

УДК 621.317

Г. А. Кардашян

Определение магнитной проницаемости ферромагнетиков

(Представлено академиком НАН Армении А. А. Терзяном 28/1 1998)

Заменяв динамический цикл гистерезиса эллипсом, имеющим ту же площадь, В. К. Аркадьев ввел понятие упругой и вязкой проницаемости, согласно которому для параметрического уравнения эллипса H и B должны быть синусоидальными функциями времени (1-3).

При этом упругая проницаемость определяется как

$$\mu_1 = \frac{B_{m1}}{H_m} = \frac{B_m \cos \delta}{H_m}, \quad (1)$$

а вязкая

$$\mu_2 = \frac{B_{m2}}{H_m} = \frac{B_m \sin \delta}{H_m}, \quad (2)$$

где B_{m1} , B_{m2} – составляющие B_m , а δ – угол потерь, при этом амплитудная или полная проницаемость определяется как

$$\mu = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2} = B_m / H_m. \quad (3)$$

Непосредственного определения указанной амплитудной проницаемости можно добиться не только при замене динамической петли гистерезиса, но и при реальном перемагничивании ферромагнетика. Ниже излагается методика и техника решения этой задачи. Для получения заданного режима перемагничивания (4,5) из задающего генератора на вход формирующего устройства подается напряжение (рис.1,а, кривая 1)

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (4)$$

где ω – угловая частота.

На выходе формирователя (4,5) образуется намагничивающее напряжение, описываемое (рис.1,а, кривая 2)

$$u_H = U_{1m} \sin \omega t + U_{3m} \sin 3\omega t + U_{5m} \sin 5\omega t + \dots \quad (5)$$

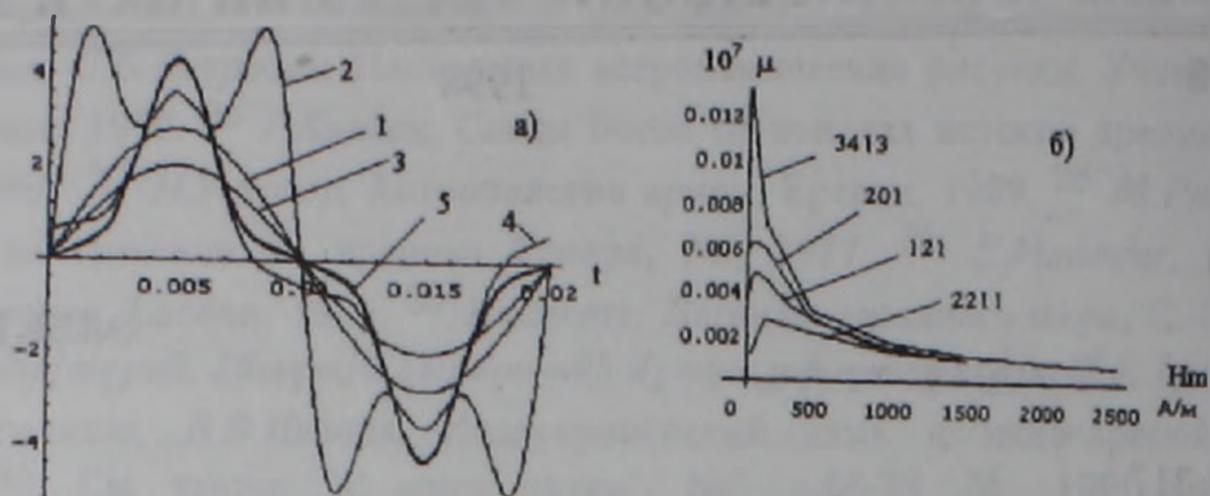


Рис.1 а – сформировавшиеся сигналы прибора;
б – экспериментальные результаты некоторых ферромагнетиков.

Благодаря введенной отрицательной обратной связи (4,5) в испытуемом ферромагнитном материале формируется магнитный поток, имеющий синусоидальную форму кривой, а индукция в образце изменится по заданному закону (рис.1,а, кривая 3)

$$B(t) = B_m \sin \omega t. \quad (6)$$

При этом из-за нелинейности магнитных свойств ферромагнитных материалов напряженность магнитного поля, пропорциональная напряженности на выходе своего первичного преобразователя, описывается (рис.1,а, кривая 4)

$$H(t) = H_{1m} \sin(\omega t + \psi_{H1}) + H_{3m} \sin(3\omega t + \psi_{H3}) + H_{5m} \sin(5\omega t + \psi_{H5}) + \dots \quad (7)$$

Выражения (4)-(7) подтверждаются сравнением с соответствующими осциллограммами, снятыми устройством, описанным в (4), и графиками, построенными по указанным выражениям с помощью ЭВМ.

Для определения амплитуды магнитной проницаемости необходимо иметь отношение амплитудного значения магнитной индукции B_m к амплитудному значению напряженности магнитного поля H_m . Для однозначности магнитной проницаемости при определенном значении B_m необходимо иметь соответствующее значение H_m . Поэтому перед измерением необходимо кривую $H(t)$ представить в соответствии с основной кривой намагничивания, т.е. так, чтобы $B(H)$ соответствовал безгистерезисному состоянию материала. С этой целью $H(t)$ представляется

$$H(t) = H_{1m} \sin \omega t - H_{3m} \sin 3\omega t + H_{5m} \sin 5\omega t - \dots \quad (8)$$

Эта напряженность магнитного поля состоит только из нечетных гармоник, без начальных фаз и постоянных составляющих (рис.1,а, кривая 5). При этом H_m и B_m одновременно достигают своих максимальных значений, и при осуществлении математической операции деления в любом состоянии перемагничивания получается изменение амплитудной магнитной проницаемости испытуемого феррообразца.

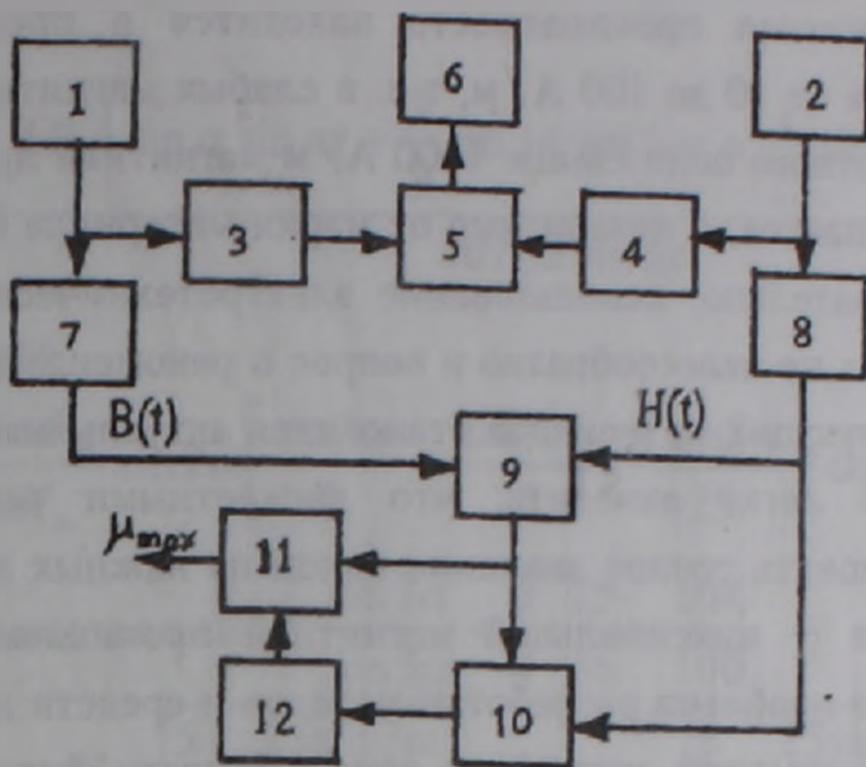


Рис.2. Блок-схема устройства для определения магнитной проницаемости ферромагнетиков.

В разработанной системе, блок-схема которой показана на рис.2, измерение осуществляется на базе интегральной микросхемы (ИМС) типа К525ПС2 или К525ПС3, предназначенной для аналоговой обработки и преобразования сигналов. На первый вход ИМС 5 подается напряжение, пропорциональное $B(t)$, по (6) проходящее через усилитель и учитывающее размеры испытуемого материала и пикового детектора 3, на выходе которого образуется постоянное напряжение $U_B = A_1 B_m$. На другой вход делителя 5 подается напряжение, пропорциональное $H(t)$ по (8), через другой пиковый детектор 4, на выходе которого образуется постоянное напряжение $U_H = A_2 H_m$. На выходе ИМС получается напряжение, пропорциональное амплитудному значению магнитной проницаемости ферромагнитного материала и легко преобразуемое на прямой отсчет измеряемой величины

$$\mu = \frac{10 A_1 B_m}{A_2 H_m}. \quad (9)$$

С помощью этой разработки проводились многократные измерения на ряде эталонных образцов из электротехнических сталей (марки 3413, 2011, 1213 и 2211) по B_m и H_m . На макете описанной системы проведено также измерение амплитудных значений магнитной проницаемости указанных образцов и осуществлена простая операция деления B_m / H_m . В обоих случаях получены одни и те же значения магнитной проницаемости.

Результаты экспериментальных исследований магнитной проницаемости для различных образцов, построенные с помощью ЭВМ, представлены на рис.1,б.

Из полученных результатов следует, что почти для всех марок сталей максимальная магнитная проницаемость находится в пределах напряженности магнитного поля от 10 до 100 А/м, т.е. в слабых магнитных полях. При напряженности магнитного поля свыше 1000 А/м магнитная проницаемость материала резко уменьшается, и независимо от марки материала они будут близки друг к другу. Следовательно, использование электротехнических сталей в сильных магнитных полях не целесообразно и вопрос о рекомендации выбора режима работы соответствующих материалов становится актуальным.

На рис.1,б легко заметить, что дискретными величинами измерений возможно установить точное значение одной из важных характеристик магнитных материалов – максимальной магнитной проницаемости. Следовательно, также актуальна проблема разработки методов и средств для непосредственного измерения максимальной магнитной проницаемости ферромагнитных материалов.

Известно, что максимальная магнитная проницаемость как частный случай нормальной проницаемости определяется

$$\mu_{\max} = \frac{B_{\mu_{\max}}}{\mu_0 H_{\mu_{\max}}} = \operatorname{tg} \alpha_{\max}, \quad (10)$$

т.е. наклон касательной, проведенной из начала $B(H)$ координат к точке верхнего перегиба кривой, соответствует максимальной проницаемости.

Для определения максимальной магнитной проницаемости μ_{\max} необходимо установить значение $H_{\mu_{\max}}$. Это можно осуществить, дифференцируя временную зависимость магнитной проницаемости по напряженности магнитного поля с приравниванием к нулю $d\mu / dH = 0$.

С целью упрощения анализа рассмотрим случай, когда обеспечивается синусоидальная форма кривой напряженности магнитного поля.

$$H(t) = H_m \sin \omega t. \quad (11)$$

При этом магнитную индукцию можно представить в виде

$$B(t) = \frac{4B_m}{\pi\alpha} \times \left[\sin \alpha \sin(\omega t + \psi_{B1}) + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin(3\omega t + \psi_{B3}) + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin(5\omega t + \psi_{B5}) + \dots \right] \quad (12)$$

Из условия

$$d \left[\frac{\frac{4B_m}{\pi\alpha} \left[\sin \alpha \sin(\omega t + \psi_1) + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin(3\omega t + \psi_3) + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin(5\omega t + \psi_5) \right]}{H_m \sin \omega t} \right] = 0 \quad (13)$$

и учитывая, что $\sin 3\omega t = \sin \omega t (1 + 2 \cos 4\omega t)$ и

$$\sin 5\omega t = \sin \omega t (1 + 2 \cos 2\omega t + 2 \cos 4\omega t), \text{ для } \psi_k = 0,$$

получаем

$$\mu(t) = \frac{B(t)}{H(t)} = \frac{4B_m \left[\sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega t \right]}{\pi H_m \alpha \sin \omega t}, \quad (14)$$

производное которого

$$\mu'(t) = \frac{-16\omega B_m}{\alpha \pi H_m} \sin 2\alpha \left[\frac{\sin 3\alpha}{9} + \frac{\sin 5\alpha}{25} + \frac{2 \sin 5\alpha}{25} 2 \cos 2\omega t \right] = 0. \quad (15)$$

Анализ приводит к соотношению $\frac{\sin 3\alpha}{\sin 5\alpha} < \frac{3}{4} \cdot \frac{25}{36} = \frac{108}{100}$

$$\text{и далее } H_m \sin \omega t = \pm H_m \sqrt{\frac{5}{8} + \frac{25 \sin 3\alpha}{72 \sin 5\alpha}}, \quad \sin \omega t = \sqrt{\frac{5}{8} + \frac{25 \sin 3\alpha}{72 \sin 5\alpha}}$$

Подбором значения α на ЭВМ установлено, что α должен быть меньше 22° .

Количественный анализ показывает, что μ_{\max} достигается в интервале напряженности магнитного поля, близкой к значению коэрцитивной силы. Аналогичный результат получается из анализа математической модели (6).

В практике максимальная магнитная проницаемость определяется не по петле гистерезиса (где слагаемые сумм $H(t)$ от отдельных гармоник содержат начальные фазы ψ_k), а по основной кривой намагничивания.

Из таблицы видно, что μ_{\max} для различных магнитомягких материалов находится в пределах от 0,8 до 100 А/м, в частности для электротехнических сталей – (10 ... 65) А/м.

Некоторые характеристики промышленных магнитомягких материалов

Название материала	Характеристика		
	μ_{\max}	H_c , А/м	B_s в поле H_s
Технически чистое железо	3500-4500	40-100	2,18 Тл, $H_s = 50000$ А/м
Электротехническая сталь	3000-8000	10-65	1,95-2 Тл, $H_s = 30000$ А/м
Пермаллон: низконикелевые (40-50% Ni)	15000-60000	5-32	1,3-1,6 Тл
	70000-20000	0,8-4	0,7-0,75 Тл
высоконикелевые (75% Ni)			

Для реализации определения максимальной магнитной проницаемости магнитных материалов с использованием магнитоизмерительного прибора (4,5) разработано устройство, блок-схема которого дана на рис.2.

К выходам первичных преобразователей магнитной индукции (ППВ) 1 и напряженности магнитного поля (ППН) 2 подключены усилители 7 и 8, выходы которых подключены к входам математического делителя 9, выполненным на базе интегральной микросхемы К525 ПСЗ, выход которого подключен к первому входу дифференцирующего блока 10 и входу ключевой схемы 11, управляющий вход которой подключен к выходу нуль-органа 12, выполненного на базе интегральной микросхемы К521СА2. Второй вход дифференцирующего блока 10 подключен к выходу усилителя 8, а выход – к входу нуль-органа.

Устройство работает следующим образом: из выходов ППВ-1 и ППН-2 напряжения, пропорциональные $B(t)$ и $H(t)$, усиливаются усилителями 7 и 8. Эти усиленные сигналы делятся на математическом делителе 9, на выходе которого получается величина, соответствующая мгновенному значению магнитной проницаемости $\mu(t)$ за цикл перемагничивания в данном режиме намагниченности испытуемого материала. Этот сигнал дифференцируется по $H(t)$ в блоке 6 и при $\frac{d\mu}{dt} = 0$ на выходе нуль-органа 12 появляется напряжение, которое открывает ключ 11, через который проходит сигнал с выхода математического делителя 9, соответствующий максимальному значению магнитной проницаемости испытуемого материала. Измерение амплитудной магнитной проницаемости описано выше.

Государственный инженерный университет Армении

Գ. Ա. ԿԱՐԴԱՇՅԱՆ

Ֆեռոմագնիսական նյութերի մագնիսական թափանցելիության որոշումը

Քննարկված է ֆեռոմագնիսական նյութերի մագնիսական թափանցելիության ամպլիտուդային և մաքսիմալ արժեքների չափման տեսական հնարավորությունները: Հիմնավորված է անհրաժեշտ սարքի կառուցվածքային սխեմայի տարրեր օղակներին ներկայացվող պահանջները և նրանցում ձևավորվող ազդանշանները: Ստեղծված սարքը հնարավորություն է տալիս անմիջականորեն չափել ֆեռոմագնիսական նյութերի, ինչպես ամպլիտուդային, այնպես էլ մաքսիմալ մագնիսական թափանցելիությունը: Գնահատված է մագնիսափափուկ նյութերի մագնիսական թափանցելիության մաքսիմալ արժեքների և նրանց համապատասխան մագնիսական դաշտի լարվածության սահմանները:

ЛИТЕРАТУРА – ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ К.М.Поливанов, Ферромагнетики, М.-Л., Госэнергоиздат, 1957. ² А.А.Преображенский, Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы, М., Высшая школа, 1972. ³ М.А.Панасенко, Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами, М., Энергия, 1971. ⁴ Г.А.Кардашян, Изв.НАН РА и ГИУА.-Ереван, №3, 1997. ⁵ Г.А.Кардашян, Метрология. Приложение к журналу "Измерительная техника", №11, с.17-21, 1977. ⁶ Н.А.Золотарев, Электромеханика, №9, с.889-897, 1980.