

## РАБОТА 18

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Цель работы:** исследование намагничивания трансформаторной стали, построение основной кривой намагничивания, а также зависимостей магнитной проницаемости и интенсивности намагничивания от напряженности магнитного поля с использованием измерителя заряда на операционном усилителе.

**Общие сведения.** Ферромагнитными веществами (ферромагнетиками) называются такие вещества, которые могут обладать спонтанной намагниченностью, т.е. быть намагниченными в отсутствие магнитного поля.

Характерной особенностью ферромагнетиков является нелинейная зависимость между вектором намагниченности  $\mathbf{J}$  и напряженностью  $\mathbf{H}$  магнитного поля, а, следовательно, между вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$  и напряженностью  $\mathbf{H}$ . Ход зависимости магнитной индукции  $B(H)$  предварительно размагничено ферромагнетика при первом его намагничивании называют *основной кривой намагничивания*. При циклическом изменении напряженности магнитного поля процесс протекает по одному из двух ее S – образных отрезков. Эти отрезки ограничивают некоторую площадь на графике зависимости  $B(H)$ , образуя *петлю гистерезиса*.

Впервые полное экспериментальное исследование зависимости  $B(H)$  было проведено профессором Московского университета А. Г. Столетовым. Он разрешил важный вопрос о том, как от исследования магнитных свойств образца данной формы перейти к магнитным характеристикам вещества, из которого выполнен образец. Заметим здесь, что значение напряженности магнитного поля внутри образца не всегда совпадает со значением напряженности внешнего магнитного поля, в которое помещен исследуемый образец. Требуемое совпадение, как указал Столетов, имеет место в случае тороидального образца, намагничиваемого круговой обмоткой, намотанной на него. В этом случае линии магнитного поля не пересекают поверхности образца и образуют систему концентрических окружностей вокруг общего с ферромагнитным тором центра. Именно такой образец используется в настоящей работе.

Ввиду нелинейности  $B(H)$  для ферромагнетика невозможно определить магнитную проницаемость  $\mu$  как некую постоянную характеристику данного вещества. Если считать, что

$$\mu = B/(\mu_0 H), \quad (15.1)$$

то  $\mu$  надо рассматривать как функцию напряженности поля  $H$ , причем конечные значения  $\mu$  принимает только для основной кривой намагничивания. Действительно, для петли гистерезиса данное определение  $\mu$  не имеет смысла, т.к. на оси ординат, где  $H = 0$ ,  $\mu$  бесконечно велико, тогда как в точках пересечения петли с осью абсцисс  $\mu = 0$ .

Кроме магнитной проницаемости, определенной ранее (*статическая магнитная проницаемость*), для ферромагнетика вводится *дифференциальная магнитная проницаемость*

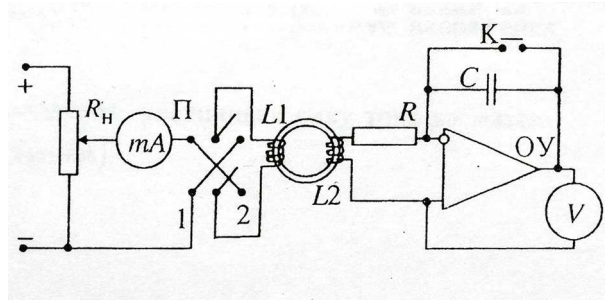
$$\mu_d = (1/\mu_0)(dB/dH) \quad (15.2)$$

Вычислив значения  $H$  для исследуемого материала при различных токах намагничивания и получив из опыта соответствующие значения магнитной индукции  $B$ , можно для данного ферромагнетика определить магнитные проницаемости  $\mu$  и  $\mu_d$ , а также интенсивность намагничивания

$$J = (B/\mu_0) - H \quad (15.3)$$

### Экспериментальная установка.

Установка для исследования намагничивания ферромагнетика (см. рисунок) содержит исследуемый образец, выполненный в виде тороида с площадью сечения магнитопровода  $S$ ; операционный усилитель, включенный по схеме интегратора; миллиамперметр ( $mA$ ) и вольтметр ( $V$ ); переключатель  $\Pi$ , служащий для коммутации тока в намагничивающей обмотке  $L1$ ; потенциометр  $R_H$ , с помощью которого устанавливается намагничивающий ток. Измерительная обмотка  $L2$  подключена к входу ОУ. Намагничивающая обмотка, наложенная на тороид из исследуемого ферромагнетика, намотана равномерно по всей длине тороида. Обмотка содержит  $n$  витков на единицу длины средней линии тороида.



Напряженность магнитного поля  $H$  внутри тороида находится расчетным путем:

$$H = nI, \quad (15.4)$$

где  $I$  – сила тока в намагничивающей обмотке.

Для измерения индукции  $B$  внутри тороида на нем дополнительно наматывают измерительную обмотку с числом витков  $N$ . Магнитный поток (поток вектора индукции) через измерительную обмотку при заданном значении силы тока  $I$  в намагничивающей обмотке равен

$$\Phi = SB.$$

Где  $S$  – площадь сечения магнитопровода тороида. Изменив направление тока в намагничивающей обмотке на обратное (эта операция носит название *коммутации тока*), изменяют тем самым и направление вектора магнитной индукции в магнитопроводе на противоположное. В результате полное изменение магнитного потока будет равно

$$\Delta\Phi = 2SB$$

Следовательно, в измерительной катушке возникнет ЭДС индукции

$$|E| = N(d\Phi/dt)$$

и, соответственно ток

$$I = E/R = (N/R)(d\Phi/dt)$$

Где  $R$  – общее сопротивление замкнутой цепи, в которую включена измерительная катушка.

За время  $t$  коммутации тока на конденсаторе  $C$  в цепи обратной связи ОУ накапливается заряд

$$Q = \int_0^t Idt = 2 \frac{N}{R} BS$$

На выходе ОУ заряд  $Q$  вызовет напряжение

$$U = \frac{Q}{C} = 2 \frac{N}{RC} BS$$

откуда

$$B = \frac{RCU}{2NS} \quad (15.5)$$

### **Методика проведения эксперимента.**

1. Включить измерительную установку.
2. Провести размагничивание образца. Для этого довести силу тока в намагничивающей обмотке до максимально возможного значения и далее медленно уменьшать ее до нулевого значения, производя одновременно непрерывную коммутацию тока с помощью переключателя П. Многократно перемагничиваемый во все более слабых полях ферромагнетик окажется после этого практически размагниченным.
3. Установить переключатель П в положение 1 и нажатием кнопки К разрядить конденсатор С.
4. Установить начальное (небольшое, около 5% от максимально возможного) значение силы тока в намагничивающей обмотке. Увеличение тока надо проводить исключительно тщательно, так как ошибочное превышение тока над планируемым с последующим его уменьшением (для исправления) исказит весь ход кривой индукции и потребует возобновления процесса размагничивания.
5. Нажатием кнопки К разрядить конденсатор С.
6. Провести коммутацию тока, переведя переключатель П в положение 2.
7. Записать максимальное значение изменения выходного напряжения ОУ  $U_i$ .
8. Наблюдения по пп. 3 – 7 выполнить, увеличивая силу тока до максимально возможной (не менее 10 значений).

### **Задание по обработке результатов**

1. Рассчитать значения напряженности  $H_i$  и индукции  $B_i$  магнитного поля, пользуясь формулами (15.4) и (15.5) и данными на панели установки. Построить основную кривую намагничивания.
2. Воспользовавшись формулой (15.3), построить зависимость  $J(H)$  интенсивности намагничивания от напряженности магнитного поля.
3. Воспользовавшись формулами (15.1) и (15.2), построить зависимости статической и динамической магнитных проницаемостей от напряженности магнитного поля. Оценить коэффициент нелинейности исследуемого ферромагнетика как отношение значения максимальной статической магнитной проницаемости к ее начальному значению.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем состоит сущность баллистического метода измерений, предложенного А. Г. Столетовым?
2. Почему в формуле (15.2)  $S$  - площадь сечения магнитопровода тороида, а не площадь сечения витков измерительной катушки?
3. Зачем необходимо размагничивать образец?
4. Поясните физический смысл вектора интенсивности намагничивания.

5. Каковы особенности магнитных свойств ферромагнетиков?