

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБЪЕКТА

СТРЕЛЮХИН А. В.

Белорусский национальный технический университет

Широкое применение для контроля изделий из ферромагнитных материалов получил магнитный метод неразрушающего контроля [1]. Дальнейшее развитие этого метода в теоретическом плане возможно за счет разработки модели описания поведения ферромагнетика в магнитном поле. Необходимость учета явления гистерезиса и сложность процессов в ферромагнетике при перемагничивании делает невозможным строгое аналитическое решение системы уравнений Максвелла аналитическими методами и требует использования численных методов моделирования.

Среди численных методов для решения задач магнитостатики широкое применение получили метод конечных элементов [2], метод пространственных интегральных уравнений [3] и метод граничных элементов [4]. Метод конечных элементов и метод граничных элементов при моделировании требуют в своей постановке полностью задать на границе начальные краевые условия. Особенность метода пространственных интегральных уравнений – возможность ограничить область расчета только объемом ферромагнетика и объемом проводников с током, которые создают намагничивающее поле, а также относительная простота учета реальных характеристик магнитного материала с использованием аппроксимирующих выражений [5]. При этом полученное решение автоматически удовлетворяет граничным условиям. В настоящей работе использовался метод пространственных интегральных уравнений применительно к протяженным объектам с поперечной неоднородностью.

Для магнитной системы, состоящей из ферромагнитного образца и источника магнитного поля, вектор магнитной индукции \vec{B} в любой точке наблюдения Q можно представить как векторную сумму полей, создаваемую внешним источником \vec{B}' и самим ферромагнетиком \vec{B}^M :

$$\vec{B}(Q) = \vec{B}^J(Q) + \vec{B}^M(Q), \quad (1)$$

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

где $\vec{B}(Q)$ – вектор магнитной индукции;

\vec{M} – намагниченность материала;

V_N и S_N – 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).

Решение будем проводить, считая материал ферромагнетика изотропным, в исходном состоянии образец размагничен, а намагничивание происходит по основной кривой намагничивания, которая будет различной в зависимости от того, принадлежит элемент разбиения основному металлу или зоне неоднородности. Для учета магнитных свойств материала трубы и материала структурной неоднородности использовали аппроксимирующие выражения для намагниченности по основной кривой намагничивания [5]. Дискретная математическая модель построена в предположении кусочно-постоянной аппроксимации компонент вектора намагниченности \vec{M} по элементам разбиения.

Проверка результатов расчета и эксперимента проводилась на цилиндрических образцах (коэрцитивная сила основного материала $H_{cs} = 760$ А/м, структурной неоднородности $H_{cs} = 3274$ А/м) при различных величинах намагничивающего поля. Результаты расчета показали, что предложенную методику расчета можно использовать для расчета напряженности магнитного поля на поверхности протяженного ферромагнитного объекта с поперечной структурной неоднородностью.

Список использованных источников:

1. Мельгуй М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Мн., 1980. – 135 с.
2. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. М., Мир, 1986. – 229 с.
3. Пеккер И. И. К расчету магнитных систем методом интегрирования по источникам поля. – Известия вузов. Электромеханика, 1968, № 9, с. 940 – 943.
4. Тозони О. В. Метод вторичных источников в электротехнике. М., Энергия, 1975. – 295 с.
5. Матюк В. Ф., Осипов А. А. Математическая модель намагничивания ферромагнетиков. – Доклады НАН Беларуси, 2004, Т. 48, № 5, с. 43 – 45.