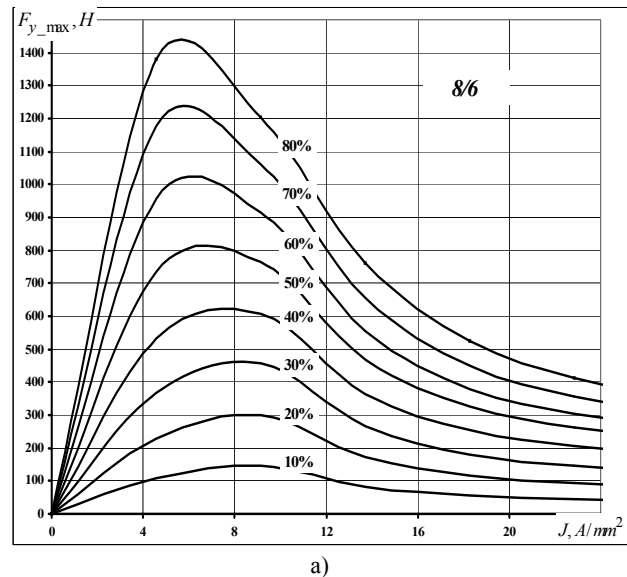


Рис. 2. Конечноэлементные модели ВРД

При проведении полевых расчетов плотности тока в проводниках обмоток статора принимались одинаковыми.

На рис. 3 представлены результаты расчетов максимальных значений небалансных радиальных сил  $F_{y\_max}$ , имеющих место при согласованном положении полюсов ротора и возбуждаемых полюсов статора, в зависимости от плотности тока  $J$  при различном эксцентриситете  $\Delta_\delta$  (рис. 3,а – ВРД 8/6, рис. 3,б – ВРД 16/12).

Рис. 3. Зависимости  $F_{y\_max} = f(J)$  при  $\Delta_\delta = \text{var}$ 

Из рис. 3 видно, что с ростом  $J$  электромагнитная сила возрастает, достигает максимума и затем уменьшается. Это связано с перераспределением магнитного поля при эксцентриситете, насыщением участков магнитной системы ВРД, что иллюстрируется картинками магнитного поля, представленными на рис. 4. Картины магнитного поля исследуемых двигателей представлены при  $\Delta_\delta = (50\%) \cdot \delta$  для двух вариантов плотности тока  $J$ . На рис. 4,а,в плотность тока соответствует малому насыщению магнитной системы ВРД, при котором наблюдается максимальная сила  $F_{y\_max}$ , а на рис. 4,б,г плотность тока соответствует глубокому насыщению магнитной системы ВРД, что характерно для режимов пуска и перегрузки.

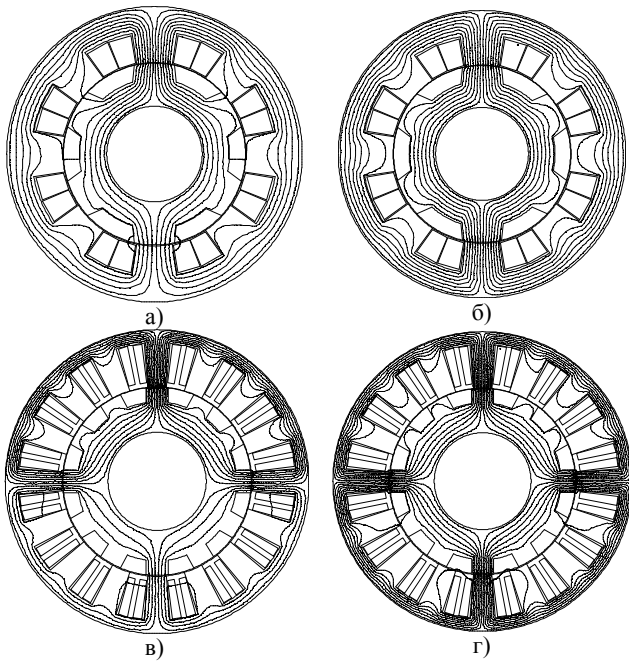


Рис. 4. Распределение магнитного поля при 50%-ном эксцентриситете

Из представленных на рис. 4 результатов видно, что при малой степени насыщения магнитной системы плотность силовых линий в верхней части магнитопровода, где воздушный зазор минимальный, выше, чем в нижней части. Соответственно, сила, действующая на верхнюю часть ротора, намного превышает силу, действующую на нижнюю часть ротора. При глубоком насыщении магнитной системы ВРД плотности силовых линий в верхней и нижней части магнитопровода приближаются друг к другу. Тогда величина небаланса ЭМС уменьшается, хотя каждая из действующих на противоположные стороны ротора сил увеличивается.

На рис. 5 показаны зависимости максимальной небалансной силы  $F_{\max}$  от величины эксцентриситета ротора для ВРД 8/6 и ВРД 16/12.

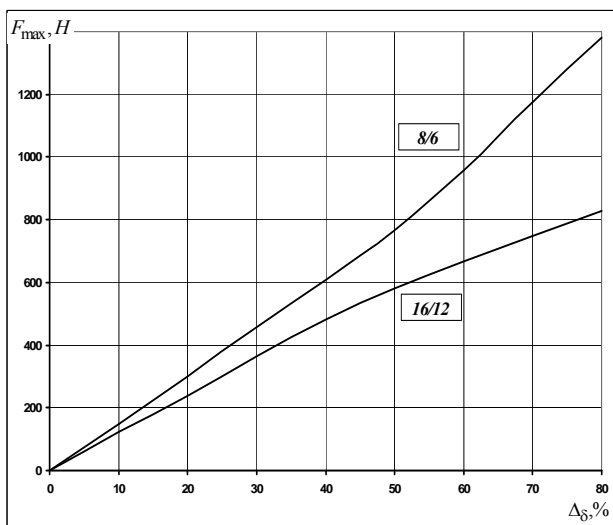


Рис. 5. Зависимость  $F_{\max} = f(\Delta_\delta)$

Из рис. 5 видно, что в пределах наиболее вероятных значений эксцентриситета  $\Delta_\delta = (10, \dots, 40)\% \cdot \delta$  расхождение между силами  $F_{\max}$  для сравниваемых вариантов ВРД не превышает 27%. При большей величине эксцентриситета это расхождение увеличивается и достигает 67% при эксцентриситете  $\Delta_\delta = 80\% \cdot \delta$ .

Следовательно, приведенные результаты показывают, что по критерию минимума величины радиальных сил предпочтение следует отдать конструкции ВРД 16/12.

В то же время при проектировании ВРД следует обратить внимание на выбор высоты ярма статора, т.к. ее величина при расчете по рекомендуемым в [1] значениям для конструкции 16/12 получается вдвое меньше, чем для конструкции 8/6. В этой ситуации рекомендуется проведение не только электромагнитных, но и механических расчетов деформации статора ВРД из-за действия радиальных сил.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p.
- [2] Ткачук В. Електромеханотроніка: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". 2001. – 404 с.
- [3] N.R.Garrigan, W.L.Soong, C.M.Stephens, A.Storace, T.A.Lipo. Radial force characteristics of a switched reluctance machine // IEEE-IAS Conf. Rec. Phoenix, AZ. October 1999. Vol. 4. pp. 2250-2258.
- [4] Радимов И.Н., Рымша В.В., Малеваный О.Е. Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С. 60-64.

Поступила 25.07.2005