

### 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В МАГНЕТИКАХ

Вещества, способные изменять магнитную индукцию при внесении их во внешнее магнитное поле, называются магнетиками.

Это свойство магнетиков объясняется тем, что атомы или молекулы этих веществ обладают собственными магнитными моментами или приобретают их, благодаря действию внешнего магнитного поля. Эти магнитные моменты, ориентируясь определенным образом во внешнем магнитном поле  $\vec{B}_0$ , создают свое собственное магнитное поле  $\vec{B}'$ , которое, накладываясь на внешнее, образует результирующее магнитное поле

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'. \quad (3.1)$$

В этом случае говорят, что вещество намагничивается, а мерой этого процесса является величина, определяющая магнитный момент единицы объема:

$$\vec{J} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \vec{P}_i}{\Delta V},$$

где  $\vec{P}_i$  – магнитный момент атома;  $n$  – число атомов в объеме  $\Delta V$ . Эта величина называется вектором намагничивания или намагниченностью вещества. Нетрудно показать, что индукция собственного поля магнетика пропорциональна намагниченности

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}. \quad (3.2)$$

Подставляя (3.2) в (3.1), получим

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{J}. \quad (3.3)$$

Индукция  $\vec{B}_0$  и намагниченность  $\vec{J}$  зависят от напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ :

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (3.4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества.

Подставляя (3.4) в (3.3), получим

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}.$$

Вводя обозначение

$$1 + \chi = \mu,$$

получим

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (3.5)$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества.

Из (3.5) и (3.4) следует, что

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}.$$

Таким образом, относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз индукция магнитного поля усиливается веществом.

Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на три класса: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики. Критерием такого деления является величина и знак магнитной восприимчивости  $\chi$ , которая у диамагнетиков составляет от  $-10^{-8}$  до  $-10^{-5}$ , у парамагнетиков – от  $+10^{-7}$  до  $+10^{-3}$ , а у ферромагнетиков – от  $+10^2$  до  $+10^5$  и более. Эта величина для ферромагнетиков к тому же является функцией напряженности магнитного поля. Для практики наибольший интерес представляют ферромагнетики. Они являются сильномагнитными веществами, их намагниченность может превышать намагниченность диа- и парамагнетиков в  $10^{10}$  раз. Такие уникальные магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены их доменной структурой. Домены представляют собой микроскопические области размерами ( $10^{-3} - 10^{-4}$ ) см, которые

самопроизвольно намагничены. Каждый из доменов намагничен до насыщения, т.е. внутри каждого домена все спиновые магнитные моменты атомов располагаются параллельно, создавая результирующий магнитный момент домена.

В отсутствие внешнего магнитного поля домены ориентированы хаотически, так что суммарная намагниченность ферромагнетика равна нулю. Физическая сущность процесса намагничивания заключается в смещении границ доменов, роста одних доменов за счет других и создании преимущественного их направления по внешнему полю. Если на образец ферромагнетика еще не действовало магнитное поле, то при постепенном увеличении напряженности магнитного поля процесс намагничивания будет совершаться по основной кривой намагничивания  $B(H)$ . В результате смещения границ сразу большого числа доменов создается их преимущественная ориентация, индукция магнитного поля резко возрастает, и крутизна начального участка кривой намагничивания будет также возрастать (рис. 3.1). При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля все меньше будет оставаться не сориентированных по полю доменов. Рост крутизны, а затем и сама крутизна основной кривой намагничивания будут уменьшаться. Когда все домены будут сориентированы по полю, зависимость  $B(H)$  станет линейной, так как  $B$  будет увеличиваться только за счет увеличения  $H$ . В этом случае ферромагнетик намагничен до насыщения.

При дальнейшем циклическом уменьшении и увеличении поля в противоположных направлениях кривая  $B(H)$  будет представлять собой петлю гистерезиса (рис. 3.2).

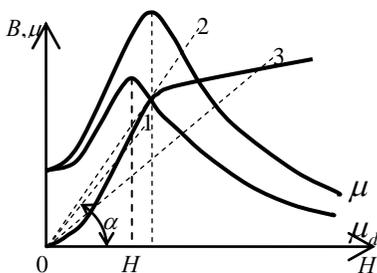


Рис. 3.1

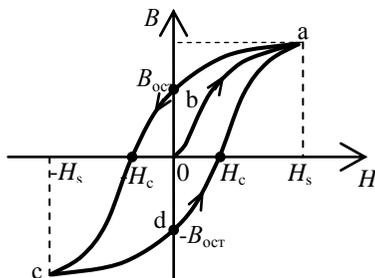


Рис. 3.2

Процессы намагничивания необратимы (обратимы только на начальном участке основной кривой намагничивания, когда происходит упругое смещение границ доменов). Если напряженность магнитного поля, доведенную до величины  $H_s$ , соответствующей насыщению вектора намагничивания (началу линейного участка кривой  $B(H)$ ), уменьшить до нуля, то намагничивание сохранит определенное значение, называемое остаточной намагниченностью, а индукция магнитного поля станет равной остаточной индукции  $B_{ост}$  (см. рис. 3.2). Для снятия остаточной намагниченности (или индукции) необходимо приложить обратное поле с напряженностью  $H_c$ .

Величина  $H_c$  называется коэрцитивной силой и является важной характеристикой ферромагнетика. При его перемагничивании от  $+H_s$  до  $-H_s$ , и обратно кривые не совпадают. При увеличении обратного намагничивающего поля вновь достигается насыщение. Если от точек насыщения «с» уменьшить магнитное поле до нуля, а затем, изменив направление поля, увеличить его, получим кривую намагничивания «cda». Замкнутая кривая «abcd» называется петлей гистерезиса. Если вначале увеличить напряженность магнитного поля, не доводя намагничивание до насыщения, а затем уменьшить ее, то можно

получить семейство петель гистерезиса. Если коэрцитивная сила  $H_c$  велика, ферромагнетик называют магнитожестким. Для него характерна широкая петля гистерезиса. Ферромагнетик с малой  $H_c$  и соответственно с узкой петлей гистерезиса – магнитомягкий.

Понятие относительной магнитной проницаемости применимо к тем значениям  $B$  и  $H$ , которые определяются основной кривой намагничивания. Следовательно, относительная магнитная проницаемость определяет наклон прямых 1, 2, 3 ( $\text{tg}\alpha$ ), проведенных из начала координат в те точки основной кривой намагничивания  $B(H)$ , которые соответствуют заданным значениям напряженности поля  $H$  и соответствующим им значениям  $\mu$  (см. рис. 3.1).

Из рис. 3.1 видно, что наклон этих прямых с ростом  $H$  возрастает на начальном участке  $B(H)$ , достигает максимума, когда прямая, соединяющая начало координат с основной кривой намагничивания, становится касательной к  $B(H)$ , и убывает при дальнейшем росте  $H$ . Отсюда ясно, что такой же характер должна иметь зависимость  $\mu(H)$ .

Существует также понятие дифференциальной магнитной проницаемости

$$\mu_d = \frac{dB}{\mu_0 dH},$$

где  $dB$  – приращение индукции магнитного поля в магнетике, определенное по основной кривой намагничивания, соответствующее бесконечно малому приращению напряженности магнитного поля  $dH$ . Из определения следует, что  $\mu_d$  определяет крутизну основной кривой намагничивания как тангенс угла наклона касательной к ней в точке, соответствующей заданному значению  $H$ . Поскольку основная кривая намагничивания  $B(H)$  имеет точку перегиба при некотором значении  $H_d$ , то этому значению будет соответствовать экстремум функции

$\mu_d(H)$  как производной  $B(H)$ . Поэтому  $\mu_d(H)$  имеет максимум, соответствующий точке перегиба основной кривой намагничивания  $B(H)$  (см. рис. 3.1).

Используя петлю гистерезиса, легко рассчитать потери энергии на перемагничивание образца.

Интеграл  $\oint HdB$ , вычисленный вдоль петли гистерезиса, равен площади  $S_{\Pi}$  охватываемой петлей. По завершении цикла перемагничивания  $H$  и  $B$ , а следовательно, и магнитная энергия будут иметь первоначальную величину. Это значит, что работа перемагничивания ферромагнетика идет на увеличение внутренней энергии ферромагнетика, т.е. на его нагревание.

При совершении одного цикла перемагничивания ферромагнетика в расчете на единицу объема затрачивается работа, численно равная площади петли гистерезиса:

$$A_{ед.об.} = \oint HdB = S_{\Pi}.$$

Эта работа идет на нагревание ферромагнетика.

Как следует из формулы, величина потерь, приходящаяся на единицу объема, численно равна площади петли гистерезиса. Таким образом, площадь петли гистерезиса есть мера потерь энергии в единице объема за один цикл перемагничивания. При частоте перемагничивания  $f$  потери в единице объема за единицу времени равны

$$Q_v = A_v \cdot f. \quad (3.7)$$

## **304. СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА**

### **304.1. Цель работы**

Изучение гистерезиса ферромагнетика, исследование зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.

### **304.2. Теоретический материал**

Магнитные свойства вещества. Ферромагнетики и их свойства. Намагниченность, магнитная проницаемость, напряженность и индукция магнитного поля, явление гистерезиса. Энергия магнитного поля.

[1. С. 153 - 162, 165 - 166, 176 - 180, 195 - 198; 2. С. 187 - 188, 206 - 208, 209 - 212].

### **304.3. Постановка задачи**

В работе студент должен получить на экране осциллографа семейство петель гистерезиса, снять для каждой из них координаты ее вершин и, используя полученные данные, вычислить значение индукции  $B$  и напряженности  $H$  магнитного поля, кроме того, вычислить относительную магнитную проницаемость  $\mu$  и построить зависимость  $B = B(H)$  и  $\mu = \mu(H)$ . Рассчитать по полученным значениям намагниченность  $J$ , построить зависимость  $J = J(H)$  и объяснить ход этой кривой.

### **304.4. Описание установки**

На рис. 304.1 изображена схема для наблюдения петли гистерезиса на экране осциллографа.

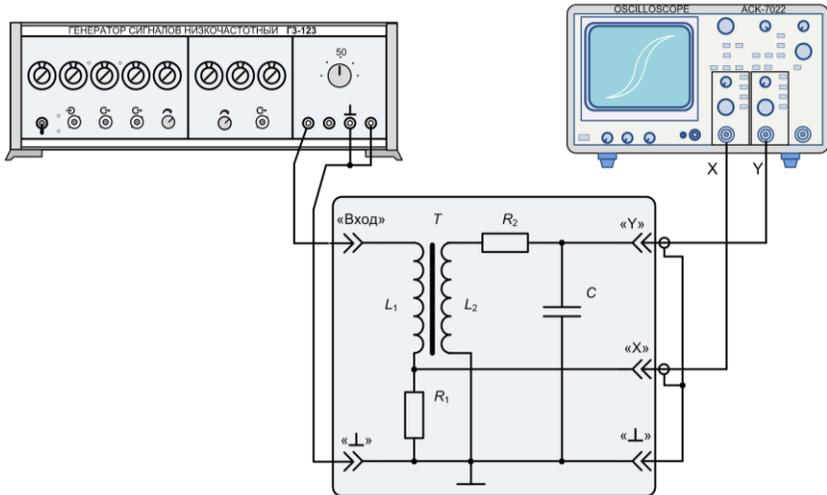


Рис. 304.1

Синусоидальное напряжение регулируемой амплитуды с выхода генератора ГЗ-123 подается на гнезда «Вход» и «⊥». На кольцевом ферромагнитном сердечнике намотаны обмотки  $L_1$  и  $L_2$ .

Чтобы получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, необходимо на вход усилителя горизонтального отклонения луча осциллографа подать напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля, а на вход усилителя вертикального отклонения – напряжение, пропорциональное магнитной индукции. Для получения семейства петель гистерезиса необходимо изменять амплитуду напряжения  $U_x$ .

В схеме на рис. 304.1 напряжение, подаваемое с резистора  $R_1$  на вход усилителя горизонтального отклонения луча осциллографа, равно

$$U_x = iR_1, \quad (304.1)$$

где  $i$  – переменный ток, проходящий по обмотке  $L_1$ .

Переменный ток  $i$ , проходя по намагничивающей обмотке, создает в трансформаторе магнитное поле с напряженностью

$$H = \frac{N_1}{l} i, \quad (304.2)$$

где  $N_1$  – число витков в первичной обмотке  $L_1$ , а  $l$  – длина сердечника.

Из уравнений (304.1) и (304.2) получим

$$U_x = \frac{lR_1}{N_1} H. \quad (304.3)$$

Таким образом,  $U_x \sim H$ .

Во вторичной обмотке  $L_2$  возникает ЭДС индукции

$$E = -\frac{d\psi}{dt} = -SN_2 \frac{dB}{dt}, \quad (304.4)$$

где  $\psi = N_2BS$  – потокосцепление вторичной обмотки;  $S$  – площадь сечения сердечника;  $N_2$  – число витков вторичной обмотки;  $B$  – индукция магнитного поля в сердечнике.

Для того чтобы получить напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля, между обмоткой  $L_2$  и осциллографом ставят интегрирующую  $RC$  – ячейку, удовлетворяющую условию  $RC \gg T$  ( $T$  – период колебаний переменного тока). Напряжение, снимаемое с конденсатора, будет пропорционально индукции магнитного поля. Покажем это.

При  $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$  ток в цепи обмотки  $L_2$  с учетом (304.4)

равен

$$i = \frac{E}{R_2} = \frac{SN_2}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (304.5)$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_y = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int idt. \quad (304.6)$$

Подставляя выражение (304.5) в (304.6), получим

$$U_x = -\frac{SN_2}{R_2C} \cdot B. \quad (304.7)$$

Таким образом, на вход усилителя горизонтального отклонения электронного луча осциллографа подается напряжение, пропорциональное  $H$ , а на вход усилителя вертикального отклонения – напряжение, пропорциональное  $B$ . На экране осциллографа получается петля гистерезиса  $B = B(H)$ .

За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране опишет полную петлю гистерезиса и за каждый последующий период повторит ее полностью. Поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса.

При уменьшении  $U_x$  будет уменьшаться амплитуда колебаний напряженности  $H$  и на экране получится ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Верхняя точка петли гистерезиса находится на основной кривой намагничивания. Следовательно, для построения основной кривой намагничивания необходимо снять с осциллографа значение координат вершин петель гистерезиса  $U_x$  и  $U_y$ .

Для построения кривой намагничивания из формул (304.3) и (304.7) определяем  $H$  и  $B$ :

$$H = \frac{N_1}{lR_1} U_x, \quad (304.8)$$

$$B = \frac{R_2C}{SN_2} U_y.$$

### 304.5. Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Подключить лабораторный макет по схеме (см. рис. 304.1).

2. Установить частоту генератора равную 1000 Гц, выходное напряжение 8 В, а переключатель «НАГРУЗКА» в положение – 50 Ом.

3. Подключить питание генератора сигналов низкой частоты (НЧ) ГЗ-123 и включить сетевой тумблер.

4. Подключить питание осциллографа АСК-7022 и включить сетевой выключатель «**POWER**» (СЕТЬ) (рис. 304.2).

5. После прогрева осциллографа, регулятором «**INTEN**» (ЯРКОСТЬ) установить необходимую яркость луча.

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ:** Не устанавливать чрезмерную яркость луча, так как, если на экране осциллографа видна яркая неподвижная точка, то возможно повреждение люминофора экрана!

При необходимости произвести установку яркости цифровой индикации регулятором «**READOUT**» (ПОКАЗАНИЯ), а фокусировку луча – регулятором «**FOCUS**» (ФОКУСИРОВКА).

6. Включить на осциллографе режим X-Y, нажав кнопку «X-Y». При этом Канал-1 осциллографа будет производить отклонение луча по оси X, а Канал-2 – по оси Y.

7. Установить переключателями чувствительности каналов «**VOLTS/DIV**» (ВОЛЬТ/ДЕЛ.) коэффициент отклонения Канала -1 в положение 2 В/дел., а Канала-2 в положение 100 мВ/дел. При этом в левом нижнем углу экрана цифровые индикаторы будут показывать « **1 : 2V 2 : 100mV** »

Нажатие на ручку этого переключателя приведёт к установке некалиброванного коэффициента отклонения соответствующего канала. (При этом, на экране появится надпись: «1 : 2V 2 : > 100mV»). Этот режим не используется в данной работе, поэтому для установки калиброванного коэффициента следует повторно нажать на эту ручку.

8. Кнопками включения каналов «CH1» (КАНАЛ1) и «CH2» (КАНАЛ2) и с помощью регуляторов установки положения луча на экране «POSITION» (ПОЛОЖЕНИЕ) установите изображение петли гистерезиса в центре экрана. Положение по оси X можно устанавливать регулятором «POSITION < >» (в правом верхнем углу передней панели осциллографа), причём, при нажатии кнопки «FINE» (ПЛАВНО), производится плавная регулировка.

9. Кнопками «GND» (ЗАЗЕМЛЕНИЕ) можно отключать сигнал, подаваемый на вход соответствующего канала и получать линию на экране. Таким образом, можно точнее установить положение петли гистерезиса в центре экрана. Для этого нажмите кнопку «GND» Канала-1. Так как при этом на вход Канала-1 (Вход X) не будет поступать сигнал, то луч будет отклоняться только по оси Y, и на экране будет видна вертикальная линия, которую необходимо регулятором «POSITION < >» совместить с центральной вертикальной линией шкалы экрана. После центровки по оси X необходимо повторным нажатием на кнопку «GND» Канала-1 снова включить сигнал, подаваемый на вход Канала-1. Затем произвести аналогичные операции с центровкой изображения по оси Y с помощью кнопки «GND» Канала-2 и регулятором «POSITION» Канала-2.



10. Кнопка «**INV**» (ИНВЕРТИРОВАНИЕ) в Канале-2 производит инвертирование изображения (изменения полярности сигнала). Кнопка «**ADD**» (СУММИРОВАНИЕ) в Канале-1 включает режим суммирования сигналов, поступающих на входы каналов. В данной лабораторной работе эти кнопки не используются и должны быть выключены.

Кнопки «**AC/DC**» служат для переключения входов каналов в режим закрытого или открытого входа. При закрытом входе на надписи « **1 : 2V**    **2 : 100mV** » над буквой **V** появляется знак « $\sim$ ». Для уменьшения искажений петли гистерезиса входы обоих каналов необходимо установить в режим открытого входа (DC).

11. Установить максимальный размер изображения петли гистерезиса с помощью декадных ступенчатых переключателей и ручкой плавной установки выходного напряжения генератора ГЗ-123.

Зарисовать на миллиметровой бумаге петлю гистерезиса, соответствующую максимальному напряжению 8 В, подаваемому с выхода генератора ГЗ - 123 и подсчитать число клеток  $\beta$ , охватываемых петлей гистерезиса.

### **Измерение напряжений $\Delta V_x$ и $\Delta V_y$ , пропорциональных **H** и **B** соответственно**

12. В осциллографе АСК-7022 есть возможность производить измерения с помощью курсоров. В режиме X-Y можно измерять разность напряжения как по оси X, так и по оси Y, что ускоряет измерения параметров петли гистерезиса и значительно уменьшает погрешность измерения по сравнению с традиционными методами измерения с помощью масштабной сетки экрана осциллографа. Для включения курсорных измерений необходимо нажать кнопку « **$\Delta V \Delta t$  OFF**», которая переключает виды курсоров в последовательности: **горизонтальные курсоры – вертикальные курсоры –**

**выкл.** В режиме X-Y оба вида курсора будут давать показания разности  $\Delta V$  по соответствующей оси. При включении горизонтальных курсоров на экране появляются две пунктирные горизонтальные линии курсора C1 и курсора C2, причём кнопкой выбора активного курсора «ТСК/C2» можно сделать активным любой из курсоров: C1 или C2, а в режиме ТСК (СЛЕЖЕНИЕ) будут активны оба курсора (режим слежения в данной работе не используется). На экране справа вверху появляется надпись «f: Y – C1», означающая что выбран режим измерения по оси Y и активен курсор C1. Если выбран активным курсор C2, то на экране появится надпись «f: Y – C2». Активный курсор на экране выделен яркой меткой на конце пунктира, и его можно перемещать, вращая ручку «FUNCTION» (ФУНКЦИЯ), которая при нажатии на неё осуществляет грубое перемещение.

Выбрав кнопкой « $\Delta V \Delta t$  OFF» вертикальные курсоры, можно производить измерения разности напряжения по оси X. При этом на экране появится надпись: «f: X – C1» или – «f: X – C2» в зависимости от выбранного курсора.

Отсчёт показаний курсоров  $\Delta V$  будет показан в нижнем левом углу экрана. Для режима X-Y при вертикальных курсорах (измерения по оси X) показания будут на экране в виде  $\Delta V1 = \dots V$ , а для горизонтальных курсоров (измерения по оси Y) – в виде  $\Delta V2 = \dots mV$ . В нашем случае можно обозначить  $\Delta V1 = \Delta V_x$ , а  $\Delta V2 = \Delta V_y$ .

Для измерения  $\Delta V_y$  надо выбрать кнопкой « $\Delta V \Delta t$  OFF» горизонтальные курсоры и, нажав кнопку «GND» Канала-1, получить вертикальную линию. Затем установить курсор C1 на нижний конец линии, а курсор C2 – на верхний и считать показания  $\Delta V2 = \Delta V_y$  с экрана. Результаты измерений занести в табл. 304.1.

Для измерения  $\Delta V_x$  выбрать кнопкой « $\Delta V \Delta t$  OFF» вертикальные курсоры и, нажав кнопку «GND» Канала-2,

получить горизонтальную линию. Затем установить курсор С1 на левый конец линии, а курсор С2 – на правый и считать показания  $\Delta V_1 = \Delta V_x$  с экрана. Результаты измерений занести в табл. 304.1.

13. Получить на экране семейство петель гистерезиса (6-8), уменьшая подаваемое напряжение с помощью декадного переключателя генератора НЧ. Шаг изменяемого напряжения 1 В. Измерить для каждой из петель величины  $\Delta V_x$ ,  $\Delta V_y$  (см. п. 12.), данные занести в табл. 304.1.

Таблица 304.1

№ п/п	$\Delta V_x$ , В	$\Delta V_y$ , В	$H$ , А/м	$B$ , Тл	$\mu = B/\mu_0 H$	$J$ , А/м
1						
2						
3						
...						
8						

14. Занести в табл. 304.2 данные с лабораторного макета.

Таблица 304.2

$N_1$ , вит.	$N_2$ , вит.	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$C$ , Ф	$\ell$ , м	$S$ , м <sup>2</sup>	$f$ , Гц
100	150	160	$5.1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$103.6 \cdot 10^{-3}$	$77 \cdot 10^{-6}$	1000

### 304.6. Порядок выполнения расчётной части и обработка результатов измерений

1. Рассчитать максимальные значения величин  $H$  и  $B$ , используя выражение (304.8) для различных петель. В выражении (304.8) величина  $U_x$  определяется как  $U_x = \Delta V_x / 2$ , а величина  $U_y$  определяется как  $U_y = \Delta V_y / 2$ , так как величины  $\Delta V_x$  и  $\Delta V_y$  измерены от вершины и до вершины петли гистерезиса. Результаты занести в табл. 304.1.

2. По полученным данным построить график зависимости  $B = B(H)$ .

3. Вычислить относительную магнитную проницаемость  $\mu$  по формуле  $\mu = B / \mu_0 H$ . Полученные данные занести в табл. 304.1.

4. Построить график зависимости  $\mu = \mu(H)$ .

5. Используя экспериментальные и расчётные данные, вычислить для полученных значений  $H$  намагниченность  $J$ , используя выражение  $H = \frac{B}{\mu_0} - J$ .

Результаты вычислений занести в табл. 304.1.

6. По полученным данным построить график зависимости  $J = J(H)$ .

7. Объясните вид кривой  $J = J(H)$ .

8. Рассчитать потери энергии на перемагничивание по следующей методике.

Цена одной клетки миллиметровой бумаги в направлении оси  $H$  определяется по формуле  $K_x = 2H/N_x$ , а в направлении оси  $B$  по формуле  $K_y = 2B/N_y$ , где  $N_x$  и  $N_y$  – количество клеток по соответствующим осям от вершины до вершины петли,  $H$  и  $B$  значения напряжённости и индукции магнитного поля соответствующие вершине петли гистерезиса (точка  $a$  на рис. 3.2). Тогда плотность энергии потерь, приходящихся на площадь одной клетки,

равна ( $K_x K_y$ ).

Если петля гистерезиса содержит  $\beta$  клеток, то площадь её в единицах энергии будет численно равна

$$S = \beta K_x K_y.$$

Таким образом, потери энергии в единице объёма за единицу времени составят

$$Q_v = \beta \cdot K_x \cdot K_y \cdot f,$$

где  $[K_x] = [\text{А/м} \cdot \text{дел.}]$ ;  $[K_y] = [\text{Тл/дел.}]$ ;  $[f] = [\text{Гц}]$ ;  $[Q_v] = [\text{Дж/м}^3 \cdot \text{с}]$ .

9. Оценить погрешность определения потерь энергии.

### Контрольные вопросы

1. Почему значение  $\mu$  для ферромагнетиков велико?
2. В чем заключается явление гистерезиса?
3. Как можно объяснить остаточную намагниченность?
4. Что называется коэрцитивной силой?
5. На что затрачивается энергия при перемагничивании ферромагнетика?
6. Укажите, какое измерение в работе дает результат, обладающий самой большой погрешностью?
7. Объясните зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.
8. Дайте определение вектора намагничивания.
9. В чем отличие процессов намагничивания пара- и ферромагнетиков?