

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОТОКА ДЛЯ СИНТЕЗА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

О. П. Муравлев, С. В. Леонов, Д. В. Полунин\*, В. В. Фокин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Томск, Россия

\* Северский технологический институт Национального исследовательского ядерного  
университета "МИФИ", 115409, г. Москва, Россия

УДК 621.825

Представлен способ оптимизации массогабаритных показателей электромеханического устройства при условии концентрации основного магнитного потока в пределах активной зоны магнитной системы.

**Ключевые слова:** магнитная муфта, концентрация потока, оптимизация, метод пространственных интегральных уравнений.

Our investigation covers the optimization method for mass and dimensions parameters of electromechanic device provided that the main magnetic flow concentrates within the active zone of magnetic system.

**Key words:** magnetic clutch, flow concentration, optimization, spatial integral equation method.

При проектировании электромеханических систем, содержащих высококоэрцитивные постоянные магниты, одной из основных задач является минимизация массогабаритных показателей при конструировании новых высокоэффективных магнитных систем. Согласно общепринятым современным представлениям о физике магнитных полей некоторые положения данной задачи несовместимы без исследования проблемы распределения магнитных потоков рассеяния в электромеханическом устройстве и применения нестандартных принципов построения магнитопровода, особенно в случаях синтеза малогабаритных магнитных систем.

В то же время исходные данные для проекта электромеханической системы весьма разнообразны по физическому содержанию, размерности и функциональным свойствам. Поэтому представляет интерес выяснение потенциальных возможностей исследуемого типа систем в широком диапазоне значений их линейных параметров для разнообразных конструкционных материалов. Установление наилучшего в определенном смысле варианта представляет собой задачу оптимального проектирования.

В настоящей работе описывается идея синтеза высокоэффективных электромеханических систем для решения вопросов оптимизации массогабаритных показателей и локализации основного магнитного потока в пределах активной зоны магнитной системы.

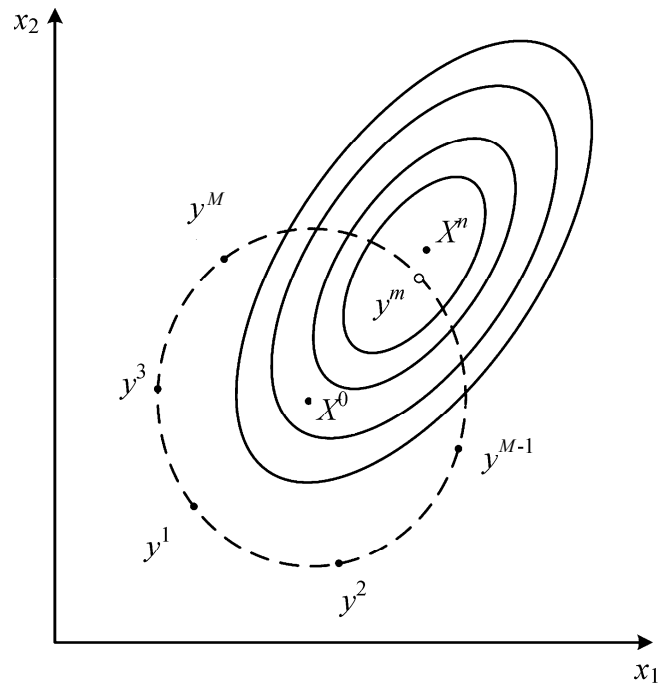


Рис. 1. Графическое представление случайного поиска

Прежде всего необходимо выбрать метод оптимизации среди апробированных в проектировании электрических машин. На данном этапе сложно провести сравнительную оценку различных способов оптимизации вследствие использования их при разработке различных типов электромеханических преобразователей для различных функций цели и ограничений. Тем не менее следует отметить, что в условиях отсутствия математического описания объекта оптимизации целесообразно использование безградиентных методов. Поэтому в данной работе используется одна из разновидностей методов случайного поиска – метод наилучшей пробы, графическая интерпретация которого представлена на рис. 1.

В оптимизационных расчетах электромеханических систем  $x^0 = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n]$  – набор  $n$  параметров, описывающих геометрию исходного варианта магнитной системы (начальный вариант);  $y^j$  – семейство новых  $M$  наборов параметров геометрии, получаемых путем использования  $M$  случайных векторов  $\xi$  размерностью  $n$  ( $\xi_n$ ).

Значения  $f(y^m)$  получаются путем сравнения результатов, найденных при вычислении критерия оптимальности для каждого набора, входящего в семейство  $y^j$ , и выбора того варианта, при котором значение целевой функции максимально.

Поскольку зависимость функции ограничения  $F_{огр}(X)$  от параметров системы является сложной и нелинейной, необходимо определить эту связь в виде некоторой математической модели, адекватность которой должна быть достаточно высокой.

Для большинства электромеханических систем с постоянными магнитами важно знать величину и закон изменения проводимости потоков рассеяния в функции положения подвижных частей магнитной системы. Такую оценку можно получить, если известна объемная картина распределения магнитных потоков в области, охватывающей магнитопровод.

Поле в электромеханическом преобразователе распределено в различных средах (магнитопровод, воздушные зазоры, электропроводящие материалы и диэлектрики и т. п.), поверхности

раздела которых имеют сложную геометрическую форму. Учитывая это, а также нелинейность свойств магнитной среды и трехмерность очертаний электрических машин, можно сделать вывод, что расчет с помощью системы Максвелла в полном объеме практически невозможен даже при использовании наиболее мощных современных ЭВМ.

За счет декомпозиции во многих случаях общая модель сводится к моделям, описываемым уравнениями Пуассона или Лапласа. Для магнитного поля в воздушном зазоре машины с неподвижной конфигурацией (решение статической задачи) уравнения имеют вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}. \quad (1)$$

Эта система положена в основу ряда численных методов, на базе которых составлены машинные программы, являющиеся коммерческим продуктом.

Следует отметить, что широко распространенные методы конечных разностей, конечных элементов, граничных элементов и т. д. обладают "избыточной универсальностью". Однако их использование, особенно для анализа электрических машин с учетом глубокого насыщения ферросред, а также принципиально объемного характера магнитных полей и неоднородности структур в аксиальном направлении, сопряжено с рядом трудностей, что приводит к затратам вычислительного времени, не соизмеримым с достигаемой точностью.

Другой подход к решению системы (1) связан с использованием закона Био – Савара, который определяет напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}_c$  в произвольной точке  $p$ , создаваемую токонесущими элементами, расположенными в объеме  $V$ :

$$\mathbf{H}_c(p) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{(\mathbf{J} \times \mathbf{r}_{qp}) dV}{|\mathbf{r}_{qp}|^3},$$

или напряженность  $\mathbf{H}_m$  в произвольной точке  $p$ , создаваемую магнитным материалом с намагниченностью  $\mathbf{M}$ , занимающим объем  $V$ :

$$\mathbf{H}_m(p) = -\frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{\mathbf{M} \times \mathbf{r}_{qp}}{|\mathbf{r}_{qp}|^3} dV.$$

Здесь  $\mathbf{r}_{qp}$  – радиус-вектор, направленный из элемента  $dV$  в точку  $p$ , в которой требуется определить  $\mathbf{H}$ .

Описанный выше подход позволяет учитывать реальное распределение тока в обмотках статора машины, нелинейные свойства ферромагнитных элементов конструкции, а также получать трехмерную картину поля в магнитной системе сложной геометрии и рассчитывать статические режимы электромеханических систем. В данной работе использован один из способов реализации второго подхода к решению (1) – метод пространственных интегральных уравнений.

При таком подходе выражение для сил, действующих на намагниченные детали, с учетом использования аппроксимации в виде кусочно-постоянных распределений векторов намагниченности по объемам ферромагнитных деталей принимает вид

$$\mathbf{F} = \mu_0 \sum_{j=1}^N \int_{S_j} (\mathbf{n}_j \mathbf{M}_j) \mathbf{H}_1 dS, \quad (2)$$

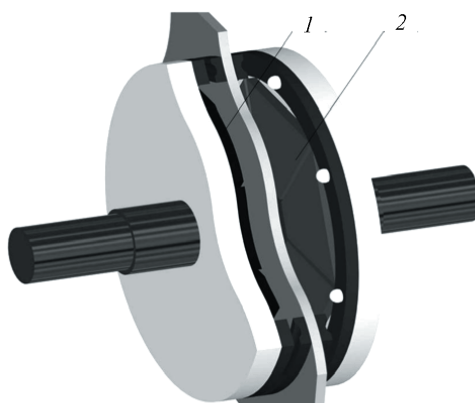


Рис. 2. Геометрия магнитной муфты:  
1 – полумуфта; 2 – полюс полумуфты

где индекс  $j$  указывает на принадлежность параметра  $j$ -му элементарному объему; суммирование проводится по  $N$  объемам, составляющим группу деталей магнитной системы;  $\mathbf{H}_1$  – напряженность поля от источников, расположенных вне поверхности  $S$ ;  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль [1, 2].

Формула (2) имеет простую структуру, однако алгоритм расчета предусматривает интегрирование по всем ограничивающим элементарные объемы поверхностям функций напряженности или индукции магнитного поля, которые в свою очередь также вычисляются по интегральным формулам.

Формальный прием, позволяющий получить выражения для усилий (моментов) через параметры поля, состоит во введении вспомогательных поверхностей, разделяющих взаимодействующие группы деталей магнитной системы, на которых помещаются фиктивные источники поля.

Метод разделения области взаимодействия основан на выводах теории потенциала и интегральных законах векторного анализа, в частности на теореме Грина, связывающей объемные интегралы по области  $V$  и поверхностные интегралы по границе  $S_r$  этой области.

Разработанный комплекс (пакет программ) проектирования электромеханических устройств состоит из расчетных исполняемых модулей и программы интерфейсной оболочки, обслуживающей эти модули. Существенная особенность пакета – современный интуитивно понятный интерфейс (сходный с интерфейсами аналогичных по назначению программ) и стандартная последовательность действий. Контекстно-зависимое меню значительно упрощает взаимодействие с программой.

В качестве примера рассмотрим конструкцию герметичной магнитной муфты. Для повышения эффективности магнитной системы в конструкции применяется полумуфта с призматическими магнитами с тангенциальным намагничиванием, поскольку такое расположение магнитов позволяет получить концентрацию магнитного потока и, следовательно, увеличить момент электромеханического устройства (рис. 2).

Магнитная система герметичной муфты содержит тангенциально расположенные постоянные магниты, которые размещены по радиусу и внутренними торцами примыкают к немагнитной втулке, а внешними – к немагнитным вставкам внешнего сварного цилиндра, содержащего

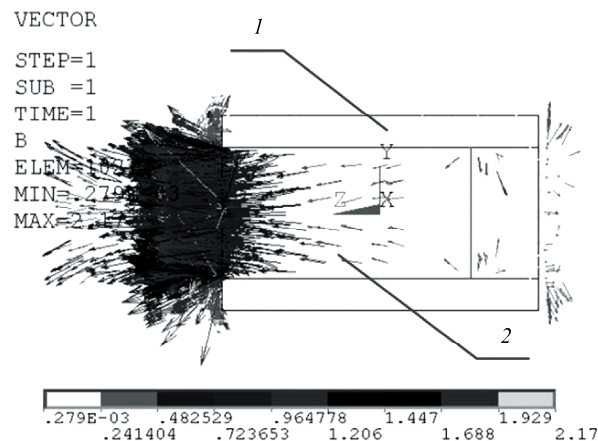


Рис. 3. Концентрация магнитного потока в основании полюса магнитной муфты:  
 1 – постоянный магнит; 2 – магнитомягкий ферромагнетик

также магнитомягкие полюсы в зонах концентрации магнитного потока. Для герметизации в воздушном зазоре магнитной муфты установлен экран из немагнитного материала. Такая конструкция магнитной муфты позволяет получить рабочую индукцию в зазоре  $B_\delta$  не меньше индукции на поверхности магнита [3]. Это позволяет повысить энергоэффективность магнитной системы, особенно при использовании высококоэрцитивных постоянных магнитов.

С помощью созданной компьютерной модели выполнено теоретическое исследование, влияния геометрии и свойств материалов на эффективность концентрации магнитного потока.

На рис. 3 приведено распределение индукции магнитного поля вдоль активной части полюсной системы полумуфты. На основе исследований различных конфигураций геометрии полюса полумуфты можно сделать следующие выводы:

- 1) применение принципов концентрации магнитного потока позволяет существенно увеличить (более чем на 50 %) индукцию магнитного поля в воздушном зазоре, а значит, и интегральные характеристики магнитной системы;
- 2) неравномерное распределение индукции вдоль полюса (большие значения в области основания полюса и меньшие в области ярма полумуфты) определяет задачу выбора эффективной геометрии с максимальными магнитными характеристиками;
- 3) необходимо в целом определить рациональность применения ярма, так как согласно рис. 3 магнитное поле в данном элементе магнитной системы практически отсутствует.

В результате расчета получены зависимости момента муфты от геометрических характеристик магнитной системы. На рис. 4 приведена зависимость момента двигателя  $M_d$  от коэффициента формы полюса  $K_z$  и высоты постоянного магнита  $w_0$ . При этом значение коэффициента формы полюса характеризует отношение высоты полюса полумуфты к его ширине.

На рис. 5 приведен график момента герметичной магнитной муфты  $M_d$  при различных значениях внешнего диаметра  $D$ .

Проведен уточняющий расчет характеристик герметичной магнитной муфты для трех основных типоразмеров исполнительных механизмов. Найдены наиболее эффективные значения геометрических характеристик полюсной системы для получения максимального момента на валу электрической машины.

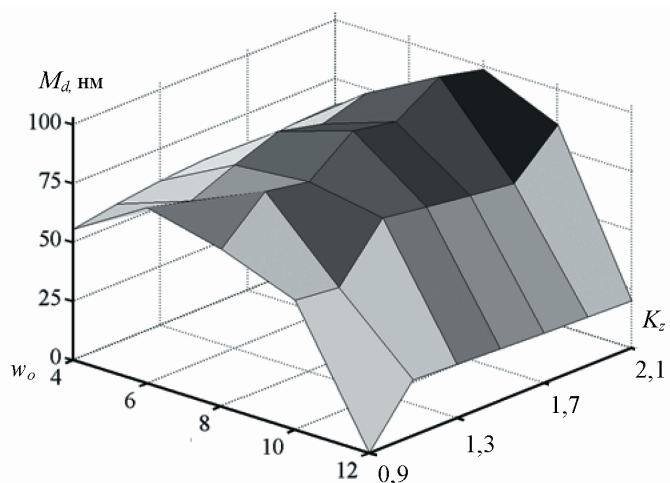


Рис. 4. Оптимизация характеристик магнитной муфты

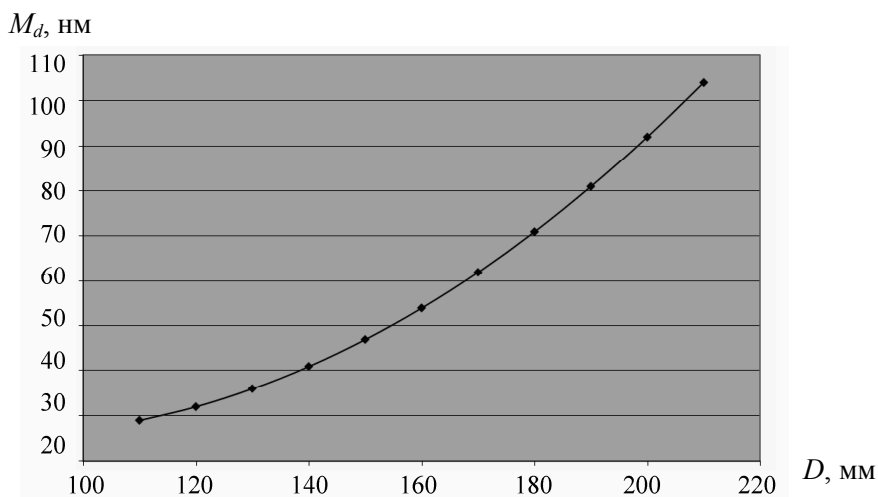


Рис. 5. Электромагнитный момент при изменении внешнего диаметра муфты

В заключение необходимо отметить, что результаты теоретических исследований подтверждены экспериментом. На рис. 5 приведены полученные характеристики для магнитной муфты диаметром 200 мм и максимального крутящего момента, равного 92 нм.

#### Список литературы

1. ЛЕОНОВ С. В., МУРАВЛЕВ О. П., КАЛАЕВ В. Е. и др. Вопросы исследования трехмерного магнитного поля электрических машин с аксиальным магнитным потоком // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 5. С. 8–12.
2. ЛЕОНОВ С. В., МУРАВЛЕВ О. П., ФЕДЯНИН А. Л. и др. Исследование герметичной синхронной машины дискового типа // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 23–25.
3. БУТ Д. А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1990.

*Муравлев Олег Павлович – д-р техн. наук, проф.*

*Томского политехнического университета; e-mail: tor@tpu.ru;*

*Леонов Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доц.*

*Томского политехнического университета; e-mail: Leonov@tpu.ru;*

*Полунин Дмитрий Владимирович – преп. Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"; e-mail: polynin@sibmail.com;*

*Фокин Владимир Васильевич – асп. Томского политехнического университета*

Дата поступления – 05.10.12 г.