

## РАЗДЕЛ III. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.179.14

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБЪЕКТА СО СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

*СТРЕЛЮХИН А. В.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Для решения ряда практических задач неразрушающего контроля представляет интерес расчет магнитного состояния ферромагнитного объекта, обладающего продольной структурной неоднородностью (например, прямошовных электросварных труб). В качестве методики расчета выбран метод пространственных интегральных уравнений, позволяющая проводить вычисления с учетом нелинейной зависимости магнитных характеристик материала от внешнего магнитного поля [1].

Для расчета используется дискретная математическая модель в предположении кусочно-постоянной аппроксимации компонент вектора намагниченности  $\vec{M}(M_r, M_\phi, M_z)$  по элементам разбиения образца. Результирующее поле в исследуемой области представляет собой векторную сумму полей, создаваемых системой намагничивания и самим ферромагнетиком:

$$\vec{H}(Q) = \frac{\vec{M}(Q)}{\square(\square)} = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_Q \int_{V_M} \vec{M}(Q) \text{grad}_N \left( \frac{1}{|r_{NQ}|} \right) dV_N + \vec{H}^J(Q), \quad (1)$$

$$\vec{B}(Q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \int_{V_M} \frac{[[\nabla \times \vec{M}(N)] \times \vec{r}_{NQ}]}{|r_{NQ}|^3} dV_N - \int_{S_M} \frac{[[\vec{n} \times \vec{M}] \times \vec{r}_{NQ}]}{|r_{NQ}|^3} dS_N \right) + \vec{B}^J(Q), \quad (2)$$

где  $\vec{H}(Q)$  – напряженность магнитного поля;

$\vec{B}(Q)$  – вектор магнитной индукции;  
 $\vec{M}$  – намагниченность материала;  
 $V_M$  и  $S_M$  – соответственно объем ферромагнетика и площадь его поверхности;  
 $Q$  – точка наблюдения;  
 $N$  – точка источника поля;  
 $\vec{n}$  – внешняя нормаль к поверхности  $S$  в точке интегрирования;  
 $\vec{r}_{NQ}$  – радиус-вектор из точки источника ( $N$ ) в точку наблюдения ( $Q$ );  
 $\vec{H}^J$ ,  $\vec{B}^J$  – напряженность и индукция магнитного поля, создаваемого внешним источником.

При построении модели полагали, что между материалом и зонной структурной неоднородности отсутствует переходной слой; образец является изотропным (в пределах элемента разбиения) и в исходном состоянии размагничен; намагничивание происходит по основной кривой намагничивания, которая будет различной в зависимости от того, принадлежит элемент разбиения основному металлу или зоне неоднородности. Магнитные свойства каждого элемента разбиения материала трубы и материала структурной неоднородности задавали, используя аппроксимирующие выражения для намагниченности по основной кривой намагничивания [2].

В модели использовался метод простой итерации. За начальное приближение принимались величины компонент вектора намагниченности, определенные по значениям поля внешнего источника. Полученные скорректированные значения компонент вектора намагниченности являлись новым начальным приближением для расчета. Решение считалось полученным, когда при сравнении значений намагниченности на двух соседних итерациях достигалась заданная точность. По рассчитанному распределению компонент вектора намагниченности в объеме ферромагнетика определяли значение компонент вектора напряженности магнитного поля в интересующей нас области.

Проверка результатов проводилась на полных цилиндрических объектах (коэрцитивная сила основного материала  $H_{cs} = 820$  А/м, структурной неоднородности  $H_{cs} = 3274$  А/м) при различных величинах намагничивающего поля и показала, что предложенная методика расчета позволяет качественно и количественно оценить про-

цессы, происходящие внутри ферромагнетика со структурной неоднородностью, а также рассчитать поле на его поверхности.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатов, П. А. Численный расчет электромагнитных полей / П. А. Курбатов, С. А. Аринчин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.
2. Матюк, В. Ф. Математическая модель намагничивания ферромагнетиков / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Доклады НАН Беларуси. – 2004. – Т. 48. – № 5. – С. 43–45.