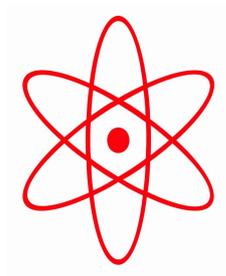


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



**ФЭЛ-11**

**ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ.**

Тула, 2011 г

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ.

Цель работы: практическое изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях и приобретении экспериментальных навыков исследования процесса намагничивания ферромагнетиков с помощью электронного осциллографа и статическим методом.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### Магнитные свойства твердых тел.

Согласно современной физической теории, атомы обладают магнитными свойствами, являясь как бы элементарными магнитами. Количественно магнитные свойства таких элементарных магнитов (а также и больших тел) оцениваются по тому механическому моменту  $\vec{M}$ , который на них действует при нахождении их во внешнем магнитном поле, при этом:

$$\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{B}] = \mu_0 [\vec{p} \times \vec{H}] \quad (1.1)$$

где  $\vec{p}$  – магнитный момент элементарного магнита;

$\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная;

$\vec{H}$  – напряженность внешнего магнитного поля.

Таким образом, все вещества обладают магнитными свойствами, т.е. являются магнетиками. Магнитные свойства веществ определяются величиной и ориентацией магнитных моментов молекул, ионов или атомов. Магнитный момент  $\vec{p}$  плоского контура  $S$ , по которому течет ток  $I$ , определяется по формуле

$$\vec{p} = IS\vec{n}, \quad (1.2)$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали, направление которого определяется по правилу правого винта относительно направления тока в контуре.

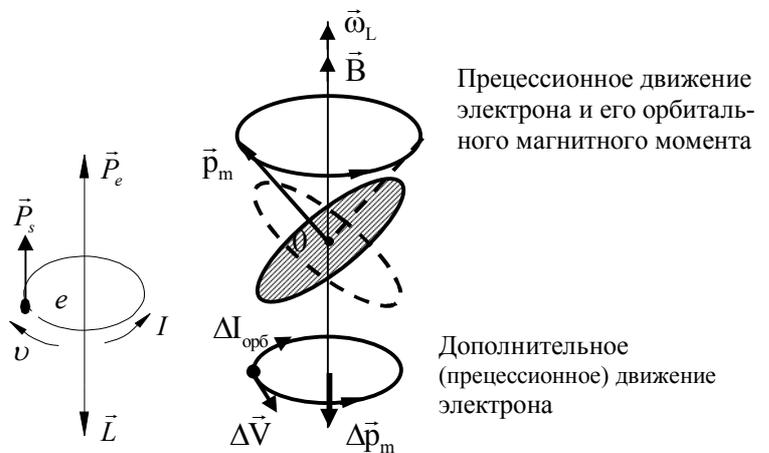


Рис.1

Рис.2

Прецессионное движение  
электрона и его орбиталь-  
ного магнитного момента

Дополнительное  
(прецессионное) движение  
электрона

Контур с током создает также собственное магнитное поле с индукцией в его центре  $B_I$ , совпадающее по направлению с магнитным моментом  $\vec{p}$  контура.

В магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  на электрон, вращающийся по окружности, действует момент сил (1.1):

$$|\vec{M}| = \left| \left[ \vec{p} \vec{B} \right] \right| = pB \sin(\vec{p}, \vec{B}), \quad (1.3)$$

который заставляет вращаться момент импульса электрона вокруг направления вектора индукции магнитного поля, т.е. порождает прецессионное движение электрона. В результате прецессии орбиты электрона создается дополнительный прецессионный ток  $\Delta I_{\text{орб}}$ , магнитный момент которого  $\Delta \vec{p}_m$  всегда направлен против вектора индукции внешнего поля.

Магнитный момент ядра  $\vec{p}_c$  значительно меньше магнитных моментов электронов в атоме и его влиянием можно пренебречь. При отсутствии поля приближенно можно считать, что магнитный момент атома:

$$\vec{p}_a = \sum_{i=1}^N \vec{p}_{ei}, \quad (1.4)$$

где  $N$  - число электронов в атоме.

Магнитный момент молекулы  $\vec{p}_{\text{мол}} = \sum_{k=1}^N \vec{p}_{atk}$ , где  $N$  – число атомов в молекуле. Во внешнем магнитном поле на электрон атома, как на замкнутый контур с током, действует момент сил  $\vec{M}$  (см. рис. 2). Под действием этого момента сил электрон, подобно механическому волчку, будет совершать прецессию, при которой векторы  $\vec{p}$  и  $\vec{L}$  описывают с постоянной угловой скоростью конус вокруг направления поля. Это дополнительное движение электрона приводит к появлению у него магнитного момента прецессии  $\vec{p}_n$ , направленного против магнитного поля  $\vec{B}$ . Это явление носит название диамагнитного эффекта.

### **Условия возникновения упорядоченных магнитных структур в твердых телах.**

Простейшая интерпретация физических механизмов, ответственных за упорядоченное пространственное расположение магнитных атомных моментов в твердых телах, основывается на следующих представлениях. Прежде всего, надо отметить, что необходимым условием такого упорядочения является наличие у атомов собственных магнитных моментов, благодаря чему возможно образование спонтанного магнитного момента даже при отсутствии магнитного поля. В магнетиках, где существуют только

магнитные моменты, локализованные на атомах, магнитный момент образца  $M$  складывается из магнитных моментов атомов  $\vec{p}_i$  ( $i$  - номер атома)

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i, \quad (2.1)$$

где суммирование ведется по всем магнитным атомам. *Намагниченность есть магнитный момент единицы объема  $V$*

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}}{V}. \quad (2.2)$$

Намагниченность  $\vec{J}$  связана с напряженностью магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (2.3)$$

где  $\chi$  - коэффициент пропорциональности, *называемый магнитной восприимчивостью вещества. Магнитные свойства вещества характеризуются также магнитной проницаемостью  $\mu$* . Коэффициенты  $\chi$  и  $\mu$  связаны соотношением

$$\mu = 1 + \chi \quad (2.4)$$

Внешнее магнитное поле создает дополнительную намагниченность за счет ориентации магнитных моментов и индицирования диамагнитного момента. Эта намагниченность складывается со спонтанной. Кроме того, магнитное поле может деформировать и даже разрушать магнитную структуру.

Вещества, для которых магнитная восприимчивость отрицательна ( $\chi < 0$ ), называются *диамагнетиками* (инертные газы, многие органические соединения, некоторые металлы). Для диамагнетиков восприимчивость, как правило, очень мала ( $\sim 10^{-6}$ ). Орбитальные  $\vec{p}_e$  и спиновые  $\vec{p}_s$  моменты атомов или молекул скомпенсированы. Во внешнем магнитном поле в результате прецессий появляются индуцированные магнитные моменты  $\vec{p}_{ar} = \Sigma \vec{p}_e$ , направленные против поля.

Вещества с положительной восприимчивостью ( $\chi > 0$ ) называются *парамагнетиками*. Для них магнитная восприимчивость  $\chi \sim 10^{-3} \div 10^{-6}$ . При отсутствии внешнего поля  $\vec{B}$   $\vec{p}_{aT} = 0$  или  $\vec{p}_{mol} \neq 0$ , а  $\vec{J} = 0$  вследствие хаотической ориентации магнитных моментов  $\vec{p}_{aT}$  или  $\vec{p}_{mol}$ . Во внешнем магнитном поле под действием вращающего момента сил  $\vec{M}$  магнитные моменты ( $\vec{p}_{aT}$  и  $\vec{p}_{mol}$ ) вещества стремятся повернуться в направлении поля, в результате  $\vec{J} > 0$  и  $\chi > 0$ ,

Магнитное поле в веществе складывается из внешнего магнитного поля  $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$  и магнитного поля, создаваемого веществом вследствие его намагничивания  $\vec{B}'$ . Векторную сумму этих величин и называют магнитной индукцией:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' . \quad (2.5)$$

Для однородного намагниченного стержня бесконечной длины

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J} = \mu_0 \chi \vec{H} ,$$

тогда 
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} \quad (2.6)$$

или 
$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} , \quad (2.7)$$

В диамагнетиках  $\mu < 1$ , а в парамагнетиках  $\mu > 1$ .

### Ферромагнитное упорядочение.

Наряду с диа- и парамагнетиками, у которых  $\mu$  мало отличается от 1, существует целый ряд веществ (железо, никель, кобальт, гадолиний, их соединения и сплавы), обладающих значительной магнитной проницаемостью ( $\mu \gg 1$ ). Такие вещества называются *ферромагнетиками*.

Соотношение (2.3) для ферромагнетиков имеет место только при определенных условиях. У них связь между намагничиванием и внешним полем более сложная – нелинейная и неоднозначная. Эта связь графически изображается так называемой кривой намагничивания (рис. 3а).

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков зависит от напряженности создаваемого в нем магнитного поля. Магнитные свойства ферромагнетиков связаны с тем, что последние состоят из большого количества макроскопических областей (доменов), каждая из которых самопроизвольно намагничена до насыщения. В ненамагниченном веществе магнитные моменты отдельных доменов компенсируют друг друга, и общий магнитный момент образца равен нулю. Внешнее магнитное поле в ферромагнетиках переориентирует магнитные моменты доменов, вследствие чего появляется результирующее намагничивание, отличное от нуля.

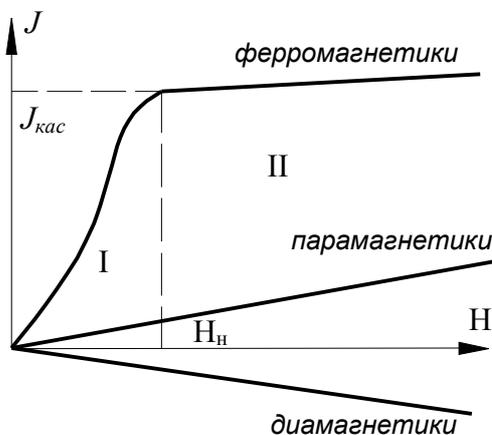


Рис. 3,а.

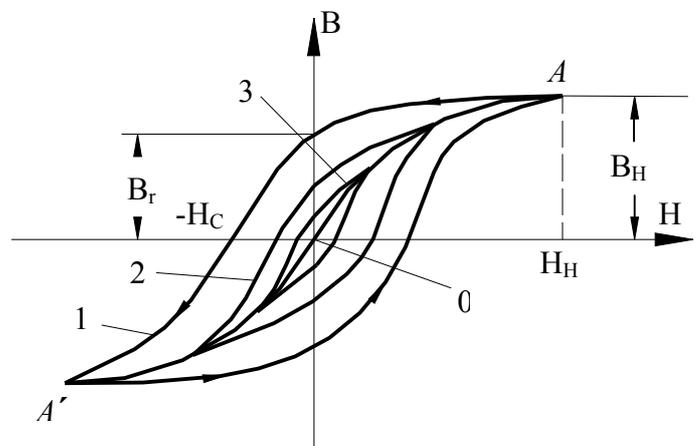


Рис. 3,б.

На первом этапе изучения магнитного упорядочения твердых тел физики имели дело с ферромагнетизмом, который характеризуется параллельным (коллинеарным) дальним порядком в расположении магнитных моментов в системе.

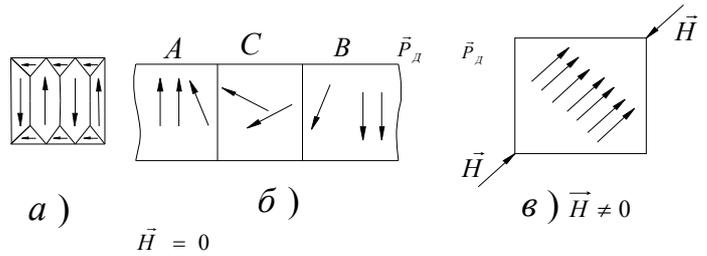


Рис.4

В ферромагнетиках обменное взаимодействие, отвечающее за образование магнитоупорядоченного состояния, преодолевает дезориентирующее действие теплового движения при  $T < T_C$  и ориентирует магнитные моменты параллельно. Некоторый разброс в ориентации магнитных моментов вследствие теплового движения подавляется обменным взаимодействием при температуре близкой к 0К.

Наличие макроскопической намагниченности образца сильно

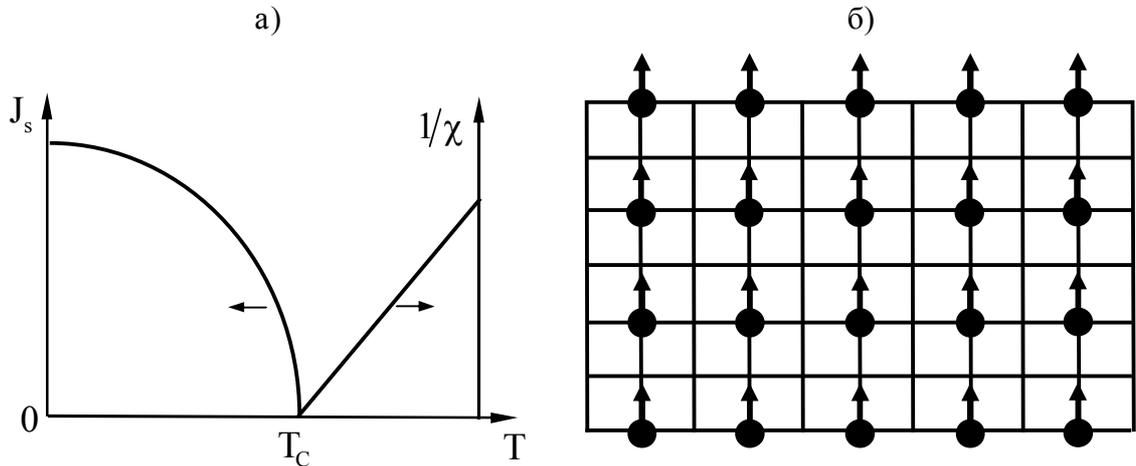


Рис. 5. - температурные зависимости спонтанной намагниченности  $J_s$  и обратной магнитной восприимчивости  $1/\chi$  ферромагнетика; б - ферромагнитная структура

увеличивает магнитостатическую энергию. Ее минимизация происходит тогда, когда образец разбивается на домены (см. рис. 4), внутри которых есть спонтанная намагниченность вдоль оси легкого намагничивания, которой является одна из кристаллических осей.

Домен называется часть ферромагнетика, в которой все магнитные моменты при отсутствии внешнего поля устанавливаются в одном направлении за счет обменного взаимодействия (рис. 4,а). Домен обладает магнитным моментом  $\vec{p}_d$ . Размеры доменов составляют  $10^{-6} \dots 10^{-8}$  м.

Температурная зависимость спонтанной намагниченности  $J_s$  приведена на рис. 5,а. Видно, что величина  $J_s$  монотонно уменьшается с нагреванием и исчезает при  $T > T_C$ . При  $T > T_C$  имеет место парамагнитное состояние с хаотической ориентацией магнитных моментов при  $H = 0$ , при  $T < T_C$  возникает ферромагнитное состояние с параллельной ориентацией магнитных моментов (рис. 4, б).

При увеличении магнитного поля  $H$  намагниченность образца возрастает за счет смещения границ доменов и процессов вращения спонтанной намагниченности. Первый процесс связан с ростом объема доменов, у которых направление  $J_s$  ориентировано наиболее выгодно энергетически по отношению к полю (угол между  $J_s$  и  $H$  наименьший). Второй процесс - вращение - обусловлен поворотом векторов  $J_s$  от оси легкого намагничивания к направлению приложенного магнитного поля.

В парамагнитной области при  $T > T_C$  для магнитной восприимчивости выполняется закон Кюри-Вейсса:

$$\frac{1}{\chi} = \frac{T - \theta_p}{C}, \quad (3.1)$$

где  $\theta_p$  – парамагнитная точка Кюри, а  $C$  - постоянная Кюри-Вейсса. Как можно видеть на рис. 5а, величина  $1/\chi$  для ферромагнетиков изменяется линейно с температурой. В изотропных однородных по составу ферромагнетиках с малой магнитной анизотропией  $T_C$  и  $\theta_p$  имеют близкие значения. В анизотропных ферромагнетиках величина  $\theta_p$  принимает разные значения для оси легкого намагничивания и оси трудного намагничивания, а также заметно отличается от температуры Кюри  $T_C$ .

Ферромагнетики находят широкое применение в технике. На их основе разработаны магнитные материалы: магнитомягкие (высокие значения магнитной проницаемости), магнито жесткие (высокие значения коэрцитивной силы и магнитной энергии), материалы для магнитной записи и др.

В металлических ферромагнетиках, таких как железо, кобальт, никель и их сплавы, ферромагнетизм обусловлен коллективизированными электронами. Он возникает вследствие неодинаковой заселенности этими электронами двух энергетических зон: первая зона со спинами электронов, ориентированными в одну сторону, и вторая зона со спинами в противоположную сторону. Различают сильный и слабый ферромагнетизм коллективизированных электронов. У первых магнитные электроны полностью заполняют одну из зон. У вторых магнитные электроны содержатся в обеих подзонах.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент ферромагнетика

$$\vec{p} = \sum p_i = 0.$$

Между доменами А и В имеются переходные слои С (см. рис. 3,б) шириной  $10^{-8} \dots 10^{-6}$  м. Во внешнем магнитном поле переходные слои разрушаются. Магнитные моменты отдельных доменов поворачиваются в направлении магнитного поля (см. рис. 4,в).

Зависимость намагниченности  $J$  магнетиков от напряжения и внешнего магнитного поля изображена на рис. 3а. Нелинейная область J отражает процесс ориентации доменов в ферромагнетиках в направлении внешнего поля при возрастании напряженности  $H$ . В сильных полях (область II) наступает магнитное насыщение, и намагниченность практически не зависит

от напряженности поля  $H$ . Кривая  $J = f(H)$  носит название основной кривой намагничивания. Для пара- и диамагнетиков зависимость  $J = f(H)$  линейная.

У ферромагнетиков и ферритов имеет место магнитный гистерезис, в котором проявляется зависимость намагниченности от предшествующего состояния. При циклических изменениях величины и направления напряженности внешнего поля  $H$  эта зависимость характеризуется кривой, называемой петлей гистерезиса (рис. 3,б, кривые 1, 2, 3).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Кривая начального намагничивания ферромагнетика (основная кривая намагничивания ферромагнетиков)

При размещении ненамагниченного ферромагнетика (поликристаллического образца) во внешнем магнитном поле, например, в поле соленоида с током, происходит его принудительное намагничивание, при котором все домены образца полностью или частично ориентируются в направлении напряженности  $\vec{H}$  намагничивающего поля, как показано на рис.6 (поле  $H_1 < H_2 < H_3$ ). В ферромагнитном образце магнитное поле характеризуется индукцией  $\vec{B}$ , причем зависимость  $B = f_1(H)$  - нелинейная и в общем случае неоднозначная. **Только процесс начального намагничивания** ферромагнетика может быть выражен зависимостью  $B = \mu_0 \mu H$ , где  $\mu_0$  - магнитная постоянная;  $\mu$  - магнитная проницаемость вещества, зависящая от напряженности поля:  $\mu = f_2(H)$ .

На рис.7 показана **основная кривая намагничивания** (сплошная линия).

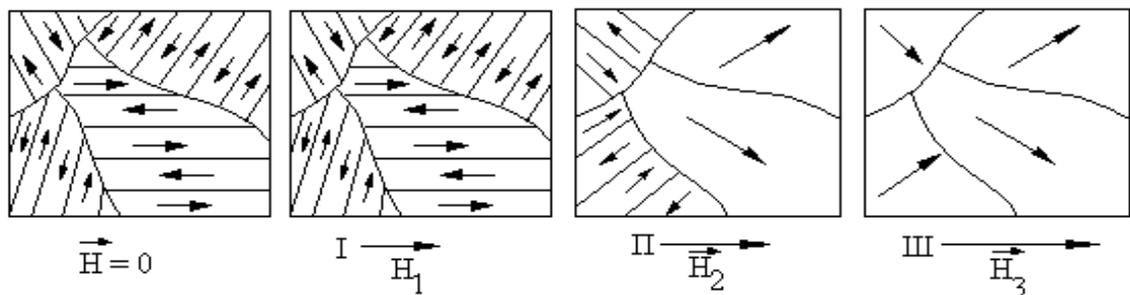


Рис. 6

Она имеет три характерных участка, соответствующих рис.6. На участке 1 с увеличением напряженности поля происходит **обратимое** смещение границ и увеличение объема доменов, ориентация которых близка к направлению поля  $H$ . Соседние антипараллельные домены уменьшаются. На участке 2 этот процесс становится интенсивным, скачкообразным (эффект Баркгаузена) и **необратимым**. При скачкообразном изменении индукции поля внутри кристаллов возникают вихревые токи, нагревающие вещество, вследствие чего теряется энергия намагничивающего поля. Часть ее преобразуется также

в энергию возникающих звуковых волн. В конце участка 2 большинство доменов, поглотив соседние, оказывается сориентированными по осям легкого намагничивания кристаллов, близких по направлению к полю  $\vec{H}$ . На участке 3 сильное намагничивающее поле вызывает процесс медленного и монотонного вращения доменов до направления, совпадающего с направлением поля  $\vec{H}$ . В результате наступает *состояние насыщения* намагничённости ферромагнетика ( $H_s, B_s$ ). Дальнейшее увеличение индукции  $\vec{B}$  не зависит от его свойств и связано только с ростом  $\vec{H}$ .

Магнитная проницаемость  $\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H}$ , как видно из кривой начального намагничивания, возрастает в слабых полях от некоторого начального значения  $\mu_n$  до максимального значения  $\mu_{\max} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_0}{H_0}$  при  $H = H_0$ , как

показано на рис.8. При дальнейшем увеличении намагничивающего поля магнитная проницаемость уменьшается, асимптотически приближаясь к значению  $\mu=1$ , когда ферромагнетик практически не влияет на магнитное поле в занимаемом им объеме. Само понятие «магнитная проницаемость» для ферромагнетика применимо только к «кривой начального намагничивания» - основной кривой намагничивания ферромагнетика.

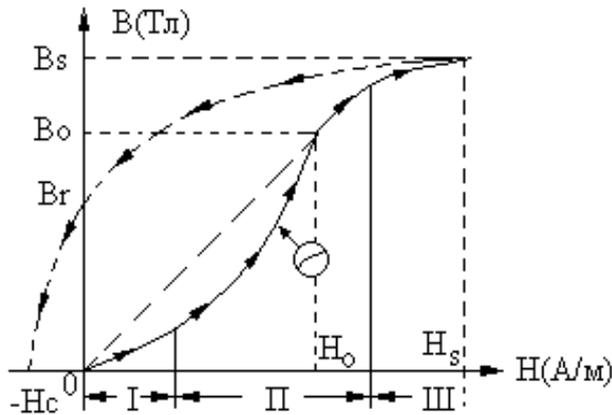


Рис.7

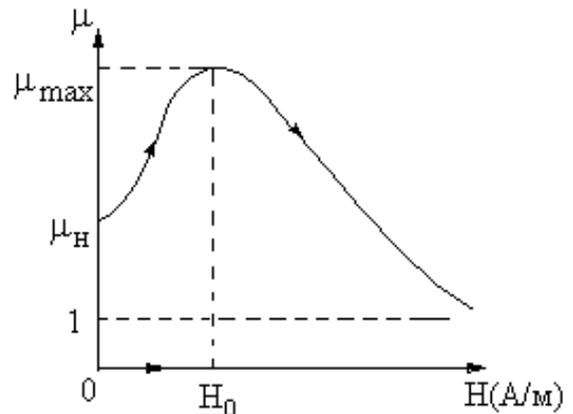


Рис.8

## Исследование свойств ферромагнетика с помощью петли гистерезиса на учебной установке ФЭЛ-11.

При уменьшении напряженности намагничивающего поля до нуля намагниченный ферромагнетик размагничивается лишь частично вследствие необратимых процессов (см. рис.7). При  $H = 0$  поле ферромагнетика характеризуется *остаточной магнитной индукцией*  $B_r$ . Отставание индукции  $B$  от напряженности  $H$  при уменьшении напряженности называется «магнитным гистерезисом».

В намагничивающем поле *обратного направления* путем изменения его напряженности от  $H = 0$  до  $H = -H_C$  остаточную индукцию можно сделать равной нулю (рис. 7). Значение  $H_C$  напряженности поля называется *коэрцитивной силой ферромагнетика*. Она показывает, как сильно удерживается ферромагнетиком остаточная индукция. Ферромагнетики, у которых  $H_C < 80$  А/м, называются «*мягкими*». Эти материалы (железо, электротехническая сталь, сплавы железа с никелем - «Пермаллой») имеют большую магнитную проницаемость ( $\mu_{\max} = 5000 - 50000$  и больше) и применяются для изготовления сердечников трансформаторов и электрических машин. Ферромагнетики, имеющие  $H_C > 4000$  А/м, называются «*жесткими*» и применяются для изготовления постоянных магнитов (сплавы железа типа «Алнико» и «Магнико»). В таблице 1 приведены свойства некоторых ферромагнетиков.

Таблица 1

Вещество	Состав	$\mu_{\max}$	$H_C$ , А/м	$B_{ост}$ Тл.	$B_{нас}$ , Тл
Железо техническое	Fe (99,9 %)	$5 \cdot 10^3$	80	0,05	2,1
Супермаллой	Ni (79%), Mo(5%), Fe(16%)	$10^6$	0,16	-	0,79
Платина-Кобальт	Pt (77%), Co (23%)	-	$3 \cdot 10^5$	0,5	-
Никель-цинковый феррит	ZnO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) NiO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	$7,5 \cdot 10^3$	4	-	0,2

При перемагничивании ферромагнетиков в переменном поле  $H = f(t)$  процесс изменения магнитной индукции поля в образце характеризуется симметричной замкнутой кривой, которая, вследствие запаздывания изменения индукции, называется *петлей гистерезиса* (рис. 9). Если амплитуда напряженности поля заходит в область насыщения намагниченности образца, петля гистерезиса называется *предельной или максимальной петлей* (дальнейшее увеличение поля  $H$  в образце не приводит к качественным изменениям формы петли), в остальных случаях - *петлей частного цикла*. Частных циклов существует бесконечное

множество и все они лежат внутри максимальной петли гистерезиса, а максимумы значений  $B$  и  $H$  (или  $J$  и  $H$ ) частных циклов всегда лежат на основной кривой намагничивания. Нелинейность петли показывает, что **индукция поля изменяется не по закону изменения напряженности**.

Две ветви петли гистерезиса означают, что любому значению  $H$  соответствуют два значения магнитной индукции  $B$ , зависящие от предыстории магнитного состояния образца.

Кривая, проведенная через вершины  $(B_m; H_m)$  ряда частных петель гистерезиса, практически совпадает с «кривой начального (основного) намагничивания». Поэтому магнитная проницаемость ферромагнетика может быть определена через эти максимальные значения  $B_m$  и  $H_m$ , относящиеся к любой из частных петель гистерезиса (рис. 9), по формуле

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m}, \quad (4.1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м.

По площади петли можно найти работу перемагничивания, отнесенную к единице объема. Малое изменение объемной плотности энергии магнитного поля  $\omega_H = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$  в цикле перемагничивания определяется по формуле

$$d\omega_H = Hd(\mu\mu_0 H) = HdB. \quad (4.2)$$

Работа  $dA_n = HdB$  расходуется на изменение внутренней энергии единицы объема ферромагнетика. Таким образом, энергия гистерезисных потерь, расходуемая за один полный цикл перемагничивания какого-либо образца, равна произведению объема образца  $V_0$  на площадь петли гистерезиса в координатах  $(B, H)$ , т.е.

$$W = V_0 \oint H \cdot dB. \quad (4.2)$$

Она переходит в тепловую энергию образца. При перемагничивании ферромагнетик нагревается. Полностью размагнитить ферромагнетик можно, перемагничивая его в переменном магнитном поле при плавном уменьшении амплитуды напряженности поля от насыщенного значения  $H_S$  до нуля в течение ряда циклов.

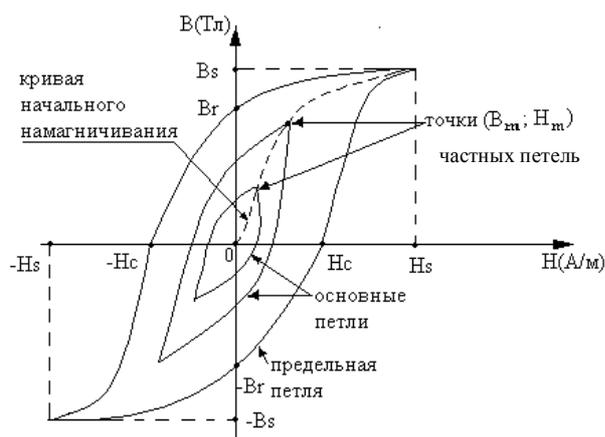


Рис.9

**ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**  
**Методика измерений. Эксперимент N 1 «Изучение явления гистерезиса ферромагнетиков в динамическом режиме с помощью электронного осциллографа».**

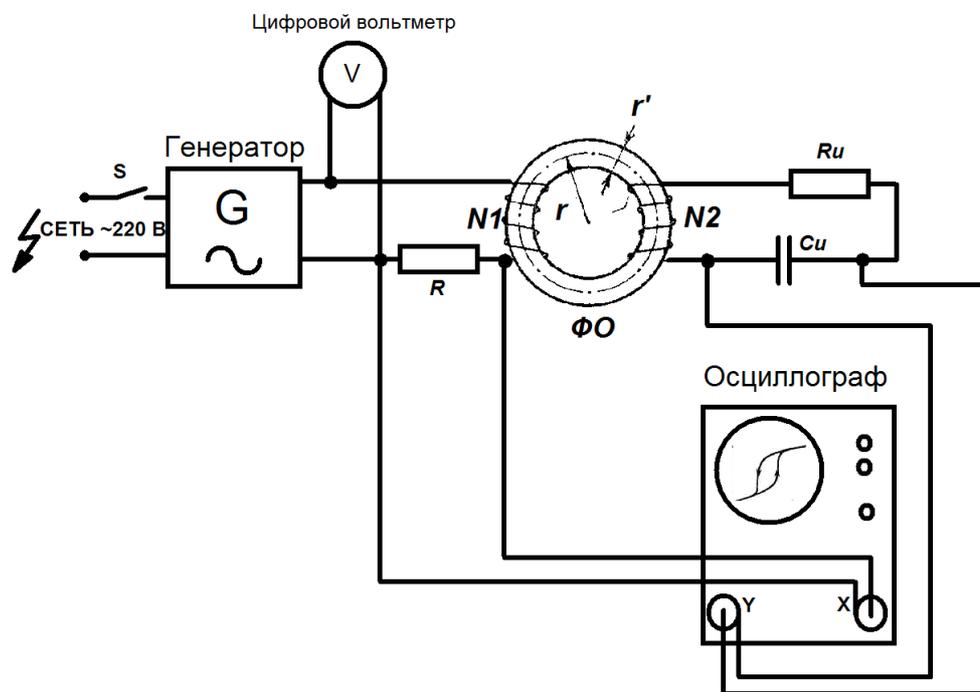


Рис.10. Блок-схема учебной установки ФЭЛ-11

**Установка учебная ФЭЛ-11**  
**"Изучение явления гистерезиса ферромагнетиков"**

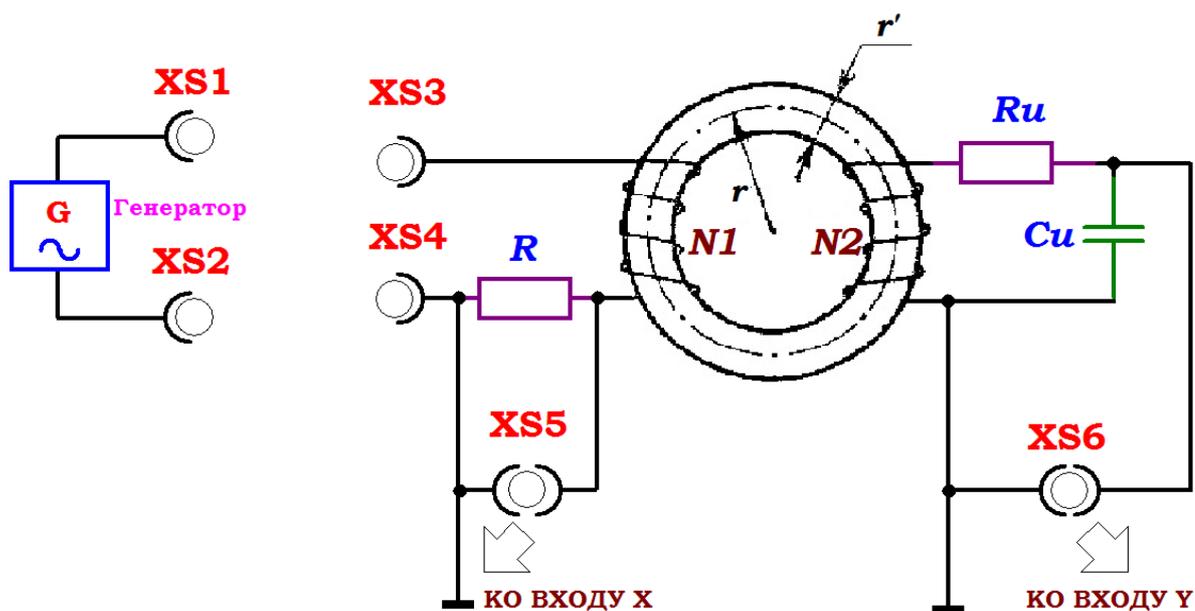


Рис.11. Блок-схема учебной установки ФЭЛ-11 с контрольными точками.

Схема измерительной установки для первого эксперимента показана на рис.10. Она содержит следующие элементы: цифровой генератор переменного напряжения; ФО - ферромагнитный образец (сердечник трансформатора);  $N_1$  - намагничивающая обмотка;  $N_2$  - измерительная обмотка;  $R_u$  и  $C_u$  - резистор и конденсатор интегрирующей  $RC$  - цепочки;  $R$  - резистор для получения напряжения  $U_x$ , электронный осциллограф. Частота генератора плавно регулируется с помощью ручки либо кнопки «ЧАСТОТА» - текущее значение частоты генератора выводится на дисплей, амплитуда выходного напряжения устанавливается с помощью ручки «АМПЛИТУДА», измеряется цифровым вольтметром и выводится на LCD индикатор. Кнопка «ЭКСПЕРИМЕНТ», позволяющая переключаться в режим первого либо второго опыта, должна быть отжата, при этом установка переходит в динамический режим снятия петли гистерезиса образца ферромагнетика (первый опыт) согласно рис. 10. **Выбор эксперимента кнопкой «ЭКСПЕРИМЕНТ», изменение частоты и измерение амплитуды входного напряжения возможно только при выключенном генераторе! Генератор включается и отключается кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».** Для надежного срабатывания кнопки необходимо удерживать в течение  $\sim 1$  секунды. Для калибровки оси X осциллографа ось Y заземляется с помощью переключателя «DC  $\perp$  AC» на панели осциллографа (он расположен справа от входа Y). Установка снабжена микропроцессорной системой управления, измерения и контроля необходимых параметров.

В соответствии с показанной на рис. 10 схемой на вход «Y» осциллографа подается напряжение  $U_y$ , пропорциональное магнитной индукции  $B$  поля в исследуемом образце, на вход «X» - напряжения  $U_x$  пропорциональное напряженности  $H$  поля, намагничивающего образец (внутренний генератор горизонтальной развертки луча осциллографа при этом выключается, включается режим X-Y осциллографа). За один период  $T$  изменения напряжений  $U_x$  и  $U_y$ , характеризующий полный цикл перемагничивания образца, электронный луч на экране осциллографа описывает петлю гистерезиса, повторяя ее в точности за каждый следующий период. Поэтому изображение петли гистерезиса на экране будет неподвижным.

Учащимся предлагается самостоятельно с помощью входящих в комплект перемычек и соединительных проводов собрать схему рис. 10. Для этого используется блок-схема с контрольными точками рис. 11. Для получения петли гистерезиса на экране осциллографа необходимо соединить выход синусоидального генератора XS1 с первичной обмоткой XS3 катушки (перемычка 1), выход XS2 соединяется с другим концом первичной обмотки XS4. Корпус осциллографа и учебной установки является общим.

С выхода X и Y учебной установки подается сигнал на соответствующие входы осциллографа. При этом сигнал с выхода X пропорционален напряженности магнитного поля  $H$ , сигнал с выхода Y - пропорционален магнитной индукции  $B$ .

При правильном соединении перемычек и осциллографических проводов получаем схему рис. 10.

Петля гистерезиса изображается на экране в координатах (x; y), причем

$$U_x = K_x \cdot X; \quad U_y = K_y \cdot Y, \quad (5.1)$$

где  $X$  и  $Y$  - измеряются в «делениях шкалы» экрана осциллографа.

**Значение масштабного коэффициента  $K_y$  указывается около ручки ВОЛЬТ/ДЕЛ (VOLTS/DIV) усиления по оси  $Y$  (это значение действительно только когда ручка ПЛАВНО VOLT VAR. усиления оси  $Y$  вывернута до упора по часовой стрелке).**

Коэффициент чувствительности оси  $x$  осциллографа  $K_x$  (В/дел.) определяется при помощи калибровки оси  $x$  с использованием цифрового вольтметра, встроенного в лабораторную установку.

**Напряжение  $U_x$ , пропорциональное напряженности  $H$  магнитного поля, получается следующим образом.** Если образец выполнен в виде однородного замкнутого сердечника, на котором равномерно распределена первичная (намагничивающая) обмотка с числом витков  $N_1$ , то ток  $I_1$  в этой обмотке и напряженность  $H$  создаваемого им поля связаны соотношением

$$H = \frac{N_1}{l} \cdot I_1 = \frac{N_1}{2\pi r} \cdot I_1, \quad (5.2)$$

где  $l=2\pi r$  - средняя длина сердечника (ферромагнитного образца),  $r$  - средний радиус тороида.

Последовательно с обмоткой  $N_1$  включен резистор  $R$ , на котором создается падение напряжения

$$U_x = I_1 R = \frac{l \cdot R}{N_1} \cdot H \quad (5.3)$$

Из (5.1) и (5.3) получается простая формула для измерения напряженности магнитного поля в образце

$$H = \alpha \cdot X, \quad (5.4)$$

где  $\alpha = \frac{K_x \cdot N_1}{l \cdot R} = \frac{K_x \cdot N_1}{2\pi r R}$ .

**Напряжение  $U_y$ , пропорциональное магнитной индукции  $B$  поля в образце, получается следующим образом.** Вторичная (измерительная) обмотка, нанесенная на образец и имеющая  $N_2$  витков, пронизывается сосредоточенным в ферромагнитном образце магнитным потоком  $\Phi = B \cdot S$ , где  $S$  - площадь поперечного сечения образца. В обмотке  $N_2$  индуцируется ЭДС

$$\varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \cdot \frac{dB}{dt},$$

создающая ток  $I_2$  и напряжение  $U_2 \approx -\varepsilon_2$  на выходе обмотки (падение напряжения на самой обмотке пренебрежимо мало). Отсюда следует, что  $U_2 dt \approx \varepsilon_2 dt = N_2 S \cdot dB$  и что

$$\int U_2 \cdot dt = N_2 S B. \quad (5.5)$$

Из (5.5) видно, что интегрированием переменного напряжения можно получить сигнал, пропорциональный мгновенному значению  $B(t)$  индукции магнитного поля в образце. Эта операция в схеме на рис. 10 выполняется «интегрирующей  $RC$  - цепочкой», состоящей из резистора  $R_u$  и конденсатора  $C_u$ .

Напряжение  $U_2$  создает в  $RC$  - цепочке ток  $I_2$  и переменный заряд конденсатора, равный  $q = \int I_2 dt$ , вследствие чего на конденсаторе образуется напряжение

$$U_y = \frac{1}{C_u} \int I_2 dt \quad (5.6)$$

поступающее на вход «Y» осциллографа (влиянием большого входного сопротивления осциллографа пренебрегаем).

Сопротивлением  $RC$  - цепочки синусоидальному току с частотой  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , где  $T$  - период колебаний тока, равно

$$Z = \sqrt{R_u^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C_u}\right)^2} = R_u \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2} \cdot \left(\frac{T}{\tau}\right)^2}.$$

где  $\tau = RC$  - «постоянная времени»  $RC$  - цепочки. При обычно выбираемом значении отношения  $30 < \frac{\tau}{T} < 100$ , сопротивление  $Z \approx R_u$ , т. е. является практически чисто активным и не создает заметного сдвига фаз между током  $I_2$  и напряжением  $U_2$ . В этом случае **для мгновенных значений** тока и напряжения практически справедлив закон Ома

$$I_2 \approx \frac{U_2}{Z} \approx \frac{U_2}{R_u}.$$

Это обстоятельство с учетом формул позволяет записать для мгновенных значений напряжений  $U_2$  и  $U_y$  и магнитной индукции  $B$  следующую зависимость:

$$U_y = \frac{1}{R_u C_u} \int U_2 \cdot dt = \frac{N_2 S}{R_u C_u} \cdot B. \quad (5.7)$$

Отметим, что увеличение  $\tau = RC$  делает формулу (5.7) более точной, т.е. повышает точность интегрирования, но одновременно приводит к уменьшению напряжения  $U_y$ .

Из (5.1) и (5.7) получается простая формула для измерения индукции магнитного поля в образце:

$$B = \beta \cdot Y, \quad (5.8)$$

где  $\beta = \frac{K_y \cdot R_u C_u}{N_2 \cdot S}$ .

Формулу для определения мощности  $P = \frac{W}{T} = W \cdot \nu$ , расходуемой за один цикл  $T = 1/\nu$  на перемагничивание ферромагнитного образца, найдем, используя (4.2), (5.4), (5.8), в следующем виде:

$$P = \chi \cdot S_r, \quad (5.9)$$

где  $\chi = K_x K_y \frac{\nu \cdot N_1 \cdot R_u C_u}{N_2 \cdot R}$ ,

$S_r = \oint X \cdot dY$  - площадь петли гистерезиса на экране осциллографа в координатах  $(x; y)$ , измеряемая в квадратных делениях шкалы экрана осциллографа.

### Необходимые данные для вычислений

Резистор в цепи первичной обмотки  $R=100 \text{ Ом}$

Количество витков первичной обмотки  $N_1=150 \text{ витков}$

Количество витков вторичной обмотки  $N_2=650 \text{ витков}$

Резистор интегрирующей цепочки  $R_u=100 \text{ кОм}=100000 \text{ Ом}$

Конденсатор интегрирующей цепочки  $C_u=100 \text{ нФ}=10^{-7} \text{ Ф}$

Исследуемый образец:

Средний радиус тороида  $r=0,015 \text{ м}$

Площадь поперечного сечения образца  $S=3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

## Эксперимент N 2 «Снятие основной кривой намагничивания ферромагнетиков статическим методом».

Впервые полное экспериментальное исследование зависимости  $B = f(H)$  проведено в 1871–1872 гг. профессором Московского университета А.Г. Столетовым. Он показал также, что напряженность поля внутри ферромагнетика сильно зависит от формы образца и только в случае тороидального (кольцевого) образца, намагничиваемого кольцевой обмоткой, она совпадает с напряженностью внешнего магнитного поля.

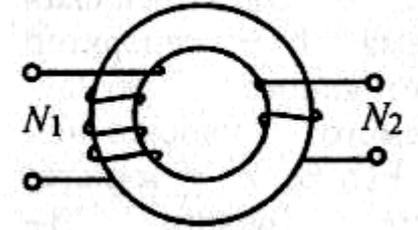


Рис.12

В данном эксперименте для получения основной кривой намагничивания используют метод, предложенный А.Г. Столетовым. Он заключается в следующем. На кольце из ферромагнитного материала располагают две обмотки (рис. 12): первичная (намагничивающая) содержит  $N_1$  витков, и вторичная (с числом витков  $N_2$ ), предназначенная для измерения величины магнитной индукции  $B$ . Напряженность магнитного поля, которое создается в кольцевом сердечнике при протекании по первичной обмотке тока  $I_1$ , рассчитывается по формуле:

$$H = I_1 \frac{N_1}{l} = n_1 I_1, \quad (6.1)$$

где  $n_1 = \frac{N_1}{l}$ ,  $l$  – длина средней осевой линии сердечника. Это поле намагничивает кольцо. Магнитный поток в сечении кольца площадью  $S$ :

$$\Phi = BS$$

При его изменении во вторичной обмотке возникает э.д.с. индукции:

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Изменение магнитного потока в данной установке достигается автоматическим периодическим изменением направления тока  $I_1$  (электронный переключатель 4 рис. 13). При этом значение напряженности поля  $H$  остается прежним, а изменяется лишь направление линий поля.

В результате поток магнитной индукции изменяет от  $+\Phi$  до  $-\Phi$ , а приращение потока:

$$\Delta\Phi = -2\Phi = -2BS. \quad (6.2)$$

Если цепь вторичной обмотки замкнуть, то в ней потечет ток:

$$I_2 = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6.3)$$

где  $R$  – сопротивление цепи вторичной обмотки.

При протекании индукционного тока  $I_2$  в этой цепи протекает заряд  $Q$ , величину которого можно рассчитать, используя формулы (6.2), (6.3):

$$Q = \int_0^t I_2 dt = \int_{+\Phi}^{-\Phi} \left( -\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt} \right) dt = -\frac{N_2}{R} \Delta\Phi = 2 \frac{N_2}{R} BS.$$

Выражая из этого равенства индукцию магнитного поля, получаем:

$$B = \frac{QR}{2N_2S}. \quad (6.4)$$

где  $R$ ,  $N_2$  и  $S$  – величины, постоянные для данной установки.

Заряд  $Q$  измеряют интегратором тока, подключенным к вторичной обмотке. При этом величина заряда, прошедшего через интегратор, пропорциональна показанию вольтметра  $U_{ин}$ :

$$Q = bU_{ин} \quad (6.5)$$

где  $b$  – постоянная интегратора;  $U_{ин}$  – отсчет по вольтметру.

Используя выражения (6.4) и (6.5), можно записать расчетную формулу индукции магнитного поля в исследуемом кольцевом сердечнике:

$$B = \frac{bnR}{2N_2S} = k U_{ин}, \quad (6.6)$$

где  $k = \frac{bR}{2N_2S}$  – постоянная для данной установки.

**При расчетах принять коэффициент  $k \approx 0,04$ .**

Принципиальная электрическая схема эксперимента сохраняет основные элементы рис. 10-11 и приведена на рис. 13.

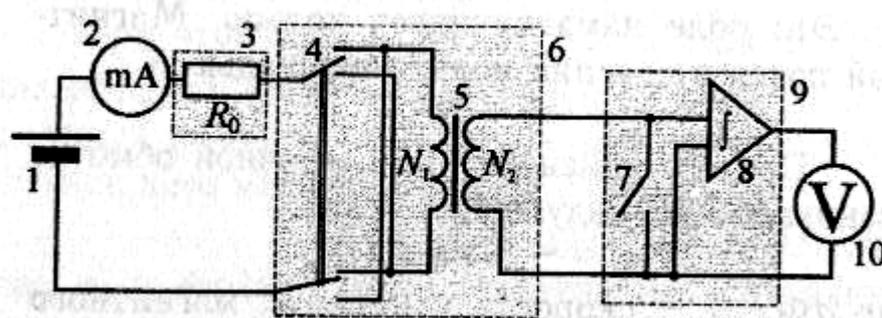


Рис.13. Блок-схема эксперимента по снятию основной кривой намагничивания ферромагнетика статическим методом (второй эксперимент). 1 – источник постоянного регулируемого тока; 2 – миллиамперметр 3 – сопротивление первичной обмотки  $R_0$  4 – автоматический периодический электронный переключатель тока; 5 – тороид с первичной  $N_1$  и вторичной  $N_2$  обмотками; 6 – блок «ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ»; 7 – автоматический электронный переключатель; 8 – интегратор тока; 9 – блок «Интегратор тока»; 10 – вольтметр.

Эксперимент в целом не отличается от опыта по наблюдению петли гистерезиса в динамическом режиме с помощью осциллографа. В данном опыте вместо осциллографа, в разрыв цепи первичной обмотки подключают миллиамперметр, а с выхода интегрирующей цепочки подают сигнал на вольтметр постоянного тока.

Первичная  $N_1$  и вторичная  $N_2$  обмотки намотаны на ферритовый кольцевой сердечник. Первичную обмотку используют для намагничивания ферромагнетика и по её параметрам определяют напряженность  $H$  намагничивающего поля. Электронный переключатель 4 служит для автоматического периодического изменения направления тока в первичной обмотке с целью перемагничивания сердечника. Резистор  $R_0$  ограничивает ток в обмотке.

Вторичная обмотка  $N_2$  предназначена для определения индукции магнитного поля  $B$  в сердечнике. Интегратор тока 8 служит для измерения заряда  $Q$ , фиксируемого вольтметром 10, пропорционального измеряемой величине  $B$ . Так как сердечник изготовлен из магнитомягкого ферромагнетика с малой величиной остаточной индукции  $B_{ост}$ , то для снятия основной кривой намагничивания нет необходимости проводить предварительное размагничивание сердечника.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Перед выполнением работы рекомендуется ознакомиться с принципом работы электронного осциллографа.
2. Перед включением следует проверить целостность всех соединительных и сетевых проводов устройств. **Перед включением установки в сеть все переключки должны быть отсоединены от стенда, в противном случае при подаче питания возможна некорректная работа измерительных приборов (ЖКД индикатора LCD).**
3. Включите лабораторный модуль и осциллограф в сеть  $\sim 220$  В.
4. Перевести переключатель СЕТЬ на панели установки и осциллографа в положение «ВКЛ» при этом должны загореться соответствующие сигнальные светодиоды. Дать приборам прогреться не менее 5-7 минут.
5. Отжать кнопку «ЭКСПЕРИМЕНТ» и приступить к выполнению первого опыта по изучению явления гистерезиса ферромагнетика в динамическом режиме с помощью осциллографа. Для этого собрать схему рис. 10 для исследования явления гистерезиса ферромагнитного образца, соединяя контрольные точки блок – схемы рис. 11 переключками. Для получения петли гистерезиса на экране осциллографа необходимо соединить выход синусоидального генератора XS1 с первичной обмоткой XS3 катушки (переключка 1), выход XS2 соединяется с другим концом первичной обмотки XS4.
6. Подключить входы X и Y осциллографа соединительными проводами к соответствующим выходам учебной установки. Два измерительных осциллографических провода типа «BNC –тюльпан» предназначены для снятия сигнала с интегрирующей цепочки во вторичной обмотке (клемма XS6, подключается ко входу Y осциллографа) и сигнала, подаваемого на первичную обмотку катушки через резистор R (клемма XS5, подключается ко входу X осциллографа).
7. Кнопкой «ЧАСТОТА» на передней панели модуля установить частоту для исследования явления гистерезиса ферромагнитного образца (оптимальное значение частоты  $\sim 300$  Гц), текущее значение частоты генератора индуцируется на ЖКД дисплее учебной установки. **Для надежного срабатывания кнопки необходимо удерживать в течение  $\sim 1$  секунды.**
8. С помощью ручки «АМПЛИТУДА» на панели установки установить уровень сигнала с выхода генератора  $U \sim 4,5-5,0$  В. Измерение значения амплитуды выходного напряжения генератора возможно только при отключенном генераторе. Генератор включается и отключается кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».
9. **Включить генератор гармонического сигнала кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ»** и перевести осциллограф в режим

сложения двух колебаний (режим фигур Лиссажу), для чего установить переключатель «SLOPE» слева от входа X осциллографа в положение «XY».

10. Ручкой ВОЛЬТ/ДЕЛ (VOLTS/DIV) оси Y установить уровень сигнала, обеспечивающий наилучший масштаб для наблюдения петли гистерезиса (рекомендуемое значение **.5 - 1** ВОЛЬТ/ДЕЛ). Ручка ПЛАВНО VOLT VAR. при этом должна быть повернута до упора по часовой стрелке, так как только в этом положении показания чувствительности  $K_y$  канала Y определяются подписями около ручки ВОЛЬТ/ДЕЛ оси Y осциллографа.
11. Вращением ручки «УСИЛЕНИЕ X» на панели учебной установки, а также ручек «POSITION» для осей X и Y на осциллографе установить изображение петли таким образом, чтобы картинка занимала  $\frac{3}{4}$  экрана и была расположена **строго по центру** относительно координатной сетки осциллографа.
12. Проверить симметричность установки изображения относительно осей X и Y на шкале экрана и скопировать это изображение на миллиметровую бумагу по клеткам.
13. Произведите калибровку оси X осциллографа. Для этого поставьте переключатель «DC  $\perp$  (GND) AC» на передней панели осциллографа в среднее положение « $\perp$  GND» при этом ось Y выключается (заземляется), а напряжение с генератора подается на горизонтально отклоняющие пластины электронного осциллографа и на экране появляется горизонтальная линия. Измерьте  $l_x$  - длину горизонтальной линии в клетках (делениях) и отключите генератор кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ» для измерения амплитудного значения напряжения с выхода генератора. Встроенный цифровой вольтметр измеряет **амплитудное значение** напряжения, а так как длина  $l_x$  горизонтальной линии осциллографа пропорциональна удвоенной амплитуде входного напряжения, то коэффициент  $K_x = \frac{2U_0}{l_x}$ , где  $U_0$  - показания вольтметра в вольтах,  $l_x$  - длина горизонтальной линии в клетках (делениях). Оптимальное для калибровки напряжение с выхода генератора лежит в диапазоне  $\sim 4,5-5,0$  В. Изменяя с помощью ручки «АМПЛИТУДА» напряжение генератора, снять зависимость  $l_x$  от напряжения  $U_0$ , рассчитать коэффициент  $K_x$  для нескольких (3 – 4) значений напряжения  $U_0$  и соответствующих этим напряжениям длин горизонтальных линий и определить среднее значение коэффициента чувствительности  $K_x$  (см. табл. 1). Для измерения установленного напряжения  $U_0$ , генератор следует отключать, при этом горизонтальная линия исчезает с экрана осциллографа.

Таблица 1

$l_x$ , деления	$U_0$ , В	$K_x = \frac{2U_0}{l_x} \left[ \frac{B}{ДЕЛ} \right]$
...	...	...

$\langle K_x \rangle = \dots$  [ВОЛЬТ/ДЕЛ]

**ПОСЛЕ КАЛИБРОВКИ ОСИ X ПОЛОЖЕНИЕ РУЧКИ «УСИЛЕНИЕ ОСИ X» НА ПАНЕЛИ УЧЕБНОЙ УСТАНОВКИ НЕ ИЗМЕНЯТЬ!** В противном случае ось придется перекалибровать согласно пп.12.

14. Рассчитайте коэффициенты  $\alpha, \beta, \chi$ , содержащиеся в формулах (5.4), (5.8) и (5.9) соответственно.
15. Включить ось Y, поставив переключатель «DC  $\underline{\underline{}}$  AC» в какое-либо крайнее положение и повторите п.6. Измерьте координаты  $X_C$  (точка пересечения с осью X) и  $Y_r$  (точка пересечения с осью Y) петли гистерезиса на шкале экрана, и по формулам (5.4) и (5.8) вычислите коэрцитивную силу  $H_C$  и остаточную индукцию  $B_r$  ферромагнитного образца.
16. Измерьте в квадратных делениях шкалы осциллографа площадь петли гистерезиса (площадь по клеткам) и по формуле (5.9) оцените мощность, расходуемую на перемагничивание ферромагнитного образца за один цикл.
17. Измерьте координаты  $X_m$  и  $Y_m$  (точка насыщения см. рис. 9) петли гистерезиса и по формулам (5.4), (5.8) и (4.1) вычислите соответствующие значения  $H_m$ ,  $B_m$  и  $\mu$  (см. рис.9). Данные занесите в таблицу 2.
18. Изменяя напряжение с выхода генератора ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах 0,3-5,0 Вольт установите поочередно другие значения напряжения генератора GN (при низкой амплитуде петля гистерезиса практически превращается в эллипс), получите соответствующие им частные петли гистерезиса (не менее 7-9 циклов) и выполните измерения и вычисления по п. 15-17. Данные занесите в таблицу 2. При необходимости контролируйте установленное значение напряжение с выхода генератора, отключая его кнопкой «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ».

Таблица 2

$X_m$ , дел	$Y_m$ , дел	$H_m$ , А/м	$B_m$ , Тл	$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m}$
...	...	...	...	...

19. Используя данные таблицы 2, постройте график зависимости  $B = f(H)$  – основную кривую намагничивания, а также график зависимости  $\mu = f(H)$ .

20. Графически оцените напряженность поля, соответствующее максимуму магнитной проницаемости материала  $\mu$ .
21. Установив значение амплитуды генератора GN на уровне 4,5 В и, изменяя частоту генератора, понаблюдайте за возможным изменением формы петли на различных частотах.
22. Проведите исследование основной кривой намагничивания ферромагнетика  $B=B(H)$  статическим методом. Для этого отключите генератор нажатием кнопки «ГЕНЕРАТОР ВКЛ/ВЫКЛ и нажмите кнопку «ЭКСПЕРИМЕНТ». При этом учебная установка переходит в режим второго опыта и принципиальная электрическая схема изменяется согласно рис. 13.
23. Вращением ручек «ТОК ГРУБО/ПЛАВНО» изменяйте ток в первичной обмотке образца I1 и записывайте значения напряжения с выхода интегратора во вторичной обмотке U2, соответствующие этому току. Обратите внимание, что ток измеряется в микроАмперах.
24. По формулам (6.1) и (6.6) пересчитайте значение намагничивающего тока I1 в напряженность магнитного поля  $H$  [А/м], а значения напряжения с выхода интегратора  $U2=U_{ин}$  в значения индукции магнитного поля  $B$  [Тл]. При расчетах принять: количество витков первичной обмотки  $N_1=150$  витков; средний радиус тороида  $r=0,015$  м,  $l=2\pi r = 0,094$  м – длина средней осевой линии сердечника; коэффициент  $k\approx 0,04$ . Все расчёты производите в СИ.
25. По полученным данным постройте на миллиметровой бумаге по клеткам зависимость  $B=B(H)$  – основную кривую намагничивания образца и сравните результат с итогами исследования ферромагнетика динамическим методом с помощью осциллографа (первый эксперимент).
26. По окончании работы поставьте все переключатели в положение «ВЫКЛ» и выньте вилки из розетки.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие вещества называются магнитными?
2. Что такое магнитный момент системы, намагниченность?
3. Дайте определение магнитной индукции и напряженности магнитного поля.
4. Что такое диамагнетики? Приведите примеры.
5. Что такое парамагнетики? Приведите примеры.
6. Что такое ферромагнетики? Приведите примеры.
7. Как определяется магнитная восприимчивость вещества, какова ее величина, и какова ее связь с магнитной проницаемостью?
8. Как изменяется намагниченность диа-, пара- и ферромагнетиков от напряженности внешнего магнитного поля?
9. Что такое магнитный гистерезис?
10. Петля гистерезиса. От чего зависит вид петли гистерезиса?
11. Что такое размагничивающий фактор? От чего зависит его величина?
12. Что такое магнитомягкие и магнито жесткие вещества?
13. Что такое домены?
14. Как ведут себя ферромагнетики при нагревании?
15. Объясните принцип получения в лабораторной установке напряжений, пропорциональных напряженности и магнитной индукции поля в образце.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. "Курс общей физики". — М.: Высшая школа, 1989г.
2. В. И. Иверонова и др. "Физический практикум". — М.: Физико-математическая литература, 1962г.
3. В. С. Попов. "Теоретическая электротехника". — М.: Энергоатомиздат, 1990г.
4. Т. И. Трофимова. "Курс физики". — М.: Высшая школа, 1998г.
5. Д. Джанколи. "Физика". Том II. — М.: Мир, 1989г.
6. Г. Г. Рекус, В. Н. Чесноков. "Лабораторные работы по электротехнике и основам электроники". — М.: Высшая школа, 1989г.