

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

**Захаров В.А.,** студент 3 курса факультета энергетики и  
электротехники

**Научный руководитель – Руссова Н.В.,** кандидат технических  
наук, доцент

**ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»**

**Ключевые слова:** магнитное поле, магнитная проводимость, полевые методы, FEMM, метод конечных разностей

*В работе проводится моделирование магнитной проводимости воздушного зазора электромагнитной системы. Зазор имеет вид плоскость-коническая призма. На основе теории электромагнитного поля выводятся расчетные формулы для магнитной проводимости воздушного промежутка. Численное моделирование проведено в среде компьютерной программы FEMM методом конечных элементов.*

**Введение.** Электромеханические аппараты находят широкое применение в экстремальных условиях, например, в условиях открытого космоса, вечной мерзлоты, ядерных реакторах на АЭС, т.е. там, где невозможно функционирование электронной аппаратуры. Проектирование таких устройств начинается с этапа расчета их магнитных систем, который в свою очередь базируется на расчете магнитных проводимостей имеющихся воздушных зазоров. Точность этих расчетов влияет на правильность функционирования готового изделия. Таким образом, тема исследования является актуальной, в особенности, из-за наблюдающегося в последнее время развития атомной промышленности, где электромеханические аппараты не заменимы.

**Цель работы** – провести моделирование магнитной проводимости воздушного зазора для заданной магнитной системы.

**Результаты исследований.** Для расчета магнитных проводимостей воздушных промежутков в технической науке

применяются три основных метода: 1) на основании упрощающих предположений относительно картины магнитного поля – метод вероятных путей потока; 2) математическая обработка экспериментальных данных с применением методов теории подобия; 3) на основе расчета магнитного поля в рассматриваемой области [1]. Первые два метода отличаются относительной простотой применения и поэтому получили широкое распространение в практике инженерных расчетов. Однако серьезным недостатком вышеуказанных алгоритмов является их критичная погрешность, которая в ряде случаев превышает 5%. Метод расчета магнитного поля требует более серьезно физико-математической подготовки специалиста, но и вместе с этим позволяет на порядок повысить точность расчета.

Магнитное поле в рассматриваемой области пространство описывается системой уравнений Максвелла [2]:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\ \vec{B} &= \mu \vec{H}. \end{aligned} \right\},$$

где  $\vec{B}$  – магнитная индукция, Тл;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость воздуха.

Запишем формулу для магнитной проводимости:

$$\Lambda = \frac{\Phi}{U_{m1} - U_{m2}}$$

Известно, что величины, входящие в формулу могут быть выражены как соответствующие интегралы [3]:

$$\Phi = \int_{S_1} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$U_{m12} = U_{m1} - U_{m2} = \int_{l_{12}} \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

Тогда выражение для магнитной проводимости можно записать в виде:

$$\Lambda = \frac{\int \overline{B} \, d\overline{S}}{\int \overline{H} \, d\overline{l}}.$$

Интегральная форма позволяет использовать численные методы для расчета магнитной проводимости, которые проведем в программе FEMM.

Эскиз воздушного промежутка ( $a=15$  мм,  $b=40$  мм, угол при вершине конуса  $120^\circ$ ) и картина поля в нем изображены ниже (рис. 1):

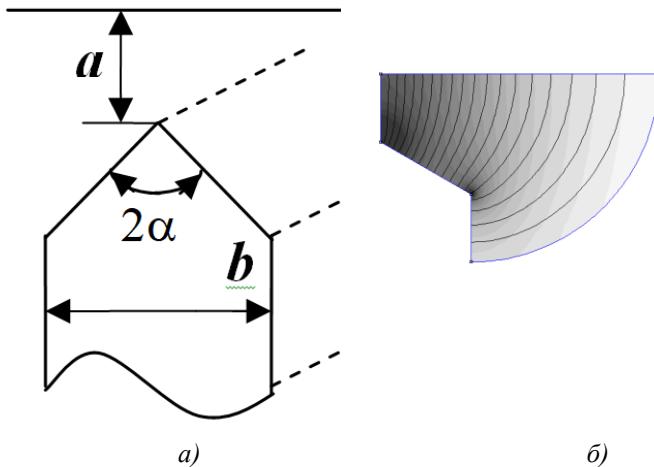


Рис.1. а) – эскиз воздушного промежутка, б) – картина магнитного поля

Встроенные инструменты FEMM позволяют определить магнитный проток, пронизывающий воздушный промежуток и магнитное напряжение. Так как FEMM располагает англоязычным интерфейсом, поэтому рассматриваем показатель Normal flux (ортогональный магнитный поток).

В ходе моделирования получено, что  $\Phi = 4,2 \cdot 10^{-6}$  Вб,  $U_m = 3,4 \cdot 10^{-2}$  В.

Тогда, возвращаясь к расчетной формуле, получим величину проводимости  $\Lambda = 1,24 \cdot 10^{-4}$  Гн.

---

**Выводы.** Таким образом, методы компьютерного моделирования позволяют провести и существенно упростить инженерный расчет магнитной проводимости воздушного промежутка магнитной системы. Применение FEMM существенно снизило общую трудоемкость вычислений. Отметим, что расхождение между аналитическим решением и численным расчетом не превышает 0,01%. Минимальная погрешность расчета позволяет применять FEMM для расчета магнитных полей всех электрических аппаратов и машин.

#### **Библиографический список:**

1. Захаров В. А. Физико-математические аспекты расчета комплексного сопротивления цилиндрического проводника с учетом скин-эффекта / В. А. Захаров, С. И. Фролов, Н. В. Руссова // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IX Международной научной конференции, Донецк, 15–17 октября 2024 года. – Донецк: Донецкий национальный университет, 2024. – С. 166–168. – EDN FTHJRA.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – 10-е изд., стереотипное. – М.: Гардарики, 2003. – 317 с.
3. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля: учебное пособие для радиотехнических специальностей вузов. – Москва: Высшая школа, 1961. – 370 с.

## MODELING OF MAGNETIC CONDUCTIVITY ELECTROMAGNETIC SYSTEM AIR GAP

Zakharov V.A.

Scientific supervisor – Russova N.V.

ChSU named after I.N. Ulyanov

**Keywords:** *magnetic field, magnetic conductivity, field methods, FEM, finite difference method*

*The paper simulates the magnetic conductivity of the air gap of an electromagnetic system. The gap has the form of a plane-a conical prism. Calculation formulas for the magnetic conductivity of the air gap are derived based on the electromagnetic theory. Numerical simulation was performed in the environment of the FEMM computer program using the finite element method.*