

## РАБОТА 8

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

**Цель работы:** изучение основной кривой намагничивания  $B(H)$  и зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля ферромагнетика.

#### Введение

Магнитная индукция поля  $\vec{B}$  в ферромагнетике (железо, кобальт, никель, специальные сплавы), который помещен в магнитное поле, нелинейно зависит от его напряженности  $\vec{H}$  (рис. 8.1). Причем, величина  $B$  в ферромагнитном веществе зависит не только от этого поля, но и предыдущего магнитного состояния образца.

Если образец предварительно был размагничен, то при его намагничивании зависимость  $B$  от  $H$  изображается кривой 0-1 и называется основной кривой намагничивания. При уменьшении напряженности поля  $H$  (см. кривую 1-2) изменение магнитной индукции  $B$  в ферромагнетике будет отставать от изменения  $H$  (магнитный гистерезис).

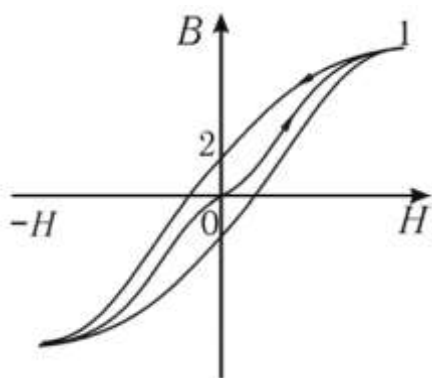


Рис. 8.1.

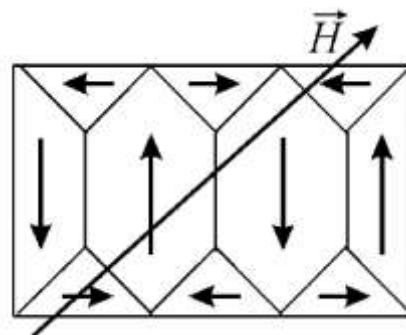


Рис. 8.2.

Эта особенность ферромагнетиков связана с наличием в них областей спонтанной (самопроизвольной) намагниченности, называемых доменами. В размагниченном состоянии ферромагнетика, магнитные моменты различных доменов ориентированы так, что результирующий вектор намагниченности образца равен нулю. Одна из возможных доменных структур такого состояния приведена на рис. 8.2, где стрелками показаны направления намагниченности доменов.

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле, границы доменов смещаются так, что сначала растут домены, магнитные моменты которых составляют с вектором  $\vec{H}$  острый угол, т.е. домены, имеющие наиболее выгодное энергетическое состоя-

ние. На следующей стадии с ростом  $\vec{H}$  происходит поворот магнитных моментов всех доменов в направлении поля.

При этом намагниченность образца  $\vec{J}$  достигает насыщения (рис. 8.3), а индукция магнитного поля  $\vec{B}$  продолжает незначительно возрастать за счет увеличения напряженности  $H$  внешнего магнитного поля:

$$B = \mu_0(H + J) = \mu_0(1 + \chi)H = \mu_0\mu H, \quad (8.1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\chi$  – магнитная восприимчивость;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

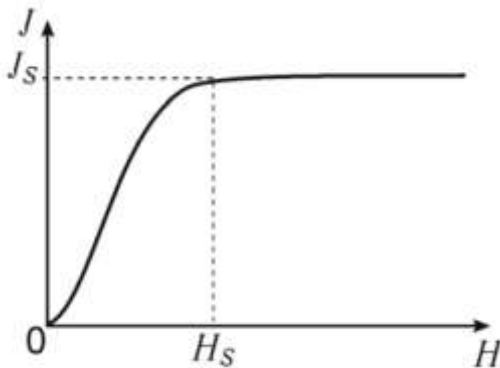


Рис. 8.3.

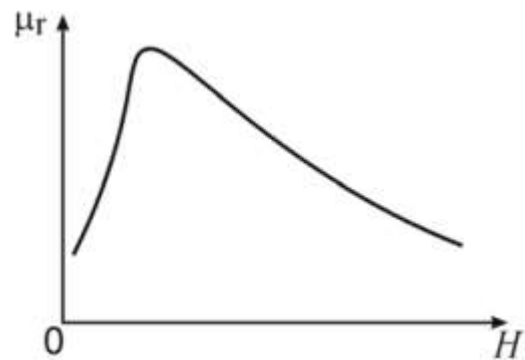


Рис. 8.4.

Доменная структура ферромагнетиков является также причиной того, что величина магнитной проницаемости  $\mu$  может меняться в широких пределах (от 1 до  $10^6$ ) и сложным образом зависит от напряженности внешнего магнитного поля (рис. 8.4). Ввиду нелинейной зависимости  $B$  от  $H$  для ферромагнетиков нельзя ввести магнитную проницаемость  $\mu$  как определенную постоянную величину, характеризующую магнитные свойства каждого данного ферромагнетика. Поэтому магнитная проницаемость  $\mu = B / \mu_0 H$  является функцией  $H$ . В таблицах, обычно, приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая температура или точка Кюри), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У железа, например, температура Кюри равна  $770^\circ\text{C}$ , у кобальта  $1130^\circ\text{C}$ , у никеля  $360^\circ\text{C}$ .

Так как магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков зависит от напряженности  $H$  магнитного поля, то от величины  $H$  зависят и те характеристики контура, которые связаны с магнитной проницаемостью, например, индуктивность соленоида  $L$ :

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} \quad (8.2)$$

и его индуктивное сопротивление переменному току  $X_L$  :

$$X_L = \omega L, \quad (8.3)$$

где  $N$  – число витков соленоида;  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника соленоида;  $l$  – длина средней осевой линии сердечника;  $\omega$  – циклическая частота переменного тока.

В данной работе измерение магнитной проницаемости сердечника  $\mu$  соленоида, согласно формуле (8.2), основано на измерениях индуктивности катушки  $L$  и её геометрических параметрах. Для определения индуктивности достаточно измерить индуктивное сопротивление катушки переменному току известной частоты  $\omega$ . Полное сопротивление катушки переменному току

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (8.4)$$

так как обычно  $R \ll X_L$ , то величиной активного сопротивления катушки  $R$  можно пренебречь по сравнению с индуктивным сопротивлением переменному току частоты 200Гц.

Закон Ома позволяет определить величину  $Z$  путем измерений тока  $I$  и напряжения  $U$  на участке цепи, содержащей соленоид:

$$Z = U / I. \quad (8.5)$$

Используя выражения (8.2), (8.4) и (8.5) магнитной проницаемости, можно записать в следующем виде:

$$\mu = \frac{Ll}{\mu_0 N^2 S} = \frac{l}{\omega \mu_0 N^2 S} \cdot \frac{U}{I} = k \frac{U}{I}, \quad (8.6)$$

где  $k = \frac{l}{\omega \mu_0 N^2 S}$  – постоянная установки.

Напряженность магнитного поля, которое создается в кольцевом сердечнике при протекании по обмотке тока  $I$ , можно рассчитать по формуле

$$H = \frac{NI}{l}. \quad (8.7)$$

Таким образом, каждому значению тока  $I$  соответствует определенная напряженность магнитного поля  $H$ , а с учетом выражения (8.1) магнитная проницаемость  $\mu$  и индукция магнитного поля  $B$ .

Определяя в данной работе величины  $H$ ,  $\mu$  и  $B$  при различных токах, можно экспериментально установить:

- $B = f(H)$  – зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля (основная кривая намагничивания ферромагнетика)

- $\mu = f(H)$  – зависимость магнитной проницаемости сердечника от напряженности магнитного поля.

### Методика выполнения работы

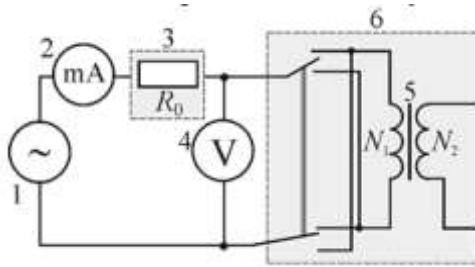


Рис.8.5

Изучение зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля проводится с помощью схемы, показанной на рис. 8.5.

На кольцевой сердечник 5, изготовленный из исследуемого ферромагнитного материала, намотаны  $N_1$  проволочных витков. Эта обмотка, по которой пропускают переменный ток частоты 200 Гц, служит для намагничивания магнетика, и по ее параметрам определяют напряженность  $H$  намагничивающего поля. Генератор сигналов специальной формы 1 позволяет изменять напряжение  $U$ , а следовательно, и ток  $I$  в обмотке тороида. Эти величины измеряют соответственно вольтметром 4 и миллиамперметром 2. Резистор 3 ( $R=100$  Ом) ограничивает ток в обмотке.

Работа выполняется на лабораторном комплексе «Электричество и магнетизм». Описание приборов и блоков лабораторного комплекса, используемых в данной работе, приведены в *приложении*. Монтажная схема электрической цепи показана на рис. 8.6.

Перед началом работы необходимо прочитать *Приложение*, которое находится в конце описания данной работы.

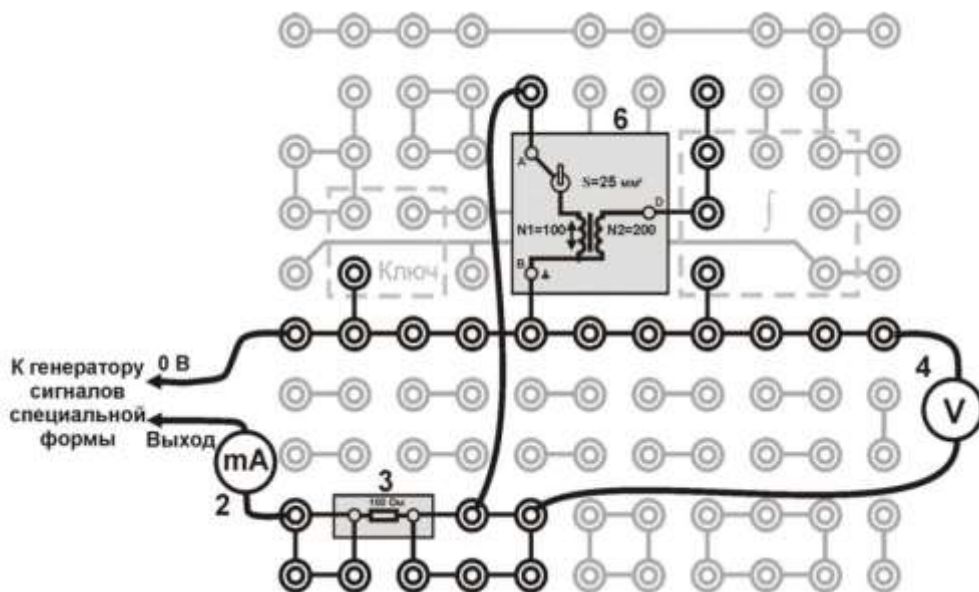


Рис. 8.6.

### Порядок выполнения работы

1. Запишите в таблицу 8.1 параметры установки и исследуемого образца.
2. Соберите электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 8.6.
3. Установите один мультиметр в режим  $A \sim 200\text{мА}$ , а другой в  $V \sim 2\text{В}$ .
4. Включите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжений и блока мультиметров. Нажмите кнопку «Исходная установка» (поз.19, см. рис.П1 в *приложении*). Включите мультиметры кнопками «On/off»
5. Кнопками установки частоты «0.2-20 кГц» установите 200 Гц. (поз.11, см. рис.П1 в *приложении*).
6. Кнопками установки уровня выхода «0-15В» генератора сигналов специальной формы установите в обмотке тороида ток  $I \approx 5\text{ мА}$ . Запишите в таблицу 8.1 показания тока и напряжения.
7. Изменяя ток в обмотке тороида с шагом  $\approx 5\text{ мА}$  от 5 до 55 мА, измерьте напряжение. Запишите в таблицу показания тока и напряжения.
8. Выключите кнопками «Сеть» питание блока генераторов напряжений и блока мультиметров.

Таблица 8.1

Параметры установки: $N=100$ ; $l=37,7\text{ мм}$ ; $S=25\text{ мм}^2$ ; $\nu=200\text{ Гц}$ .				
$k = \dots \text{ А/В}$				
I, мА	U, В	H, А/м	$\mu$	B, мТл
5				
10				
15				
...				
55				

9. Вычислите постоянную установки  $k$  и запишите ее значение в таблицу 8.1.
10. Для каждого значения тока рассчитайте величины  $H$ ,  $\mu$  и  $B$  по формулам (8.7), (8.6) и (8.1). Результаты расчетов запишите в таблицу.
11. По данным таблицы постройте основную кривую намагничивания  $B = f(H)$  и график зависимости  $\mu = f(H)$ .

12. Сопоставьте ход кривой намагничивания с положением максимума на графике  $\mu = f(H)$ . Сравните полученные кривые с известными теоритическими и экспериментальными зависимостями.

13. Напишите заключение к работе.

### Контрольные вопросы

1. Назовите характерные свойства ферромагнетиков и особенности их намагничивания.
2. Нарисуйте основной вид кривой намагничивания  $B = f(H)$  и графика зависимости магнитной проницаемости от напряженности  $\mu = f(H)$  магнитного поля для ферромагнетиков в случае: а) при  $T < T_c$ ; б) при  $T > T_c$  ( $T_c$  - температура Кюри).
3. От каких величин зависят:
  - напряженность  $H$  магнитного поля тороида;
  - индукция  $B$  магнитного поля тороида с ферромагнитным сердечником;
  - магнитная проницаемость  $\mu$  сердечника тороида?
4. Какая зависимость составляет основу метода определения магнитной проницаемости сердечника?
5. Какой закон используется в работе для определения полного сопротивления катушки в цепи переменного тока?
6. Какие измеряемые величины входят в расчетную формулу для магнитной проницаемости сердечника?
7. Какие экспериментальные зависимости можно получить, определяя  $H$ ,  $\mu$  и  $B$  при различных токах?
8. Какие измеренные величины используются для построения основной кривой намагничивания?

Лабораторный комплекс «Электричество и магнетизм» состоит из блока генератора напряжений, наборного поля, блока мультиметров, набора миниблоков и набора слабо проводящих пластин с электродами.

Общий вид блока генераторов напряжений показан на рис. П1. Блок состоит из генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений (регулируемый источник постоянного напряжения и два нерегулируемых источника стабилизированного постоянного напряжения).



Рис. П1. Блок генераторов напряжений:

- 1 – индикатор перегрузки генератора сигналов специальной формы;
- 2 – индикатор перегрузки регулируемого источника постоянного напряжения «0...+15В»;
- 3 – индикатор перегрузки стабилизированного напряжения «+15В»;
- 4 – индикатор перегрузки стабилизированного напряжения «-15В»;
- 5 – индикатор частоты;
- 6 – индикатор выбранной формы сигнала;
- 7 – выход синхронизации осциллографа (прямоугольные импульсы «+5В»);
- 8 – кнопки переключения формы сигнала:  
 ~ – синусоидальная;

□ – биполярные импульсы «-15В ... +15В»;

▭ – униполярные импульсы «0 ... +15В»;

9 – выходной сигнал генератора сигналов специальной формы;

10 – кнопки регулировки амплитуды сигнала генератора сигналов специальной формы;

11 – кнопки регулировки частоты от 50 до 20000 Гц;

12 – регулируемое постоянное напряжение «0 ... +15В», максимально допустимый ток 0,3А;

13 – нулевой выход (земля);

- 14 – кнопки установки постоянного напряжения;
- 15 – индикатор постоянного напряжения на выходе регулируемого источника «0 ...+15В»;
- 16 – стабилизированное напряжение «+15В», максимально допустимый ток 0,3А;
- 17 – нулевой выход (земля);
- 18 – индикатор постоянного напряжения на выходе регулируемого источника «0 ...-15В»;
- 19 – кнопка исходной установки блока генераторов:
  - выходной сигнал источника постоянного напряжения (12) – 0 В;
  - выходной сигнал генератора сигналов специальной формы – синусоидальный, частота 500Гц, амплитуда выходного сигнала (9) 0В;
- 20 – выключатель питания («сети»).

### **Генератор сигналов специальной формы (ГССФ)**

Генератор (см. рис. П1) предназначен для получения сигнала частотой от 0,05 до 20 кГц различной формы и амплитуды. Генератор может выдавать три вида сигнала: синусоидальный (амплитуда -15 ...+15В), биполярные импульсы (амплитуда -15 ...+15В, ширина импульса равна половине периода), униполярные импульсы (-0 ...+15В, ширина импульса равна половине периода). Установка формы сигнала осуществляется кнопками 8. Частоту выходного сигнала (выход 9) регулируют кнопками 11, а амплитуду – кнопками 10. Значение частоты сигнала отображается на индикаторе 5. Для получения стабильного изображения сигнала на осциллографе в генераторе предусмотрены импульсы синхронизации (прямоугольные, заданной частоты, амплитуды +5В, ширина импульса равна половине периода), которые можно снимать с выхода 7.

Генератор имеет защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки 1. В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки, необходимо выключить блок и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

### **Источник постоянного напряжения (ИПН)**

Источники постоянного напряжения (см. рис. П1) предназначены для получения стабилизированного постоянного напряжения -15, +15В (необходимо для работы интегратора тока, вакуумной лампы и датчика Холла), и регулируемого постоянного напряжения 0 ...+15В, которое регулируется кнопками 14.



Источники имеют защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки 2, 3, 4. В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки необходимо выключить блок и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

### Наборное поле

Наборное поле (рис. П2) предназначено для сборки электрических схем. Линии на наборном поле показывают физически соединенные гнезда.

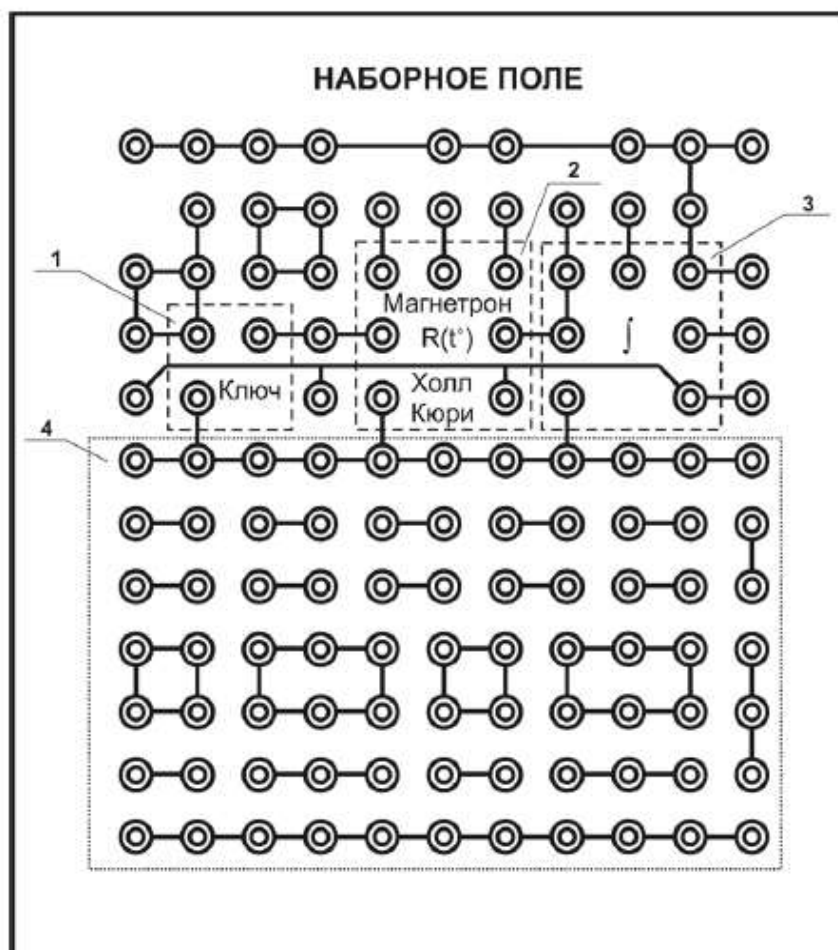


Рис. П2.

- 1 – место для подключения миниблока «Ключ»;
- 2 – место для подключения миниблоков «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника», «Эффект Холла», «Ферромагнетик», «Магнетрон»;
- 3 – место для подключения миниблока «Интегратор тока»;
- 4 – поле для подключения миниблоков.

## Блок мультиметров

Блок мультиметров состоит из двух цифровых мультиметров с источниками питания и стрелочного вольтметра. Тумблер «Сеть» предназначен для включения мультиметров (подачи питания на мультиметры).

Мультиметр предназначен для измерения постоянного и переменного напряжений, постоянного и переменных токов, сопротивления, емкости и температуры. Общий вид мультиметра представлен на рис. П3.

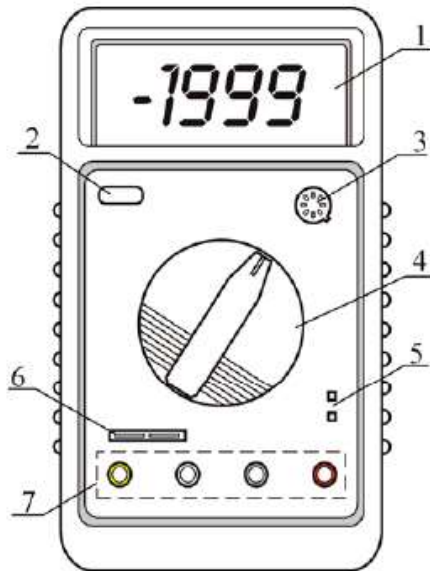


Рис. П3. Общий вид мультиметра:

1 – дисплей; 2 – выключатель питания; 3 – гнездо для проверки транзисторов; 4 - переключатель режимов (рис. П4); 5 – разъем для подключения термопары; 6 – разъем для подключения конденсатора; 7 – входы для измерения тока, напряжения, сопротивления (рис. П5).

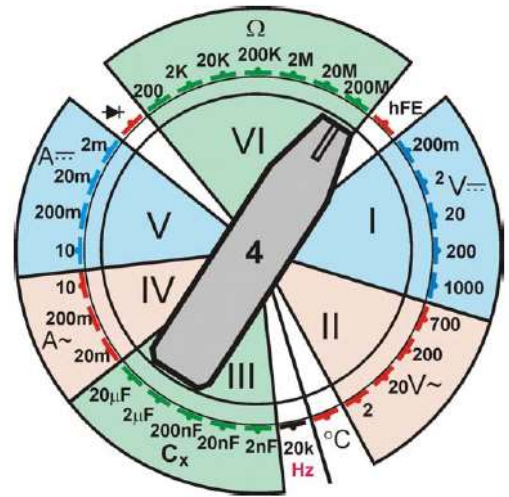


Рис. П4. Переключатель режимов.

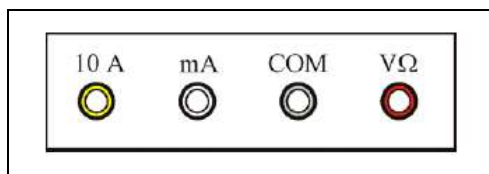


Рис. П5. Измерительные входы мультиметра:

10A – вход для измерения тока до 10А;  
mA – вход для измерения тока до 200 мА;  
COM – общий вход (земля);

VΩ – вход для измерения напряжения и сопротивления.

**При использовании прибора необходимо соблюдать следующие правила:**

1. Перед вращением переключателя режимов для выбора измеряемой величины отсоедините провода от схемы.
2. Если значение измеряемой величины не известно заранее, установите переключатель режимов в положение, соответствующее наибольшему значению.
3. Появление на дисплее цифры «1» указывает на то, что следует увеличить диапазон измерений.

**Внимание!** Если положение переключателя режимов не изменяют в течение **40 минут**, мультиметр автоматически выключается. Для продолжения работы необходимо дважды нажать кнопку 2 (см. рис. П3).

### ***Измерение напряжения***

Подсоедините один провод к входу **COM** (см. рис. П5), второй к входу **V $\Omega$** . Установите переключатель режимов (см. рис. П4) в положение **V $\overline{\square}$**  (область I) для измерения постоянного напряжения или в положение **V $\sim$**  (область II) для измерения переменного напряжения с учетом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к точкам электрической цепи, между которыми измеряется напряжение.

Диапазоны измерения переменного и постоянного напряжения  $U = 0,2; 2; 20; 200; 700$  В. Погрешность измерений 1,2%.

### ***Измерение тока***

Подсоедините один провод к входу **COM** (см. рис. П5), второй к входу **mA (A)** или **10A** (для измерения больших токов). Установите переключатель режимов в положение **A $\overline{\square}$**  для измерения постоянного тока (см. рис. П4 область V) или в положение **A $\sim$**  для измерения переменного тока (область IV) с учетом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к точкам электрической цепи, между которыми измеряется  $i_{\text{r}}$ .

Диапазоны измерения переменного тока  $I = 20; 200$  mA; 10A, постоянного тока  $I = 2; 20; 200$  mA; 10 A. Погрешность измерений составляет 2%.

### ***Измерение сопротивления***

Подсоедините один провод к входу **COM** (см. рис. П5), второй к входу **V $\Omega$** . Установите переключатель режимов в положение  **$\Omega$**  (см. рис. П4, область VI) с учетом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к измеряемому сопротивлению.

Диапазоны измерения сопротивлений  $R = 200$  Ом; 2 кОм; 20 кОм; 200кОм; 2 МОм; 20 МОм; 200МОм. Погрешность измерений 1%.

## Набор миниблоков

1. Миниблок «**Конденсатор**» (рис. П6) содержит конденсатор емкостью  $C$ , указанной на блоке, или неизвестной емкостью  $C_x$ .

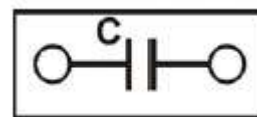


Рис. П6.

2. Миниблок «**Сопротивление**» (рис. П7) содержит сопротивление  $R$  (значение указано на блоке).

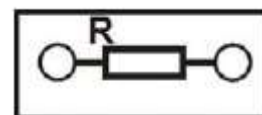


Рис. П7

3. Миниблок «**Катушка**» (рис. П8) содержит катушку с индуктивностью  $L$ , указанной на блоке, или неизвестной индуктивностью  $L_x$ .



Рис. П8

4. Миниблок «**Ферромагнетик**» (рис. П9) предназначен для изучения магнитных свойств сердечника.

1– переключатель направления тока в первичной обмотке;

2 – ферромагнитный сердечник (тороид) с первичной обмоткой  $N_1$  (выводы **AB**) и вторичной обмоткой  $N_2$  (выводы **BD**).

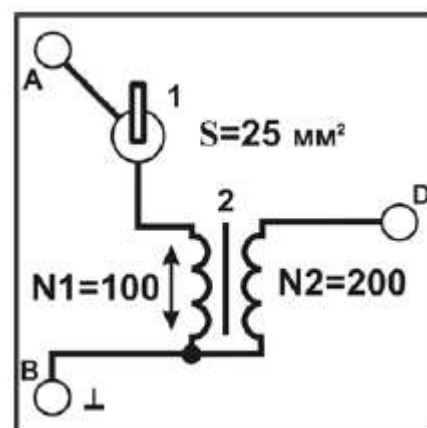


Рис. П9