

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 21.08.2023 11:28:10

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d739e5f1c11eabbf73e943d61a48516de56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова



«28» 05 2023 г.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания по выполнению лабораторной работы № 4  
по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы»

Курск 2023

УДК 621.382

Составитель О.Е. Ключникова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры КПиСС *Е.О. Брежнева*

**Исследование свойств низкочастотных магнитных материалов:** методические указания по выполнению лабораторной работы № 4 по дисциплине «Конструкционные и биоматериалы» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: О.Е. Ключникова. – Курск, 2023. – 19 с.

В методических указаниях излагаются основные понятия и определения и методические рекомендации по подготовке к выполнению лабораторной работы, её проведению и оформлению результатов опытов.

Методические указания соответствуют требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению «Биотехнические системы и технологии» и рабочей программы дисциплины «Конструкционные и биоматериалы».

Предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 12.03.04 Биотехнические системы и технологии очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано печать . Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,10. Уч.-изд. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ *303* Бесплатно  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является изучение магнитных свойств низкочастотного феррита.

## 2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Во многих устройствах радиоэлектронной аппаратуры для усиления магнитных полей в катушки с током помещают магнитные сердечники – магнитопроводы. В переменных полях, особенно повышенной частоты, при перемагничивании сердечников возникают вихревые токи, которые увеличивают потери энергии и снижают к. п. д. устройств. В результате устройство может так нагреться, что выйдет из строя. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечники делают не сплошными, а собирают из отдельных пластин, электрически изолированных друг от друга. Чем выше рабочая частота, тем тоньше должны быть пластины. Но и это позволяет увеличивать рабочие частоты примерно до сотен кГц. На более высоких частотах можно работать, используя магнитодиэлектрики. В них магнитная фаза представляет собой мелкие ферромагнитные частицы, диаметром от 1 до 50 мкм, изолированные друг от друга диэлектрической средой. В этом случае предельные рабочие частоты могут быть до 100 МГц. Но на более высоких частотах потери на вихревые токи становятся недопустимо большими. Успех был, достигнут лишь с разработкой ферритов, сочетающих магнитные свойства ферромагнетиков и диэлектрические свойства полупроводников и диэлектриков. Электрическое сопротивление ферритов превышает сопротивление металлических ферромагнетиков в  $10^5$  -  $10^{13}$  раз, и это свойство позволило решить важную задачу применения магнитных материалов в области высоких и сверхвысоких частот.

В настоящее время получены сотни различных марок ферритов, отличающихся по химическому составу, кристаллической структуре, магнитным и другим свойствам. Ферриты с высокой магнитной проницаемостью, большой индукцией насыщения и малой

коэрцитивной силой используется для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, в качестве магнитных антенн и др. Ферриты с большой коэрцитивной силой и большой остаточной индукцией применяются для производства постоянных магнитов. Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса используются при создании элементов памяти в ЭВМ, в логических устройствах. Ферритовые элементы обладают большой надежностью в работе, относительно дешевы, просты в изготовлении.

## 2.1. Величины, характеризующие магнитное состояние материалов, единицы их измерения

2.1.1. Напряженность магнитного поля  $H$  измеряется в амперах на метр (А/м). Для тороидального образца, по обмотке которого протекает ток, напряженность  $H$  вычисляется по формуле:

$$H = \frac{N \cdot i}{\pi \cdot d_{cp}}, \quad (4.1)$$

где  $N$  – число витков намагничивающей обмотки;

$i$  – сила тока, А;

$d_{cp}$  – средний диаметр образца, м,

$$d_{cp} = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (4.2)$$

где  $d_1$  – внутренний диаметр образца, м;

$d_2$  – внешний диаметр образца, м.

2.1.2. Образец, помещенный в магнитное поле, намагничивается и приобретает результирующий магнитный момент. Магнитный момент единицы объема вещества называется намагниченностью

$$I = \frac{m}{V}, \quad (4.3)$$

где  $I$  – намагниченность, А/м;

$m$  – магнитный момент некоторого объема вещества, А·м<sup>2</sup>

$V$  – объем вещества, м<sup>3</sup>.

Намагниченность  $I$  связана с напряженностью поля  $H$  следующей зависимостью:

$$I = k \cdot H, \quad (4.4)$$

где  $k$  – безразмерная величина, характеризующая способность вещества намагничиваться в магнитном поле и называется магнитной восприимчивостью. Магнитная восприимчивость показывает, как изменилась намагниченность количественно под действием магнитного поля.

2.1.3. Намагниченное тело, находящееся во внешнем поле, создает собственное магнитное поле. Суммарное поле в веществе (внешнее плюс собственное) характеризуется магнитной индукцией  $B$ , равной сумме индукций  $B_C$  и  $B_H$  собственного и внешнего поля соответственно.

$$B = B_C + B_H = \mu_0 I + \mu_0 H, \quad (4.5)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Если в формулу (4.5) Подставить значение намагниченности  $I$  из формулы (4.4), получим:

$$B = \mu_0 H(1 + K) = \mu_0 \mu_r H, \quad (4.6)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;

$\mu_r$ , – относительная магнитная проницаемость, безразмерная величина, показывающая как изменится индукция во внешнем магнитном поле.

$$\mu_r = 1 + k, \quad (4.7)$$

Магнитная индукция – это плотность магнитного потока, проходящего через единичную площадь поперечного сечения образца, перпендикулярного направлению магнитного потока.

## 2.2. Химический состав ферритов, их кристаллическая и магнитная структура

Из всех ферритов наиболее широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) нашли ферриты-шпинели, химический состав которых отвечает формуле  $MeFe_2O_4$  или  $MeO \cdot Fe_2O_3$ . Эти ферриты представляют собой твердый раствор окисла двухвалентного металла  $MeO$  и окиси железа  $Fe_2O_3$ . В качестве окислов металлов могут быть  $NiO$ ,  $MnO$ ,  $ZnO$ ,  $CoO$ ,  $MgO$  и др. Феррит, в состав которого входит окисел одного двухвалентного металла  $MeO$ ,

называется моноферритом или простым ферритом. В технике нашли широкое применение полиферриты или смешанные ферриты. Они содержат в своем составе окислы нескольких металлов, например, никель-цинковые, магний марганцевые и др. ферриты. Изменяя в составе феррита окислы металлов и их соотношение, можно в широких пределах изменять магнитные и другие свойства ферритов.

Магнитную структуру ферритов можно представить в виде двух магнитных подрешеток, вставленных друг в друга (рис. 4.1). Магнитные моменты атомов подрешеток не равны по величине и антипараллельны по направлению. Такая магнитная структура соответствует не скомпенсированному антиферромагнетизму.

Магнитный момент феррита равен векторной сумме магнитных моментов подрешеток. Из-за такой магнитной структуры ферриты обладают более слабыми магнитными свойствами по сравнению с металлическими ферромагнетиками (см. рис. 4.1 б). Чтобы найти магнитный момент единицы объема ферромагнетика, надо сложить магнитные моменты всех атомов, входящих в этот объем. У ферритов надо найти магнитный момент каждой из подрешеток и найти разность абсолютных значений этих величин.

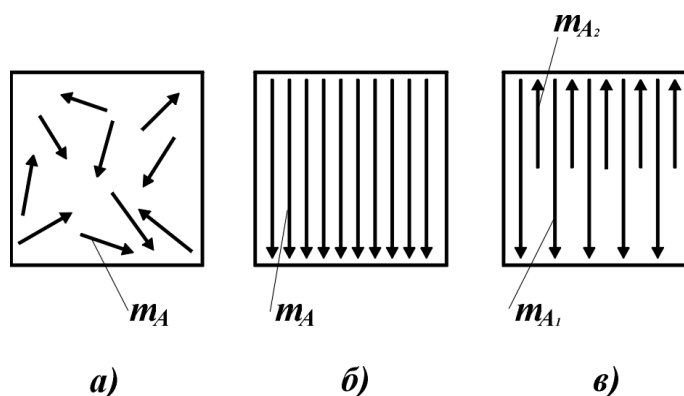


Рис. 4.1. Схематическое изображение магнитных структур в различных магнитных материалах в отсутствие внешнего магнитного поля: а) магнитные моменты атомов  $m_A$  в парамагнетике полностью разориентированы тепловой энергией; б) магнитные моменты атомов  $m_A$  в металлических ферромагнетиках ориентированы под действием внутренних сил параллельно друг другу; в) в ферритах магнитные моменты атомов  $m_{A_1}$  образуют одну подрешетку, а магнитные моменты  $m_{A_2}$  — другую.  $|m_{A_1}| \neq |m_{A_2}|$ . Направлены  $m_{A_1}$  и  $m_{A_2}$  антипараллельно.

Ферриты, как и ферромагнетики в намагниченном состоянии самопроизвольно разбиваются на отдельные области-домены. В пределах любого домена наблюдается ориентация магнитных моментов атомов, изображенная на рис. 4,1 б и 4,1 в, магнитные моменты отдельных доменов ориентированы так, что суммарный магнитный момент образца равен нулю.

Ориентация магнитных моментов атомов зависит от величины внутреннего электростатического взаимодействия, называемого обменным. Энергия этого взаимодействия  $W_{обм}$  может быть положительной и отрицательной. При достаточной величине положительной обменной энергии ориентация магнитных моментов параллельная, при отрицательной - антипараллельная.

Тепловая энергия  $kT$  ( $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура) стремится разрушить ориентацию магнитных моментов в домене. До тех пор, пока  $W_{обм} > kT$ , сохраняется доменная структура, но с ростом температуры все большее количество магнитных моментов отклоняется от параллельной (антипараллельной) ориентации; при  $W_{обм} = kT_K$  наблюдается разрушение доменной структуры, и ферромагнетик (феррит) переходит в парамагнитное состояние. Критическая температура, при которой наблюдается этот переход, называется температурой или точкой Кюри  $T_K$ . Чем больше обменная энергия  $W_{обм}$ , тем большая энергия  $kT$  требуется для разрушения спонтанной (самопроизвольной) намагниченности, значит тем выше будет температура Кюри.

### **2.3. Магнитные свойства ферритов (ферромагнетиков) в постоянных и переменных магнитных полях.**

В магнитном поле намагниченность  $I$  (и индукция  $B$ ) образца увеличивается. Зависимость намагниченности  $I$  (индукции  $B$ ) от напряженности магнитного поля  $H$  называется основной кривой намагничивания (рис. 4.2) и широко используется для определения магнитных свойств материалов.

Монокристаллы ферритов (ферромагнетиков) характеризуются магнитной анизотропией. Она проявляется в различной степени

намагничивания вдоль различных кристаллографических направлений в одном и том же намагничивающем поле (рис. 4.3). Направления, вдоль которых легче всего намагнитить монокристалл, называются осями легкого намагничивания (ОЛН). Направления, вдоль которых труднее всего намагнитить материал, называются осями трудного намагничивания (ОТН). Кривая намагничивания для поликристалла займет какое-то промежуточное положение между кривыми намагничивания вдоль ОЛН и ОТП.

Рассмотрим процессы, происходящие при намагничивании образца (рис.4.4).

В области слабых намагничивающих полей  $H < H_1$  идет обратимое смещение доменных границ, растет объем тех доменов, направление магнитных моментов которых наиболее близко к направлению поля. Процесс этот обратимый и после снятия поля магнитная структура полностью восстанавливается. Если величина поля  $H_1 < H < H_2$ , то процессы смещения границ имеют необратимый характер. Растет объем тех же доменов, но граница при своем смещении преодолевает различные препятствия (немагнитные включения, дефекты и др.), поэтому после снятия поля граница не возвращается в первоначальное положение, и появляется остаточное магнитное состояние. При поле  $H = H_2$  смещение доменных границ закончится и весь образец будет представлять собой один домен. В полях  $H_2 < H < H_3$  идет процесс вращения магнитных моментов до совпадения их направления с направлением поля. А в сильных магнитных полях  $H > H_3$  достигается магнитное насыщение материала. Из основной кривой намагничивания можно определить зависимость относительной магнитной проницаемости от намагничивающего поля.



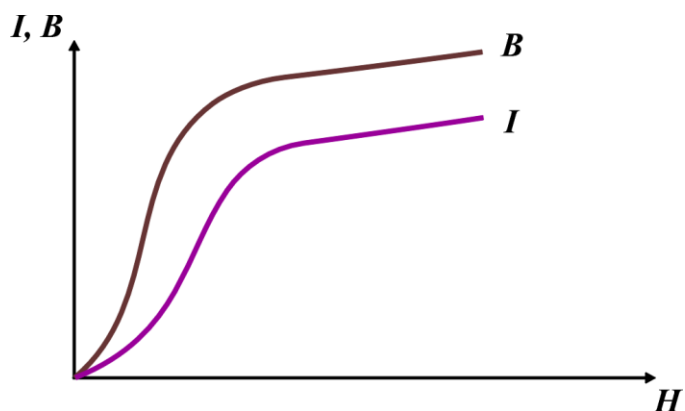


Рис. 4.2. Зависимость намагниченности  $I$  и индукции  $B$  от напряженности внешнего магнитного поля

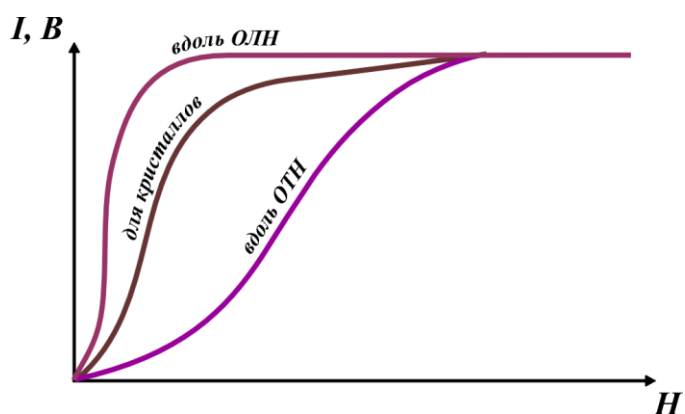


Рис. 4.3. Основная кривая намагничивания для монокристалла при его намагничивания вдоль ОЛН, вдоль ОТН и для поликристаллического образца

Из выражения (4.6)

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (4.8)$$

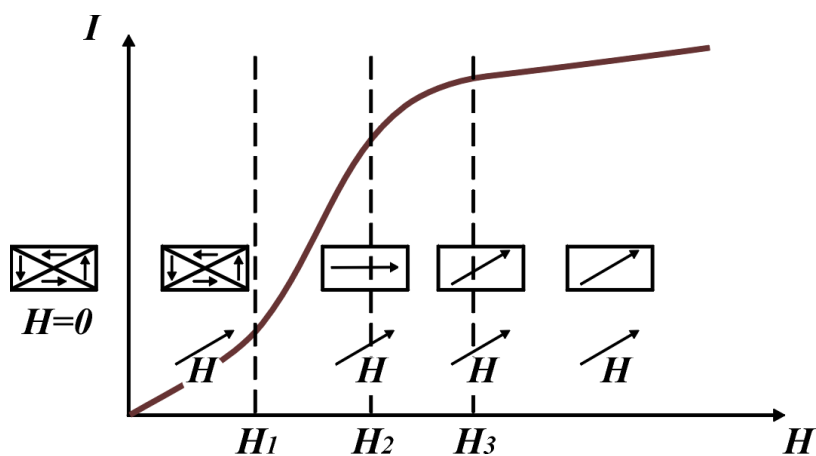


Рис. 4.4. Схематическое изменение доменной структуры под действием различных намагничивающих полей

Для каждой точки кривой намагничивания (определенные значения  $B$  и  $H$ ) можно найти значение  $\mu_r$  (рис. 4.5).

Существует несколько понятий магнитной проницаемости. В очень слабых полях ( $H \rightarrow 0$ ) магнитная проницаемость называется начальной магнитной проницаемостью  $\mu_{нач}$ . Максимальное значение  $\mu_r$ , в зависимости  $\mu_r = f(H)$  называется максимальной магнитной проницаемостью -  $\mu_{max}$ . Для каждой конкретной точки зависимости  $B = f(H)$  можно определить дифференциальную магнитную проницаемость -  $\mu_{диф} = \frac{dB}{\mu_0 dH}$

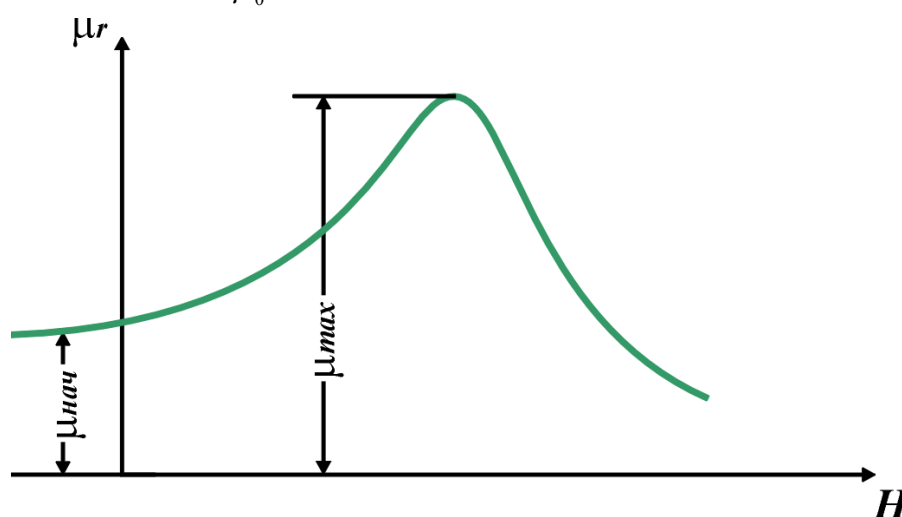


Рис. 4.5. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля

Если на образец действовать переменным магнитным полем, будет наблюдаться гистерезис, т. е. отставание изменения магнитной индукции (намагниченности) от изменения магнитного поля. При полном цикле изменения поля  $H$  будет наблюдаться петля гистерезиса (рис. 4.6).

Характерными точками на петле являются  $\pm B_r$  - остаточная индукция, которая остается после снятия поля  $U \pm H_c$  - коэрцитивная сила, (напряженность магнитного поля, необходимая для снятия остаточного магнитного состояния). Площадь петли гистерезиса эквивалентна потерям энергии, затрачиваемым на полный цикл перемагничивания.

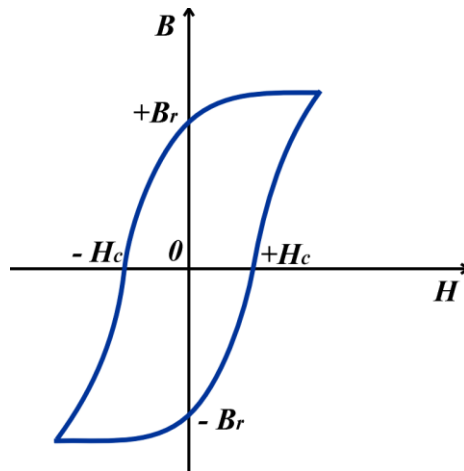


Рис.4.6. Петля гистерезиса. Изменение магнитной индукции при циклическом изменении поля

## 2.4. Зависимость магнитных свойств от температуры

Многие РЭС работают в определенном температурном диапазоне, иногда достигающем десятков и сотен градусов. Поэтому большое значение имеет температурная стабильность магнитных свойств. Ранее уже говорилось о влиянии температуры на величину намагниченности доменов. Степень ориентации магнитных моментов доменов по направлению вектора внешнего магнитного поля зависит от энергии анизотропии  $W_a$ . Чем выше  $W_a$ , тем труднее намагнитить материал в направлении, отличающемся от ОЛН. С ростом температуры  $W_a$  уменьшается и становится равной нулю незадолго до точки Кюри. Поэтому с ростом температуры начальная магнитная проницаемость  $\mu_{нач}$  возрастает (рис. 4.7). Максимальное значение  $\mu_{нач}$  соответствует температуре, при которой  $W_a = 0$ . Вблизи температуры Кюри начинается разрушение доменной структуры, и магнитная проницаемость быстро уменьшается.

Температурная стабильность магнитных свойств материалов может быть обеспечена только в области температур, далеких от температуры Кюри. По зависимости  $\mu_{нач} = f(T)$  обычно находится точка Кюри, как точка пересечения касательной, проведенной к наиболее крутой части спада этой зависимости, с осью абсцисс. Изменение магнитной проницаемости от температуры можно

характеризовать температурным коэффициентом магнитной проницаемости:

$$TK\mu = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{dT} = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{T_2 - T_1}, \quad (4.9)$$

где  $TK\mu$  – температурный коэффициент магнитной проницаемости,  $1/^\circ\text{C}$ .

$\mu_2, \mu_1$  – значения магнитной проницаемости при двух близлежащих температурах  $T_2$  и  $T_1$  (см. рис. 4.7).

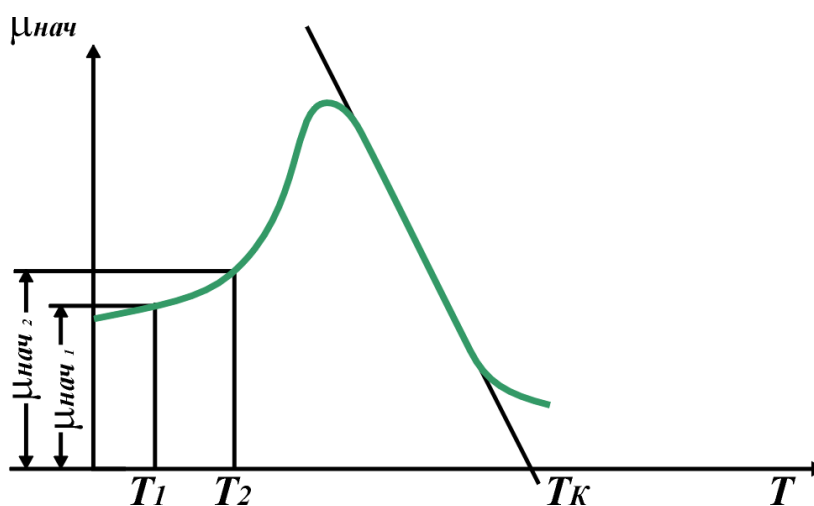


Рис. 4.7. Зависимость начальной магнитной проницаемости от температуры

Температурный коэффициент магнитной проницаемости равен относительному изменению магнитной проницаемости при изменении температуры на один градус.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1. Принцип измерения магнитной проницаемости

Для измерения электрических и магнитных свойств радиоматериалов широко применяются резонансные методы. В данной лабораторной работе исследование свойств ферритов производится с помощью измерителя добротности низкочастотного Е4–10. Он предназначен для измерения добротности и индуктивности катушек без сердечника и с магнитным сердечником в диапазоне частот от 1 до 100 КГц. Структурная схема прибора приведена на рис.

4.8. Приборы этого типа часто называют куметрами, т.к. добротность обозначается буквой  $Q$ .

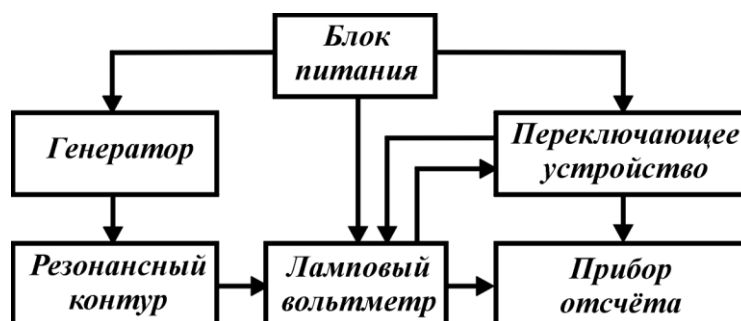


Рис.4.8. Структурная схема прибора Е4–10

Принцип работы куметра состоит в следующем (рис. 4.9). Резонансный измерительный контур образован из исследуемой катушки индуктивности  $L$ , магазина емкости  $C_m$ , конденсатора переменной емкости  $C_n$  и резистора  $R_0$  для введения в контур э.д.с. от генератора  $G$ . Такая схема включения представляет собой последовательный резонансный контур, в котором имеет место резонанс напряжений. Потери энергии в воздушных конденсаторах  $C_m$  и  $C_n$  пренебрежительно малы. Сопротивление  $R_0$ , очень мало в сравнении с активным сопротивлением катушки индуктивности  $R_L$  ( $R_0 \ll R_L$ ) и потерями энергии в  $R_0$ , можно пренебречь. Поэтому добротность контура тождественна добротности катушки.

Контур настраивается в резонанс путём изменения емкостей  $C_n$  и  $C_m$ . В условии резонанса напряжение на конденсаторах  $C_n$  и  $C_m$  имеет максимальную величину.

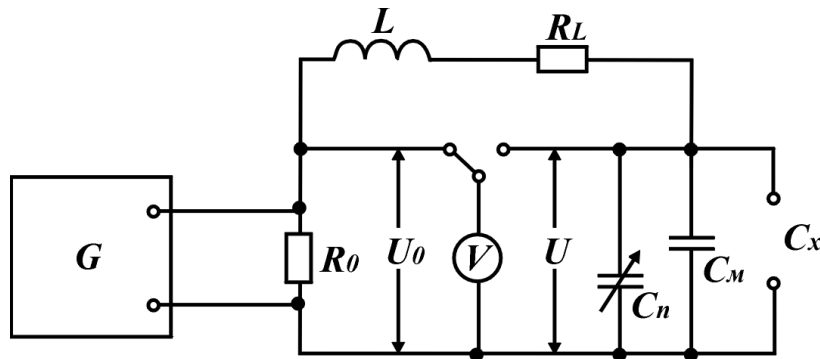


Рис. 4.9. Принципиальная схема прибора Е4-10:  $G$  - генератор,  $R_0$  - эталонное постоянное сопротивление,  $L$ ,  $R_L$  - индуктивность и сопротивление катушки,  $C_n$  - переменная емкость,  $C_m$  - емкость магазина емкостей,  $V$  - ламповый вольтметр,  $C_x$  - клеммы для подключения емкости, которую нужно измерить, если в этом есть необходимость.

Нетрудно доказать, что при резонансе напряжение на измерительных емкостях контура ( $C_n$  и  $C_m$ ) в  $Q$  раз больше э.д.с.  $U_0$  вводимой в контур.

Напряжение, вводимое в контур  $U_0 = i \cdot R_0$ .

Полное сопротивление измерительного контура при переменном напряжении

$$Z = \sqrt{R_L^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

$R_0 \ll R_L$ , поэтому  $R_0$  можно пренебречь.

При резонансе  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ .

Следовательно, при резонансе полное сопротивление  $Z = R_L$ , ток в контуре  $i = \frac{U_0}{R_L}$ , напряжение на конденсаторе  $U = i \frac{1}{\omega C}$ .

Добротностью контура называется отношение  $Q = \frac{\omega L}{R_L}$ . Отсюда

$R_L = \frac{\omega L}{Q}$ . Подставим  $i = \frac{U_0}{R_L}$  и  $R_L = \frac{\omega L}{Q}$  в формулу напряжения на

измерительном конденсаторе 
$$U = i \frac{1}{\omega C} = \frac{U_0 \cdot Q}{\omega L} \cdot \frac{1}{\omega C}.$$

При резонансе  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ , т. е.  $\omega^2 \cdot L \cdot C = 1$

Окончательно получим  $U = U_0 \cdot Q$ .

Если при всех измерениях поддерживать напряжение  $U_0$  на входе постоянным, то шкалу вольтметра можно проградуировать в величинах добротности  $Q$ . Это сделано в данном приборе для двух значений (2 и 20 мВ). Следовательно, величина добротности  $Q$  отсчитывается непосредственно со шкалы вольтметра, а индуктивность рассчитывается по формуле:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{39,48 \cdot f^2 \cdot C}, \text{ если } Q \geq 15$$

или

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{Q^2}{1+Q^2} = \frac{1}{39,48 \cdot f^2 \cdot C} \cdot \frac{Q^2}{1+Q^2}, \text{ если } Q \leq 15,$$

где  $L$  – индуктивность, Гн;

$\omega$  – круговая частота, рад  $\text{с}^{-1}$ ;

$f$  – частота, Гц ;

$C$  – суммарная емкость параллельно включенных конденсаторов  $C_n$  и  $C_m$ , Ф;

$Q$  – добротность.

Если сердечник катушки индуктивности тороидальный (рис. 4.10), то величину магнитной проницаемости феррита можно рассчитать по формуле

$$\mu_r = \frac{2\pi \cdot r_{cp} \cdot L}{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S},$$

где  $r_{cp} = \frac{r_1 + r_2}{2}$  – средний радиус сердечника, м;

$r_1$  – внутренний радиус сердечника, м;

$r_2$  – внешний радиус сердечника, м;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$N$  – число витков тороидальной катушки;

$S = h(r_2 - r_1)$  – площадь сечения витка катушки,  $\text{м}^2$ ;

$h$  – толщина сердечника, м.

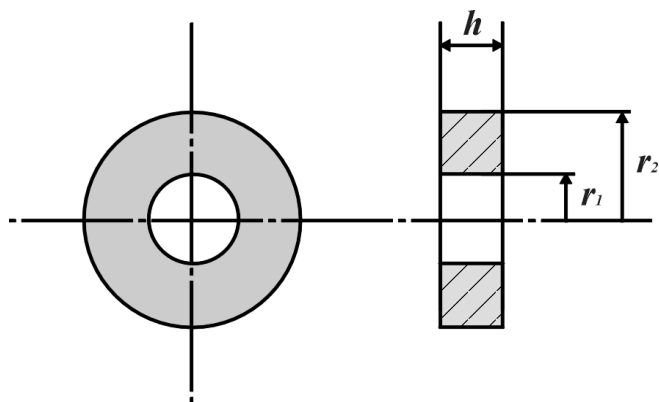


Рис. 4.10. Тороидальный сердечник катушки

### 3.2. Порядок выполнения работы на куметре Е4-10

3.2.1. Подготовить прибор к работе. Переключатель ИЗМЕРЕНИЕ - УРОВЕНЬ  $U$  поставить в положение УРОВЕНЬ  $U$  и ручку регулировки УРОВЕНЬ  $U$  повернуть в крайнее левое положение. Заземлить корпус прибора. Включить напряжение тумблером СЕТЬ, при этом загорается зеленая лампочка и на шкалах от счетного прибора “ $mV-Q$ ” появляется световой зайчик. Через 30 мин прибор будет готов к работе.

3.2.2. Произвести измерения:

- 1) к клеммам “ $L_x$ ” подключить исследуемый образец;
- 2) ручкой плавной регулировки ЧАСТОТА kHz и переключателем “ $\times 1$ ” или “ $\times 10$ ” установить необходимую частоту генератора;
- 3) ручкой УРОВЕНЬ  $U$  установить световой указатель на шкале “ $mV$ ” на отметку 20 мВ;
- 4) переключатели ПРИДЕЛЫ  $Q$  установить в положение “ $\times 1$ ” (при этом измерительный контур будет вводиться напряжение  $U_0 = 20$  мВ) и АВТОМАТ. (при этом будет осуществляться автоматический выбор чувствительности вольтметра при настройке контура в резонанс). Если необходимо произвести измерения при  $U_0 = 2$  мВ, то нужно установить переключатель в положение “ $\times 10$ ”;
- 5) все три ручки магазина емкостей установить в нулевое положение, а переменный конденсатор - в среднее положение;



6) переключатель ИЗМЕРЕНИЕ - УРОВЕНЬ  $U$  установить в положение ИЗМЕРЕНИЕ;

7) ручками магазина емкостей и переменного конденсатора настроить измерительный контур в резонанс - добиться максимального отклонения светового указателя;

8) произвести отсчет емкости и добротности;

9) рассчитать индуктивность и магнитную проницаемость исследуемого образца.

3.2.3. По окончании работы привести прибор в исходное состояние:

1) отсоединить исследуемый образец;

2) переключатель ИЗМЕРЕНИЕ - УРОВЕНЬ  $U$  установить в положение УРОВЕНЬ  $U$ , а ручку плавной регулировки УРОВЕНЬ - в крайнее левое положение;

3) три ручки магазина емкостей установить в нулевое положение;

4) установить тумблер СЕТЬ в нижнее положение и выключить прибор из розетки.

### 3.3. Задание

3.3.1. Снять зависимость от частоты индуктивности и добротности двух образцов: пермаллоя и феррита. Измерения производить при напряжении 20 мВ в диапазоне 1-10 кГц через 1 кГц, Рассчитать магнитную проницаемость при всех частотах. Результаты измерений и расчетов представить в виде таблиц и графиков зависимости магнитной проницаемости и добротности от частоты.

3.3.2. Снять зависимость индуктивности и добротности образца феррита от температуры на заданной частоте в интервале от комнатной до температуры резкого спада индуктивности. Измерения производить через 5°C при напряжении 20 мВ. Рассчитать магнитную проницаемость. Построить график зависимости магнитной проницаемости от температуры. Все результаты измерений и расчетов свести в таблицу.

3.3.3. Для трех характерных участков графика зависимости магнитной проницаемости от температуры рассчитать графоаналитическим методом температурный коэффициент магнитной проницаемости.

3.3.4. Объяснить полученные результаты

#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое феррит?
2. Почему ферриты обладают большим удельным электрическим сопротивлением?
3. Каковы преимущества ферритов по сравнению с металлическими ферромагнетиками?
4. Каковы недостатки ферритов по сравнению с металлическими ферромагнетиками?
5. Что такое магнитная индукция?
6. Что такое намагниченность?
7. Что такое магнитная проницаемость?
8. Какие процессы происходят при намагничивании ферритов?
9. Что такое температура Кюри?
10. Начертить кривые  $B = f(H)$ ,  $\mu = f(H)$ ,  $\mu = f(T)$ .
11. Рассказать принцип действия прибора Е4-10.
12. Рассказать метод измерения индуктивности в данной работе.

#### 5. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы материаловедения : [ Электронный ресурс ] : учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина, В.С. Казаков, О.Ю. Фоменко ; Министерство образования и науки Российской Федерации ; Сибирский Федеральный университет. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. – 152 с. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364047>.

2. Биомедицинское материаловедение [Текст]: учебное пособие / С. П. Вихров [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.

3. Корневский, Н. А. Биотехнические системы медицинского назначения [Текст]: учебник / Н. А. Корневский, Е. П. Попечителей. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 688 с. – Текст : непосредственный.