

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МОСТ ОУЭНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАТИМОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОБРАЗЦА

А. М. ГРУЗНОВ, Б. Б. ВИНОКУРОВ, И. Г. ЛЕЩЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедры информационно-измерительной техники)

Под динамической обратимой проницаемостью мы понимаем обратимую проницаемость, полученную при подмагничивании образца не постоянным, а переменным полем. При этом частота подмагничивающего поля много меньше частоты поля, которое приводит к образованию петли частного цикла.

Поскольку в процессе измерения динамической обратимой проницаемости определяются составляющие комплексного сопротивления, может быть использована методика измерения мгновенных значений составляющих периодически изменяющегося комплексного сопротивления.

Пусть комплексное сопротивление, включенное в одно из плеч моста переменного тока, изменяется во времени по неизвестному закону  $Z = Z(t)$ , являясь результатом гармонического воздействия на него  $p = P_m \sin(\Omega t - \varphi)$  (рис. 1, а). Частота напряжения  $\omega$ , питающего мост, выбирается много больше частоты воздействия  $\Omega$ . Напряжение измерительной диагонали через избирательный усилитель подается на вход электронного осциллографа. При длительности развертки, равной примерно  $\frac{2\pi}{\Omega}$ , в общем случае осциллограмма модулированного по

амплитуде напряжения разбаланса моста будет иметь вид, показанный на рис. 1, б. Форма огибающей этого напряжения сложным образом будет зависеть как от закона изменения  $z$ , так и от параметров мостовой схемы.

Если для какого-то момента времени  $t_i$  выполняется условие равновесия моста, в осциллограмме для этого момента верхняя и нижняя огибающие соприкасаются в точке (рис. 1, в).

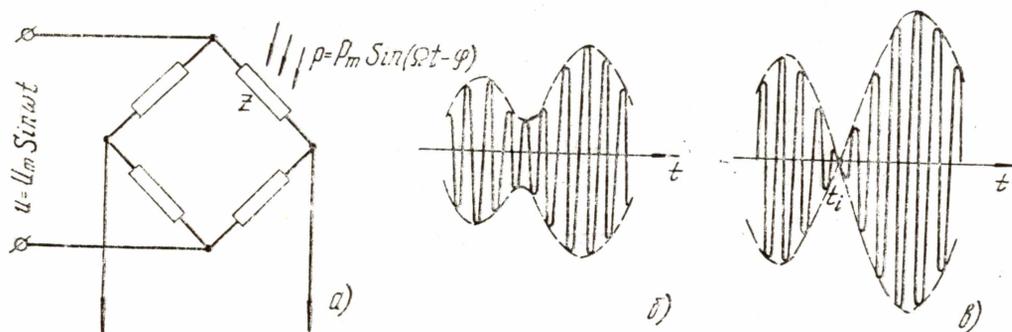


Рис. 1.

Напряжение разбаланса мостовой схемы, полученное описанным методом, помимо основной частоты  $\omega$  содержит частоты вида  $\omega \pm n\Omega$ , где  $n$  принимает в общем случае значения четных и нечетных чисел от 0 до  $\infty$ . Однако, во-первых, ввиду того, что спектральный состав  $z$  всегда может быть ограничен сверху частотой  $\Omega_i$ , во-вторых, из-за соотношения частот  $\omega \gg \Omega$ , гармоники напряжения разбаланса окажутся весьма близкими к частоте  $\omega$ . На этой частоте практически и происходит уравновешивание мостовой схемы.

Мост Оуэна является частотонезависимым, т. е. условие равновесия может быть выполнено одновременно для всех гармоник.

Частота  $\omega$  в эксперименте была равна  $2\pi \cdot 4,7$  кГц, частота  $\Omega$  —  $2\pi \cdot 0,05$  кГц.

Чтобы определить значение гармонического воздействия  $p_i$ , соответствующее моменту времени  $t_i$ , было создано устройство, синхронно с  $p$  вырабатывающее короткие строб-импульсы напряжения и подсвечивающее в момент  $t_i$  осциллограмму напряжения разбаланса моста. Калиброванный фазовращатель данного устройства позволяет изменять фазу строб-импульса в диапазоне  $0-2\pi n$ .

Если «0» шкалы фазовращателя соответствует моменту перехода  $p$  через нуль, то мгновенное значение гармонического воздействия для момента времени  $t_i$  может быть легко определено:

$$p_i = P_m \sin \Theta, \quad (1)$$

где  $\Theta$  — угол по шкале фазовращателя, соответствующий моменту  $t_i$ .

Процесс получения зависимости  $z = f(p_i)$ , где  $p_i$  — мгновенное значение гармонического воздействия, заключается в следующем. С помощью фазовращателя через небольшие интервалы задаются значения угла  $\Theta$ , по которым определяются соответствующие значения  $p_i$ . Для каждого из этих значений  $p_i$  с помощью уравновешивающих элементов мостовой схемы верхняя и нижняя огибающие напряжения разбаланса сводятся до соприкосновения в светящейся точке. Затем из условий равновесия моста по его параметрам при балансе определяются активное и реактивное сопротивления датчика.

Схема (рис. 2), работающая по предложенному методу, была рассчитана для экспериментального получения зависимости динамической обратимой проницаемости ферромагнитных образцов от мгновенного значения подмагничивающего тока 50 зц. Составляющие этой проницаемости определяются из уравнения

$$j\omega L_d + R_d = j\omega\mu_0 \frac{S_{ж}}{l_c} W^2 (\mu'_{обр} - j\mu''_{обр}), \quad (2)$$

где  $\omega$  — рабочая частота мостовой схемы,

$L_d$  — индуктивность датчика,

$\mu_0$  — проницаемость вакуума,

$S_{ж}$  — поперечное сечение магнитной цепи,

$l_c$  — средняя длина магнитной силовой линии,

$W$  — число витков датчика [1],

$\mu'_{обр}$  и  $\mu''_{обр}$  — соответственно активная и реактивная составляющие динамической обратимой проницаемости.

Преобразовав выражение 2, получим:

$$\mu'_{обр} = \frac{L_d \cdot l_c}{\mu_0 S_{ж} W^2} = A L_d, \quad (3)$$

$$\mu''_{обр} = \frac{R_d \cdot l_c}{\omega \mu_0 S_{ж} W^2} = A' R_d, \quad (4)$$

где  $A$  и  $A'$  — постоянные в условиях эксперимента коэффициенты.  
Идеальные условия равновесия моста Оуэна.

$$L_d = C_2 R_2 R_1, \quad (5)$$

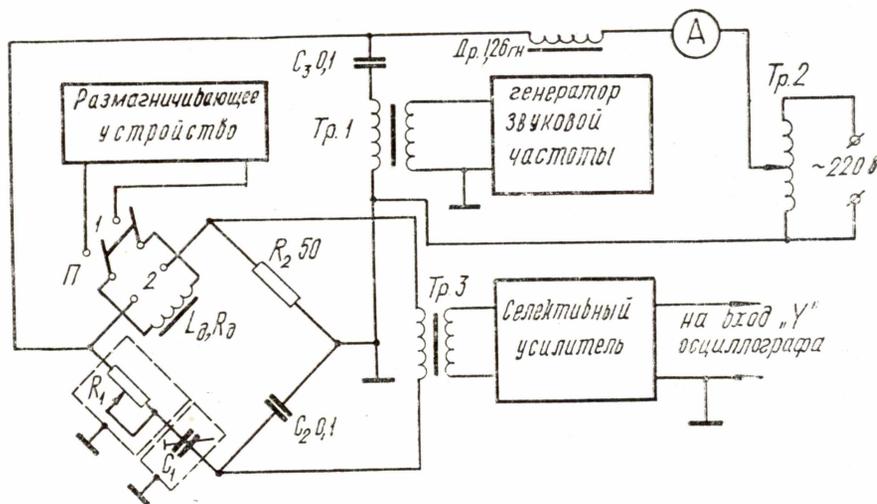


Рис. 2. Принципиальная схема модифицированного моста Оуэна для измерения динамической обратимой проницаемости

$$R_d = R_2 \frac{C_2}{C_1}. \quad (6)$$

Параметры мостовой схемы рассчитаны таким образом, чтобы, с одной стороны, удовлетворить условию максимальной чувствительности моста на рабочей частоте 4,7 кГц, с другой — сделать подмагничивающий ток практически нечувствительным к изменению уравнивающего

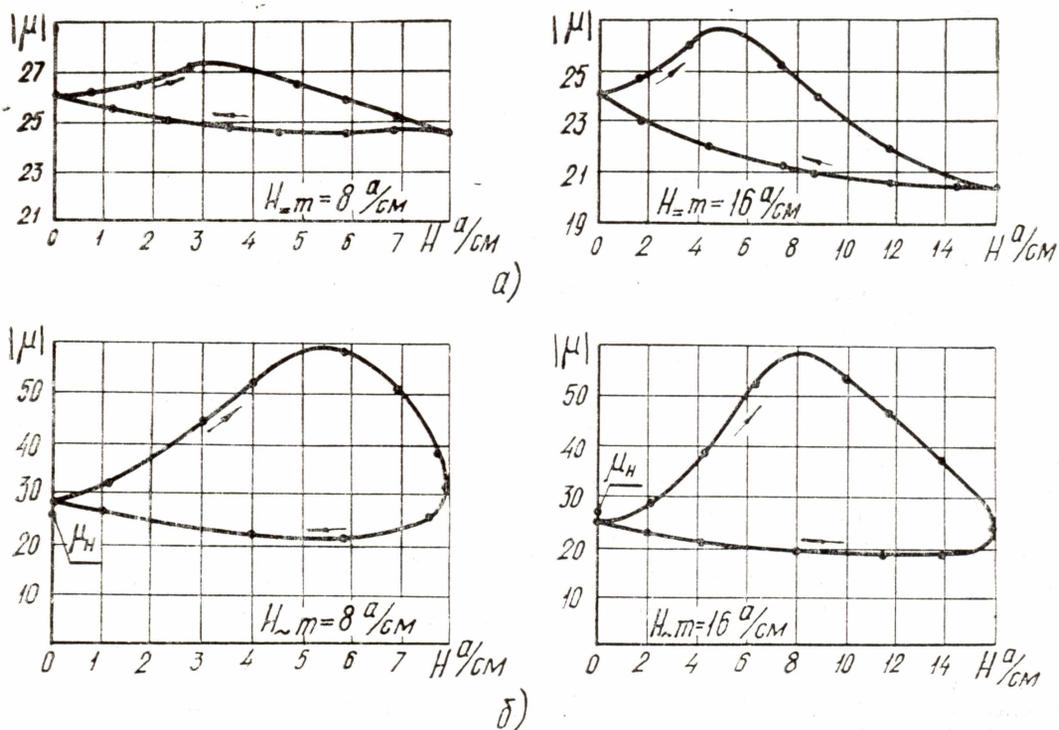


Рис. 3. Петли обратимой проницаемости при различных значениях подмагничивающих полей: а) при подмагничивании постоянными полями; б) при подмагничивании переменными полями

щих элементов мостовой схемы. Для разделения источников питания моста друг от друга служат дроссель  $Dp$  и конденсатор  $C_3$ .

В качестве воздействия  $p$  в схеме выступает ток  $i = I_m \sin(\Omega t - \varphi)$ , по значению которого нетрудно определить величину подмагничивающего поля.

По предлагаемой схеме проведены испытания для тороидального образца. Были получены сначала значения обратимой проницаемости образца при подмагничивании постоянным током, затем — при подмагничивании переменным. Амплитудное значение переменного тока соответствовало значению постоянного тока. Частота напряжения, питающего мост, была в обоих случаях одинакова — 4,7 кГц.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3 и 4.

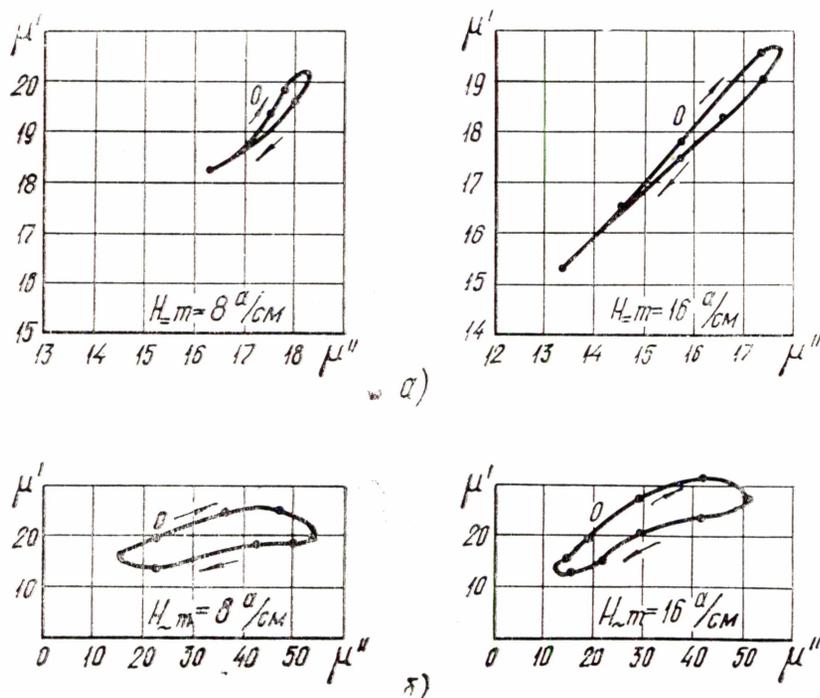


Рис. 4. Изменения составляющих обратимой проницаемости при различных значениях подмагничивающих полей: а) при подмагничивании постоянным полем; б) при подмагничивании переменным полем

На основании полученных данных видно, что:

1. Обратимая проницаемость при подмагничивании переменным полем претерпевает более значительные изменения как по амплитуде, так и по фазе, чем при подмагничивании постоянным полем с тем же самым максимальным значением.

2. Имеет место явно выраженное отставание по фазе динамической обратимой проницаемости от переменного подмагничивающего тока: минимум проницаемости наблюдается позже перехода тока через максимальное значение. Явление временного отставания объясняется наличием магнитного скин-эффекта низкочастотного поля.

3. Максимальное значение обратимой проницаемости при подмагничивании переменным полем больше максимального значения той же проницаемости при подмагничивании постоянным полем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. З. Фактор, Л. Грудный, И. Старый, З. Тишер. Магнитномягкие материалы, «Энергия», 1964.
2. К. М. Поливанов. Ферромагнетики, ГЭИ, 1957.