

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

С.А. Ганджа

(Южно-Уральский государственный университет)

*Разработан программный комплекс оптимального проектирования вентильных электрических машин с аксиальным зазором, в котором используется многоуровневая оптимизация для широкого класса конструктивных модификаций. Комплекс ориентирован на сквозную технологию проектирования.*

**Ключевые слова:** вентильный электропривод, вентильные машины с аксиальным зазором, многоуровневая оптимизация, сквозная технология.

### Введение

Электроприводы малой и средней мощности на базе вентильных электрических машин широко используются как в системах общепромышленного применения, так и в изделиях специального назначения (космос, медицина, робототехника, вооружение). Традиционно для этих целей используются вентильные электрические машины с радиальным магнитным потоком. Это объясняется хорошими удельными энергетическими показателями этих электрических машин, отлаженной технологией их производства.

В последнее время для этих электроприводов всё чаще применяются вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком (ВМАП). Эти электрические машины активно развиваются, и можно говорить о формировании нового класса вентильных электроприводов, конкурирующих с традиционными вентильными электроприводами. Идёт процесс перехода от проектирования единичных изделий к разработке промышленного ряда электрических машин этого типа.

Объяснить активное использование электрических машин этого класса можно следующими причинами:

- в настоящее время интенсивное развитие получило промышленное производство мощных магнитов с большими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы, что позволило сконцентрировать энергию магнитного поля в малых объёмах и уменьшить габариты электромеханических устройств;

- современное развитие вычислительных средств и специального программного обеспечения позволяет оптимизировать геометрию ВМАП для эффективного использования занимаемого ими объёма. При этом оптимально спроектированные ВМАП в условиях ограничения габарита вдоль оси вращения могут иметь лучшие удельные массогабаритные и энергетические показатели по сравнению с радиальными электрическими машинами;

- современные технологии позволяют сделать ВМАП экономичными при производстве и надёжными в эксплуатации.

Следует отметить, что, несмотря на острую необходимость практического внедрения, теоретические исследования по анализу и синтезу электрических машин этого класса носят эпизодический, разрозненный характер. Как правило, разработчики анализируют только одну конструкцию для специального привода. Результаты этих исследований достаточно сложно использовать при проектировании другой конструкции. Оптимизации подвергаются только отдельные узлы и детали, например, статор или ротор. Не в полной мере изучено влияние электронного коммутатора на электромеханическую часть. Методики проектирования слабо ориентированы на разработку систем автоматизированного проектирования и так называемую сквозную технологию с минимальным объёмом документооборота в твёрдых копиях.

Существующее противоречие между практической потребностью во внедрении и недостаточно развитой теорией анализа и синтеза является основным источником дальнейшего развития электрических машин этого класса, что определяет актуальность научных исследований в этой области.

### Постановка задачи оптимального проектирования ВМАП

Сформулируем основные требования к системе автоматизированного проектирования ВМАП.

Во-первых, такая система должна включать все основные конструктивные исполнения этих электрических машин. Конструктивные модификации ВМАП достаточно подробно описаны в [1, 2].

Условно назовём реализацию этих возможностей системы проектирования «развитием по горизонтали».

Во-вторых, при определении оптимальной геометрии ВМАП в систему проектирования необходимо ввести различные уровни оптимизации. В классической постановке задача однокритериальной оптимизации формулируется следующим образом: для заданных констант и ограничений необходимо выбрать независимые переменные таким образом, чтобы показатель качества имел минимальное

или максимальное значение. Как правило, независимыми переменными являются размеры, которые однозначно определяют геометрию изделия. Если при поиске оптимума изменяются все независимые переменные, то решается самая сложная задача полной габаритной оптимизации. Но достаточно часто возникают проектные ситуации, при которых некоторые размеры или группа размеров должны быть фиксированными. Например заданы наружный или внутренний диаметр, заданы габариты. При этих проектных ситуациях мы имеем уровни частичной оптимизации. Из практики проектирования ВМАП можно выделить следующие уровни:

- полная оптимизация (варьируются все независимые переменные);
- оптимизация при фиксированном числе пар полюсов;
- оптимизация при фиксированном наружном диаметре;
- оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре;
- оптимизация при фиксированной наружной длине;
- оптимизация при фиксированном наружном и внутреннем диаметрах;
- оптимизация при фиксированных габаритах;
- оптимизация при заданных размерах магнита.

Крайний случай при фиксации всех независимых переменных приводит к поверочному расчёту, который вписывается в систему оптимизации как последний уровень.

Возможность реализации различных уровней оптимизации условно назовём «развитием по вертикали».

Совмещение большого количества конструктивных модификаций с возможностью оптимизации по различным уровням позволяет создавать обширную проектную область.

В-третьих, система проектирования должна позволять реализовывать подробное исследование ВМАП. Необходим анализ электромагнитного поля. Очень важна оценка теплового состояния ВМАП,

так как эти электрические машины имеют затруднённый отвод тепла от обмотки якоря, что может привести к её недопустимому перегреву и размагничиванию постоянных магнитов. Необходимо построение трёхмерного объёмного изображения спроектированного изделия. Для комплексного подхода к проектированию привода необходим анализ схмотехнических решений.

Следует отметить, что в инженерной практике существуют профессиональные программные средства, которые могут решить перечисленные выше задачи анализа. Они могут быть включены в систему как готовые блоки, адаптированные к результатам многоуровневой оптимизации.

Разработка программного комплекса, реализующего названные требования, является главной задачей представленного научного исследования.

### Программный комплекс

Нами разработан программный комплекс оптимального проектирования ВМАП в среде Delphi. Программный комплекс включает в себя 16 уровней оптимизации для 28 конструктивных исполнений, охватывая тем самым 448 проектных ситуаций.

В программный комплекс включены следующие готовые проектные системы:

- Ansys – для расчёта магнитных и тепловых полей;
- SolidWorks – для трёхмерного твердотельного проектирования;
- MicroCap – для анализа схмотехнических решений.

Для анализа магнитного поля выбран метод векторного магнитного потенциала. Построение модели, задание свойств объёмам, разбиение на конечные элементы, задание граничных условий и решение производятся в автоматизированном режиме при помощи встроенного в программу Ansys языка APDL. Результаты расчёта магнитного поля для различных моделей приведены на рис. 1.

Для оценки теплового состояния используется

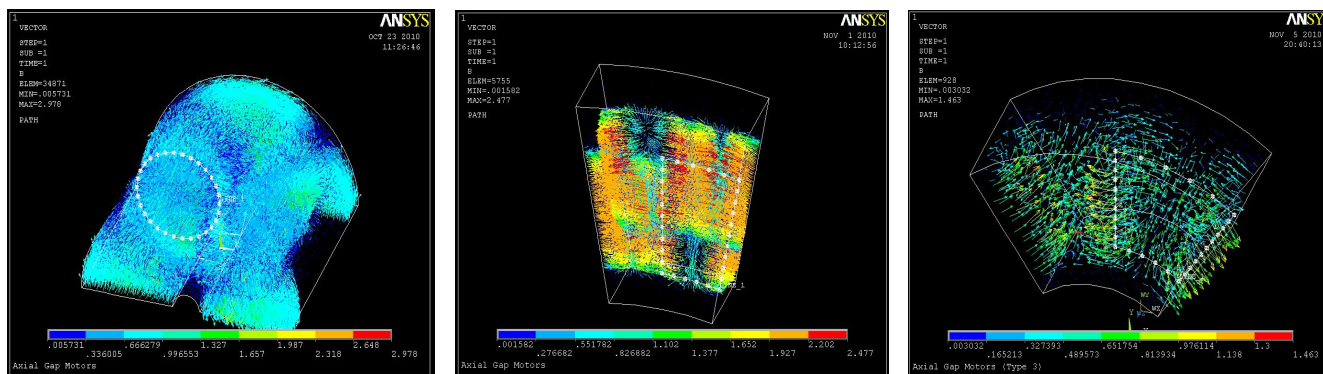


Рис. 1. Результаты расчёта магнитного поля

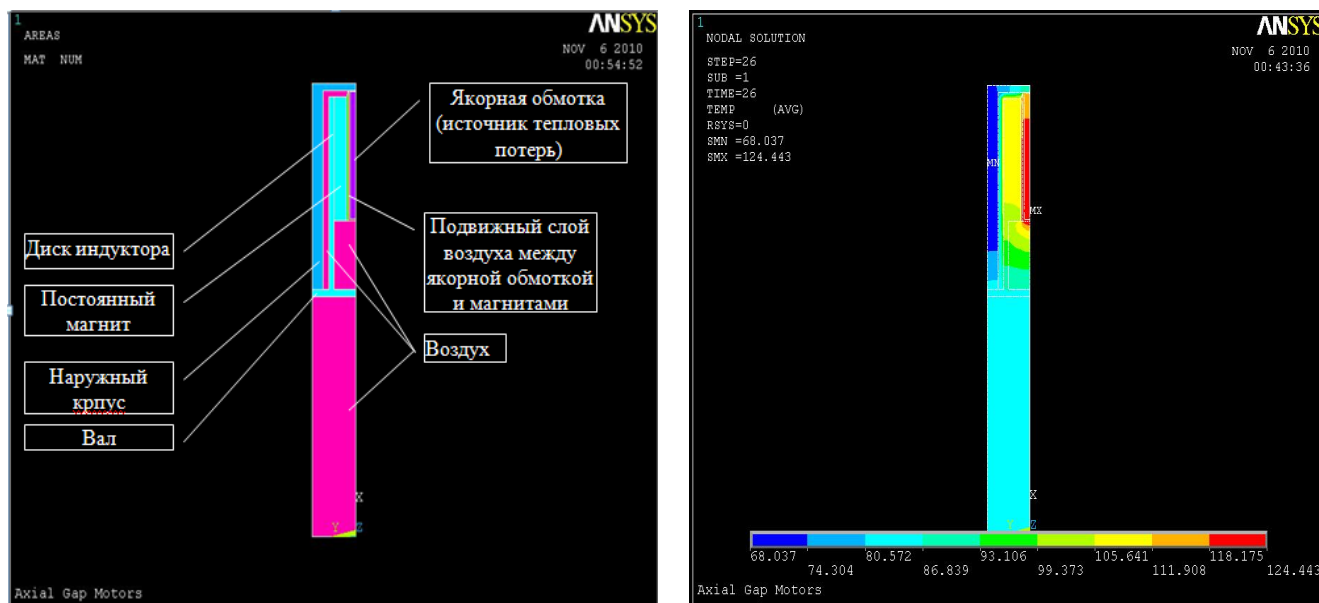


Рис. 2. Расчётная тепловая модель и поле температур ВМАП

метод конечных элементов с применением программного пакета Ansys. Анализ для всех моделей проводится по одной плоской тепловой модели. Генерация тепловой модели, разбиение на конечные элементы, задание тепловых нагрузок, граничных условий и решение в программе Ansys проводятся автоматически по исходным данным, которые передаются из основной программы. Фрагменты результатов теплового расчёта одного из проектов приведены на рис. 2.

Одной из наиболее важных составляющих анализа ВМАП является визуализация геометрии, полученная в результате многоуровневой оптимизации. Построение трёхмерных твердотельных моделей выполняет две основные функции. С одной стороны, оно позволяет опытному разработчику обнаружить явные ошибки и оценить качество оптимизации геометрии. С другой стороны, построение этих моделей может являться промежуточным этапом в технологической цепи сквозного проектирования.

Для построения трёхмерных моделей используется программа Borland Delphi, в которую введены

командные процедуры для графической среды SolidWorks. В качестве исходных данных построения принимаются геометрические размеры, полученные в результате многоуровневой оптимизации. Фрагменты построения трёхмерных моделей представлены на рис. 3.

Для анализа схмотехнических решений использован программный комплекс MicroCap. Включение MicroCap в процедуру проектирования позволяет повысить качество анализа и сделать его комплексным с учётом взаимного влияния электроники и электрической машины.

Программный комплекс ориентирован на сквозную технологию разработки ВМАП и может в качестве составной системы быть включён в систему автоматизированного проектирования более высокого уровня [4 – 6].

Система проектирования является открытой и позволяет как дорабатывать её структуру, так и постоянно её совершенствовать.

Практика эксплуатации программного пакета при реализации конкретных проектов показала, что

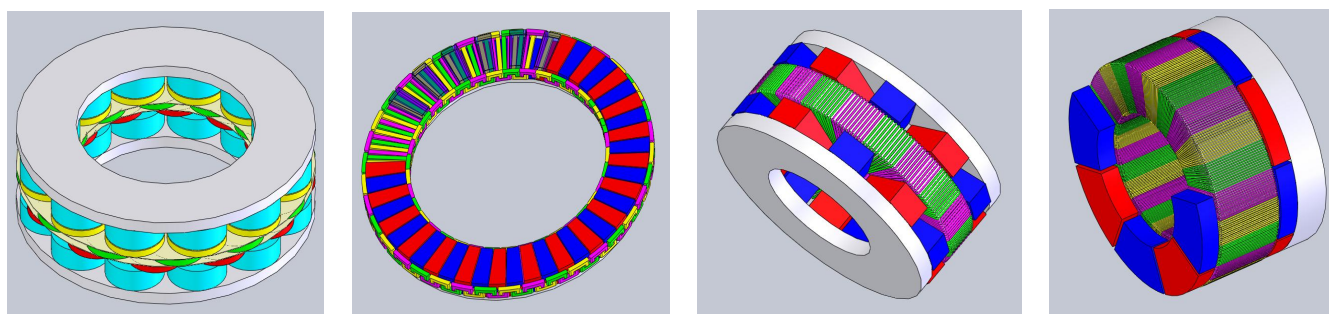


Рис. 3. Трёхмерные твердотельные модели, построенные в SolidWorks автоматизированным способом

он в полной мере удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям по гибкости, универсальности и точности расчёта.

Программный комплекс прошел апробацию при разработке около двадцати проектов. Среди них:

1. Проект «Мобильная группа дистанционного наблюдения». Одной из технических задач при реализации проекта была разработка бортового питания беспилотного летательного аппарата на базе электрогенератора, работающего от тягового двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Заказчиком проекта выступило ЗАО «Кыштымский радиозавод».

2. Проект «Генератор для ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения». Задача проекта заключалась в разработке серии электрических генераторов для ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения мощностью 1,0 – 30 кВт. Заказчиком проекта выступила американская корпорация Empire Magnetics Inc. Непосредственным исполнителем проекта было научно-производственное предприятие ООО «ГРЦ – Вертикаль». По проекту был изготовлен ряд ветроэнергетических установок с применением описанного программного комплекса.

3. Проект «Интегрированный малогабаритный высокомоментный привод». Основная цель проекта заключалась в разработке мотор-редуктора с большим удельным крутящим моментом при малой массе и габаритах. Заказчиком данного проекта является ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет». Непосредственным исполнителем проекта было ООО «Научно-производственное предприятие «Привод».

Все проекты получили гранты по линии Фонда содействия развитию малого и среднего бизнеса в научно-технической сфере по Уральскому федеральному округу.

Изделия, разработанные с применением программного комплекса, показали хорошую сходимость результатов расчёта и эксперимента [2]. Применение разработанных программ позволило резко сократить число циклов моделирования макетных и опытных образцов.

### Заключение

1. Программный комплекс оптимального проектирования ВМАП охватывает широкий круг проектных ситуаций, что позволяет на его базе создать систему автоматизированного проектирования электрических машин этого класса.

2. Разработанный программный комплекс является открытым для изменения и совершенствования его структуры.

3. Подключение к пакету программ SolidWorks, Ansys и MicroCap позволяет комплексно решать задачу проектирования ВМАП, что создает хороший задел для сквозного проектирования.

### Литературы

1. Вильданов К. Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального исполнения: дис. ... док. техн. наук. 05.09.01 / К. Я. Вильданов. – М., 2000. – 453 с.

2. Ганджа С. А. Вентильные электрические машины постоянного тока с аксиальным зазором. Анализ и синтез / С. А. Ганджа // Сборник трудов пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEMGmbH, 21 – 22 апреля 2005 г. – М., 2005. – С. 372 – 376.

3. Ганджа С. А. Применение программного комплекса Ansys для анализа вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным зазором / С. А. Ганджа, М. С. Свиридов, А. А. Бедкер // Сборник трудов шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD\_FEMGmbH (20 – 21 апреля 2006 г.). – М., 2006. – С. 361 – 363.

4. Евгеньев Г. Б. Case-технология создания многоагентных САПР изделий машиностроения / Г. Б. Евгеньев [и др.] // Труды Международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» и «Интеллектуальные САПР». – Т. 2. – М.: Физматлит, 2003. – С. 41 – 46.

5. Казаков Ю. Б. Комплексная автоматизированная система исследования двигателей постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. – 1995. – № 4. – С. 21 – 24.

6. Кобелев А. С. Новые функции интеллектуальной САПР асинхронных электродвигателей версии «AED\_AIS 2.0» / А. С. Кобелев // ЭЛМАШ-2006 : Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. / Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2 – 6 октября 2006 г. – М., 2006. – Т. 2. – С. 43 – 49.

Поступила в редакцию 25.11.2012

*Сергей Анатольевич Ганджа, канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханики и электромеханических систем Южно-Уральского государственного университета, т. (908) 812-58-19, e-mail:gandja\_sa@mail.ru.*