

УДК 53.088 : 620.179.14

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГИСТЕРЕЗИСНОЙ КРИВОЙ  
НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

Минск, Беларусь

Безгистерезисное намагничивание материала [1] исключает влияние гистерезиса на намагничивание ферромагнетика. Оно заключается в том, что одновременно с постоянным намагничивающим полем на материал действуют переменным магнитным полем, доводящим материал до технического насыщения, после чего амплитуду переменного поля плавно уменьшают до нуля. При этом получают кривую безгистерезисного намагничивания, которая имеет большую крутизну в слабых полях и не имеет точки перегиба. Использование безгистерезисного намагничивания важно для резкого повышения чувствительности разных магнитных элементов. Но для ее определения проводят полный цикл многочисленных измерений. Это усложняет определение безгистерезисной кривой намагничивания материала и снижает его точность.

Целью работы является упрощение определения безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала.

Для моделирования безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала воспользуемся тем, что она близка к линии, проходящей через средние точки горизонтальных хорд предельной петли гистерезиса [1]. Экспериментальная проверка показала [2], что погрешность определения безгистерезисной кривой намагничивания при таком подходе на начальном участке не превышает 3 %.

Методика [3] моделирования безгистерезисной кривой намагничивания основана также на том, что зависимости изменения намагниченности  $M$  ферромагнитного материала от напряженности  $H$  действующего намагничивающего поля на нисходящей (1) и восходящей (2) ветвях петли гистерезиса ферромагнитного материала могут быть аппроксимированы формулами Фрелиха следующим образом:

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_c)}{M_s H_c + M_r H} ; \quad (1)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H} . \quad (2)$$

Это утверждение обосновано многочисленными использованиями формулы (1) для аппроксимации изменения намагниченности  $M$  ферромагнитного материала во втором квадранте плоскости  $(M, H)$ .

Значениям намагниченности  $M$  соответственно на нисходящей и восходящей ветвях предельной петли магнитного гистерезиса соответствуют значения  $H_1$  и  $H_2$  напряженности намагничивающего поля (рис. 1).

Из (1) и (2) имеем

$$M = \frac{M_r M_s (H_c - H_1)}{M_s H_c - M_r H_1} ; \quad (3)$$

$$M = \frac{M_r M_s (H_2 - H_c)}{H_c (M_s - 2M_r) + M_r H_2} \quad (4)$$

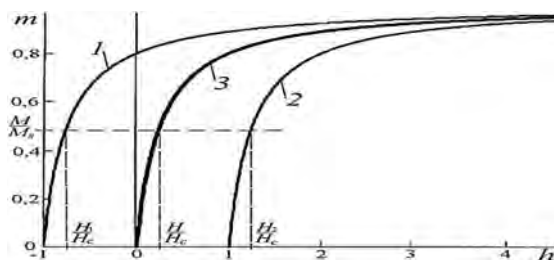


Рис. 1. Нисходящая (1) и восходящая (2) ветви петли гистерезиса и безгистерезисная кривая намагничивания (3), построенные в безразмерных координатах ( $h = H/H_c$ ,  $m = M/M_s$ ) по формулам (1), (2) и (5) для материала с  $K_{II} = 0,8$

Из (3) и (4) имеем

$$H_1 = \frac{M_s H_c (M_r - M)}{M_r (M_s - M)};$$

$$H_2 = \frac{H_c (M_s M - 2M_r M + M_s M_r)}{M_r (M_s - M)}.$$

Полусумма напряженностей  $H_1$  и  $H_2$  магнитного поля (с учетом их знака) равна напряженности поля  $H$  на безгистерезисной кривой намагничивания (см. рис. 1):

$$H = \frac{H_2 - H_1}{2} = \frac{M H_c (M_s - M_r)}{M_r (M_s - M)}.$$

Откуда

$$M = \frac{M_r M_s H}{H_c (M_s - M_r) + M_r H} \quad (5)$$

Введя обозначения  $K_{II} = M_r/M_s$ ,  $m = M/M_s$ ,  $h = H/H_c$  и проведя алгебраические преобразования из (5), получим

$$m = [1 + (1 - K_{II})/K_{II}h]^{-1} \quad (6)$$

Формула (6) получена математически точно на основании экспериментально обоснованной в [1, 2] методики и экспериментально обоснованных зависимостей (1) и (2). Она не требует дополнительного экспериментального обоснования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бозорт, Р.** Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1956. – 784 с.
2. Магнитный метод определения количества остаточного аустенита в мартенситно-старееющих сталях / А. Н. Сташков [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 36–42.
3. **Сандомирский, С. Г.** Определение безгистерезисной кривой намагничивания ферромагнитного материала по параметрам предельной петли его магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 55–60.