

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН С АКСИАЛЬНЫМ ЗАЗОРОМ

С.А. Ганджа
г. Челябинск, ЮУрГУ

Описан программный пакет проектирования вентильных электрических машин с аксиальным зазором, в котором для анализа используется метод конечных элементов, для синтеза – многоуровневая оптимизация.

Вентильные машины с аксиальным зазором (ВМАЗ) в последнее время начали интенсивно развиваться в связи с промышленным освоением постоянных магнитов на основе высококоэрцитивных материалов типа самарий–кобальт, неодим–железо–бор.

Рынок предъявляет ряд требований к ВМАЗ, которые должны быть учтены при разработке, как самих изделий, так и систем их проектирования. Среди них: большое количество конструктивных модификаций, необходимость сокращения сроков и циклов проектирования при возрастающем требовании к качеству изделий, сокращение стоимости, как самого изделия, так и работ, связанных с его разработкой и производством. Эти противоречивые требования можно выполнить, если разработать систему автоматизированного проектирования (САПР) ВМАЗ с ориентацией на, так называемые, сквозные технологии. Поэтому разработки в этом направлении являются актуальными и представляют научный интерес и практическую значимость.

Большое количество конструктивных модификаций ВМАЗ можно классифицировать по форме активных элементов, создающих электромагнитный момент. По форме постоянных магнитов

различают ЭМАЗ с цилиндрическими, призматическими и сегментными магнитами. Фазные катушки ЭМАЗ могут иметь кольцевую, трапециевидную, волновую и тороидальную формы. Кольцевые фазные катушки могут быть диамагнитными (без каркаса с заливкой компаундом) или могут быть намотаны на магнитный сердечник.

Классификация конструкций ЭМАЗ представлена на рис. 1.

Следует отметить, что большое количество различных конструкций является не единственной трудностью при разработке программных средств проектирования ВМАЗ. Часто оптимальный, с точки зрения математической постановки задачи, вариант является неприемлемым для заказчика по причине ограничений габаритов, использования уже имеющихся заделов по комплектующим (например, по размерам постоянных магнитов), ограниченных возможностей собственного производства. Поэтому программы оптимизации ВМАЗ должны включать в себя как большое количество конструктивных модификаций и используемых материалов (назовем это требование развитием «по горизонтали»), так и различные уровни габаритной оптимизации (назовем это требование развитием «по вертикали»).



Рис. 1

Задачу проектирования ВМАЗ можно разбить на две взаимосвязанные задачи: анализ, то есть разработки методики поверочного расчета, при которой полностью известна геометрия, и необходимо определить рабочие характеристики, и синтез, то есть разработки методики оптимального проектирования, при которой для определенных техническим заданием параметров необходимо рассчитать геометрию.

Известно, что качество решения задачи анализа зависит от точности расчета магнитного поля в электрической машине.

Применительно к анализу ВМАЗ были опробованы различные методики расчета поля [1–3], но положительный результат, не смотря на сложность реализации, дали методики, основанные на методе конечных элементов (МКЭ).

Выделим основные преимущества МКЭ по сравнению с другими методами расчета магнитного поля:

- возможность рассчитывать магнитные системы практически любой геометрии;
- возможность закладывать свойства любых материалов для постоянных магнитов, электротехнических и конструкционных сталей и для якорных обмоток;
- возможность анализировать магнитное состояние как всей системы, так и отдельных ее элементов;
- возможность решать связанные задачи, например расчет электромагнитного и теплового поля;
- хорошая сходимость расчета с результатами тестирования.

Сложность реализации этого метода компенсируется постоянно возрастающими возможностями вычислительной техники, наличием специальных отработанных лицензионных программ для реализации этого метода.

После определения параметров магнитного поля (индукции, магнитного потока, потокосцепления), расчет рабочих характеристик производится по традиционным методикам с использованием схем замещения.

Экспериментальное исследование опытного образца вентильного генератора с параметрами 350 Вт, 24 В, 3500 об/мин на холостом ходу и под нагрузкой показала погрешность расчета по индукции в воздушном зазоре около 5 %, по ЭДС вращения порядка 9 %, по выходной мощности порядка 8 %, по КПД порядка 5 %.

Таким образом, сочетание конечно-элементного анализа магнитного поля с классическими методиками с использованием схем замещения позволяют качественно решить задачу анализа ВМАЗ.

Задача оптимального проектирования ВМАЗ (задача синтеза) была поставлена в классической формулировке [4]: для заданных параметров (конкретного исполнения, материалов, исходных данных технического задания), при технологических ограничениях (минимально и максимально возможных размерах магнита, проводника), делая перебор независимых переменных по определенному алгоритму, определить геометрию, которая обеспечивала бы минимальное значение конкретного выбранного критерия.

Блок-схема алгоритма оптимального проектирования представлена на рис. 2. Она была по-



Рис. 2

ложена в основу пакета программ оптимального проектирования ВМАЗ.

Основным принципом, заложенным в программу, является максимальная гибкость, которая позволяет охватить различные проектные ситуации.

С одной стороны, в программу введены различные конструктивные модификации ВМАЗ. Общее число их при разных сочетаниях типов моделей, формы магнита и проводника составляет 10 вариантов. В базу по магнитам заложены различные материалы, включая керамику, магнитопласты, самарий–кобальт, неодим–железо–бор. База материалов имеет возможность пополняться. В базу по проводникам заложены удельные сопротивления меди, алюминия, а также для исследовательских целей, серебра и железа. Программа позволяет рассчитывать генераторный и двигательный режимы работы. Включение различных модификаций развивает пакет оптимизации «по горизонтали».

С другой стороны, в пакете реализована, так называемая, многоуровневая оптимизация: от полной оптимизации без фиксации основных геометрических размеров, через частные оптимизации с фиксацией некоторых размеров до поверочного расчета, при котором вся геометрия задана. Всего таких уровней в программе 6:

- полная габаритная оптимизация;
- габаритная оптимизация при фиксированном числе полюсов;
- оптимизация при фиксированном наружном диаметре;
- оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре;
- оптимизация при фиксированном наружном и внутреннем диаметре;
- оптимизация при заданных размерах постоянного магнита.

Возможность выбора различных уровней оптимизации развивает пакет оптимизации «по вертикали».

В качестве критериев оптимальности выбраны следующие показатели качества:

- минимальная масса активных частей;
- минимальный объем активных частей;
- минимальная масса постоянного магнита;
- минимальная масса обмотки;

– минимальная суммарная стоимость постоянных магнитов и обмотки.

В качестве констант в программе фигурируют данные технического задания и, в зависимости от уровня оптимизации, фиксированные геометрические размеры.

В качестве ограничений выступают требования по технологическим размерам и максимально допустимая плотность тока.

В качестве метода оптимального перебора независимых переменных выбран метод покоординатного спуска в сочетании с методом Фибоначчи и методом штрафных функций.

Процесс оптимального проектирования ВМАЗ, как правило, осуществляется по следующему алгоритму. Разработчик в соответствии с особенностями ТЗ и на основании своего конструкторского опыта предварительно выбирает материал для магнитов, обмотки, форму проводника, магнита и тип модели. Далее реализует полную габаритную оптимизацию. В процессе анализа результатов он фиксирует некоторые основные геометрические размеры и перебирает уровни частных оптимизаций. Заключительным этапом расчета является подробный поверочный расчет.

Определение оптимальной геометрии активных элементов ВМАЗ позволяет перейти к следующему шагу сквозного проектирования: решению связанной задачи анализа магнитных и тепловых полей. Этот этап в технологической цепочке необходим для повышения качества проектирования и сокращения циклов макетирования. Для реализации этого этапа необходимо построить трехмерную модель ВМАЗ. Визуализация результатов расчета в виде трехмерных моделей позволяет опытному разработчику уже на этом этапе оценить качество работы программы оптимизации.

Построение трехмерных моделей ВМАЗ в программном комплексе осуществляется в формате Solidworks в автоматическом режиме. Примеры построения трехмерных моделей ВМАЗ различных конструкций приведены на рис. 3–5.

На рис. 3 представлена ВМАЗ с цилиндрическими магнитами и кольцевыми катушками.

На рис. 4 представлена ВМАЗ с сегментными магнитами и трапециевидными катушками.

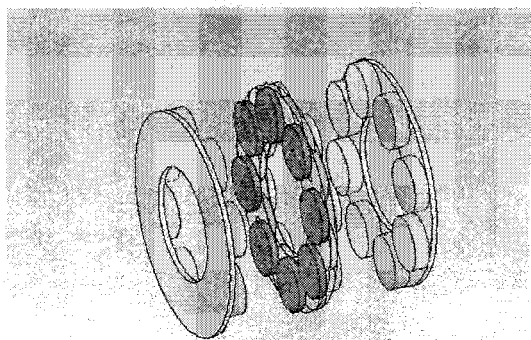


Рис. 3

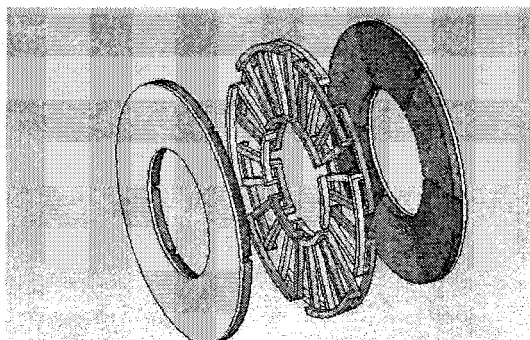


Рис. 4

На рис. 5 представлена ВМАЗ с сегментными магнитами и тороидальными катушками.

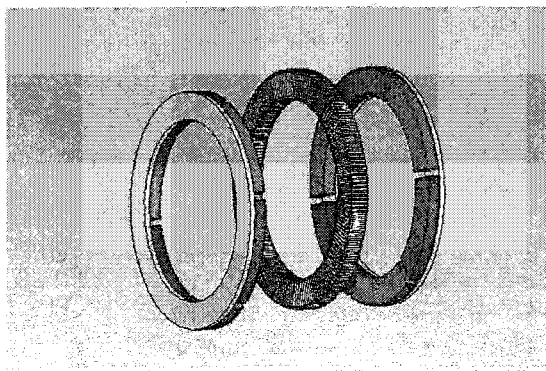


Рис. 5

Построенные автоматизированным способом трехмерные модели значительно облегчают конструктору разработку конкретного образца, не позволяя ему сделать ошибку при построении геометрии активных элементов, обеспечивающих энергетику и основные параметры электрической машины.

Для решения связанной задачи по анализу магнитных и тепловых полей в разработанном комплексе используется программа Ansys. Фрагмент анализа магнитного поля образца ВМАЗ представлен на рис. 6.

Фрагмент анализа теплового поля образца ВМАЗ представлен на рис. 7.

Особенностью анализа ВМАЗ является совместная работа его с электронным коммутатором в режиме двигателя и выпрямительным блоком в

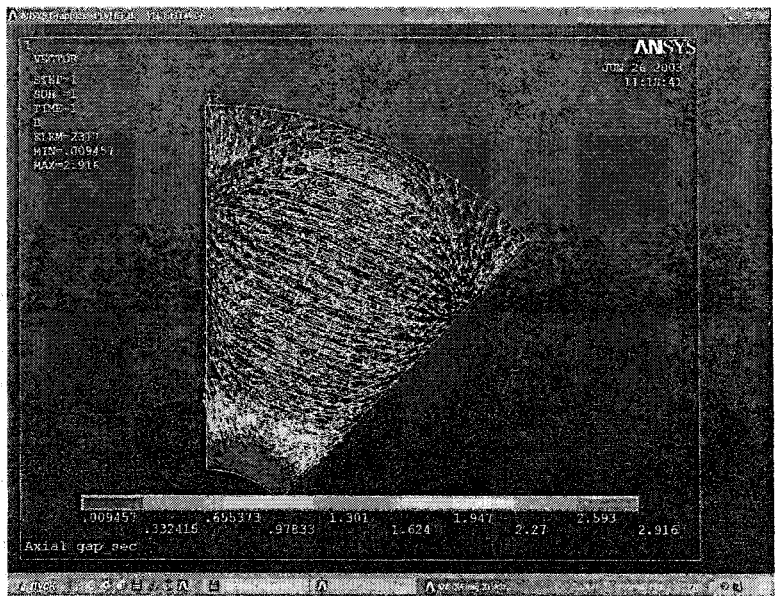
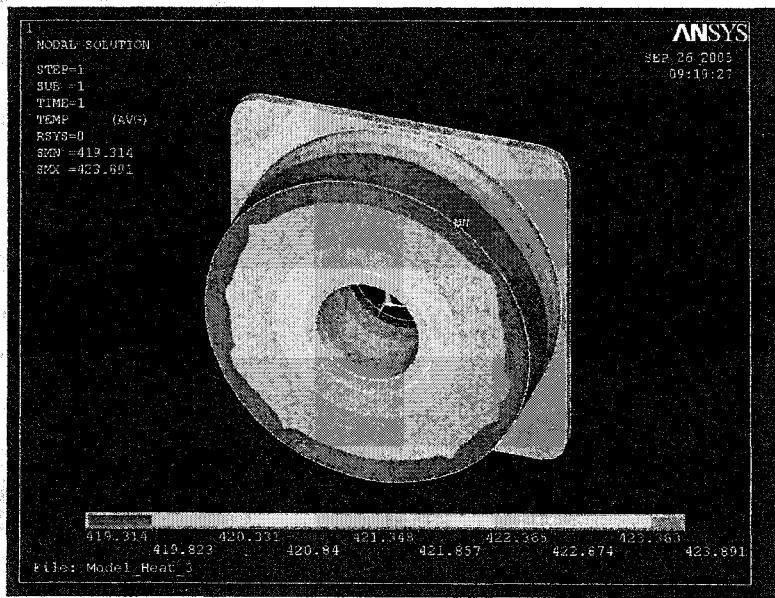


Рис. 6



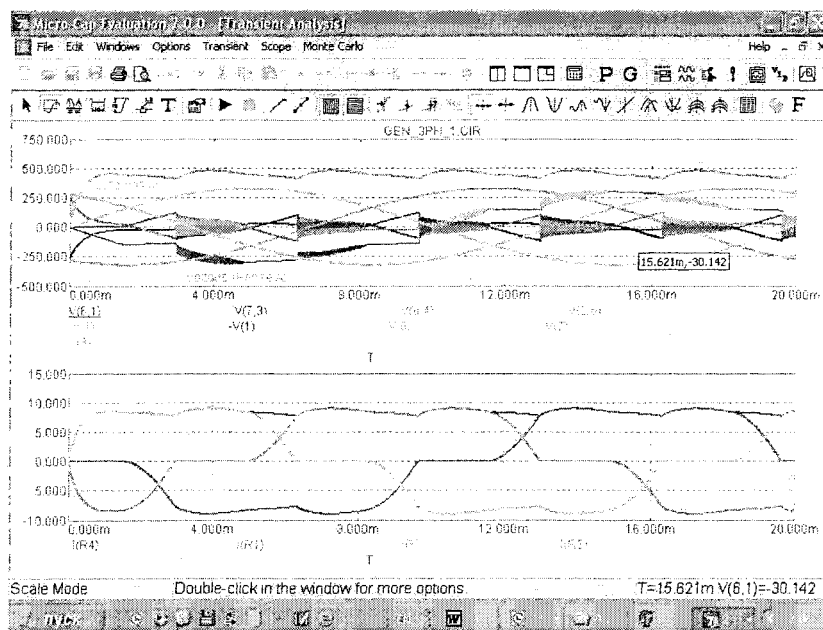


Рис. 8

режиме генератора. Электронные компоненты существенно влияют на работу ВМАЗ в плане обеспечения основных характеристик и коммутационных процессов. Учесть это влияние на этапе синтеза довольно трудоемко из-за сложности физики переходных процессов и увеличения числа независимых переменных в оптимизационных циклах. Но для анализа этих процессов, существуют хорошо отработанные профессиональные пакеты моделирования электронных схем. В описанном программном комплексе имеется процедура подключения к программе MicroCap. При этом из оптимизационной программы в программу MicroCap передается информация об ЭДС вращения в фазах. Фрагменты такого анализа представлены на рис. 8 для режима генератора, работающего на выпрямительный мост, собранный по схеме Ларионова.

Программный комплекс прошел апробацию при разработке около 20 проектов. Среди них: генератор для ветроэнергетической установки на 1 кВт и 3 кВт, стартер-генератор для самолета мониторинга окружающей среды, оптический привод для космического применения, электропривод для робототехнического устройства и другие.

Основные выводы

1. Разработанная математическая модель анализа ВМАЗ, включающая в себя сочетание

МКЭ и традиционных схем замещения, показала хорошую сходимость расчета и эксперимента.

2. Развитый как «по горизонтали», так и «по вертикали» алгоритм оптимального проектирования охватывает широкий круг проектных ситуаций.

3. Подключение к пакету программ Solidworks, Ansis и MicroCap позволяет комплексно решать задачу проектирования ВМАЗ, делая цикл проектирования практически замкнутым, что создает хороший задел для сквозного проектирования.

Литература

1. Ганджа, С.А. Применение метода граничной коллокации для расчета магнитных полей в электрических машинах/ С.А. Ганджа// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей. – Челябинск: ЧПИ, 1983.
2. Альтшуллер, И.Б. Расчет электромагнитных полей в электрических машинах/ И.Б. Альтшуллер. – М.: Энергия, 1980.
3. Зильберман, С.З. Разработка и исследование бесконтактных моментных двигателей постоянного тока. Автореферат дис. ...к.т.н./ С.З. Зильберман. – Свердловск: УПИ, 1978.
4. Геминтерн, В.И. Методы оптимального проектирования/ В.И. Геминтерн, Б.М. Каган. – М.: Энергия, 1980. – 160 с.

Ганджа Сергей Анатольевич, в 1978 г окончил Челябинский политехнический институт (ЧПИ), в 1985 г – аспирантуру (ЧПИ). С 1985 г по 2001г работал в СКБ «Ротор» и ОАО «Электромашина» в должностях ведущего инженера, начальника бюро, начальника отдела. В настоящее время работает техническим директором НИИ «Уралмет». Доцент кафедры ЭМи-ЭМС ЮУрГУ, к.т.н. Научные интересы связаны с разработкой вентильных машин постоянного тока.