

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 22-23
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*



Воронеж 2024

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Составитель

канд. физ.-мат. наук А. С. Бадаев

Радиоматериалы и радиокомпоненты: методические указания к выполнению лабораторных работ № 22-23 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А.С. Бадаев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2024. – 37 с.

Данные методические указания представляют собой лабораторный практикум по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты». В методических указаниях изучаются и исследуются магнитные свойства радиоматериалов: основные свойства ферромагнетиков по петле гистерезиса, температурные зависимости магнитной проницаемости ферритов, определение точки Кюри. Тематика лабораторных работ соответствует рабочей программе дисциплины «Радиоматериалы и радиокомпоненты».

Методические указания предназначены для студентов 4 и 5 курсов, специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», очной формы обучения. очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле РМиРК_22-23.pdf.

Ил. 18. Табл. 1. Библиогр.: 1 назв.

УДК 621.396.6(07)
ББК 32я7

Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПО ПЕТЛЕ ГИСТЕРЕЗИСА

1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1.1. Цель работы

Целью работы является изучение магнитных свойств ферромагнетиков, экспериментальное определение их основных параметров по петле гистерезиса.

1.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является изучение магнитных свойств твёрдых тел, экспериментальное исследование петли магнитного гистерезиса ферромагнетиков и определение их основных параметров по этой петле: коэрцитивной силы, остаточной намагниченности, магнитной проницаемости, потерь энергии на перемагничивание.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

1.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

1.2.1. Задание № 1

Изучите основные понятия, характеризующие магнитные свойства радиоматериалов, и их классификацию по этим свойствам. В заготовку отчёта занести определения и формулы.

1.2.1.1. Методические указания по выполнению задания

Необходимо ознакомиться с материалом [1], с. 147 – 153.

Любое вещество, помещенное во внешнее магнитное поле, приобретает магнитный момент M . Магнитный момент единицы объема V вещества называют *намагниченностью* J_m : $J_m = M/V$.

Магнитные материалы – это материалы способные заметно изменять свою намагниченность при воздействии на него внешнего магнитного поля.

Влияние напряженности внешнего магнитного поля на намагниченность определяется выражением

$$J_m = k_m H, \text{ А/м}, \quad (1)$$

где H – напряженность внешнего магнитного поля (А/м); k_m – безразмерная величина, характеризующая способность данного вещества намагничиваться в магнитном поле и называемая *магнитной восприимчивостью*.

Магнитная индукция в веществе, находящемся во внешнем магнитном поле, определяется алгебраической суммой индукции внешнего B_0 и внутреннего B_i полей

$$B = B_0 + B_i = \mu_0 H + \mu_0 J_m, \quad (2)$$

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

Подставляя выражение (2.1) в (2.2) получим

$$B = \mu_0 H + \mu_0 k_m H = \mu_0 (1 + k_m) H, \quad (3)$$

где $\mu = 1 + k_m$ – *статическая относительная магнитная проницаемость*, показывающая во сколько раз магнитная индукция B поля в данной среде больше, чем магнитная индукция B_0 в вакууме.

Заменяя значение $\mu = 1 + k_m$ в формуле (3), получим выражение, связывающее напряженность магнитного поля с индукцией магнитного поля B в веществе, измеряемое в теслах (Тл)

$$B = \mu_0 \mu H_1 T. \quad (4)$$

Тогда значение статической относительной магнитной проницаемости μ определяется выражением

$$\mu = B / \mu_0. \quad (5)$$

1.2.1.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества можно подразделить на пять групп: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

Диамагнетики – это вещества, у которых магнитная восприимчивость k_m *отрицательна* и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля H . Диамагнитный эффект является результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи и проявляется в том, что возникает магнитный момент, направленный в сторону, противоположную внешнему полю. Следова-

тельно магнитная восприимчивость k_m отрицательна, по величине она мала ($k_m \approx -10^{-5}$) и в большинстве случаев не зависит от напряженности поля.

Так как магнитная восприимчивость является отрицательной величиной, то магнитная проницаемость меньше единицы. Поскольку диамагнетики намагничиваются в направлении, противоположном внешнему магнитному полю, то они выталкиваются из этого поля.

К диамагнетикам относятся: инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, висмут, ртуть, галлий и др.), большинство полупроводников (кремний, германий, соединения A^{III} , B^V , $A^{II}B^{IV}$ и др.), органические соединения, щелочно-галоидные кристаллы, неорганические стекла и др.

Парамагнетики – это вещества, у которых магнитная восприимчивость $|k_m| \leq 1$, но она положительна и при комнатной температуре составляет $10^{-2} - 10^{-5}$.

Для большинства твердых парамагнетиков магнитная восприимчивость выражается законом Кюри

$$k_m = C / T, \quad (6)$$

где C – постоянная Кюри; T – абсолютная температура, К.

К числу парамагнетиков относятся кислород, окись азота, щелочные и щелочноземельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

Ферромагнетики – это вещества с *большой положительной магнитной восприимчивостью* (до 10^6), которая сильно зависит от напряженности внешнего магнитного поля и температуры. В ферромагнитных веществах атомы имеют большое количество неспаренных (нескомпенсированных) спиновых магнитных моментов. Ферромагнетикам присуща внутренняя магнитная упорядоченность, выражающаяся в существовании макроскопических областей (доменов) с параллельно ориентированными магнитными моментами атомов в них. Важнейшая особенность ферромагнетиков заключается в их способности намагничиваться до насыщения в относительно слабых магнитных полях. При определенной температуре T_k (точка *Кюри*) у ферромагнетиков атомный магнитный порядок разрушается, и вещества переходят в парамагнитное состояние.

К классу ферромагнетиков относятся элементы переходных групп Fe, Co, Ni, а также редкоземельные элементы: Gd (гадолиний), Dy (диспрозий), Ho (гольмий), Er (эрбий), Tm (тулий).

Антиферромагнетики – это вещества, у которых спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки; при этом суммарный магнитный момент антиферромагнетика равен нулю. Для антиферромагнетика характерна *небольшая положительная магнитная восприимчивость* ($k_m = 10^{-3} - 10^{-5}$), кото-

рая сильно зависит от температуры. При нагревании антиферромагнетик испытывает фазовый переход, и вещество переходит в парамагнитное состояние. Температура такого перехода, при котором исчезает магнитная упорядоченность, получила название точки Нееля. Поскольку магнитная восприимчивость в антиферромагнетиках меньше единицы, то и магнитная проницаемость близка к единице. К антиферромагнетикам относятся металлы переходной группы – хром (Cr), марганец (Mn), а также простейшие химические соединения на основе металлов переходной группы типа окислов, сульфидов, карбонатов и т.п. Антиферромагнитные свойства проявляют также атомы редкоземельных элементов – церия (Ce), неодима (Nd), самария (Sm), тербия (Tb).

Ферримагнетики – это вещества, магнитные свойства которых обусловлены *нескомпенсированным антиферромагнетизмом*. В ферримагнитных соседние магнитные моменты выстроены антипараллельно друг другу, но величина их неодинакова. Поэтому они обладают большим нескомпенсированным суммарным магнитным моментом. Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры. При температуре выше точки Нееля у ферромагнетиков атомный магнитный порядок разрушается, и вещества переходят в парамагнитное состояние.

Диамагнетики и парамагнетики иногда объединяют под названием *слабромагнитных веществ*, не обладающих атомным магнитным порядком, а ферромагнетики и ферримагнетики – под названием *сильномагнитных материалов*, обладающих атомным магнитным порядком; для антиферромагнетиков характерен атомный магнитный порядок, но количественно этот эффект весьма мал.

1.2.2. Задание № 2

Изучите структуру ферромагнетиков и природу ферромагнетизма. Приведите в отчёте схему доменной структуры ферромагнетиков.

1.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует изучить материал [1], с. 153 – 162.

Спиновая природа ферромагнетизма. Для объяснения ферромагнитных свойств твердых тел русский физик Розинг и французский физик Вейсс предположили, что в ферромагнетиках существует внутреннее молекулярное поле, под действием которого они даже в отсутствие внешнего поля намагничиваются до насыщения. Внешне такая спонтанная намагниченность не проявляется потому, что тело разбивается на отдельные макроскопические области, в каждой из которых магнитные моменты расположены параллельно друг другу, а сами эти области ориентированы друг относительно друга хаотично, вследствие чего результирующий магнитный момент ферромагнетика в целом оказывается равным нулю. Такие области спонтанной намагниченности получили

название *доменов*. Существует ряд экспериментальных методов наблюдения доменов и определения направления их намагниченности.

Введение внутримолекулярного поля объясняются явления, наблюдаемые в ферромагнетиках. При этом рядом ученых доказано (Эйнштейн, Барнет, Иоффе, Капица), что ферромагнетизм обусловлен спиновыми магнитными моментами атомов. Спиновые магнитные моменты электронов, не скомпенсированные в атомах, и являются элементарными носителями ферромагнетизма. Так как магнитные моменты заполненных оболочек атомов равны нулю, а внешние валентные электроны обобществляются в металле, то ферромагнетизмом могут обладать лишь элементы с недостроенными внутренними оболочками. Такими элементами являются переходные элементы Fe, Ni, Co, имеющие недостроенную 3d-оболочку, и редкоземельные элементы с недостроенной 4f-оболочкой.

Согласно теории Френкеля, магнитные моменты электронов внутри макроскопических областей (доменов) выстраиваются параллельно друг другу, намагничивания домены до насыщения, в результате сил внутренних недостроенных оболочек атомов.

Таким образом, условиями, при которых возникает ферромагнетизм, являются: наличие в атоме внутренних недостроенных электронных оболочек и параллельная ориентация спинов электронов.

Доменная структура ферромагнетиков. Несмотря на наличие в ферромагнетиках самопроизвольной намагниченности опыт обычно показывает размагничное состояние ферромагнитных тел. Как указывалось выше, для объяснения факта Вейс выдвинул гипотезу о существовании *доменов* (намагниченных до состояния насыщения отдельных областей), расположение векторов магнитных моментов которых равновероятно.

При вынесении из магнитного поля ферромагнетик остается намагниченным. Наличие на его внешних поверхностях полюсов (рис. 1 а) приводит к возникновению внутреннего поля, направленного против вектора намагниченности. Это поле стремится размагнитить ферромагнетик, поэтому его называют размагничивающим.

Для монокристалла, показанного на рис. 1 а, магнитная энергия будет значительной. Поэтому, энергетически более выгодным оказывается деление его на области, в которых векторы намагниченности направлены в противоположные стороны (рис. 1 б и в). Для структуры доменов, изображенной на рис. 1 б, магнитная энергия в 2 раза меньше, чем для структуры, показанной на рис. 1 а. Это обусловлено тем, что часть магнитного потока, выходящего из одной области, замыкается на другую, вследствие чего уменьшается размагничивающий фактор N , а следовательно, и магнитная энергия. Для структуры доменов, представленной на рис. 1 в. Магнитная энергия уменьшается в 4 раза. Еще меньшей магнитной энергией обладает структура с боковыми замыкающими доменами (рис. 1 г), так как магнитный поток замыкается внутри образца, а за его пределами магнитное поле практически равно нулю.

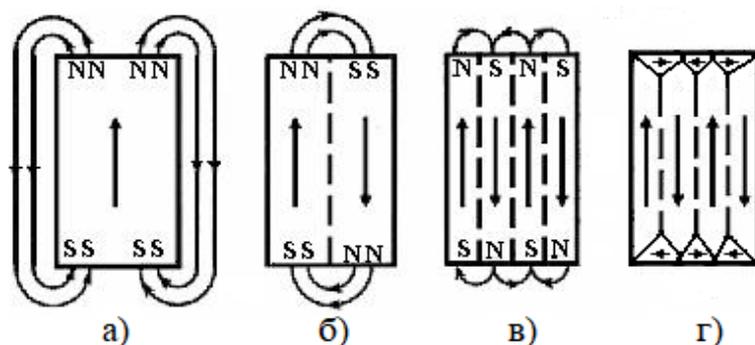


Рис. 1. Разделение монокристалла на домены

Таким образом, деление ферромагнитного кристалла на домены является следствием стремления системы уменьшить свою свободную энергию. Однако деление не может происходить беспредельно, так как появление границы между доменами, у которых угол между спинами возрастает до 180°C , должен привести к увеличению обменной энергии. Деление протекает до тех пор, пока уменьшение магнитной энергии, вызванное делением, не компенсируется увеличением обменной энергии границ раздела между доменами (доменных границ). *Доменная граница* представляет собой переходную область, называемую *стенкой Блоха*, размером около $0,1\ \mu\text{м}$. Блох показал, что энергетически выгодно иметь доменную границу, в которой осуществляется постепенный поворот спинов на 180°C и направления намагниченности в соседних доменах оказывается противоположным (рис. 2).

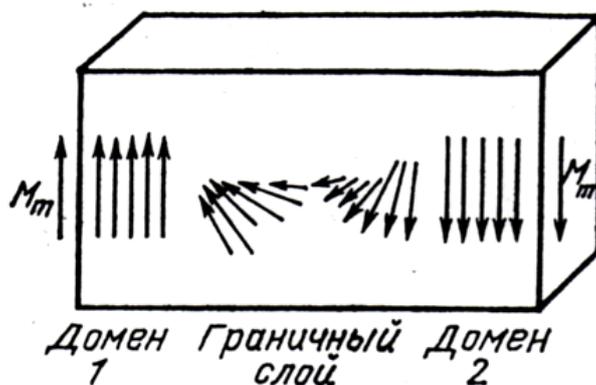


Рис. 2. Структура переходного слоя между доменами

1.2.3. Задание № 3

Изучите процессы при намагничивании ферромагнетиков, кривую намагничивания, петли магнитного гистерезиса, основную кривую намагничивания, петли магнитного гистерезиса, основную кривую намагничивания, параметры, определяемые по петле гистерезиса, отразите это в отчёте.

1.2.3.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо рассмотреть материал [1], с. 162 – 167; с. 168 – 170; с. 174 – 179.

Кривая намагничивания. Магнитные свойства ферромагнетиков и ферримагнетиков характеризуются зависимостью магнитной индукции B от напряженности внешнего магнитного поля H . График зависимости $B = \varphi(H)$ называют *кривой намагничивания*. Для получения кривых намагничивания в качестве исходного принимают различное состояние ферромагнитного образца, при котором в отсутствие внешнего магнитного поля индукция равна нулю, поскольку магнитные моменты доменов статистически равновероятно распределяются по всем возможным направлениям легкого намагничивания.

При получении кривой намагничивания образец ферромагнитного материала помещают внутри соленоида и пропускают по нему ток. Напряженность магнитного поля H , которое создается при пропускании тока по проводу соленоида, определяется из формулы

$$H = \frac{IN}{l}, \text{ А/м}, \quad (7)$$

где I – величина тока; N – число витков соленоида; l – длина соленоида.

На рис. 3 приведена типичная кривая намагничивания поликристаллического ферромагнетика. Возрастание индукции под действием внешнего магнитного поля обусловлено двумя основными процессами: смещением доменных границ и поворотом магнитных моментов доменов. На кривой $B = \varphi(H)$ можно выделить четыре характерных области.

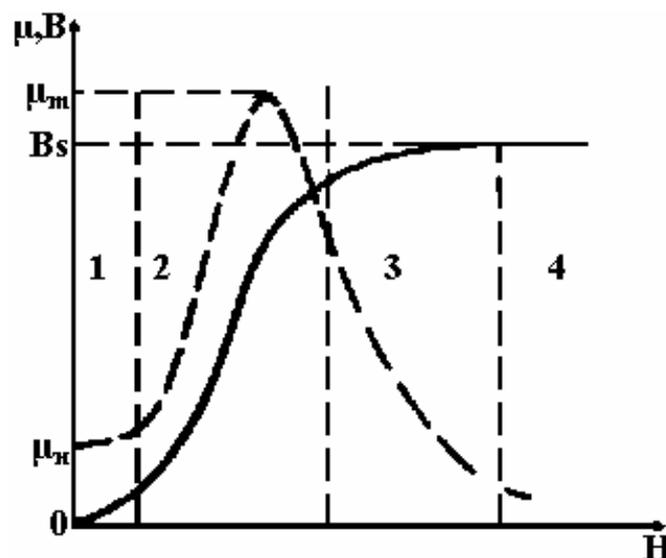


Рис. 3. Зависимость магнитной индукции и магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля

Область 1. Представляет собой область *упругого (обратимого) смещения доменных границ*. При этом происходит увеличение объема тех доменов, магнитные моменты которых образуют наименьший угол с направлением внешнего поля, а домены с неблагоприятной ориентацией уменьшаются. Суммарная

намагниченность образца становится отличной от нуля, что приводит к появлению магнитной индукции B и росту магнитной проницаемости μ . После снятия слабого внешнего поля доменные границы возвращаются в исходное состояние. При стремлении напряженности поля к нулю материал характеризуется *начальной магнитной проницаемостью* μ_n .

Область 2. Эта область характеризуется тем, что в области сильных полей смещение доменных границ носит необратимый характер. Процесс намагничивания идет более интенсивно, чем на начальном участке; кривая намагничивания имеет наибольшую крутизну (участок сильного роста B). Этот участок кривой намагничивания характеризуется и ростом магнитной проницаемости вплоть до ее максимального значения μ_{max} . При этом на кривой намагничивания появляются маленькие ступеньки. Процесс ступенчатого намагничивания ферромагнитного материала сопровождается излучением слабого электромагнитного поля и получил название эффекта Баркгаузена.

Область 3. По мере дальнейшего увеличения напряженного поля возрастает роль второго механизма намагничивания – *механизма вращения*, при котором магнитные моменты доменов из направления легкого намагничивания, образующего небольшой угол с полем, постепенно поворачиваются в направлении поля. Материал переходит в состояние технического насыщения ($B \rightarrow B_s$). Поскольку на этом участке при увеличении напряженности поля индукция меняется слабо, то магнитная проницаемость уменьшается.

Область 4. Эта область *технического насыщения*. Магнитные моменты всех доменов в этой области ориентируются вдоль направления внешнего магнитного поля. Незначительное возрастание индукции на участке насыщения обусловлено увеличением намагниченности самого домена.

Явление незначительного увеличения магнитной индукции с ростом напряженности поля получило название *парапроцесса*. Значение индукции, соответствующее её максимальному значению в области технического насыщения, называется индукцией насыщения B_s . Основные стадии технического намагничивания ферромагнитного схематически изображены на рис. 4.

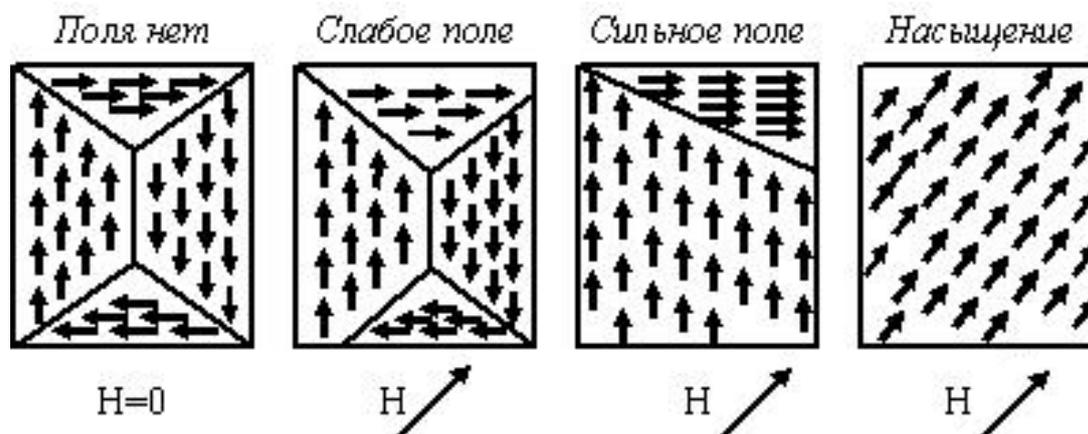


Рис. 4. Схема ориентации спинов и изменения доменных границ при намагничивании ферромагнетика

Зависимость магнитной индукции предварительно размагниченного ферромагнитного материала от напряженности поля называют *начальной кривой намагничивания*.

Магнитный гистерезис. Если ферромагнетик намагничивать до насыщения, а затем уменьшать напряженность внешнего поля до нуля, то индукция не падает до нуля, а будет равна некоторому значению, называемому остаточной индукцией B_r или остаточным магнетизмом (рис. 5).

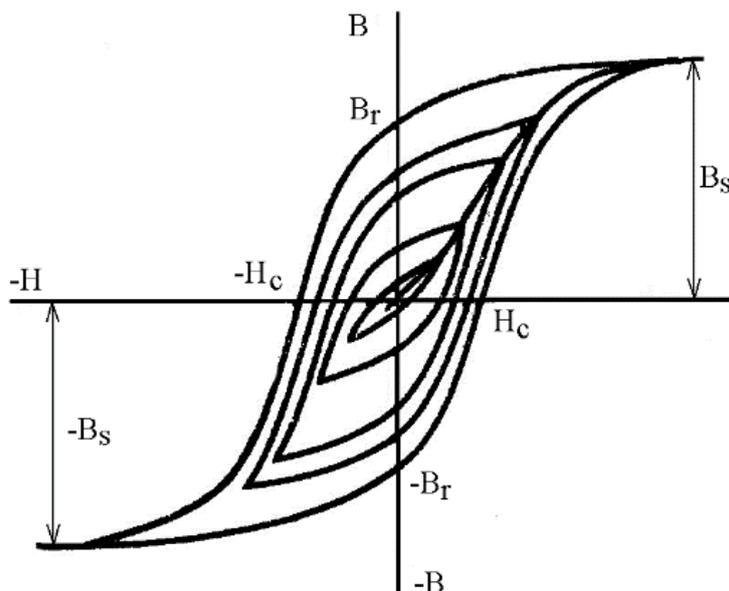


Рис. 5. Петли гистерезиса при различных значениях амплитуды переменного магнитного поля и основная кривая намагничивания ферромагнетика

Явление отставания B от H называют *магнитным гистерезисом*. Для того, чтобы полностью размагнитить материал, т.е. добиться состояния, при котором $B = 0$, необходимо приложить некоторое магнитное поле, направленное противоположно первоначальному. Напряженность размагничивающего поля H_c , при котором индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения, обращается в нуль, называют *коэрцитивной силой* H_c .

Увеличение напряженности поля до значений больших $-H_c$, вызывают перемагничивание ферромагнетика до насыщения ($-B_s$). При намагничивании ферромагнитного материала изменяющимся по направлению магнитным полем зависимость $B = f(H)$ имеет форму замкнутой кривой, которая называется *петлей гистерезиса*. При различных амплитудных значениях напряженности внешнего поля H можно получить семейство петель гистерезиса. Петля гистерезиса, полученная при индукции насыщения, называется *предельной*. Петля гистерезиса называется *частной*, если она получена при измерениях в слабых циклических магнитных полях, когда максимальное значение B не достигает предельного значения B_s . Совокупность вершин петель гистерезиса образует *основную кривую намагничивания* ферромагнетика.

Причинами гистерезиса в основном являются необратимые процессы смещения доменных границ и вращения векторов намагниченности. Коэрцитивная сила определяется тем наибольшим энергетическим барьером, который надо преодолеть в процессе размагничивания образца.

По форме кривых гистерезиса и величине H_c различают три группы магнитных материалов: магнитомягкие, магнитотвердые и материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (рис. 6).

Магнитная проницаемость. Магнитные материалы, используются в различных устройствах РЭС, могут эксплуатироваться при воздействии как статических, так и динамических (переменных, импульсных) магнитных полей. Поэтому при выполнении расчетов в различных устройствах с магнитными сердечниками пользуются различными понятиями магнитной проницаемости, основанными на определении *статической магнитной проницаемости* (5) и общей зависимости $\mu(H)$, показанной на рис. 3.

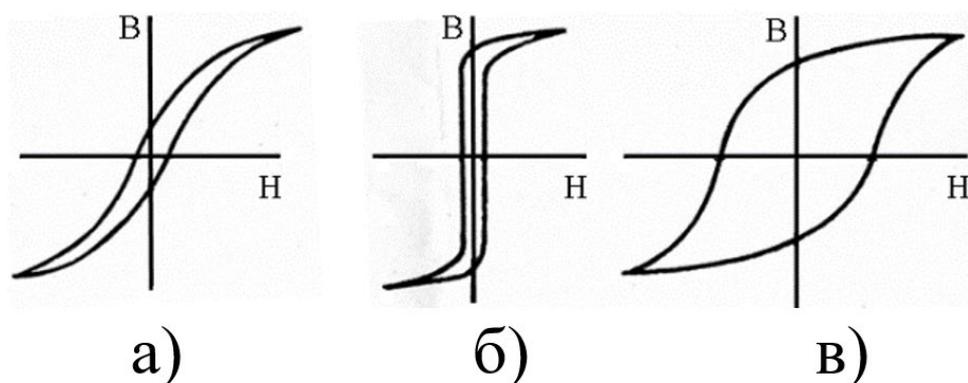


Рис. 6. Предельные петли гистерезиса: а – магнитомягких материалов; б – материалов с ППГ; в – магнитотвердых материалов

Относительную магнитную проницаемость определяют по основной кривой намагничивания, например, для точки А (рис. 7)

$$\mu = \frac{B_A}{\mu_0 H_A} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{m_B}{m_H} \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

где α – угол наклона секущей ОА к оси абсцисс; m_B и m_H – масштабы по осям соответственно В и Н.

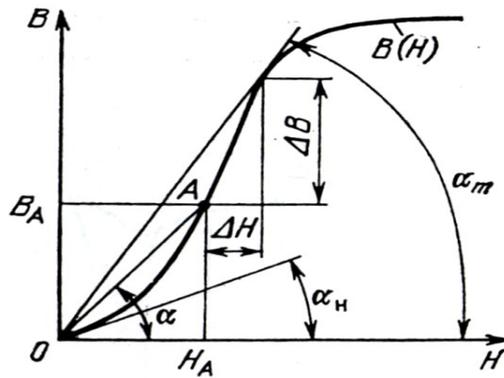


Рис. 7. К объяснению различных понятий магнитной проницаемости

Наиболее часто используют понятия начальной μ_H , максимальной μ_{\max} , дифференциальной $\mu_{\text{диф}}$, обратимой (реверсивной) μ_p и импульсной $\mu_{\text{и}}$ магнитной проницаемости.

Начальная и максимальная магнитная проницаемости представляют собой частные случаи статической магнитной проницаемости

$$\mu = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{1}{\mu_0} \frac{m_B}{m_H} \operatorname{tg} \alpha_H, \quad (9)$$

$$\mu_{\max} = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H_{\max}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{m_B}{m_H} \operatorname{tg} \alpha_m, \quad (10)$$

где α_H – угол наклона касательной на начальном участке кривой $B = f(H)$; α_m – угол наклона прямой, проведенной из начала координат в точку перегиба кривой намагничивания (рис. 7).

Параметр μ_H является справочным, так как используется в расчетах многих устройств с магнитными сердечниками. Экспериментально начальную магнитную проницаемость определяют в слабых полях с напряженностью около 0,1 А/м.

Потери энергии. При перемагничивании магнитных материалов переменным полем петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии на перемагничивание в течение одного цикла перемагничивания, расширяется (увеличивает свою площадь) за счет потерь на гистерезис, вихревые токи и магнитное последствие. Такую петлю гистерезиса называют *динамической*, а сумму составляющих потерь – *полными потерями*. Потери энергии, обусловленные перемагничиванием переменным полем, вызывают нагрев материала. Вкладом потерь на последствие в нагрев ферромагнетика обычно можно пренебречь.

Потери энергии на гистерезис \mathcal{E}_r за один цикл перемагничивания, отнесенной к единице объема материала, определяются на площади статической предельной (или частной) петли гистерезиса

$$\mathcal{E}_r = \oint H dV, \text{ Дж/м}^3 \quad (11)$$

Выражение, связывающее удельную мощность потерь на гистерезисе P_r и потери энергии на гистерезис, имеет следующий вид

$$P_r = f \mathcal{E}_r / d, \text{ Вт/кг}, \quad (12)$$

где f – частота перемагничивания, Гц; d – плотность материала кг/м³.

Для практических целей при вычислении удельных потерь на гистерезис пользуются эмпирической формулой:

$$P_r = \eta f B_m^n, \quad (13)$$

где η – коэффициент, зависящий от свойств материала ($\eta \approx 1$); B_m – максимальная индукция, достигаемая в данном цикле Тл; n – показатель степени, принимающий значения от 1,6 до 2 в зависимости от B_m .

Потери энергии на вихревые токи обусловлены образованием вихревых токов в проводящей среде за счет ЭДС самоиндукции, пропорциональной скорости изменения магнитного потока. Поэтому потери на вихревые токи возрастают пропорционально частоте.

Потери на магнитное последствие обусловлены отставанием магнитной индукции от изменения напряженности магнитного поля. Спад намагниченности ферромагнетиков после отключения внешнего поля происходит не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени. Время установления стабильного магнитного состояния возрастает с температурой. Одной из причин магнитного последствия является тепловая энергия, которая помогает слабо закрепленным доменным границам преодолевать энергетические барьеры, мешающие их свободному смещению. Явление отставания магнитной индукции от изменения напряженности магнитного поля, называют *магнитной вязкостью*.

1.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие материалы называют магнитными?
2. Дайте определение *относительной магнитной проницаемости* и приведите выражение, связывающее относительную магнитную проницаемость с магнитной индукцией и напряженностью внешнего магнитного поля.
3. Как классифицируются вещества в зависимости от величины магнитной восприимчивости?
4. Как ориентируются векторы намагниченности относительно друг другу в ферро-, ферри- и антиферромагнетиках? Приведите примеры ма-

- териалов, обладающих ферро-, ферри- и антиферромагнитными свойствами.
- Объясните природу ферромагнитного состояния, появление доменной структуры и магнитной анизотропии ферромагнетиков.
 - По графику основной кривой намагничивания объясните механизм намагничивания ферромагнитных материалов.
 - Изобразите кривую намагничивания при циклическом перемагничивании (петлю гистерезиса) и укажите на ней B_s , V_r и H_c . Объясните значения этих величин.
 - Проведите классификацию ферромагнитных материалов по виду петли гистерезиса, величине коэрцитивной силы и функциональному назначению.
 - Какие бывают виды магнитной проницаемости, применяемые при расчетах различных устройств с магнитными материалами?
 - Какие виды потерь существуют в магнитных материалах и причины их возникновения? Каков характер изменения удельных магнитных потерь на гистерезис и вихревые токи в зависимости от частоты внешнего магнитного поля?

1.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

При выполнении эксперимента используются приборы и оборудование лабораторного комплекса МУК-РМ1. В настоящей работе используются измеритель статических характеристик ИСХ-1 и лабораторный стенд СЗ-РМ01 (рис. 8).



а)



б)

Рис. 8. а) измеритель статических характеристик ИСХ-1; б) лабораторный стенд СЗ-РМ01

1.4.1. Задание № 1

Ознакомьтесь с порядком работы с прибором ИСХ-1 и лабораторным стендом СЗ-РМ01, собрать лабораторную установку и подготовить её к работе.

Органы управления прибором показаны на рис. 9.

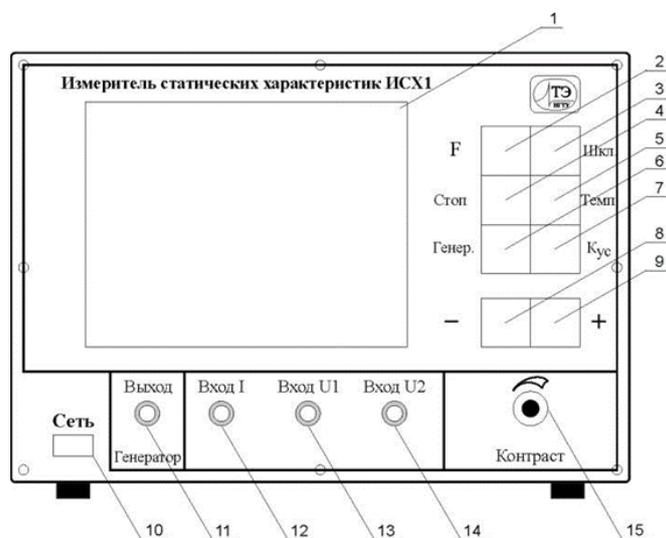


Рис. 9. Органы управления ИСХ-1: 1 - графический дисплей; 2 - кнопка выбора режима работы «F»; 3 - кнопка выбора шкалы «Шкл.»; 4 - кнопка запоминания оцифрованного сигнала «Стоп»; 5 - кнопка выбора температурного режима «Темп»; 6. кнопка управления генератором «Генер.»; 7 - кнопка выбора коэффициента отклонения «Кус»; 8 - кнопка уменьшения выбранной величины «-»; 9 - кнопка увеличения выбранной величины «+»; 10 - кнопка выключателя «Сеть»; 11 - выход генератора; 12 - вход тока I; 13 - вход напряжения U1; 14 - вход напряжения U2; 15 - ручка регулировки контраста изображения «Контраст»

Экран дисплея, разделенный на два поля, показан на рис. 10:

- поле отображения сигнала;
- информационное поле.

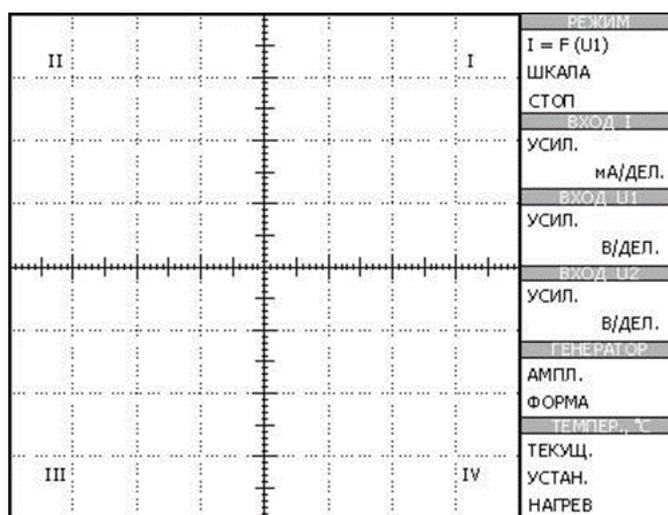


Рис. 10. Экран дисплея

Поле отображения сигнала содержит координатную сетку, на которую накладывается измеряемый сигнал.

Информационное поле разделено на 4 области:

- область общих установок: отображает режим работы прибора (строка «Режим»), шкалу развертки (строка «Шкала») и состояние стоп-кадр (строка «Стоп»);

- область состояния входа I, входа U1 и входа U2: отображает коэффициенты отклонения каналов;

- область состояния генератора: отображает амплитуду выходного сигнала генератора (строка «Ампл.») и форму выходного сигнала генератора (строка «Форма»);

- область состояния терморегулятора: отображает текущую температуру образцов (строка «Текущ.»), требуемую температуру образцов (строка «Устан.») и индицирует работу нагревательного элемента (строка «Нагрев»).

Порядок работы с прибором:

1. Для включения прибора нажмите кнопку «Сеть» 10, при этом загорится индикатор 1. Прогрейте прибор 5 мин.

2. Регулировка контраста изображения проводится вращением ручки 15 «КОНТРАСТ».

3. Соберите электрическую схему.

4. Для переключения режима работы нажмите кнопку 2 «F». При этом должен подсветиться текущий режим работы. Затем кнопками «+» или «-» выберите необходимый режим:

$I=F(U1)$ (вольт-амперная характеристика);

$U2=F(U1)$ (статическая характеристика);

$U2=F(I)$ (передаточная характеристика).

5. Установите требуемый сигнал на выходе генератора. Для этого однократным нажатием кнопки «Генер.» подсветите строку «ФОРМА» и кнопками «+» и «-» выберите необходимую форму сигнала (синусоидальная, треугольная). **В работе используется синусоидальная форма сигнала.** Повторным нажатием кнопки «Генер.» подсветите строку «АМПЛ.» и кнопками «+» и «-» установите необходимую амплитуду выходного сигнала (в вольтах).

6. Для изменения коэффициента отклонения нажмите кнопку 6 «Кус». При этом подсветится надпись «УСИЛ.» того канала, который соответствует выбранному режиму работы. Если режим работы предполагает совместное использование двух каналов, то переход между выбором коэффициентов отклонения каналов осуществляется повторным нажатием кнопки 6 «Кус». Установить необходимое значение коэффициента отклонения для выбранного канала можно при помощи кнопок «+» или «-».

7. Для включения режима «Стоп-кадр» необходимо нажать кнопку 4 «СТОП». При этом кадр будет остановлен для проведения измерений. Для выхода из этого режима необходимо нажать кнопку «СТОП» повторно.

8. Установка требуемой температуры (по умолчанию образцы имеют температуру окружающей среды) осуществляется нажатием кнопки «ТЕМП» и последующим выбором кнопками «+» и «-» температуры, до которой необходимо нагреть образцы. В строке «УСТАН.» отображается заданная температу-

ра, а в строке «ТЕКУЩ.» её текущее значение. Для регулировки температуры сегнетоэлектрика стенд снабжен вентилятором.

Состав стенда СЗ-РМ01:

1. Два постоянных резистора:
 - $R1 = 68 \text{ Ом} \pm 10\%$;
 - $R2 = 470 \text{ кОм} \pm 10\%$;
2. Конденсатор $C1 = 0.47 \text{ мкФ} \pm 10\%$;
3. Трансформатор Tr , имеющий следующие характеристики:
 - Материал сердечника – пермаллой 50Н
 - Средняя длина сердечника $l = 7.8 \pm 0.1 \text{ см}$;
 - Площадь поперечного сечения $S = 0.64 \pm 0.05 \text{ см}^2$;
 - Число витков первичной обмотки $N1 = 1665 \text{ вит.}$;
 - Число витков вторичной обмотки $N2 = 970 \text{ вит.}$

Схема лабораторной установки приведена на рис 11.

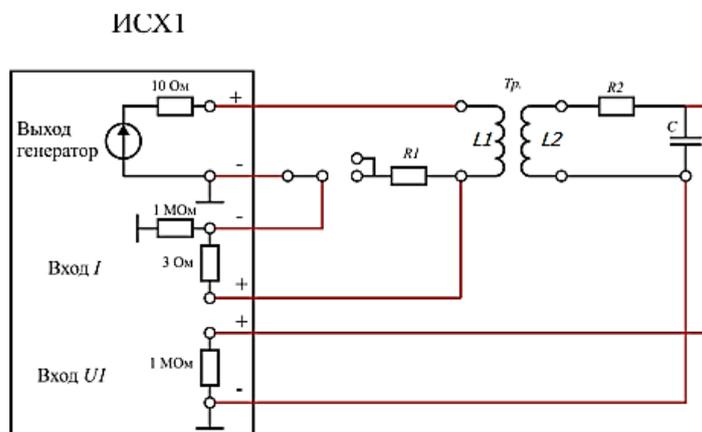


Рис. 11. Схема ИСХ1.

1.4.2. Задание № 2

Получить семейство петель гистерезиса вплоть до предельной, определите основные параметры ферромагнетика по этим петлям.

Намагничивающая обмотка L_1 питается переменным током от генератора. Чтобы получить на дисплее петлю гистерезиса, нужно на горизонтально отклоняющие пластины подать напряжение U_x , пропорциональное напряжённости магнитного поля в образце, а на вертикально отклоняющие пластины – напряжение U_y , пропорциональное индукции магнитного поля. Напряжение U_x подаётся с резистора R_1 . Ток I , проходя по намагничивающей обмотке, создаёт в трансформаторе магнитное поле

$$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l} \quad (14)$$

где N_1 – число витков в намагничивающей обмотке, l – длина сердечника по средней линии.

Напряжение на резисторе R_1 , подаваемое на X-вход (вход I) прибора

$$U_x(t) = I(t)R_1 = \frac{IR_1}{N_1}H(t) \quad (15)$$

ЭДС индукции в измерительной катушке из N_2 витков по закону Фарадея–Максвелла равна скорости изменения магнитного потока в ней

$$\varepsilon(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB(t)}{dt} \quad (16)$$

где S – площадь поперечного сечения сердечника.

Для того чтобы U_y было пропорционально индукции магнитного поля B , между индикаторной катушкой и ИСХ-1 ставят интегрирующую RC-цепь, удовлетворяющую условию

$$R_2 \gg X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (17)$$

где ω – циклическая частота переменного тока.

При этом ток в цепи индикаторной катушки

$$I(t) = \frac{\varepsilon(t)}{R_2} = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB(t)}{dt} \quad (18)$$

Напряжение на конденсаторе равно

$$U_y = U_C = \frac{\int I(t)dt}{C} = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \int dB = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B(t) \quad (19)$$

За один период синусоидального изменения тока электронный луч на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности её повторит. Увеличивая напряжение питания намагничивающей катушки, будем получать на экране последовательно ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Верхняя точка каждой из петель гистерезиса находится на кривой намагничивания. Следовательно, для построения начальной кривой намагничивания необходимо снять с дисплея координаты (x_i, y_i) вершин нескольких петель гистерезиса. Эти координаты соответствуют максимальным значениям H_m и B_m , которые из (15) и (19) равны

$$U_{xm} = \frac{lR_1}{N_1} H_m, \quad U_{ym} = \frac{N_2 S}{R_2 C} B_m \quad (20)$$

или

$$H_m = \frac{N_1}{lR_1} U_{xm}, \quad B_m = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_{ym} \quad (21)$$

Зная напряжения на *X-входе* (на резисторе R_1) и на *Y-входе* (вход UI) (на конденсаторе C) можно определить цены делений координатной сетки дисплея.

$$c_x = \frac{U_{xi}}{x_i}, \quad c_y = \frac{U_{yi}}{y_i} \quad (22)$$

Учитывая, что действующее значение напряжения $U = U_m / \sqrt{2}$, окончательно получаем

$$H_i = \frac{N_1}{lR_1} \sqrt{2} c_x x_i, \quad B_i = \frac{R_2 C}{N_2 S} \sqrt{2} c_y y_i \quad (23)$$

Магнитная проницаемость для каждого значения тока в намагничивающей катушке

$$\mu = \frac{B_i}{\mu_0 H_i} \quad (24)$$

Для выполнения задания следует:

2.1. Увеличивая напряжение генератора до достижения в образце состояния магнитного насыщения, добейтесь, чтобы петля гистерезиса была хорошо видна, занимала большую часть экрана и находилась по центру экрана. Для этого после получения петли уберите напряжение до 0 и ручками регулировки дисплея вновь поместите сфокусированную светящуюся точку в центр координатной сетки на экране. После этого вновь увеличьте напряжение.

2.2. Зафиксируйте полученную петлю гистерезиса. Определите координаты вершины петли.

2.3. По значениям напряжения на входе I (резисторе R_1) и входе UI (конденсаторе C), определите цены делений координатной сетки экрана.

$$c_x = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/дел}, \quad c_y = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/дел}$$

2.4. Результаты занесите в табл. 1.

Результаты измерений

i	x_i , дел	y_i , дел	U_{x_i} , В	U_{y_i} , В	H_i , А/м	B_i , Тл	μ_i
1							
2							
3							
4							
5							

2.5. Постепенно уменьшая напряжение до 0, получите семейство 5 петель гистерезиса. Зафиксируйте их. Определите координаты вершин петель. Результаты занесите в таблицу.

2.6. Определите значения H и B каждой из вершин петель по формулам (4.10).

2.7. Постройте основную кривую намагничивания $B = B(H)$. Сделайте выводы.

2.8. Рассчитайте магнитную проницаемость для каждого случая. Заполните последнюю колонку в таблице. Постройте график $\mu = \mu(H)$. Сравните с табличными данными. Сделайте выводы.

1.4.3. Задание № 3

По предельной петле гистерезиса определите коэрцитивную силу, остаточную индукцию и индукцию насыщения, остаточную намагниченность, потери энергии на перемагничивание.

Площадь петли гистерезиса численно равна работе, затрачиваемой на перемагничивание единицы объёма образца за один цикл перемагничивания. Так как в условиях работы перемагничивание обеспечивается переменным током с частотой f , то мощность, затрачиваемая на перемагничивание единицы объёма, может быть определена по соотношению

$$\frac{P}{V} = \frac{A}{Vt} = \frac{\sigma}{T} = f\sigma \quad (25)$$

где V – объём образца, f – частота тока перемагничивания, σ – площадь петли гистерезиса, выраженная в энергетических единицах. Эта площадь может быть определена как произведение числа Z масштабных клеток петли гистерезиса на значение масштабной единицы

$$\sigma = Zc_H c_B \quad (26)$$

где c_H и c_B – цены делений соответствующих осей.

Тогда получаем

$$\sigma = Z \frac{H_i}{x_i} \cdot \frac{B_i}{y_i} = \frac{N_1}{lR_1} \sqrt{2} c_x \frac{R_2 C}{N_2 S} \sqrt{2} c_y = 2 \frac{N_1 R_2 C}{lR_1 N_2 S} c_x c_y Z \quad (27)$$

Окончательно

$$\frac{P}{V} = 2f \frac{N_1 R_2 C}{lR_1 N_2 S} c_x c_y Z \quad (28)$$

Остаточная намагниченность определяется по формуле

$$J_{ост} = \frac{B_r}{\mu_0} \quad (29)$$

где B_r – остаточная индукция; μ_0 – магнитная постоянная

1.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Расскажите о лабораторной установке и порядке получения петель гистерезиса на ней.
2. Как строится основная кривая намагниченности?
3. Как определяются основные параметры ферромагнетиков из петель гистерезиса?
4. Зная плотность пермаллоя, оцените его удельные магнитные потери, сравните с табличными данными.
5. Укажите области применения ферромагнетиков в радиоэлектронике.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТА. ТОЧКА КЮРИ

2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

2.1.1. Цель работы

Изучение магнитных свойств радиоматериалов, экспериментальное исследование магнитных свойств ферритов: магнитной проницаемости, влияния температуры на эту величину, определение точки Кюри.

2.1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение структуры, магнитных свойств, типов и применения ферритов, экспериментальное исследование температурных зависимостей магнитной проницаемости ферритов и определение магнитной точки Кюри.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

2.1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

2.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.2.1. Задание № 1

Изучите основные понятия и определения, характеризующие магнитные свойства радиоматериалов, их классификацию по этим свойствам и занесите в отчет.

2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует рассмотреть материал [1], с. 147 – 153 и задание №2.1 из лабораторной работы №8.

2.2.2. Задание № 2

Изучить химический состав, структуру, магнитные свойства и области применения ферритов в радиоэлектронике.

2.2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания

Необходимо изучить материал [1], с. 197 – 208.

Химический состав и строение ферритов. Ферриты – это оксидные магнитные материалы, относящиеся к ферромагнетикам, основной особенностью которых является высокое удельное электрическое сопротивление, достигающее 10^8 Ом м, и широкий диапазон значений начальной магнитной проницаемости от 10 до 20000.

По составу ферриты представляют химические соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов. В настоящее время используют сотни различных марок ферритов, отличающихся по химическому составу, кристаллической структуре, магнитным и электрическим свойствам.

Наиболее широкое применение нашли ферриты со структурой минерала *шпинели*. Химический состав ферритов-шпинелей отвечает формуле $MeFe_2O_4$ ($MeOFe_2O_3$), где Me – катион двухвалентного металла. Элементарная ячейка шпинели представляет собой куб с ребром $a = 8,5$ А, в состав которого входит восемь структурных единиц типа $MeFe_2O_4$, т.е. 32 иона кислорода, 16 ионов трехвалентного железа и 8 ионов двухвалентного металла (рис. 12).

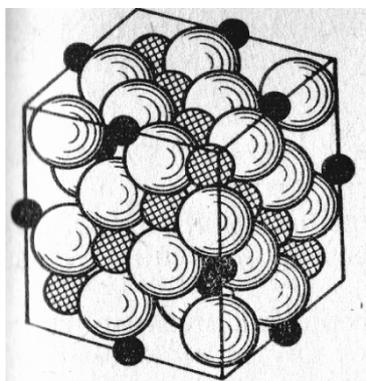


Рис. 12. Элементарная ячейка шпинели: белые шарики – ионы кислорода; черные - катионы в тетраэдрических положениях; заштрихованные – катионы в октаэдрических положениях

Ферриты-шпинели, обладающие высокими магнитными свойствами, имеют структуру, в которой катионы Me^{2+} находятся в позициях типа В, а катионы трехвалентного железа распределяются между позициями типа А и В.

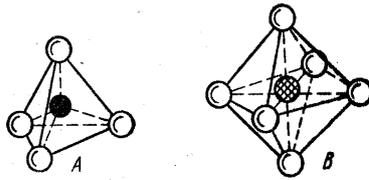
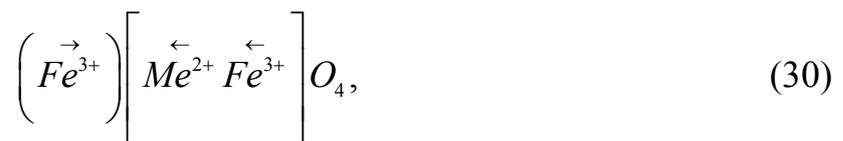


Рис. 13. Схематическое изображение кислородных междуузлий: тетраэдрических типа А; октаэдрических типа В (в центре – металлический катион)

Такая структура получила название обращенной шпинели. Формулу обращенной шпинели с учетом распределения катионов можно записать в виде



где стрелки условно указывают направления магнитных моментов катионов в соответствующих подрешетках.

Высокие магнитные свойства феррошпинели проявляются, если в качестве Me используются металлы Ni, Mn. Худшие магнитные свойства проявляются у ферритов, у которых ионами Me служат Co, Cu, Mg. Феррит считается немагнитными, если в качестве ионов Me служат Zn и Cd. К феррошпинелям относятся и феррит одновалентного лития.

Ферриты получают в виде поликристаллической керамики и монокристаллов. В отличие от радиокерамики поликристаллические ферриты совершенно не содержат стеклообразной фазы.

Монокристаллические ферриты обладают рядом свойств (малая ширина кривой магнитного резонанса, высокая оптическая прозрачность, высокое удельное электрическое сопротивление, большая механическая износостойкость и другие), позволяющих применять их в приборах сверхвысоких частот и магнитной записи, в вычислительной технике и оптических приборах.

Магнитные свойства. В качестве магнитомягких материалов для радиочастот широко применяемой поликристаллические марганец-цинковые (система MnO-ZnO-Fe₂O₃) и никель-цинковые (система NiO-ZnO-Fe₂O₃) ферриты. Ферриты обычно применяются в слабых и средних полях, так как они имеют относительно низкую индукцию насыщения ($B_s = 0,15-0,7$ Тл). Для ферритов, используемых в переменных полях, кроме начальной магнитной проницаемости μ_n важной характеристикой является тангенс угла магнитных потерь $tg\delta_m$. Для оценки допустимого частотного диапазона, в котором может использоваться данный феррит, вводят понятие *критической частоты* $f_{кр}$. Обычно под $f_{кр}$ понимают такую частоту магнитного поля, при которой $tg\delta_m$ достигает 0,1. Су-

существует определенная связь между величиной μ_n и критической частотой: чем выше μ_n , тем ниже $f_{кр}$ (рис. 14). При этом ферриты с большим значением начальной магнитной проницаемости обладают более высоким значением $\text{tg} \delta_m$, критическая частота их ниже.

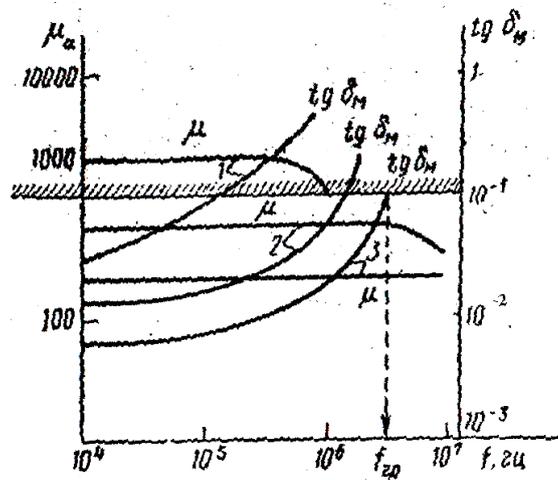


Рис. 14. Зависимость μ_n и $\text{tg} \delta_m$ от частоты ферритов: 1 – 1000НН; 2 – 600НН; 3 – 200НН (стрелкой показано значение $\text{tg} \delta_m = 0,1$ для одного феррита)

Зависимость начальной магнитной проницаемости ферритов двух составов от температуры приведена на рис. 15.

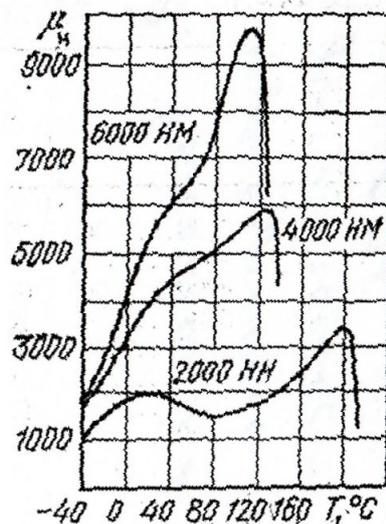


Рис. 15. Зависимость μ_n от температуры для марганец–цинковых и никель–цинковых ферритов

Из рисунка видно, что μ_n повышается с ростом температуры до точки Кюри, а затем резко падает. При этом, чем выше μ_n , тем ниже точка Кюри для ферритов одной и той же системы окислов.

По электрическим свойствам ферриты относятся к классу полупроводников или даже диэлектриков. Их электропроводность обусловлена процессами электронного обмена между ионами переменной валентности. Основным фактором, влияющим на электропроводность, является присутствие в ферритах ионов двухвалентного железа Fe^{2+} .

Для ферритов характерна большая величина относительной диэлектрической проницаемости ϵ , которая зависит от состава и частоты. Наибольшее значение ϵ присуще марганец-цинковым ферритам, у которых она достигает сотни и тысяч единиц.

Наибольшее распространение получили две группы магнитомягких ферритовых материалов:

1. Марганцево-цинковые ферриты (Mn-Zn) – твердые растворы феррита марганца ($MnFe_2O_4$) и феррита цинка ($ZnFe_2O_4$).

2. Никель-цинковые ферриты (Ni-Zn) – твердые растворы феррита никеля ($NiFe_2O_4$) и феррита цинка ($ZnFe_2O_4$).

Разнообразие марок Mn-Zn и Ni-Zn-ферритов определяется, главным образом, соотношением главных компонентов, наличием легирующих присадок и режимами синтеза.

Одним из основных электромагнитных параметров магнитомягких ферритов является начальная магнитная проницаемость n , измеряемая в слабых синусоидальных полях (при напряженности поля $H_m \rightarrow 0$) заданной частоты.

Температурная зависимость магнитной проницаемости характеризуется температурным коэффициентом ТК μ_H , при этом в некотором интервале температур её условно принимают линейной:

$$TK \mu_H = \frac{\mu_{T_2} - \mu_{T_1}}{\mu_{T_1} (T_2 - T_1)} \quad (31)$$

Ферромагнитные свойства ферритов проявляются вплоть до температуры Кюри θ_K , являющейся в силу этого важным параметром магнитомягких ферритовых материалов. Выше θ_K ферриты становятся парамагнетиками. По своей сути в точке Кюри происходит фазовый переход второго рода.

Исходя из условий эксплуатации и области применения ферритовых сердечников магнитомягкие ферриты могут быть условно разделены на одиннадцать групп:

- Для общего применения;
- Термостабильные;
- Высокопроницаемые;
- Для телевизионной техники;
- Для импульсных трансформаторов;
- Для перестраиваемых контуров;
- Для широкополосных трансформаторов;

- Для магнитных головок;
- Для датчиков температуры;
- Для магнитного экранирования;
- Для устройств, работающих на эффекте ядерного спинового эха.

Так, например, группа ферритов общего применения включает в себя никель-цинковые ферриты марок 1000НН, 2000НН и марганцево-цинковые ферриты марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ. Ферриты данной группы используются в слабых и сильных полях в диапазоне частот до 30 МГц в качестве сердечников трансформаторов, дросселей, магнитных антенн и в другой аппаратуре, где нет особых требований к температурной и временной стабильности параметров. Для этих ферритов устанавливаются нормы только на значение начальной магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь.

Магнитные потери марганцево-цинковых ферритов значительно ниже, чем никель-цинковых при близких значениях начальной магнитной проницаемости.

Марганцево-цинковые ферриты, входящие в группу общего применения, обладают меньшей зависимостью магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля по сравнению с никель-цинковыми. Ширина петли гистерезиса у них меньше ввиду меньших значений остаточной индукции и коэрцитивной силы при достаточно высоких значениях индукции.

Особенностью марганцево-цинковых ферритов является более высокое значение температуры Кюри θ_K по сравнению с никель-цинковыми ферритами и меньшие значения температурного коэффициента магнитной проницаемости TK_{μ_n} .

Из ферритов группы общего применения выпускаются детали различной конфигурации и размеров: кольцевые, броневые, Ш, Е, П, Г-образные сердечники, пластины, стержни, трубки и др.

В состав группы ферритов для датчиков температуры входят никель-цинковые ферриты марок 1200НН, 1200НН1, 1200НН2, 1200НН3, 800НН. Эти ферриты отличаются тем, что их магнитная проницаемость резко уменьшается в области температуры Кюри. Температурный интервал спада магнитной проницаемости составляет всего несколько градусов. Это позволяет использовать такие ферриты в качестве чувствительных элементов термореле.

2.2.3. Задание № 3

Изучить влияние температуры на магнитные свойства ферритов и магнитную точку Кюри. В отчёт занести типичные температурные зависимости магнитной проницаемости в сильных и слабых магнитных полях.

2.2.2.3. Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует ознакомиться с материалом [1], с. 147 – 153.

При нагревании ферромагнетика ослабляется роль обменного взаимодействия, что приводит к постепенной тепловой дезориентации спиновых магнитных моментов и уменьшению спонтанной намагниченности J_m . Выше некоторой температуры происходит распад доменной структуры, т.е. спонтанная намагниченность исчезает и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние. Температуру такого фазового перехода называют *магнитной точкой Кюри*. Вблизи точки Кюри наблюдаются и характерные изменения немагнитных свойств ферромагнетиков (удельного электрического сопротивления, температурного коэффициента линейного расширения, удельной теплоемкости и др.). На рис. 16 показано изменение магнитной проницаемости от температуры, измеренной в сильных и слабых магнитных полях. В слабых магнитных полях, соответствующих начальной магнитной проницаемости μ_n , на кривой $\mu(T)$ наблюдается максимум при температуре несколько ниже точки Кюри.

В области насыщения магнитная проницаемость уменьшается с ростом температуры и качественно повторяет изменение намагниченности насыщения от температуры. Возрастание μ_n от температуры обусловлено ослаблением сил, препятствующих смещению доменных границ и повороту магнитных доменов. При температуре Кюри магнитная проницаемость ферромагнетика становится примерно равной единице.

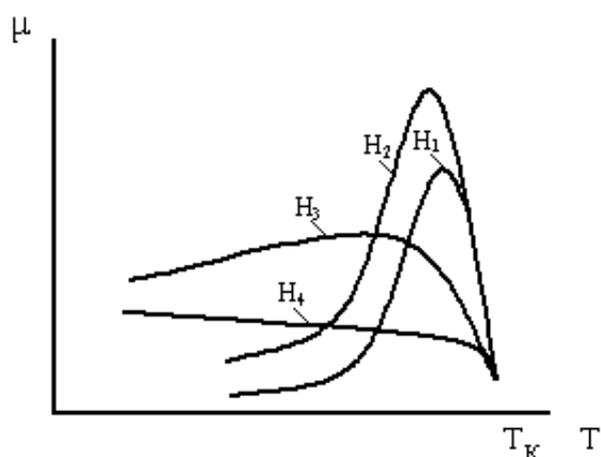


Рис. 16. Температурная зависимость магнитной проницаемости при различных значениях H : $H_4 > H_3 > H_2 > H_1$ (H_4 – область технического насыщения; H_1 – соответствует μ_n)

2.3. Вопросы к домашнему заданию

1. Какие материалы называют магнитными?
2. Дайте определение относительной магнитной проницаемости и приведите выражение, связывающее относительную магнитную проницаемость с магнитной индукцией и напряженностью внешнего магнитного поля.
3. Как классифицируются вещества в зависимости от величины магнитной восприимчивости?

4. Как ориентируются векторы намагниченности относительно друг другу в ферро-, ферри- и антиферромагнетиках? Приведите примеры материалов, обладающих ферро-, ферри- и антиферромагнитными свойствами.
5. Какие бывают виды магнитной проницаемости, применяемые при расчетах различных устройств с магнитными материалами?
6. Какие радиоматериалы называют магнитомягкими?
7. Почему ферриты и магнитодиэлектрики могут применяться в высокочастотных магнитных полях?
8. Что представляют собой по структуре ферриты и магнитодиэлектрики?
9. Какую частоту внешнего магнитного поля называют критической частотой $f_{кр}$ для ферритов?
10. Приведите химическую формулу феррита (например, никельцинкового).
11. Расшифруйте марки ферритов: 2000НМ, 1000НН, 100ВН.

2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Работа выполняется на приборах и оборудовании лабораторного стенда МУК-РМ1.

В ходе выполнения лабораторной работы исследуются температурная зависимость индуктивности тороидальной катушки, в качестве сердечника которого выступает исследуемый феррит. Измерения производятся с помощью прибора ЛСМ1. В состав этого прибора входит термостатированная печь, в которую может быть помещена измерительная камера ИК1-4 с исследуемыми образцами.

По произведённым измерениям, зная геометрические размеры сердечников можно произвести расчет:

магнитной проницаемости материала.

Работа может быть выполнена как в ручном варианте, так и с применением ПК.

2.4.1. Задание № 1

Ознакомиться с порядком работы с измерителем ёмкости и индуктивности ЛСМ1 (рис. 17) и измерительной камерой ИК 1-4. Подготовить лабораторную установку к работе.

В настоящей работе используется измеритель индуктивности и ёмкости ЛСМ1 (рис. 17). С его помощью можно определить ёмкость конденсатора, индуктивность катушек, а также тангенс угла потерь.

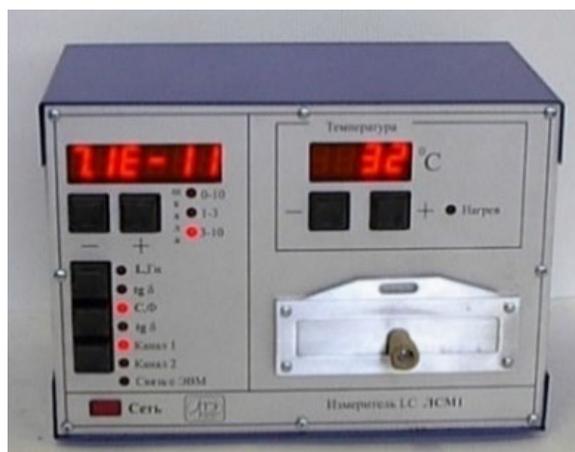


Рис. 17. ЛСМ1

Для включения прибора необходимо нажать кнопку 12 “Сеть” (рис. 18), при этом загорится индикатор результата измерения 1, индикатор выбора температуры 4, индикаторы 8, 9, 10.

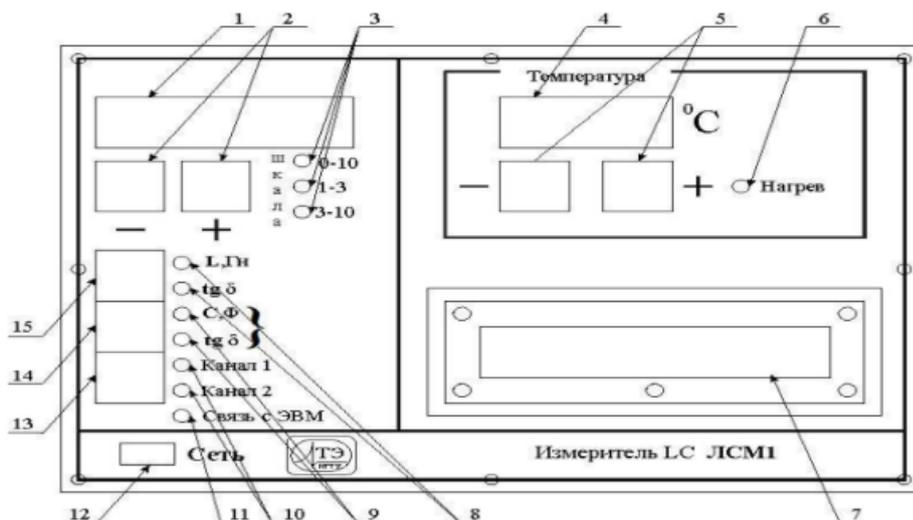


Рис. 18. Передняя панель ЛСМ1: 1 – индикатор результата измерения; 2 – кнопки выбора поддиапазона; емкости; 3 – индикатор шкалы; 4 – индикатор температуры; 5 – кнопки выбора температуры; 6 – индикатор нагрева; 7 – термокамера; 8 – индикаторы режима измерения измерения емкости; 9 – индикаторы режима измерения; 10 – индикатор выбора канала; 11 – индикатор связи с ЭВМ; 12 – кнопка выключателя «Сеть»; 13 – кнопка переключения канала; 14 – кнопка переключения режима индуктивности; 15 – кнопка переключения режима емкости

Исследуемые образцы находятся в измерительной кассете. Для её установки в прибор необходимо поднять шторку 11, установить кассету с образцами в термокамеру прибора до упора. При этом шторка должна опуститься.

Установите кнопкой 14 требуемый режим измерения. Кнопками 2 установите требуемый диапазон.

Кнопкой 13 установите требуемый канал для измерения. Контроль выбора канала осуществляется с помощью индикатора 10.

С помощью кнопок 5 устанавливается требуемое значение температуры термокамеры. При первом нажатии кнопки на индикаторе 4 высветится установленное значение температуры. При повторном нажатии кнопки произойдет коррекция устанавливаемой температуры. Через 2 с после завершения установки индикатор 4 перейдет в режим отображения текущей температуры. Для отключения терморегулятора необходимо установить температуру менее 30 °С. При этом на экране высветится сообщение.

В измерительной камере расположены 2 образца ферритов с намотанными на них катушками.

Материал образца *канала 1* – феррит 1200НН; меньший диаметр кольца – 3 мм, больший диаметр – 5 мм, толщина – 4 мм, число витков катушки – 50 витков.

Материал образца *канала 2* – феррит М2000НМ7; меньший диаметр кольца – 6 мм, больший диаметр – 9 мм, толщина – 6 мм, число витков катушки – 50 витков.

2.4.2. Задание № 2

Провести экспериментальное исследование зависимости магнитной проницаемости ферритов от температуры, определить магнитную точку Кюри.

Для нахождения магнитной проницаемости можно измерить с помощью прибора ЛСМ1 индуктивность L катушки, намотанной на тороидальный сердечник прямоугольного сечения из исследуемого материала. Поскольку прибор проводит измерения в режиме малого синусоидального сигнала, то в этом случае после измерения L можно рассчитать начальную магнитную проницаемость μ_H :

$$\mu_H = \alpha L \quad (32)$$

где α можно вычислить по формуле:

$$\alpha = \frac{10^9}{2N^2 h \ln \frac{d_H}{d_B}} \quad (33)$$

где N – число витков однорядной сплошной намотки,

h – высота сердечника (см),

d_H – наружный диаметр тора (см),

d_B – внутренний диаметр тора (см).

Поместите измерительную камеру в печь прибора ЛСМ1. Переключите прибор в режим измерения индуктивности. Установите режим измерения канала 1. Установите требуемую температуру. Установите нужный диапазон измерения. По достижении заданной температуры произведите измерение индуктивности. Рекомендуется проводить измерения индуктивности с шагом температуры 10°C , а вблизи точки Кюри 5°C .

2.4.3. Задание № 3

Рассчитайте начальную магнитную проницаемость μ_n по формуле (32) для всех измеренных значений индуктивности. Постройте график зависимости $\mu_n(t)$.

2.4.4. Задание № 4

На линейных участках графика рассчитайте значения температурного коэффициента магнитной проницаемости ТК μ_n .

2.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210×297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Расскажите о порядке работы с лабораторной установкой.
2. Объясните методику эксперимента и определения заданных характеристик.
3. Сравните полученные и вычисленные параметры исследованных ферритов со справочными данными.
4. Где применяются ферриты в радиоэлектронике?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернышов А.В. Радиоматериалы. Ч. 2: Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы [Текст]: учеб. пособие / А.В. Чернышов, А.С. Бадаев. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. – 235 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ	
ПО ПЕТЛЕ ГИСТЕРЕЗИСА	3
1.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	3
1.1.1. Цель работы	3
1.1.2. Содержание работы	3
1.1.3. Указания по технике безопасности	3
1.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	
ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	3
1.2.1. Задание № 1	3
1.2.1.1. Методические указания по выполнению задания	3
1.2.1.2. Классификация веществ по магнитным свойствам	4
1.2.2. Задание № 2	6
1.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	6
1.2.3. Задание № 3	8
1.2.3.1. Методические указания по выполнению задания	8
1.3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ	14
1.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	
ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	15
1.4.1. Задание № 1	15
1.4.2. Задание № 2	18
1.4.3. Задание № 3	21
1.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	22
1.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ.....	22
2.ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ	
ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТА. ТОЧКА КЮРИ.....	23
2.1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	23
2.1.1. Цель работы	23
2.1.2. Содержание работы	23
2.1.3. Указания по технике безопасности	23

2.2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	23
2.2.1. Задание № 1	23
2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	23
2.2.2. Задание № 2	24
2.2.2.2.1. Методические указания по выполнению задания	24
2.2.3. Задание № 3	28
2.2.2.3. Методические указания по выполнению задания	28
2.3. Вопросы к домашнему заданию	29
2.4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ	30
2.4.1. Задание № 1	30
2.4.2. Задание № 2	32
2.4.3. Задание № 3	33
2.4.4. Задание № 4	33
2.5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	33
2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ	33
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	34

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ № 22-23
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Составитель

Бадаев Андрей Станиславович

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 29.05.2024.

Уч.-изд. л. 1,9.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет» 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84