

УДК 621.317.43
БЫСТРЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДЛИНЫ СРЕДНЕГО МАГНИТНОГО
ПУТИ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

И. Т. СКУРТУ, И. И. БРАНОВИЦКИЙ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

Задачи, связанные с расчетом стационарных динамических магнитных процессов, можно свести к получению вебер-амперной характеристики $\Phi(I)$ на фиксированной частоте перемагничивания. Основная кривая намагничивания конкретного материала и вебер-амперная характеристика изделия связаны между собой через зависимость длины среднего магнитного пути $l_{\text{ср}}$ от внешнего намагничивающего поля.

Расчет длины среднего магнитного пути как в квазистатике, так и в динамике связан с вычислением интеграла от тангенциальной компоненты H_{\parallel} магнитного поля по поверхности образца $S_{\text{изм}}$, находящейся в пределах измерительной обмотки:

$$l_{\text{ср}}(H) = \frac{S_{\text{изм}} I \omega_{\text{намагн}}}{\iint H_{\parallel} dS_{\text{изм}}}, \quad (1)$$

где I – ток в намагничивающей обмотке, $\omega_{\text{намагн}}$ – количество витков в намагничивающей обмотке.

Выражение (1) является обобщением применения закона полного тока на динамические режимы перемагничивания, в которых он используется для поля на поверхности. Расчетная практика показывает, что при прочих равных условиях, различные режимы перемагничивания (статика, динамика, постоянная проницаемость, переменная проницаемость) находятся достаточно близко друг от друга в пространстве значений функции (1). Переходы между двумя различными режимами могут быть осуществлены в несколько этапов при помощи последовательных приближений с использованием функций связи режимов. При этом соотношения затрат машинного времени на расчет одной и той же задачи при смене режимов перемагничивания может составлять около двух порядков (в случае прямого решения методом конечных элементов).

Изменение длины среднего магнитного пути в зависимости от проницаемости связано с изменением соотношения между тангенциальной и нормальной компонентами магнитного поля на поверхности образца. При этом закон полного тока в магнитных измерениях используется именно по отношению к тангенциальной составляющей, что обусловлено требованиями однородности (по направлению) измеряемых величин.

Расчет функций связи режимов может быть выполнен без проведения вычислений в наиболее затратном режиме (что требует ресурсов супер-

компьютера и не является универсальным решением). Для этого предлагается использовать свойства геометрии магнитной цепи, не зависящие (инвариантные) от режима перемагничивания.

К основным функциям связи относятся, прежде всего, зависимость эквивалентной проницаемости на фиксированной частоте от постоянной проницаемости и группа зависимостей проницаемостей от величины напряженности поля (тока в намагничивающей обмотке).

Расчет выполняется следующим образом:

1) методом конечных элементов вычисляется зависимость длины среднего магнитного пути конкретной магнитной цепи от величины задаваемой постоянной магнитной проницаемости $l_{cp}(\mu_{const})$;

2) аналитически, либо методом конечных элементов в 2D, определяется зависимость средней по сечению магнитной проницаемости конкретного образца от величины задаваемой постоянной магнитной проницаемости на фиксированной частоте перемагничивания $\mu_{equal}(\mu_{const})|_{f=const}$;

3) выполняется оценка зависимости средней проницаемости образца от амплитуды внешнего магнитного поля в динамике при переменной проницаемости (реальная кривая намагничивания). Данная зависимость представляет собой кривую, находящуюся между зависимостями такого же типа для постоянной проницаемости в статике и динамике. Оценка положения такой кривой (например, по среднему значению зависимости из пункта 1 или другим эмпирическим схемам) позволяет с необходимой точностью получить зависимость длины среднего магнитного пути от величины внешнего магнитного поля в динамике для реальной кривой намагничивания. Следует отметить, что данная схема является работоспособной для замкнутой магнитной цепи, поскольку ошибка определения длины среднего магнитного пути в среднем на три порядка ниже ошибки определения средних проницаемостей.

В каждом конкретном случае для произвольной магнитной цепи необходимо делать оценку ошибки, возникающей при расчете ресурсосберегающими методами. В случае высокой чувствительности усредненных магнитных характеристик к точности определения магнитных свойств необходимо оперировать схемами расчета отношений полевых величин (точность для которых всегда намного выше, чем для расчета абсолютных величин), а также использовать эквивалентные (по интегральным характеристикам) цепи.

E-mail: tisotta@tut.by