

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ
ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА МЕТОДОМ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

СТРЕЛЮХИН А. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

При решении ряда задач магнитного метода неразрушающего контроля необходимо знать, как распределение индукции и намагниченности внутри контролируемого изделия, так и топографию магнитного поля на его поверхности. Сложность описания процессов намагничивания ферромагнетиков объясняется нелинейным изменением их основных параметров (намагниченность, индукция, проницаемость) с изменением внешнего магнитного поля и явлением гистерезиса, что полностью исключает возможность аналитического решения задачи и требует применения численных методов решения.

В работе предложен численный метод расчета распределения намагниченности и индукции внутри и напряженности магнитного поля на поверхности протяженного ферромагнитного изделия, находящегося в постоянном неоднородном поле проходного соленоида, с учетом нелинейной зависимости магнитной восприимчивости материала от внешнего магнитного поля.

В качестве математического аппарата расчета использовался метод пространственных интегральных уравнений [1]. Это обусловлено тем, что при его применении нет необходимости задавать граничные условия (в отличие от метода конечных элементов, сеток или граничных интегральных уравнений). Полученное при таком подходе решение автоматически удовлетворяет граничным условиям. Кроме того, в расчет достаточно просто вводятся магнитные характеристики материала с использованием аппроксимирующих выражений.

Идея метода пространственных интегральных уравнений заключается в использовании интегрального выражения для напряженно-

сти магнитного поля через намагниченность M элементов магнитной системы

$$\vec{H}^M(Q) = -\text{grad}_Q U(Q) \quad (1)$$

$$U(Q) = -\frac{1}{4\pi} \int_{V_M} \frac{\text{div} \vec{M}(N)}{|r_{NQ}|} dV_N + \frac{1}{4\pi} \int_{S_M} \frac{M_n(N)}{|r_{NQ}|} dS_N, \quad (2)$$

где V_M , S_M – соответственно объем намагниченного вещества (элемента) и площадь его поверхности;

Q – точка наблюдения; N – точка источника (точка, определяющая координаты центра сечения элемента разбиения);

\vec{r}_{NQ} – радиус-вектор из точки источника (N) в точку наблюдения (Q);

\vec{H}^M – поле ферромагнетика; \vec{M} – намагниченность материала.

Для описания основной кривой намагничивания использовались аппроксимирующие выражения, описанные в работе [2].

Расчет проводился на основе дискретной математической модели ферромагнетика с кусочно-постоянной аппроксимацией вектора намагниченности по элементам объема. В качестве итерационного метода использовался метод простой итерации (точность итерационного процесса, необходимого для прекращения расчета намагниченности в образце, задавалась равной 0,01 %).

С целью проверки правильности разработанной модели проведен расчет распределения аксиальной и радиальной составляющих суммарного поля соленоида и намагниченного полого ферромагнитного цилиндра с различными размерами, магнитными характеристиками материала и при различных величинах постоянного тока через соленоид. Сравнение результатов расчета по разработанной методике и экспериментальных данных показало хорошее совпадение, что подтверждает правомочность предложенной модели расчета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатов П. А., Аринчин С. А. Численный расчет электромагнитных полей. М., Энергоатомиздат, 1984, – 168 с.

2. Матюк В. Ф., Осипов А. А. Математическая модель намагничивания ферромагнетиков // Доклады НАН Беларуси. – 2004. – Т. 48. – № 5. – С. 43–45.