

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования -  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра общей физики

А.В.МИХАЙЛИЧЕНКО, В.П. АПАСЬЕВА

# СНЯТИЕ ОСНОВНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 327А

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

УДК 537.6 (076.5)

ББК 22.3я73

М 69

Рецензент:

кандидат физико-математических наук, доцент А.Д. Юрк

**Михайличенко А.В.**

**М 23 Снятие основной кривой намагничивания ферромагнетика и определение магнитной проницаемости: методические указания к лабораторной работе № 327А / Михайличенко А.В., Апасьева В.П., - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. – 11 с**

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по изучению процесса намагничивания ферромагнетиков и определения их магнитной проницаемости. Работа включает теоретическое изложение материала, описание методики проведения эксперимента и контрольные вопросы для самопроверки.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Общая физика» для студентов всех специальностей.

ББК 22.3я73

© Михайличенко А.В., 2009

© ГОУ ОГУ, 2009

## Лабораторная работа №327А

### Снятие основной кривой намагничивания ферромагнетика и определение магнитной проницаемости

#### 1 Теоретическое введение

##### 1.1 Магнитная индукция $\vec{B}$

Движущиеся заряды, а так же проводники с током создают в окружающем их пространстве магнитное поле. Это поле проявляется в том, что действует с силой на проводники с током, а так же на заряды, движущиеся в нем. Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ .

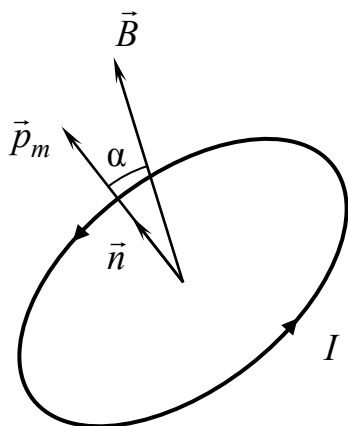


Рисунок 1

Поместим в магнитное поле пробный контур с током. Если  $I$  – сила тока, а  $S$  – площадь контура, то магнитный момент контура

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

где  $\vec{n}$  – единичный вектор положительной нормали (направление  $\vec{n}$  определяется по правилу правого винта). Размерность магнитного момента  $[p_m] = \text{А} \cdot \text{м}^2$ .

В магнитном поле на контур действует вращающий момент  $\vec{M}$

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}].$$

Модуль вращающего момента

$$M = p_m B \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{p}_m$  и  $\vec{B}$ .

Этот вращающий момент поворачивает контур так, что его положительная нормаль совпадает с направлением вектора магнитной индукции. Модуль вектора  $\vec{B}$

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}.$$

Очевидно, что  $M = M_{\max}$  в том случае если  $\sin \alpha = 1$ , т.е. при  $\alpha = \pi/2$ .

Магнитная индукция (силовая характеристика магнитного поля) – векторная величина, направление которой совпадает с направлением положительной нормали к контуру с током, находящемуся в равновесии ( $M = 0$ ,  $\alpha = 0$ ) и численно равная максимальному моменту сил, действующему на контур с током, магнитный момент которого равен единице ( $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ).

Единица магнитной индукции – тесла (Тл):  $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$ .

## 1.2 Магнитное поле в веществе

Под действием магнитного поля всякое вещество способно намагничиваться, т.е. является магнетиком. Атомы имеют магнитные моменты. Каждый электрон в атоме имеет орбитальный магнитный момент  $\vec{p}_m$ , обусловленный движением электрона около ядра атома и собственный магнитный момент  $\vec{p}_{ms}$ .

Орбитальный магнитный момент

$$p_m = -\mu_B \sqrt{l(l+1)},$$

где  $\mu_B$  – магнетон Бора.  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$  ( $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  – постоянная Планка  $h$  делённая на  $2\pi$ ),

$l$  – орбитальное квантовое число,

$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$ , где  $n$  – главное квантовое число.

Собственный (спиновый) магнитный момент

$$p_{ms} = -2\mu_B \sqrt{s(s+1)},$$

где  $s$  – спиновое квантовое число,  $s = 1/2$ .

Знак « $\rightarrow$ » означает, что механические моменты электрона и его магнитные моменты направлены в противоположные стороны.

Атомные ядра также имеют магнитные моменты. Но магнитные моменты ядер гораздо меньше магнитных моментов электрона, поэтому в первом приближении ими можно пренебречь.

Чтобы определить суммарный магнитный момент атома нужно учитывать правила пространственного квантования. В результате при суммировании орбитальных и собственных магнитных моментов может

произойти их компенсация, и результирующий момент атома будет равен нулю. Если же компенсации не происходит, то атом будет обладать постоянным магнитным моментом

$$\vec{p}_a = \sum \vec{p}_m + \sum \vec{p}_{ms}.$$

Поместим в магнитное поле с индукцией  $B_0$  изотропное тело объёмом  $V$ . Под действием поля тело намагничивается, поэтому магнитное поле в веществе

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}',$$

где  $\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}$  – магнитное поле, созданное атомами вещества.

$\vec{J}$  – вектор намагничивания, равный векторной сумме магнитных моментов атомов единицы объема

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{ai}, \text{ А/м.}$$

Тогда  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{J}$  или  $\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} + \vec{J}$ .

Здесь  $\frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \vec{H}_0$  – вектор напряженности внешнего магнитного поля.

$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H}_0 + \vec{J}$  (отсюда следует, что напряжённость измеряется в А/м).

В несильных магнитных полях  $\vec{J} = \chi \vec{H}_0$ , где  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества.

Тогда

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H}_0 + \chi \vec{H}_0,$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}_0,$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}_0,$$

где  $\mu = (1 + \chi)$  – магнитная проницаемость вещества.

Магнитная проницаемость – физическая величина, показывающая, во сколько раз магнитное поле в веществе увеличивается за счет намагничивания вещества.

Если суммарный магнитный момент атома  $\vec{p}_a = 0$ , то  $\mu < 1$  и такое вещество называется диамагнетиком. Если  $\vec{p}_a > 0$ , но взаимодействие между магнитными моментами атомов мало, то  $\mu > 1$  и вещество называется парамагнетиком. Если же магнитные моменты соседних атомов стремятся выстроиться параллельно друг другу даже без внешнего поля, то это ферромагнетики, в этом случае  $\mu \gg 1$ .

### 1.3 Намагничивание ферромагнетиков

Ферромагнетизм обусловлен нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами атомов. Ферромагнетизмом обладают переходные элементы, у которых имеются недостроенные внутренние оболочки (Fe, Ni, Co) и их соединения, а также редкоземельные элементы (церий, самарий и др). В результате обменного взаимодействия электронов внутренних недостроенных оболочек возникают силы, приводящие к образованию доменов. Домены – области ферромагнетика, где спины этих электронов выстраиваются параллельно друг другу, т.е такая область ферромагнетика уже без внешнего поля намагничена до насыщения. Такие области ферромагнетика имеют очень малые размеры (ширина  $\sim 10^{-6}$  м). В отсутствие внешнего поля домены ориентируются так, что их суммарный магнитный момент равен нулю (рисунок 2а). При помещении ферромагнетика в магнитное поле  $\vec{B}_0$   $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}_0$  происходит намагничивание. Этот процесс можно разделить на 3 стадии.

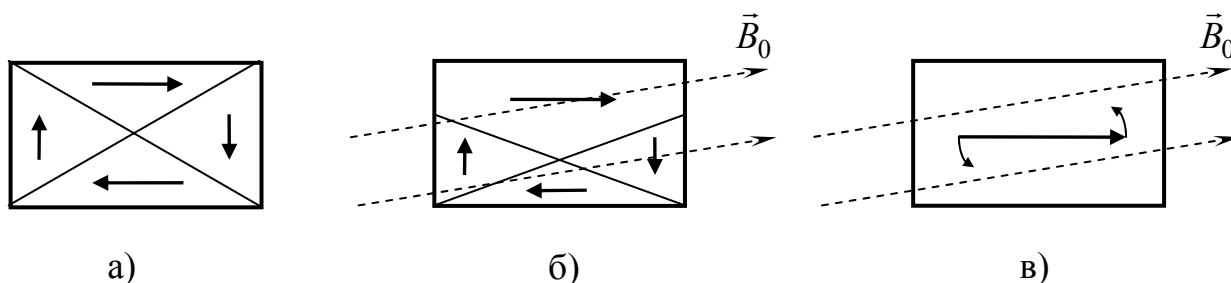


Рисунок 2

1 Процесс смещения границ доменов. Этот процесс заключается в увеличении размеров тех доменов, вектор намагничивания  $\vec{J}$  которых имеет наименьший угол с направлением вектора  $\vec{B}_0$  внешнего поля (рисунок 2б). На рисунке 3 этот процесс выражен кривой  $OA$ . Это происходит до тех пор, пока весь кристалл не будет представлять собой один домен (рисунок 2в).

2 Процесс вращения. При дальнейшем увеличении  $\vec{B}_0$  происходит поворот  $\vec{J}$  в направлении внешнего поля (рисунок 2в). Участок кривой  $AB$  (рисунок 3). При этом достигается техническое насыщение намагниченности.

3 Парапроцесс. При температуре, отличной от абсолютного нуля, не все спины атомов доменов ориентированы параллельно друг другу. Часть спинов имеет антипараллельную ориентацию вследствие теплового движения. При очень сильных полях происходит переориентация спинов таких атомов. Это и есть парапроцесс (участок кривой  $BC$  рисунок 3).

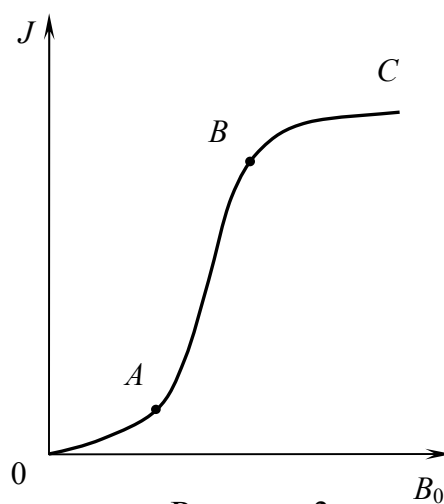


Рисунок 3

Очевидно, что при таком процессе намагничивания ферромагнетиков их магнитная проницаемость  $\mu$  резко возрастает в слабых магнитных полях,

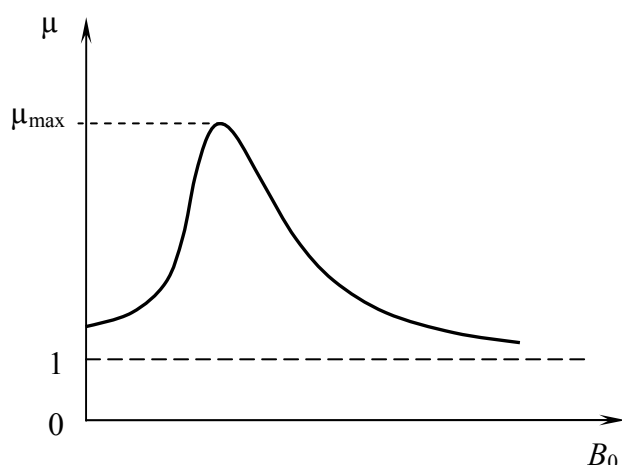


Рисунок 4

затем уменьшается и в сильных полях стремится к единице (рисунок 4).

На рисунке 5 приведена кривая полного перемагничивания ферромагнетика. На ней видно, что если внешнее поле  $\vec{B}_0$  уменьшить до нуля после достижения технического насыщения  $B_S$ , то намагниченность остается ( $J_{OC}$  – остаточная намагниченность). Для её уничтожения нужно создать

размагничивающее поле  $B_K$ , которое называется коэрцитивной силой. Полная кривая перемагничивания ферромагнетика называется петлей гистерезиса. Площадь петли пропорциональна работе перемагничивания ферромагнетика. В процессе перемагничивания эта работа переходит в теплоту.

При нагревании ферромагнетиков их магнитные свойства изменяются. Для каждого ферромагнетика существует такая температура, при которой он утрачивает особенности ферромагнетика и превращается в парамагнетик. Такая температура называется точкой Кюри  $Q$ .

При  $T = Q$  энергия взаимодействия магнитных моментов атомов в пределах доменов становится равной средней энергии теплового движения атомов. В результате этого спонтанная намагниченность исчезает, и изменяются магнитные свойства вещества. Это фазовый переход второго рода.

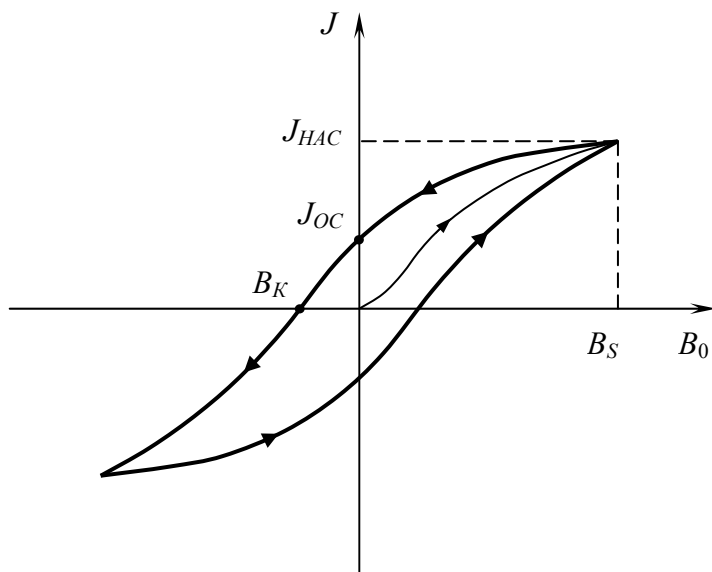


Рисунок 5

## 2 Схема опыта и метод измерения

Принципиальная схема

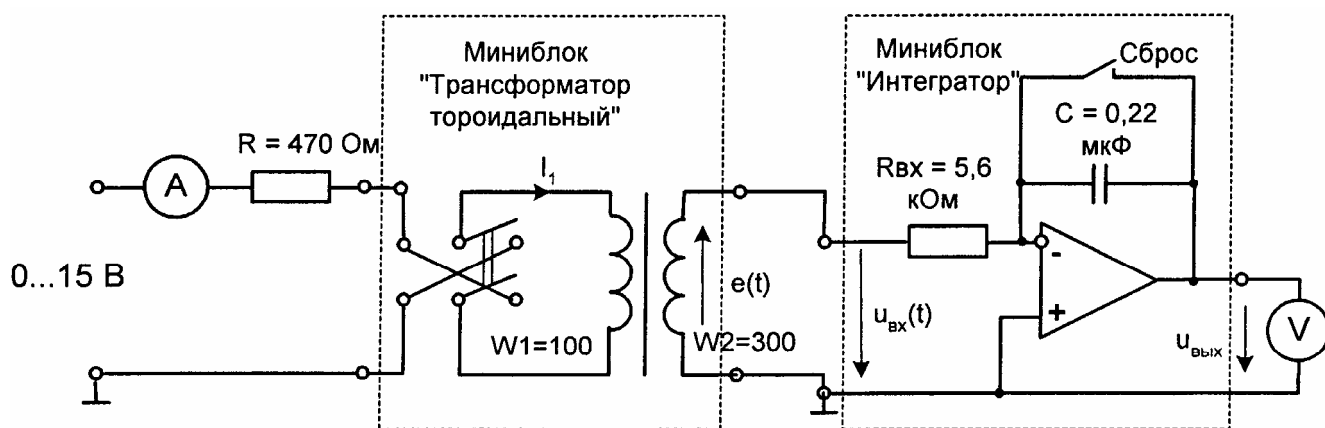


Рисунок 6

Исследуемый образец представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетке миниблока «Трансформатор тороидальный». На сердечнике имеются две катушки. Катушка с числом витков  $W_1$  подключается к источнику регулируемого постоянного напряжения и служит для создания магнитного поля в сердечнике. Направление тока в катушке можно менять тумблером на миниблоке. К другой катушке с числом витков  $W_2$  подключен миниблок «Интегратор».

При изменении направления тока в первичной катушке на противоположный магнитный поток в сердечнике изменяется от  $-\Phi$  до  $+\Phi$  и в процессе этого изменения во вторичной катушке возникает ЭДС индукции



$\varepsilon = W_2 \frac{d\Phi}{dt}$ . Индукционный ток заряжает конденсатор  $C$  и

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C} + U_{\text{вых}}(0).$$

При этом  $q = \int_0^t Idt$ , а  $I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{ex}}}$ ,

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} \cdot C} \int_0^t \varepsilon dt + U_{\text{вых}}(0).$$

Где  $R_{\text{ex}}$  и  $C$  – параметры интегратора. На интеграторе имеется переключатель «Сброс», с помощью которого перед началом измерения устанавливается

$$U_{\text{вых}}(0) = 0.$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} \cdot C} \int_0^t W_2 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{W_2}{R_{\text{ex}} \cdot C} \int_{-\Phi}^{+\Phi} d\Phi = \frac{2W_2\Phi}{R_{\text{ex}} \cdot C}.$$

$\Phi = B \cdot S$ , где  $S$  – сечение сердечника,  $B$  – магнитная индукция,  $U_{\text{вых}}$  измеряется вольтметром.

Напряженность магнитного поля определяется по закону полного тока:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = N_1 I_1.$$

Циркуляция вектора  $\vec{H}$  по замкнутому контуру  $L$  равна алгебраической сумме токов проводимости, охватываемых этими контуром.

Если  $l$  – длина средней линии кольцевого сердечника, то

$$H \cdot l = N_1 I_1 \rightarrow H = \frac{I_1 W_1}{l}.$$

$I_1$  – ток в первичной обмотке, измеряемый амперметром.

### 3 Порядок выполнения эксперимента

1 Соберите лабораторную установку как показано на рисунке 2. В качестве амперметра и вольтметра используйте мультиметры.

2 Перед включением получите разрешение на работу у преподавателя или лаборанта.

3 Включите блок генераторов и установите регулятором напряжения первое значение тока в намагничивающей катушке (например, 2 мА).

4 Переведите переключатель «Сброс» интегратора в верхнее положение. Убедитесь, что на вольтметре установилось нулевое напряжение (или  $\pm 10$  мВ), верните переключатель в нижнее положение и сразу же переключите переключатель на миниблоке «Трансформатор тороидальный». Запишите значение напряжения на вольтметре в таблицу.

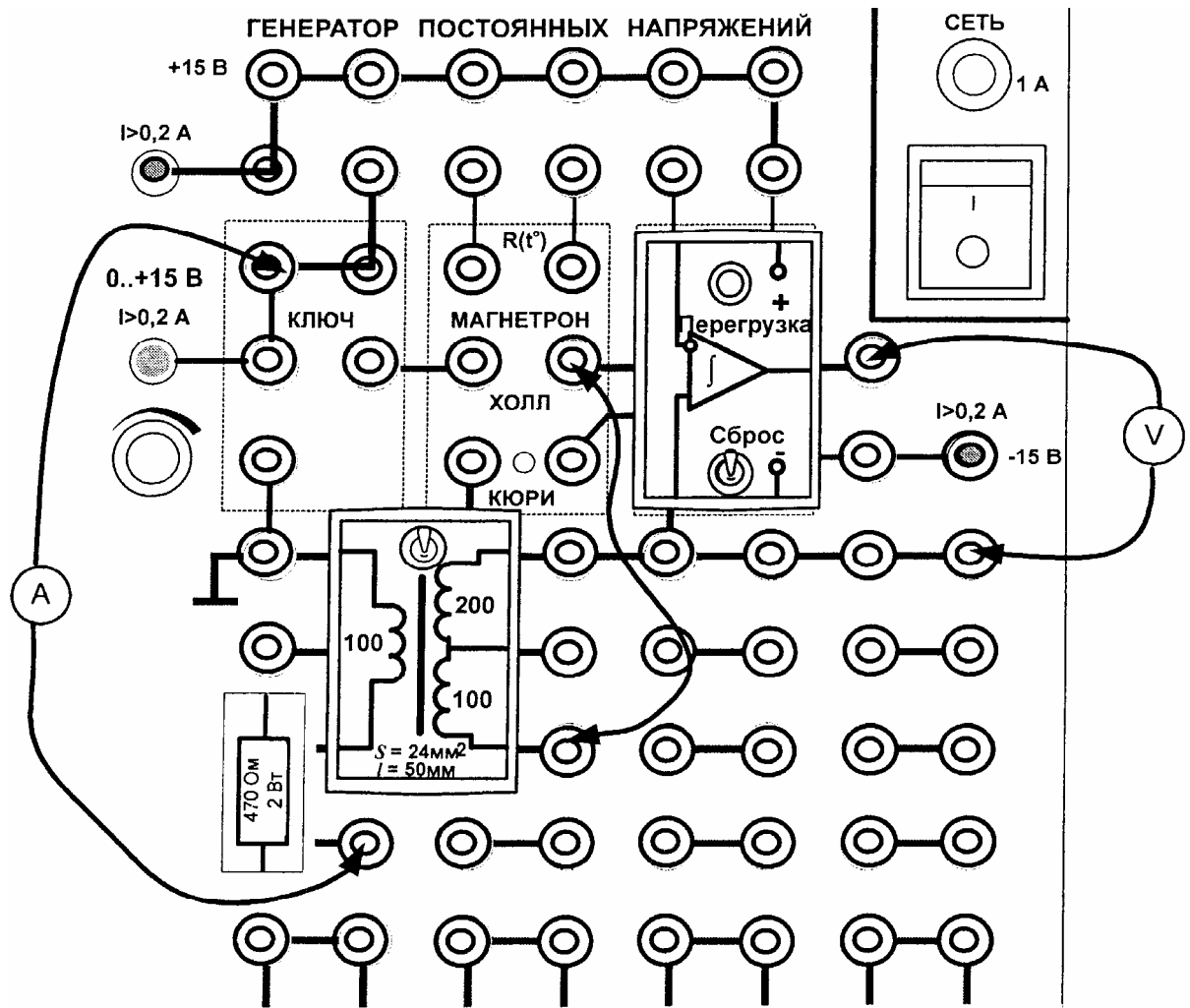


Рисунок 7

Примечание: Значение напряжения на вольтметре записывать в течение двух- трёх секунд после переключения тока, т.к. его значение может медленно изменяться вследствие утечки и неточной балансировки усилителя. Повторите этот опыт несколько раз и запишите в таблицу среднее или часто повторяющиеся значение.

5 Увеличьте ток намагничивания и повторите опыт при каждом его значении, записывайте результат в таблицу 1.

6 Вычислите магнитную индукцию

$$B = \frac{R_{\text{вх}} \cdot C}{2W_2 S} \cdot U_{\text{вых}}$$

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

$I_1, \text{A}$	$U_{\text{вых}}, \text{B}$	$H, \text{A/м}$	$B, \text{Тл}$	$\mu$

Параметры сердечника	$l =$
	$S =$
Параметры катушек	$W_1 =$
	$W_2 =$
Параметры интегратора	$R_{ex} =$
	$C =$

7 Вычислите  $H$  по формуле  $H = \frac{I_1 W_1}{l}$ .

8 Вычислите магнитную проницаемость  $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

9 Постройте графики зависимостей  $B = f(H)$  и  $\mu = f(H)$ .

10 Сделайте вывод по работе.

#### 4 Контрольные вопросы

- 1 Что такое вектор магнитной индукции?
- 2 Дать определение орбитального и спинового магнитных моментов электрона.
- 3 Что такое вектор намагничивания?
- 4 Дать определение магнитной проницаемости вещества.
- 5 Как происходит намагничивание ферромагнетика? Что такое домены?
- 7 Объяснить петлю гистерезиса ферромагнетика.
- 8 Почему магнитная проницаемость ферромагнетика зависит от внешнего магнитного поля?

#### Список использованных источников

- 1 Трофимова, Т.И. Курс физики: учебник / Т.И.Трофимова. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с. с илл.
- 2 Савельев, И.В. Курс физики: учебник: в 2т / И.В.Савельев. – М.: Наука, 1978. Т2 – 480 с. с илл.
- 3 Епифанов Г.И. Физика твёрдого тела / Г.И. Епифанов. – М.: Высшая школа, 1977. – 288 с. с илл.