

**Б.А. ЕГОРОВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ", Харьков  
**А.М. МАЛЕЕВ**, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков

## **ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ИНДУКТОРНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЭТОЙ ПРОБЛЕМЫ**

Розглядається проблема розрахунку магнітного поля вентильних індукторно-реактивних двигунів у зв'язку з несінусоїдальністю розподілення поля у повітряному зазорі та конфігурацією магнітопровода.

Рассматривается проблема расчета магнитного поля вентильных индукторно-реактивных двигателей в связи с несинусоидальностью распределения поля в воздушном зазоре и конфигурацией магнитопровода.

**Введение.** Достоинства вентильных индукторно-реактивных двигателей (ВИРД), которые выделяют его среди остальных электромеханических преобразователей:

– *простая конструкция.* Ротор и статор выполнены в виде пакетов листового магнитомягкого материала. На роторе ВИРД отсутствуют обмотки и постоянные магниты. Фазные обмотки находятся только на статоре. Для уменьшения трудоемкости катушки обмотки якоря могут изготавливаться отдельно, а затем надеваться на полюсы статора;

– *высокая ремонтпригодность.* Простота обмотки якоря повышает ремонтпригодность ВИРД, так как для ремонта достаточно сменить вышедшую из строя катушку. Отсутствует механический коммутатор. Управление электромеханическим преобразователем электропривода/генератора осуществляется с помощью высокоэффективных силовых полупроводниковых элементов – IGBT или MOSFET (HEXFET) транзисторов, надежность которых существенно превышает надежность любых механических деталей, например: коллекторов, щеток, подшипников;

– *отсутствие постоянных магнитов.* ВИРД не содержит постоянных магнитов ни на роторе, ни на статоре, при этом он успешно конкурирует по характеристикам с вентильными электрическими двигателями с постоянными магнитами (ВЭДПМ). В среднем, при одинаковых электрических и весогабаритных характеристиках ВИРД имеет

в 4 раза меньшую стоимость, значительно большую надежность, более широкий диапазон частот вращения, более широкий диапазон рабочих температур. Конструктивно, по сравнению с ВЭДПМ, ВИРД не имеет ограничения по мощности (практически, мощность ВЭДПМ ограничивается пределом около 20-40 кВт). Вентильные индукторно-реактивные электродвигатели/генераторы свободны от всех этих недостатков;

– *отсутствие обмотки*. Ротор не имеет обмотки и выполнен в виде пакета листового магнитомягкого материала, например из обычной электротехнической стали;

– *малое количество меди*. На изготовление ВИРД требуется в среднем 2-3 раза меньше меди, чем для коллекторного электродвигателя такой же мощности, и в 1,3 раза меньше меди, чем для асинхронного электродвигателя. тепловыделение происходит в основном только на статоре, при этом легко обеспечивается герметичная конструкция, воздушное или водяное охлаждение. В рабочем режиме не требуется охлаждение ротора. Для охлаждения ВИРД достаточно использовать наружную поверхность статора. Высокие массогабаритные характеристики. В большинстве случаев ВИРД может быть выполнен с полым ротором. Толщина спинки ротора при этом должна быть не менее половины ширины полюса. Подбором количества полюсов статора и ротора могут быть оптимизированы массогабаритные характеристики электродвигателя/генератора, его мощность при заданном моменте и диапазоне частоты вращения;

– *низкая трудоемкость*. Простота конструкции ВИРД снижает трудоемкость его изготовления. В сущности, его можно изготовить даже на не специализирующемся в области электромашиностроения промышленном предприятии. Для серийного производства ВИРД требуется обычное механическое оборудование – штампы для изготовления шихтованных сердечников статора и ротора, токарные и фрезерные станки для обработки валов и корпусных деталей. Трудоемкие и сложные в технологическом отношении операции, например изготовление коллектора и щеток коллекторного электродвигателя или заливка клетки ротора асинхронного двигателя, здесь отсутствуют. По предварительным оценкам трудоемкость изготовления ЭМП вентильного реактивного электродвигателя составляет на 70 % меньше трудоемкости изготовления коллекторного и на 40 % меньше трудоемкости изготовления асинхронного электродвигателя;

– *гибкость компоновки*. Простота обмотки якоря и отсутствие обмотки и магнитов на роторе обеспечивает ВИРД высокую гибкость

компоновки

**Проблема.** Проблема расчета магнитного поля ВИРД заключается в том, что невозможно получить значение электромагнитного момента традиционными методами расчета поля. На данном этапе необходимо сначала задаваться значением момента, а потом проверять его либо с помощью системы дифференциальных уравнений, либо с помощью моделирования магнитного поля в программных продуктах типа ELCUT, FEMM, ANSYS.

Магнитное поле в пусковом режиме ВИРД является нестационарным и плоскопараллельным при допущении о невлинии магнитных полей лобовых частей обмоток на величину момента. Для решения подобных задач целесообразно использовать программный пакет FEMM.

Исходными данными для расчета магнитного поля в ВИРД являются: геометрические размеры поперечного сечения электрической машины; граничные условия на внешней границе модели и на внутренних границах раздела сред; магнитные и электрические свойства материалов и сред; взаимное расположение осей зубцов статора и ротора, способ включения обмоток и величина плотности тока в катушке.

При моделировании магнитных полей ВИРД применяется разномименное включение соседних катушечных обмоток по расточке статора. Из катушечных обмоток формируются фазные обмотки. Количество одновременно работающих фаз определяется вентильным коммутатором ВИРД. Одновременно может подключаться как одна фаза, так и две. Гипотетическим случаем является включение сразу всех фаз – в таком случае электромагнитный момент будет равен 0 при любом угловом положении ротора.

Магнитные потоки и проводимости определяются для двух фиксированных положений ротора –  $d$  и  $q$ . Величина магнитной проводимости по оси  $d$  зависит от насыщения магнитной цепи, а при известной проводимости, а также индуктивности и взаимоиндуктивности обмоток, с помощью теории цепей можно вычислить токи и момент электрического двигателя.

Если традиционная схема магнитного расчета выглядит так:

$$A \Rightarrow B \Rightarrow H \Rightarrow \left| \begin{array}{c} \Phi_J(\Theta, I) \\ F_J \end{array} \right| \Rightarrow \Lambda_J(\Theta, I) \Rightarrow L(\Theta, I) \Rightarrow \left| \begin{array}{c} M(\Theta, I) \\ W \end{array} \right|$$

то для ВИРД схему расчета рекомендуется немного изменить:

$$A \Rightarrow B \Rightarrow H \Rightarrow \left| \begin{array}{c} M(\Theta, I) \\ W \end{array} \right| \Rightarrow \left| \begin{array}{c} \Phi_J(\Theta, I) \\ F_J(\Theta, I) \end{array} \right| \Rightarrow \Lambda_J(\Theta, I) \Rightarrow L(\Theta, I).$$

### Пути решения проблемы.

*Оптимизация* параметров зубцовой зоны ВИРД выполняется по величине пускового момента, который можно определить непосредственно на основе локальных параметров магнитного поля  $B$  и  $H$ . Такой подход сокращает время моделирования и объем вычислительных операций.

После определения локальных параметров магнитного поля в каждой точке внутреннего пространства можно вычислить момент, действующий на статор или ротор, при фиксированном взаимном угловом положении статора и ротора. Для получения распределения момента по углу поворота ротора необходимо выполнить серию расчетов при различных угловых положениях ротора в пределах зубцового деления. Полученная зависимость  $M=f(\theta)$  является кривой синхронизирующего момента.

Математическое описание электромагнитных полей основывается на уравнениях Максвелла, которые отображают общие закономерности, присущие электромагнитному полю в определенной среде и записываются в терминах векторного анализа:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= J + \frac{dD}{dt}, & \operatorname{rot} E &= -\frac{dB}{dt}, \\ \operatorname{div} B &= 0, & \operatorname{div} D &= p \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E = E(x, y, z, t)$  – напряженность электрического поля,  $D = D(x, y, z, t)$  – электрическая индукция,  $H = H(x, y, z, t)$  – напряженность магнитного поля,  $B = B(x, y, z, t)$  – магнитная индукция,  $J$  – объемная плотность тока проводимости,  $p$  – удельное электрическое сопротивление среды, функция  $dD/dt$  – плотность тока смещения. Векторы напряженности и индукции являются функциями координат и времени.

Своеобразие и физическое представление магнитного поля ВИРД зависят от геометрической конфигурации зубцовой зоны, граничных и начальных условий на линии раздела сред и источников поля. Начальные условия определяются в пределах внутреннего объема двигателя, а граничные – на граничной поверхности, окружающей двигатель.

*Применение численно-полевых методов расчета.* Как следует из вышеприведенного анализа, для расчета магнитного поля рекомендуется применять численно-полевые методы расчета, на базе которых проводить коррекцию электромагнитного момента. Сетка конечных элементов должна быть неоднородной, с достаточно мелким шагом в местах, где магнитное поле изменяется особенно сильно.

**Список литературы:** 1. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные

*ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПИ". 2010. № 55*

двигатели. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ "Электроприбор", 2003. – 148с. 2. *Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А.* Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. 3. *Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А.* Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1970.



**Малєєв Олексій Михайлович**, магістр. Захистив диплом бакалавра за спеціальністю інженера-електромеханіка в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, в 2009 р. Працював на кафедрі "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2009 р. по березень 2010. Зараз працює інженером-конструктором 2КО АО СКБ Укрелектромаш.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами електромагнітного розрахунку ВИРД, та розрахунком магнітних полів за допомогою ЕОМ.



**Егоров Борис Олексійович**, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера та дисертацію кандидата технічних наук в Харківському Політехнічному Інституті за фахом електричні машини відповідно у 1968, 1975 р. У 1980 отримав ступінь доцента. Працює на кафедрі "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 1968 р.

Наукові інтереси пов'язані з застосуванням комп'ютерної техніки у покращенні параметрів машин постійного струму та з розрахунком за допомогою ЕОМ магнітних полів.

*Поступила в редколлегию 18.10.2010*