

Крячок А. С.,
Красноголовец А. Н.**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Разработана математическая модель для расчета параметров магнитного поля в рабочей зоне электрического двигателя. Магнитная система двигателя содержит полюсные наконечники. На базе математической модели разработан расчетный алгоритм и программное обеспечение. Расчетный алгоритм базируется на аналитических методах решения прямой задачи магнито-статики с использованием метода «вторичных источников». Проведен ряд экспериментов по моделированию магнитного поля в рабочей зоне двигателя.

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм, электрический двигатель, расчет магнитного поля.

1. Введение

Современные требования к высокой эффективности и надежности электрических двигателей обуславливают применение более точных методов (математических моделей и алгоритмов) расчета. Известно, что выходные характеристики электрических машин определяются параметрами магнитной системы. А расчет магнитной цепи таких устройств сложен и, в ряде случаев, приближен, поскольку она (магнитная цепь) содержит участки с разной магнитной проводимостью.

Разработка математических моделей для расчета магнитных цепей сложной (не канонической) формы является актуальной задачей, поскольку позволяет создавать САПР электрических машин.

В связи с этим в статье рассматривается подход к решению прикладной инженерной задачи по расчету магнитной цепи с применением более точной математической модели, которая реализована в виде специализированного программного обеспечения.

2. Объект, цель и задачи исследования

Объектом исследования являются математические модели и алгоритмы для расчета магнитного поля в условиях неоднородной среды.

Цель исследования — моделирование магнитного поля в рабочей зоне электрической машины.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработка математической модели для расчета компонент напряженности магнитного поля в рабочей зоне электрической машины.
2. Проектирование программного обеспечения для выполнения числовых экспериментов по моделированию картины магнитного поля в воздушном зазоре.

**3. Анализ литературных данных
и постановка проблемы**

Известно, что общей задачей расчета электромагнитного поля [1, 2] является определение напряженности

поля в заданных точках пространства по заданным зарядам (на границе тел). Если известно распределение магнитных зарядов в конечной области однородной среды, то решение можно найти на основании уравнений и методик, изложенных в [3, 4].

Для решения задачи расчета поля рассмотрим типовой элемент конструкции электрического двигателя, который состоит из магнитопровода, двух магнитов со стальными полюсными наконечниками и воздушного зазора (рабочей зоны) как показано на рис. 1.

Известно, что одной из наиболее важных задач при проектировании электрических машин является задача расчета потока рассеяния и эффективного потока. Сложность решения этой задачи обусловлена необходимостью выполнения расчета поля в условиях неоднородной среды. Поэтому применим следующий подход [5, 6].

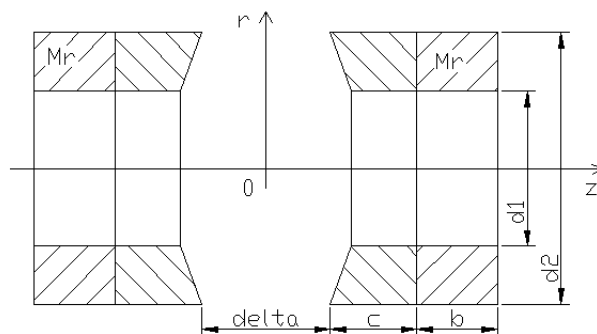


Рис. 1. Типовой элемент конструкции электрического двигателя

Допустим, что на торцевых поверхностях магнита сосредоточены заряды с постоянной поверхностной плотностью $\sigma = \pm M_r$. Таким образом, расчет поля (на первом этапе) можно свести к определению дополнительных магнитных зарядов на поверхности стали. С учетом свойств интегральных уравнений [5] и симметрии конструкции получаем следующую математическую модель:

$$\sigma_m - \frac{\lambda}{2\pi} \int_l (K(r, r', z, z') - K(r, r', z, -z')) \sigma_m dl = 2\lambda H_0 n. \quad (1)$$

Поле H_0 создается постоянными магнитами. После дискретизации уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{mi} - \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{j=1}^n \sigma_{mj} \int_{\Delta_j} (K(r_i, r'_j, z_i, z'_j) - K(r_i, r'_j, z_i, -z'_j)) dl_j = \\ = f(r_i, z_i). \end{aligned} \quad (2)$$

Можно показать [7–9], что элементы a_{ij} матрицы a системы интегральных уравнений определяется выражением:

$$a_{ij} = -2\lambda n F_j, \quad (3)$$

где вектор:

$$\begin{aligned} F_j = \frac{1}{4\pi} \int_{\Delta_j} \frac{2r'_j}{\sqrt{(r+r'_j)^2 + (z-z'_j)^2}} \times \\ \times \left\{ \frac{1}{r} \left[\frac{r^2 - r_j'^2 - (z-z'_j)^2}{(r-r'_j)^2 + (z-z'_j)^2} E(k) + K(k) \right] e_r + \right. \\ \left. + \frac{2(z-z'_j)}{(r-r'_j)^2 + (z-z'_j)^2} E(k) e_z \right\} dl_j, \end{aligned} \quad (4)$$

вычисляется при $r=r_i$ и $z=z_i$.

При известном распределении магнитных зарядов напряженность поля рассчитывается по формуле:

$$H(r, z) = \frac{1}{\mu_0} \sum_{j=1}^n F_j \sigma_{mj}. \quad (5)$$

4. Результаты расчетов по моделированию магнитного поля в зоне полюсных наконечников

С учетом особенностей математической модели [10, 11] разработан обобщенный алгоритм расчета, который включает в себя следующие основные этапы:

- формирование блока данных геометрических размеров конструкции и характеристик магнитных материалов;
- задание числа расчетных точек, в которых необходимо вычислить компоненты напряженности поля;
- решение системы алгебраических уравнений для нахождения распределения дополнительных зарядов;
- вычисление составляющих напряженности поля во всех точках наблюдения;
- визуализация полученных результатов.

При проведении экспериментов в качестве базовых были использованы следующие входные данные:

- внутренний диаметр магнита — $d1 = 25$ мм;
- внешний диаметр магнита — $d2 = 45$ мм;
- высота магнита — $b = 7,5$ мм;
- высота наконечника — $c = 7,5$ мм;
- расстояние между наконечниками — $\delta = 20$ мм.

Результаты моделирования магнитного поля в зоне полюсных наконечников представлены на рис. 2.

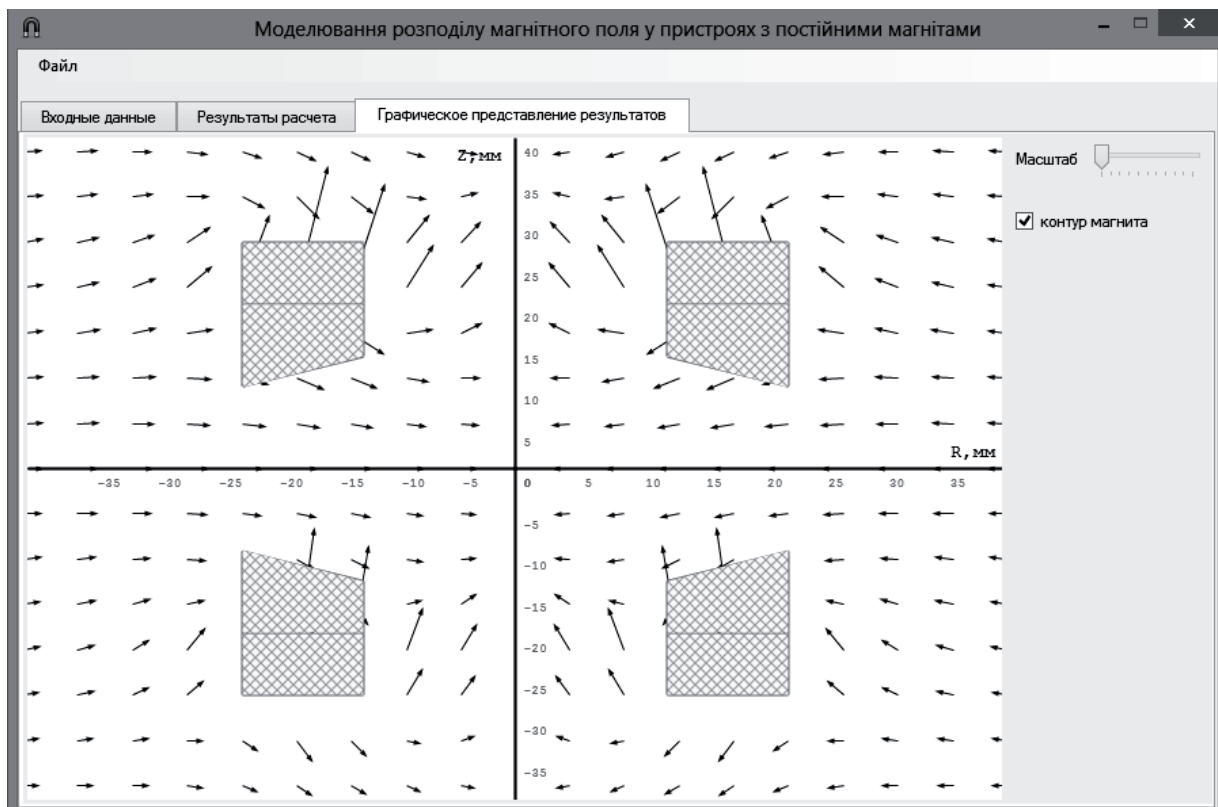


Рис. 2. Графическое представление результатов расчетов

5. Обсуждение разработанной математической модели и программной системы

Предложенная математическая модель, с учетом допущения об «идеальности» электро-физических характеристик магнитной системы, позволяет выполнить расчет значений составляющих напряженности магнитного поля в неоднородной среде.

Таким образом, расчетный алгоритм может быть реализован как в виде специализированного программного обеспечения, так и в виде подсистемы САПР электрических машин. В последнем случае актуальной представляется задача по расчету поля в торцевых зонах. Решение подобной задачи потребует модификации предложенной математической модели.

6. Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Проанализирована типовая конструкция магнитной системы электродвигателя с постоянными магнитами.
2. Для данной конструкции получена математическая модель распределения магнитного поля и предложен расчетный алгоритм.
3. С применением программных инструментов Microsoft Visual Studio Express 2012 и .NET Framework 4.0 разработан программный пакет, с использованием которого получены результаты по расчету магнитного поля для радиального сечения магнитной системы.

Литература

1. Максвелл, Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля [Текст] / Дж. К. Максвелл. — М.: Гостехиздат, 1954. — 688 с.
2. Стреттон, Дж. А. Теория электромагнетизма [Текст] / Дж. А. Стреттон. — М.: Гостехиздат, 1948. — 540 с.
3. Гринберг, Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений [Текст] / Г. А. Гринберг. — Л.: АН СССР, 1948. — 727 с.
4. Тамм, И. Е. Основы теории электричества [Текст] / И. Е. Тамм. — М.: Наука, 1976. — 616 с.
5. Тозони, О. В. Метод вторичных источников в электротехнике [Текст] / О. В. Тозони. — М.: Энергия, 1975. — 296 с.
6. Бинс, К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей [Текст] / К. Бинс, П. Лауренсон. — М.: Энергия, 1970. — 376 с.

7. Цырлин, Л. Э. Избранные задачи расчета электрических и магнитных полей [Текст] / Л. Э. Цырлин. — М.: Советское радио, 1977. — 319 с.
8. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров [Текст] / Андре Анго. — М.: Наука, 1967. — 780 с.
9. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики [Текст] / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. — М.: Наука, 1977. — 736 с.
10. Крячок, А. С. О расчете электромагнитных характеристик специальных устройств с постоянными магнитами [Текст] / А. С. Крячок // Управляющие системы и машины. — 1996. — № 4/5. — С. 102–107.
11. Крячок, А. С. К вопросу о расчете электромагнитных характеристик специального устройства с постоянными магнитами в сверхпроводящем экране [Текст] / А. С. Крячок // Управляющие системы и машины. — 2000. — № 4. — С. 38–43.

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У РОБОЧІЙ ЗОНІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Розроблено математичну модель для розрахунку параметрів магнітного поля у робочій зоні електричного двигуна. Магнітна система двигуна містить полюсні наконечники. На базі математичної моделі розроблено розрахунковий алгоритм та програмне забезпечення. Розрахунковий алгоритм базується на аналітичних методах розв'язання прямої задачі магнітостатики з використанням метода «вторинних джерел». Проведено низку експериментів з моделювання магнітного поля у робочій зоні електричного двигуна.

Ключові слова: математична модель, алгоритм, електричний двигун, розрахунок магнітного поля.

Крячок Олександр Степанович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: kriachok@list.ru.

Красноголовец Андрей Николаевич, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: mail@kpi.ua.

Крячок Олександр Степанович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Красноголовец Андрій Миколайович, кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Kriachok Olexandr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: kriachok@list.ru.

Krasnogolovets Andrii, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: mail@kpi.ua