

УДК 621.317

Г. А. Кардашян

Определение коэрцитивной силы и остаточного магнетизма в переменном магнитном поле

(Представлено академиком НАН Армении В.В.Алексеевским 16/1 1998)

Электромагнитное свойство ферромагнитных материалов в основном характеризуется петлей гистерезиса, магнитной индукцией, напряженностью магнитного поля, потерями, магнитной проницаемостью, коэрцитивной силой и остаточным магнетизмом. ГОСТ 12119-80 "Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических величин" предусматривает измерение всех вышеуказанных параметров, однако в разделе перемагничивания ферромагнитных материалов в симметричных переменных магнитных полях как в ГОСТе, так и в (1,2) отсутствует гарантируемый метод и средство для измерения H_c и B_r при намагничивании, а эти параметры определяются при намагничивании ферромагнитных материалов в постоянных и квазистатических магнитных полях.

Известно, что динамическая петля гистерезиса несколько отличается от статической, так как H_c и B_r зависят не только от намагничивающего поля, но и от внешних упругих напряжений, толщины листа, частоты, температуры и т.д. (1). Следовательно, измеряемые коэрцитивные силы H_c и остаточные магнитные индукции B_r будут отличаться.

В связи с развитием электронно-измерительной техники и возможностью перемагничивания ферромагнитных материалов в разомкнутой магнитной цепи с обеспечением заданного режима магнитной индукции или напряженности магнитного поля (3,4) в испытуемых локальных областях становится возможным автоматическое измерение коэрцитивной силы H_c и остаточной магнитной индукции B_r в динамических режимах перемагничивания.

Основой для уравнения динамической петли ферромагнетика является уравнение для статической петли, в котором при переменном токе

$$B = C \frac{H \pm H_c}{H + a \pm b} \quad (1)$$

все величины, кроме C и a , являются периодическими функциями времени (5). С учетом, что $b = H_c - H_{ввз}$, уравнение (1) можно представить в виде

$$B = C \frac{H \pm H(t)}{H + a \pm b} = C \frac{H \pm H(t)}{H \pm H(t) + a \mp H_{ввз}} \quad (2)$$

H для восходящей и нисходящей ветви соответственно представляется

$$\left. \begin{aligned} H_B &= a_B \frac{B + B(t)}{C_B - B} \\ H_H &= a_H \frac{B - B(t)}{C_H - B} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где
$$B(t) = \frac{C_B}{a_B} H(t) = \frac{C_H}{a_H} H(t). \quad (4)$$

Уравнение (3) аналогично (2) выражается общим уравнением

$$H = a \frac{B \pm B(t)}{C - B \mp D} = a \frac{B \pm B(t)}{C - (B \pm B(t)) \pm B_{ввз}}, \quad (5)$$

где
$$\left. \begin{aligned} C &= 0,5(C_H + C_B) \\ D &= 0,5(C_H - C_B) = B(t) - B_{ввз} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Верхний знак в (2) принимается для нисходящей ветви, а в (5) для восходящей. Постоянные C и a для восходящей и нисходящей ветвей различны.

Если напряженность магнитного поля изменяется во времени по гармоническому закону, то уравнению (2) соответствует следующая параметрическая форма:

$$\left. \begin{aligned} B &= C \frac{H_m \cos(\omega t \mp \alpha_1)}{H_m \cos(\omega t \mp \alpha_1) + a \mp H_d \sin \omega t} = \\ &= C \frac{H_{Bm} \cos \omega t \pm H_c \sin \omega t}{H_{Bm} \cos \omega t + a \pm H_d \sin \omega t}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где
$$\left. \begin{aligned} H_{Bm} &= H_m \cos \alpha_1; H_d = H_c - H_d; \\ H_c &= H_m \sin \alpha_1; \alpha_1 = \arctg(H_c / H_{Bm}); \end{aligned} \right\}$$

H_{Bm} — напряженность, соответствующая максимальной индукции B_m ; H_d — амплитуда напряженности, обусловленная магнитной вязкостью (вихревыми токами). Здесь принято во внимание, что составляющие $H(t)$ и $H_{ввз}$, обуславливающие потери в стали, должны во времени изменяться по одноименному закону. В связи с этим при изменении индукции по гармоническому закону уравнению (5) будет соответствовать следующая параметрическая форма:

$$\begin{aligned}
 H &= a \frac{B_m \cos(\omega t \mp \alpha_2)}{C - B_m \cos(\omega t \mp \alpha_2) + a \mp B_d \sin \omega t} = \\
 &= a \frac{B_{Hm} \cos \omega t \pm B_r \sin \omega t}{C - B_{Hm} \cos \omega t \mp B_d \sin \omega t},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где

$$\begin{aligned}
 B_{Hm} &= B_m \cos \alpha_2; \quad B_r = B_r - B_d; \\
 B_r &= B_m \sin \alpha_2; \quad \alpha_2 = \arctg(B_r / B_{Hm})
 \end{aligned}$$

B_{Hm} — индукция, соответствующая максимальной напряженности H_m ; B_d — амплитуда индукции, обусловленная магнитной вязкостью (вихревыми токами).

После определения постоянных (7) и (8) представляется возможным определить мгновенные значения несинусоидальных индукций, напряженности магнитного поля и их производных по времени. Однако определение постоянных этих уравнений сопряжено с некоторыми трудностями⁽⁵⁾. Поэтому даются более простые зависимости $H(B)$ и $B(H)$, имеющие вид

$$H = \frac{aB}{C - B} \pm \frac{H(t)C - B_B}{C - B} = H_{cp} \mp H_n; \tag{9}$$

$$B = \frac{CH}{a + H} \mp \frac{B(t)a + HD}{a + H} = B_{cp} \mp B_n; \tag{10}$$

где

$$H_{cp} = a \frac{B_m \cos \omega t}{C - B_m \cos \omega t} \tag{11}$$

$$H_n = \frac{H_c C_1 - H_d B_m \cos \omega t}{C - B_m \cos \omega t} \sin \omega t \tag{12}$$

$$\sin \omega t = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{B_m}\right)^2}; \quad -\pi \leq \omega t \leq \pi \tag{13}$$

$$H = H_{cp} - H_n.$$

В (9) верхний знак принимается для нисходящей ветви, а в (10) — для восходящей.

Причем в случае косинусоидальной индукции

$$\left. \begin{aligned}
 B &= B_m \cos \omega t; \quad b = H_d \sin \omega t; \\
 H_n &= H_c \sin \omega t; \quad H_d = H_c - H_d;
 \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

при косинусоидальной напряженности

$$\left. \begin{aligned}
 H &= H_m \cos \omega t; \quad D = B_d \sin \omega t \\
 B_d &= B_r \sin \omega t; \quad B_d = B_r - B_d
 \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

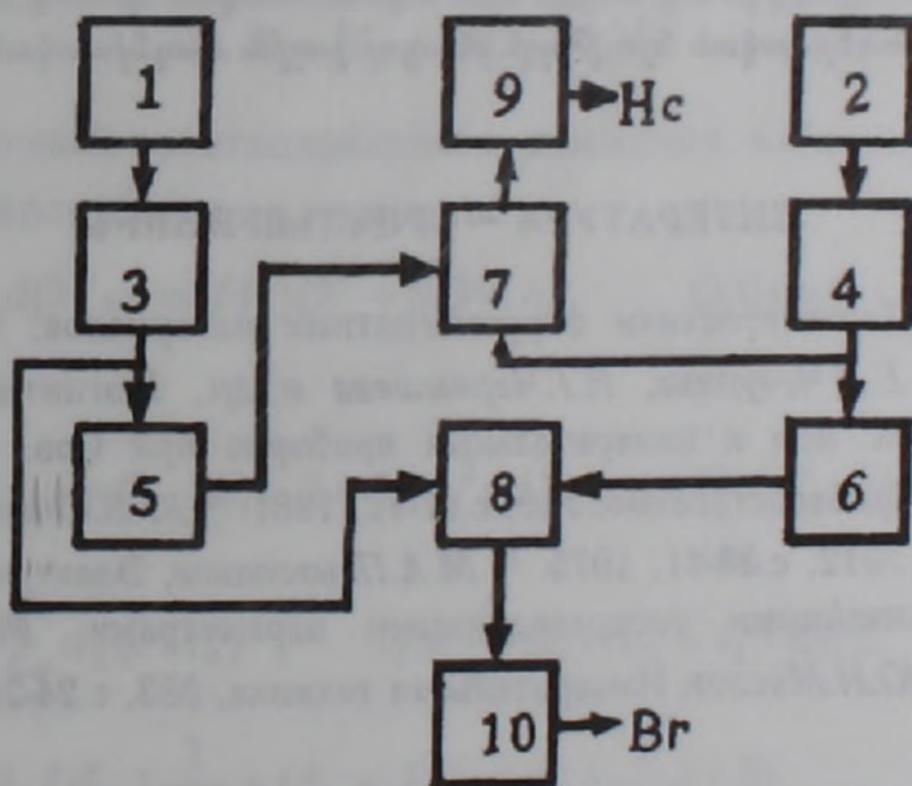
Однако из (6), где индукция изменяется по синусоидальному закону, напряженность магнитного поля определяется

$$H(t) = \begin{cases} \frac{a_b B_m \sin \omega t + C_b H_c}{-B_m \sin \omega t + C_b}, & 0 \leq \omega t \leq \pi/2 \\ \frac{-a_n B_m \sin \omega t + C_n H_c}{B_m \sin \omega t - C_n}, & \pi/2 \leq \omega t \leq \pi \end{cases}, \quad (16)$$

где при $\omega t = 0$, $\sin \omega t = 0$ $H(t) = H_c$, а при $\omega t = \pi$, $\sin \omega t = 0$ и $H(t) = -H_c$.

Это значит, что если фиксировать значение напряженности магнитного поля в мгновение, когда синусоидально-изменяющаяся магнитная индукция приравнивается к нулю, то определится значение коэрцитивной силы H_c . Заметим, что $H(t)$ осуществляет полное колебание в течение $0 \leq \omega t \leq \pi$, при этом проходит через состояние $B=0$ дважды. В первый раз преобладает значение H_c , когда $\omega t = 0$, во второй $-H_c$, когда $\omega t = \pi$. Поэтому, учитывая, что при симметричном цикле перемагничивания $H_c = |-H_c|$, достаточно провести измерение для одного состояния $B=0$, при котором $H(t) = H_c$. Аналогично, при нулевом значении напряженности магнитного поля определяется значение остаточной магнитной индукции.

Для измерения коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции испытуемого ферромагнитного материала магнитоизмерительный прибор (3,6), с выходами первичных преобразователей магнитной индукции (ППВ)1 и напряженности магнитного поля (ППН)2, дополнительно снабжен соответственно усилителями 3 и 4, двумя нуль-органами, выполненными на интегральных микросхемах К521СА2 5 и 6, двумя ключевыми схемами 7 и 8 и двумя пиковыми детекторами 9 и 10 (см. рисунок).



Принципиально-блочная схема устройства для измерения H_c и B_r ферромагнетиков.

Устройство работает следующим образом: выход ППВ1, где формируется синусоидальное напряжение, через усилитель 3 подключается к входу нуль-

органа 5 и ключевой схемы 8. На выходе нуль-органа 5, при переходе кривой магнитной индукции через нулевое значение от положительного полупериода образуется импульсное напряжение величиной 3-3,5 вольт в момент времени, соответствующий нулевому значению магнитной индукции. При этом на управляющий вход ключевой схемы 7 поступает сигнал от 2, через усилитель 4, соответствующий коэрцитивной силе H_c испытуемого материала. На время длительности сигнала нуль-органа 5 ключевая схема 7 пропускает сигнал на вход пикового детектора 9, на выходе которого образуется постоянное напряжение, по величине равное коэрцитивной силе H_c .

Аналогично измеряется остаточная магнитная индукция. При переходе $H(t)$ с положительного полупериода через нулевое значение на выходе нуль-органа 6 образуется напряжение, на некоторое время открывающее ключевую схему 8, на вход которой через усилитель 3 от ППВ поступает напряжение, по величине соответствующее B_r , которая на выходе пикового детектора 10 фиксируется в виде постоянного напряжения по величине, равной остаточной магнитной индукции B_r .

Государственный инженерный университет Армении

Գ. Ա. ԿԱՐԴԱՇՅԱՆ

Ֆեռոմագնիսական նյութերի կոերցիտիվ ուժի և մնացորդային մագնիսական ինդուկցիայի որոշումը փոփոխական մագնիսական դաշտում

Տեսականորեն և պրակտիկորեն նկարագրված է բաց մագնիսական շղթայում, փոփոխական մագնիսական դաշտում ֆեռոմագնիսական նյութերի սահմանափակ տիրույթում մնացորդային մագնիսական ինդուկցիայի և կոերցիտիվ ուժի անմիջական որոշման հնարավորությունը: Առաջարկված է սարք, որը ավտոմատորեն կարող է չափել նշված պայմաններում, ֆեռոմագնիսական նյութերի մնացորդային մագնիսական ինդուկցիան և կոերցիտիվ ուժը:

ЛИТЕРАТУРА – ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ И.И.Кифер, Характеристики ферромагнитных материалов, М., Энергия, 1967.
- ² Е.Т.Чернышев, Е.Н.Чечурина, Н.Г.Чернышева и др., Магнитные измерения, М., Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Сов. Мин. СССР, 1969.
- ³ Ж.А.Кардашян, Приборостроение, №6, с.67-72, 1981. ⁴ Ю.В.Селезнев, Д.К.Пискунов, Приборостроение, №12, с.38-41, 1975. ⁵ М.А.Панасенков, Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами, М., Энергия, 1971.
- ⁶ Ж.А.Кардашян, Ю.Н.Маслов, Измерительная техника, №3, с.24-26, 1980.