

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ФАЗ

Наведено порівняльний аналіз трьох- та чотирьохфазних вентильно-реактивних двигунів при умові ідентичності зовнішнього та внутрішнього діаметрів статора, активної довжини машини і робочого повітряного зазору.

Представлен сравнительный анализ трех- и четырехфазных вентильно-реактивных двигателей при условии идентичности внешнего и внутреннего диаметров статора, активной длины машины и рабочего воздушного зазора.

В настоящее время вентильно-реактивные двигатели (ВРД) являются объектом интенсивных исследований в связи с расширением сфер их применения в системах регулируемого электропривода [1].

Электромеханический преобразователь (ЭМП) ВРД обычно классифицируют по числу полюсов на статоре Z_S и роторе Z_R , а также по числу фаз m обмотки статора. Так, например, ВРД, показанный на рис. 1, относится к трехфазным с $Z_S / Z_R = 6/4$, а ВРД (рис. 2) – к четырехфазным с $Z_S / Z_R = 8/6$.

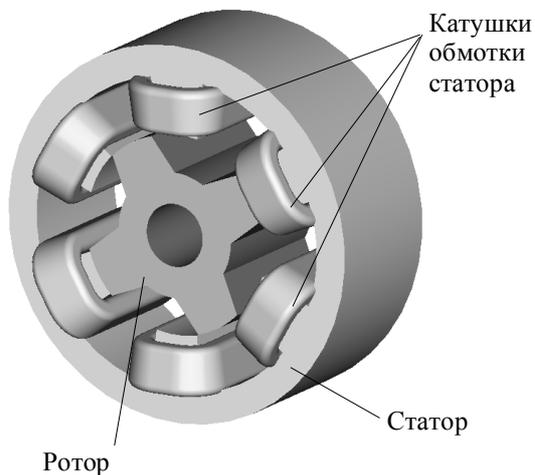


Рис. 1. Трехфазный ЭМП ВРД конструкции 6/4

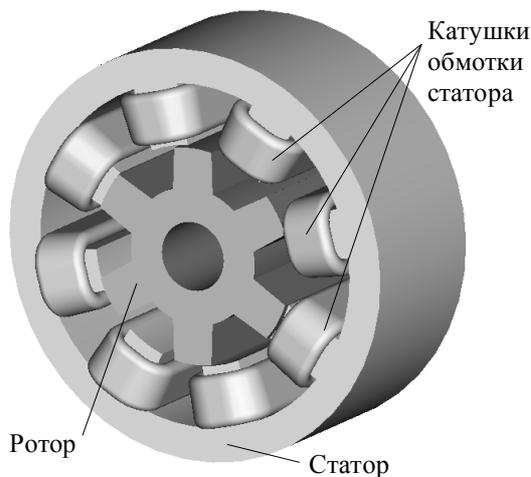


Рис. 2. Четырехфазный ЭМП ВРД конструкции 8/6

Число фаз m является фактором, определяющим многие свойства ВРД. Имеющиеся в литературе данные не позволяют на этапе решения конкретной прак-

тической задачи сделать выбор в пользу трех- или четырехфазной модификации двигателя с точки зрения их энергетических показателей. Исходя из этого, целью работы является исследование и сопоставительный анализ трехфазных и четырехфазных ВРД с использованием разработанной авторами системы автоматизированного анализа и синтеза ВРД SRM-CAD [2, 3].

Математическая модель, описывающая режимы работы ВРД и лежащая в основе математического обеспечения системы SRM-CAD, представляет собой систему дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} U_k = I_k R_k + \frac{d\Psi_k}{dt}, k = 1, 2, \dots, m \\ M_\Sigma = M_C + J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где U_k , I_k , R_k , Ψ_k – соответственно, напряжение, ток, сопротивление и потокосцепление k -ой фазы, $M_\Sigma = M_1 + M_2 + \dots = M_m$ – результирующий электромагнитный момент от действия всех фаз, M_C – момент сопротивления, J_Σ – суммарный момент инерции системы электропривода, ω – угловая скорость ротора, t – время.

Первое уравнение системы (1) – дифференциальное уравнение электрического равновесия, записываемое для каждой из фаз ВРД в предположении о том, что фазы являются независимыми в магнитном отношении, а сама магнитная система – симметрична относительно фаз. Второе уравнение системы (1) – дифференциальное уравнение механического равновесия движущихся частей ВРД.

Решение системы (1) позволяет найти динамические характеристики ВРД I_Φ , M , $\omega = f(t)$, а также построить его механическую характеристику $\omega = \varphi(M)$.

Для решения системы (1) первоначально требуется получить зависимости потокосцепления и момента в функции от тока в фазе и угла положения ротора ВРД. Наиболее быстро и точно они могут быть получены путем численного расчета магнитного поля методом конечных элементов (МКЭ), т.е. на базе полевой математической модели [4].

Сравнение проводилось для трех- и четырехфазного ВРД малой мощности, у которых внешний диаметр статора равен 53 мм, активная длина – 28 мм, воздушный зазор – 0,15 мм. Сталь магнитопровода статора и ротора для обоих вариантов – марки 2211 с толщиной листа 0,5 мм. Отличие состояло в числе

витков на фазу ВРД: для трехфазного – $w_{3ф} = 70$, для четырехфазного – $w_{4ф} = 60$. При этих числах витков на фазу обеспечивается практическое совпадение "естественных" механических характеристик анализируемых ВРД (рис. 3).

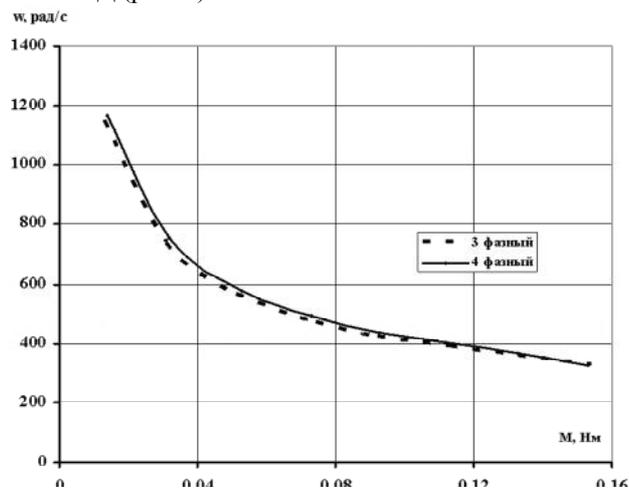


Рис. 3. Сравнение механических характеристик

Зависимости электромагнитного момента от угла поворота ротора, для трех- и четырехфазных ВРД при токе в фазе статора 6 и 9 А представлены на рис. 4.

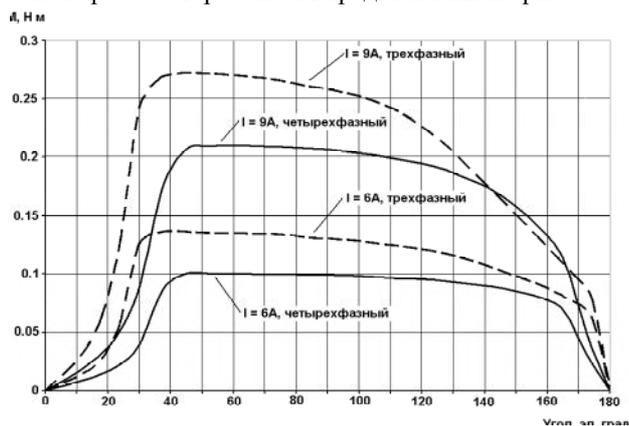


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента от угла положения ротора для ВРД трех- и четырехфазной конструкции

Спроектированные двигатели имеют практически одинаковые массы активных материалов, что иллюстрируется данными в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Число фаз	Масса стали ротора, кг	Масса стали статора, кг	Общая масса стали, кг
3	0,085	0,258	0,343
4	0,084	0,243	0,327

Таблица 2

Число фаз	Масса меди, кг	Общая масса активных материалов, кг	Момент инерции ротора, кг·м ²
3	0,066	0,409	$9,772 \cdot 10^{-6}$
4	0,074	0,401	$9,712 \cdot 10^{-6}$

При сравнении рассчитывались и анализировались следующие величины: потери в меди обмотки статора $P_{эл}$ и потери в стали магнитопроводов статора и ротора $P_{ст}$ (рис. 5), коэффициент полезного действия

η (рис. 6), а также коэффициент пульсаций момента K_p (рис. 7) в зависимости от момента M на валу двигателя, при его работе на "естественной" механической характеристике.

Для определения потерь в стали ЭМП ВРД был разбит на участки. Для каждого из участков рассчитана индукция и частота перемагничивания. Непосредственно потери определялись по формуле Штейнмеца.

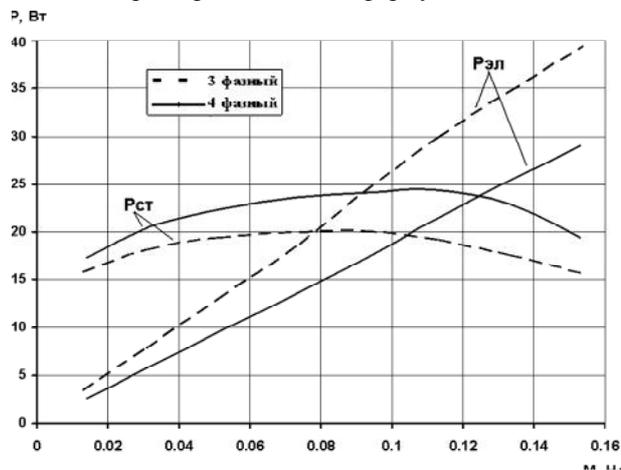


Рис. 5. Сравнение потерь от нагрузочного момента для трех- и четырехфазных ВРД

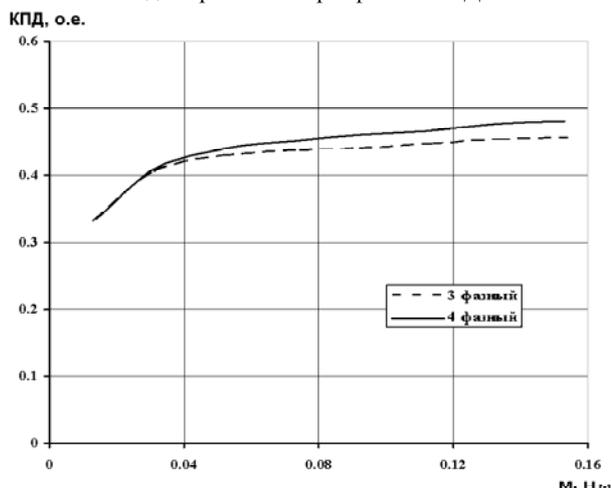


Рис. 6. Сравнение коэффициента полезного действия от нагрузочного момента для трех- и четырехфазных ВРД

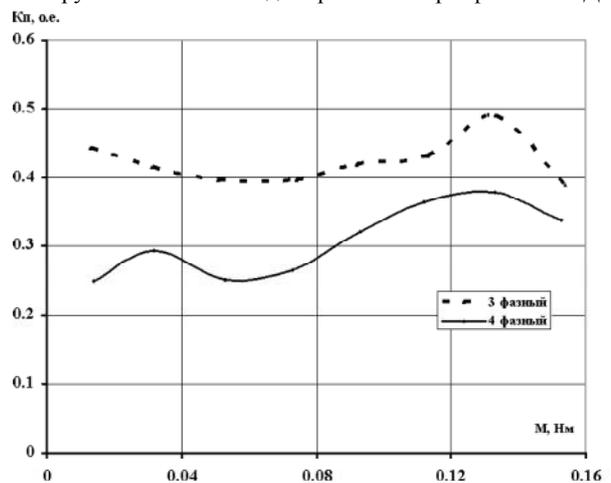


Рис. 7. Сравнение коэффициента пульсаций от нагрузочного момента для трех- и четырехфазных ВРД

Из рис. 5 следует, что с ростом момента увеличиваются потери в меди обмотки статора, а потери в стали вначале растут, достигая определенного максимального значения, а затем начинают уменьшаться. Такой характер изменения потерь в стали связан, с одной стороны, с уменьшением частоты пульсаций магнитного потока в зубцах и ярмах магнитопровода, а с другой стороны – с увеличением магнитной индукции в этих участках с ростом момента на валу двигателя.

Видно, что потери в меди для трехфазного ВРД больше, чем для четырехфазного, а потери в стали больше в четырехфазном варианте. Отличие потерь в стали объясняется тем, что при одинаковой скорости вращения ротора частота коммутации фаз $f_k = (\omega/2\pi) \cdot Z_R \cdot m$ обмотки статора для четырехфазной машины выше в два раза, чем для трехфазной.

В результате такого своеобразного изменения потерь значения КПД (см. рис. 6) анализируемых двигателей достаточно близки во всем диапазоне изменения момента на валу, хотя КПД четырехфазного ВРД все же проходит несколько выше. Здесь также интересно отметить, что максимум КПД в ВРД не наблюдается при условии равенства потерь в меди и стали, т.к. для такого типа машин потери в стали не являются постоянными. Из рис. 7 видно, что четырехфазный ВРД имеет меньшую величину пульсаций момента во всем принятом диапазоне его изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рымша В.В., Радимов И.Н., Мальований О.Е. и др. Вентильно-реактивные электродвигатели специального назначения // ЭЛЕКТРОинформ. – 2006. – № 2. – С. 28-30.
2. Рымша В.В., Радимов И.Н., Процьна З.П. Подсистема компьютерного моделирования вентильно-реактивных электродвигателей // Вестник Херсонского национального технического университета. – Вып. 2 (25). – 2006. – С. 437-442.
3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30929. Комп'ютерна програма "Система автоматизованого аналізу та синтезу вентильно-реактивних двигунів SRM-CAD" / Гулий М.В., Мальований О.Є., Процьна З.П., Радимов І.М., Римша В.В. Україна, м. Київ: Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності, 10.11.2009 р.
4. Рымша В.В., Радимов И.Н., Порайко А.С. Расчет статического электромагнитного момента вентильно-реактивного двигателя модифицированным методом натяжений // Электромашиностроения та електрообладнання. – 2003. – Вып. 60. – С. 35-38.

Поступила 04.10.2010

Рымша Виталий Викторович, д.т.н., проф.

Процьна Зиновий Павлович

Кравченко Петр Алексеевич

Одесский национальный политехнический университет
кафедра электрических машин
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1
тел. (048) 738-58-55, e-mail: rimsha@ukrainemotors.com

Радимов Игорь Николаевич, к.т.н., доц.

НТЦ ООО "Завод Электротехника"

65005, Одесса, ул. Мельницкая, 26/2

тел. (048) 738-58-55, E-mail: radimov@ukrainemotors.com

V.V. Rymsha, I.N. Radimov, Z.P. Protsyna, P.A. Kravchenko

Comparative analysis of power properties of a switched reluctance motor with different numbers of phases.

A comparative analysis of a three-phase and a four-phase switched reluctance motors is performed under the conditions of identity of the external and internal diameters of the stator, the active length of the machine and the working air gap.

Key words – switched reluctance motor, three phases, four phases, finite element method, simulation of dynamic modes, comparative analysis.