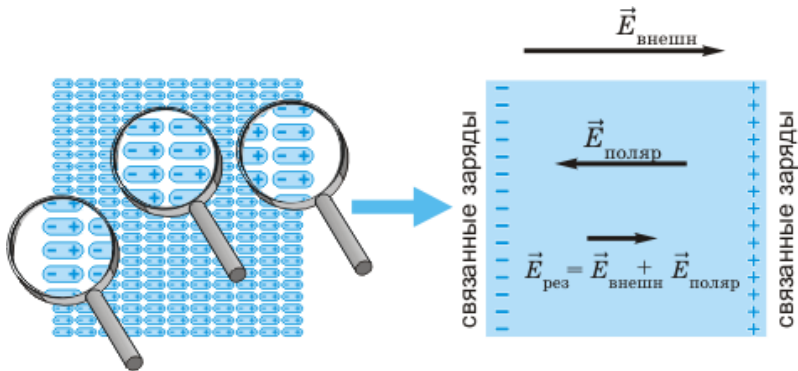


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕ-
СКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ
ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания
к лабораторной работе № 3



Рязань 2016

УДК 621.382

Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь электроизолирующих материалов: методические указания к лабораторной работе № 3/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т. сост.: Т.А. Холомина, М.В. Зубков, С.И. Мальченко. Рязань, 2016. 16 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов поляризации и явлениях возникновения потерь энергии в диэлектриках. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего емкость и добротность образцов, а также виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл. 1. Ил. 8. Библиогр.: 6 назв.

Диэлектрики, поляризация, диэлектрические потери

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав.кафедрой Т.А.Холомина)

Измерение относительной диэлектрической проницаемости
и тангенса угла диэлектрических потерь
электроизолирующих материалов

Составители: Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
З у б к о в Михаил Владимирович
М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович

Редактор М.Е. Цветкова

Корректор Н.А. Орлова

Подписано в печать 10.11.16. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение явлений поляризации и диэлектрических потерь, ознакомление с резонансным методом измерения основных параметров ϵ и $\text{tg}\delta$ диэлектриков и исследование их частотных зависимостей на измерительном оборудовании, а также с помощью виртуального лабораторного стенда.

1. Краткие теоретические сведения

Фундаментальное явление, определяющее возможность использования диэлектрика для создания емкости конденсаторов электронной аппаратуры, – поляризация диэлектриков. Электрическая поляризация при воздействии поля проявляется в ограниченном упругом смещении связанных зарядов, ориентации дипольных молекул, в результате чего некоторый объем или поверхность диэлектрика приобретает электрический момент. После снятия электрического поля связанные заряды возвращаются в первоначальное состояние.

Для сравнения диэлектриков, имеющих различную степень поляризации, пользуются понятием относительной диэлектрической проницаемости ϵ . Эта величина представляет собой отношение заряда Q конденсатора с конкретным диэлектриком к заряду Q_0 конденсатора тех же размеров и при том же напряжении, между обкладками которого находится вакуум:

$$\epsilon = Q/Q_0, \quad (1)$$

где ϵ – величина безразмерная и всегда больше единицы, поскольку реальные диэлектрики, в отличие от вакуума, всегда содержат электрические заряды.

Диэлектрики делятся на два класса: полярные и неполярные. У молекул неполярных веществ центры тяжести суммарных положительных и отрицательных зарядов совпадают. Молекулы полярных материалов имеют вид диполей, способных ориентироваться в электрическом поле.

Различают две группы поляризации. Мгновенная поляризация (электронная, ионная) происходит практически без потерь энергии. Замедленные виды поляризация (электронно-, ионно-, дипольно-релаксационная, структурная, спонтанная) сопровождаются потерями электрической энергии. Отдельные виды поляризации различаются временем установления (релаксации) и величиной, обратно пропорциональной времени релаксации, – характеристической частотой, вплоть до которой конкретный вид поляризации способен проявляться.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установ-

ления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с), процесс происходит практически без потерь энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков без исключения, поскольку у всех диэлектриков имеются электроны, находящиеся в связанном состоянии.

Ионная поляризация характерна для твердых диэлектриков с ионным строением (слюда, корунд, каменная соль) и проявляется в упругом смещении связанных ионов под действием электрического поля. Время установления поляризации около 10^{-13} с, потерь энергии не происходит.

Электронно- и ионно-релаксационная поляризации сопровождаются диэлектрическими потерями. Электронно-релаксационная поляризация возникает вследствие возбуждения тепловой энергии избыточных (дефектных) электронов и дырок. Ионно-релаксационная поляризация характерна для материалов ионного строения с неплотной упаковкой ионов (например, в неорганических стеклах). При этом виде поляризации слабосвязанные ионы под действием поля перемещаются на одно или несколько атомных расстояний и закрепляются в новом положении, что создает асимметрию распределения зарядов и, следовательно, электрический момент единицы объема. Время релаксации составляет $10^{-8} \dots 10^{-11}$ с для ионов-релаксаторов разных размеров.

Дипольно-релаксационная поляризация обычно наблюдается в полярных органических диэлектриках (полиметилметакрилат, поливинилхлорид и т.д.) и заключается в ориентации, повороте дипольных молекул, дипольных групп под действием электрического поля. Этот вид поляризации сопровождается потерями энергии. Чем ниже температура и крупнее диполи, тем больше время релаксации, изменяющееся в пределах $10^{-6} \dots 10^{-10}$ с.

Структурная (межслойная, миграционная) поляризация обусловлена движением свободных зарядов (положительных и отрицательных ионов, электронов) и их закреплением на дефектах и поверхностях раздела различных компонентов электроизоляционного материала. Этот вид поляризации наблюдается в неоднородных диэлектриках (композиционные пластмассы, гетинаксы, текстолиты, керамика и т.д.), компоненты которых обладают разными электрическими свойствами. Время релаксации может достигать десятков минут, поляризация сопровождается диэлектрическими потерями.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация характерна для сегнетоэлектриков. При температуре ниже точки Кюри, когда энергия теплового движения невысока, ионы, смещаясь друг относительно друга, создают электрический момент. Области с одинаковым направ-

лением дипольных моментов называются доменами. До действия электрического поля направление дипольных моментов разных доменов хаотично и сумма их равна нулю, поэтому сегнетоэлектрики в целом неполяризованы. Под действием внешнего электрического поля происходит ориентация дипольных моментов доменов в направлении поля. Поэтому диэлектрическая проницаемость при спонтанной поляризации зависит от напряженности электрического поля. Потери энергии при этом незначительны.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика зависит от его агрегатного состояния, структуры и условий эксплуатации (температуры, влажности, напряжения, частоты).

Газообразные диэлектрики из-за низких концентраций заряженных частиц и плотности имеют $\epsilon \approx 1$.

У жидких неполярных диэлектриков с электронной поляризацией ϵ также невелика и составляет 2-2,5. Полярные (органические и неорганические с неплотной упаковкой) диэлектрики, для которых характерны релаксационные виды поляризации, имеют $\epsilon = 3 \dots 10$. Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков достигает $2 \cdot 10^5$.

Характер зависимости $\epsilon(T)$ конкретного диэлектрика обусловлен преобладающим видом поляризации. Например, у неполярных материалов (полиэтилен, парафин) ϵ с ростом температуры снижается из-за уменьшения плотности и соответственно концентрации объектов поляризации заряженных частиц (рис. 1, кривая 1).

Зависимость ϵ полярных диэлектриков от температуры имеет максимум при определенной температуре T_1 (рис.1, кривая 2). При увеличении температуры до T_1 ϵ увеличивается за счет уменьшения вязкости и облегчения ориентации диполей, далее, при

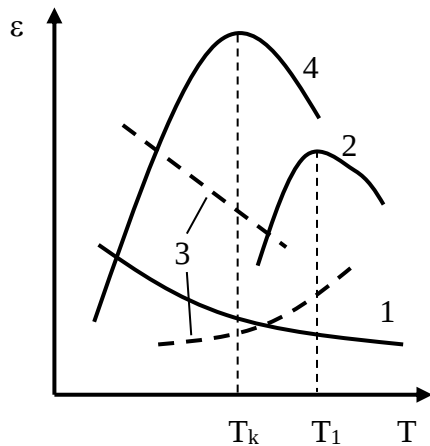


Рис. 1. Зависимость ϵ от температуры для диэлектриков с электронной (1), дипольно-релаксационной (2), ионной и ионно-релаксационной (3) и спонтанной (4) поляризациями

$T > T_1$ (определенной для каждого диэлектрика), ε уменьшается, так как тепловое движение нарушает ориентацию диполя по полю. У большинства неорганических стеклообразных и кристаллических материалов ионного строения ε увеличивается с ростом температуры, а у некоторых уменьшается (рис. 1, кривая 3). Это объясняется наличием у диэлектриков как электронной (снижение ε с ростом T), так и ионной поляризации. Вследствие уменьшения связи между ионами ε при ионной поляризации с ростом температуры увеличивается.

При повышении температуры вплоть до значения точки Кюри (T_K на рис. 1, кривая 4) ε сегнетоэлектриков увеличивается вследствие облегчения процесса поляризации доменов, а выше точки Кюри уменьшается из-за того, что хаотическое тепловое движение молекул с сосредоточенными на них электрическими моментами нарушает доменное строение.

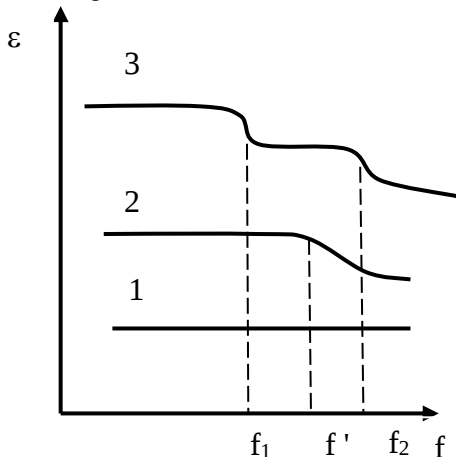


Рис. 2. Частотная зависимость ε диэлектриков с мгновенной (1) и релаксационными (2, 3) видами поляризации

Относительная диэлектрическая проницаемость ε неполярных диэлектриков не зависит от частоты, как показано на рис. 2 (кривая 1), так как им свойственна только мгновенная поляризация, время релаксации которой мало по сравнению с полупериодом действия напряжения. В полярных материалах с дипольно-релаксационной или ионно-релаксационной поляризацией ε до определенной частоты f^1 не меняется (рис. 2, кривая 2). Когда поля-

ризация не будет успевать полностью устанавливаться за один полупериод действия напряжения (f' — величина, обратная времени релаксации), ε снижается, приближаясь к значению, обусловленному всегда имеющейся электронной поляризацией. Некоторые полярные полимеры имеют ступенчатую зависимость $\varepsilon(f)$, аналогичную кривой 3 (рис. 2), обусловленную наличием набора разных релаксаторов (диполей,

групп, сегментов) с соответствующими характеристическими частотами «выбывания» f_1 , f_2 и временами релаксации поляризационных процессов. Характеристическую частоту f_x можно рассчитать по формуле:

$$f_x = \frac{kT}{8\pi^2\eta r^3}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, η – вязкость среды, r – радиус поляризующегося элемента (макромолекулы, диполя и т.п.).

Из соотношения (2) следует, что характеристическая частота увеличивается с ростом температуры и снижается при увеличении вязкости диэлектрика. Самое значительное влияние оказывают на характеристическую частоту размеры релаксатора (иона, диполя, макроструктурного компонента диэлектрика). Применительно к диполям, т.е. полярным молекулам, f_x соответствует максимальной частоте внешнего электромагнитного поля, которую они способны воспроизвести своими поворотами в нем. За счет таких поворотов (ориентации) достигается максимально возможная компенсация внешнего поля собственным электрическим полем диэлектрика. Важно, что полярные молекулы одинаковых размеров, пребывая в средах с разной вязкостью, обладают неодинаковой характеристической частотой. Поскольку емкость любого конденсатора пропорциональна величине ϵ , зависимости $C(T)$ и $C(f)$ полностью определяются зависимостями $\epsilon(T)$ и $\epsilon(f)$ конкретного диэлектрика.

Диэлектрическими потерями называется энергия, рассеиваемая в единицу времени в диэлектрике, находящемся в электрическом поле, и вызывающая его нагрев. При постоянном поле потери обуславливаются током сквозной проводимости – движением ионов, иногда – свободных электронов. Потери на сквозную электропроводность присущи в большей или меньшей мере всем диэлектрикам без исключения. Величина потерь на сквозную электропроводность определяется удельным сопротивлением ρ_v , а в твердых диэлектриках также и удельным поверхностным сопротивлением ρ_s .

При переменном поле различают следующие виды потерь:

- 1) на сквозную электропроводность;
- 2) поляризационные, обусловленные разными видами замедленной (релаксационной) поляризации;
- 3) ионизационные;
- 4) обусловленные неоднородностью структуры.

Поляризационные потери характерны для полярных диэлектриков (поливинилхлорид, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталат, электроизоляционные стекла и др.). Каждый тип релаксационной по-

ляризации диэлектрика сопровождается характерными поляризационными потерями с определенным временем релаксации и характеристической частотой.

Ионизационные потери характерны для газообразных диэлектриков, а также жидких и твердых, содержащих газовые включения (керамические, слоистые, композиционные и др.). Этот вид потерь характеризуется так называемой кривой ионизации - зависимостью $\text{tg } \delta$ от приложенного электрического напряжения [2,3].

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, непосредственно связаны с макроструктурной (миграционной) поляризацией и присутствуют в композиционных, керамических, слоистых диэлектриках.

При выводе аналитического соотношения для расчета мощности диэлектрических потерь пользуются эквивалентной схемой диэлектрика, состоящей из последовательно или параллельно включенных активного сопротивления R и емкости C . Эквивалентная схема выбирается так, чтобы расходуемая активная мощность была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а вектор тока был сдвинут относительно вектора напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

В идеальном конденсаторе (вакуумном) без потерь угол между векторами тока I_C и напряжением U_C равен 90° . Чем больше рассеиваемая в реальном диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция $\text{tg } \delta$ (рис. 3).

Тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) – параметр, учитывающий все виды потерь в диэлектрике и представляющий собой тангенс угла, дополняющего угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи до 90° . Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению

$$\text{tg } \delta = I_\sigma / I_C, \quad (3)$$

а мощность диэлектрических потерь в переменном электрическом поле

$$P_- = U^2 \omega C \text{tg } \delta, \quad (4)$$

где U – приложенное напряжение; $\omega = 2\pi f$ – частота. Из выражения (4) следует, что диэлектрические потери существенно влияют на работу аппаратуры высокого напряжения, высокочастотной и в особенности - одновременно высокочастотной и высоковольтной.

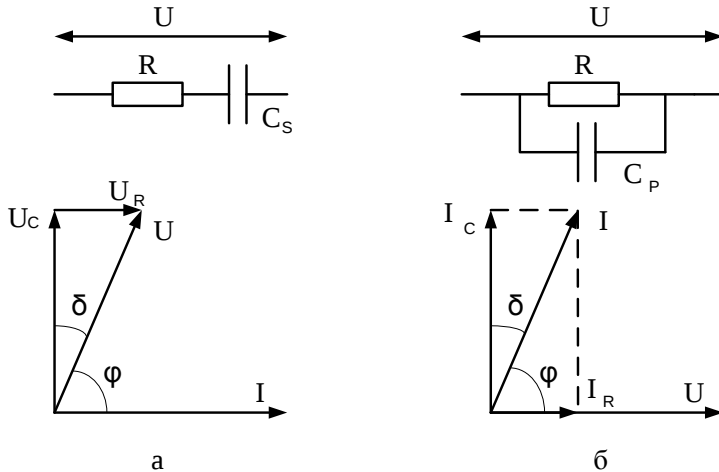


Рис. 3. Эквивалентные схемы и векторные диаграммы диэлектрика с потерями: а – последовательная; б – параллельная

Тангенс угла диэлектрических потерь зависит от состава и структуры диэлектриков, от агрегатного состояния, а также от условий эксплуатации.

У чистых однородных неполярных диэлектриков диэлектрические потери малы и обусловлены только током сквозной проводимости. $\operatorname{tg} \delta$ незначителен, порядка 10^{-4} , с ростом частоты падает (рис. 4, кривая 1), так как I_R от частоты практически не зависит, а реактивный ток I_C увеличивается. Для таких диэлектриков при повышении температуры $\operatorname{tg} \delta$ возрастает за счет увеличения тока сквозной проводимости (рис. 5, кривая 1).

Полярные диэлектрики, у которых потери обусловлены как сквозной проводимостью (иногда значительной), так и релаксационными видами поляризации, имеют высокий $\operatorname{tg} \delta \sim 10^{-2} - 10^{-1}$. Частотная и температурная зависимости $\operatorname{tg} \delta$ таких диэлектриков имеют максимумы, показанные на рис. 4 (кривая 2) и 5 (кривая 2). Появление максимума на зависимости $\operatorname{tg} \delta(f)$ объясняется инерционностью диполей и дипольных групп, не успевающих ориентироваться по полю за полупериод его изменения. Общий характер частотной зависимости соответствует кривой 1, рис. 4, т.е. потерям на сквозную электропроводность. При наличии нескольких релаксаторов появляется соответствующее число максимумов $\operatorname{tg} \delta$ аналогично рис. 2.

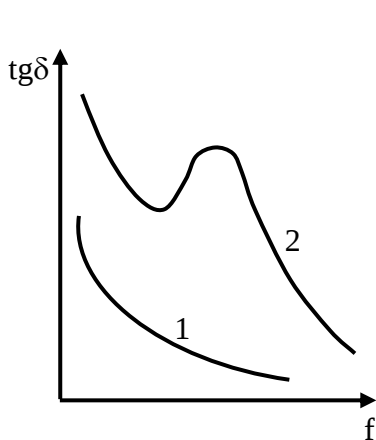


Рис. 4. Частотная зависимость $\text{tg}\delta$ для диэлектриков с потерями на сквозную электропроводность (1); с потерями на электропроводность и поляризационными потерями (2)

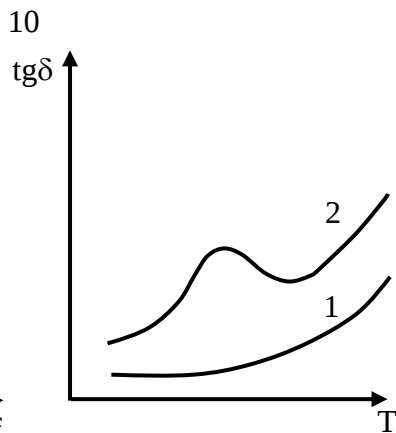


Рис. 5. Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры для непольярных (1) и полярных (2) диэлектриков

Появление максимумов на температурной зависимости $\text{tg}\delta$ полярных диэлектриков объясняется тем, что по мере повышения температуры закрепленные диполи получают дополнительную энергию, большую свободу перемещения и ориентации по полю. При этом возрастает мощность диэлектрических потерь и $\text{tg}\delta$. Начиная с определенной температуры, соответствующей максимуму $\text{tg}\delta$ на его температурной зависимости, энергия теплового движения становится выше энергии электрического поля, нарушается ориентация диполей, затрата энергии уменьшается и $\text{tg}\delta$ снижается. При высоких температурах $\text{tg}\delta$ полярных диэлектриков возрастает за счет роста тока сквозной проводимости.

У диэлектриков с газовыми включениями $\text{tg}\delta$ растет при увеличении напряжения вследствие ионизации газа. Поэтому пористые диэлектрики непригодны для высоковольтной аппаратуры. У гигроскопичных материалов $\text{tg}\delta$ имеет повышенное значение, так как вода является источником свободных ионов.

Величина $\text{tg}\delta$ неоднородных и композиционных диэлектриков зависит от природы и распределения включений, специальных

наполнителей. Значение $\text{tg} \delta$ слоистых пластмасс может изменяться в широких пределах в зависимости от количественных соотношений компонентов, достигая нескольких единиц.

Наименьшие потери характерны для диэлектриков с мгновенными видами поляризации, имеющих плотную однородную структуру и минимальное содержание примесей. К таким материалам относятся полистирол, полиэтилен, фторопласт-4, трансформаторное масло, слюда, высокочастотный стеатит и др. Особенно высокие требования предъявляются к диэлектрикам, применяемым на высоких частотах и в высоковольтной аппаратуре.

2. Описание методики измерений

Возможны два варианта выполнения настоящей лабораторной работы. В первом случае это реальный прибор с реальными образцами диэлектрических материалов. Во втором случае используются программная модель прибора - куметр (виртуальный прибор) и программные (виртуальные) модели диэлектрических материалов, при этом работа выполняется на персональном компьютере. Вариант выполнения работы, диэлектрические материалы, диапазоны частот и температур для исследования задаются преподавателем.

Принцип выполнения лабораторной работы с помощью реального и (или) виртуального прибора - куметра остается неизменным. Измеряется емкость образцового конденсатора и добротность контура без образца диэлектрика и с подключенным образцом. Затем по формулам производят расчет параметров диэлектриков. Приведенное далее задание к лабораторной работе остается неизменным в любом варианте ее выполнения

2.1. Выполнение лабораторной работы на измерительном куметре

Куметром называется прибор, позволяющий измерять добротность колебательного контура, индуктивность катушек, емкость и добротность конденсаторов. Добротность диэлектрической изоляции представляет собой величину, обратную $\text{tg} \delta$, т.е.

$$Q = 1 / \text{tg} \delta.$$

Функциональная схема куметра приведена на рис. 6. Она включает в себя следующие элементы:

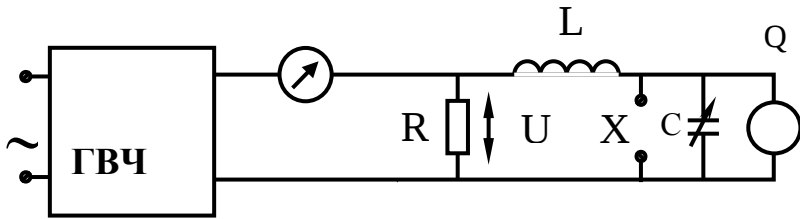


Рис. 6. Функциональная схема куметра

ГВЧ – генератор высокой частоты; $R=0.04$ Ом – постоянное сопротивление; L – сменные образцовые катушки индуктивности; X – зажимы для подключения образца; C – образцовый конденсатор переменной емкости на 25 – 450 пФ; Q – вольтметр с высоким входным сопротивлением, проградуированный в значениях добротности. С помощью образцового конденсатора переменной емкости можно добиться резонанса на заданной частоте в последовательном контуре L и C с подключенным испытуемым образцом.

В момент резонанса напряжение на образцовом конденсаторе U_c в Q раз больше подводимого к контуру напряжения U , т.е.

$$U_c = QU. \quad (5)$$

Добротность контура при резонансе определяется по формуле:

$$Q = \frac{\omega L}{r_k}, \quad (6)$$

где r_k – активное сопротивление контура, ω – частота.

При подключении испытуемого образца с потерями к зажимам образцового конденсатора происходит возрастание активного сопротивления контура при резонансе и, следовательно, уменьшение его добротности. Добротность контура можно определить, зная напряжения U и U_c . Напряжение U_c измеряют вольтметром с большим входным сопротивлением. Подводимое напряжение находится в пределах 0.01 – 0.02 В. Величина этого напряжения зависит от тока, протекающего через резистор R . Следовательно, и показание вольтметра, проградуированного в единицах добротности, зависит от этого тока. Шкала прибора, регистрирующего ток в цепи с сопротивлением R , проградуирована в значениях добротности. Процесс измерения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ состоит в определении добротности контура Q_1 и емкости образцового конденсатора C_1 без испытуемого

образца в момент резонанса при заданной частоте и определении значений Q_2 и C_2 при наличии образца. По этим величинам вычисляют $\operatorname{tg} \delta$ и емкость испытуемого образца.

В работе измерение ε и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектриков производится при помощи куметра Е9 – 4, принцип работы которого изложен выше.

Процесс измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь состоит в следующем.

1. К клеммам L_x на верхней панели прибора подключают одну из измерительных катушек индуктивностей, к клеммам C_x подсоединяют провода без образца. Провода установлены медные жесткие, в виде круглых шин диаметром 3 – 4 мм, покрытых серебром для уменьшения потерь. Расстояние между проводами в процессе измерения емкости и $\operatorname{tg} \delta$ поддерживают неизменным. Контакты в местах соединений должны быть надежными.

2. Переключатели рода работ устанавливают в положение «Измерение», ручку «Уровень» – в крайнее левое положение. Включают тумблер питания.

3. Переключатель диапазонов Q устанавливают в положение «60». Переключатель рода работ – в положение «Уст. нуля». Ручками «Нуль» и «Нуль уровня» устанавливают нули приборов.

4. Переводят переключатель рода работ в положение «Калибровка». Ручкой «Уровень» устанавливают стрелку прибора на красную риску, а потенциометром «60» стрелку Q вольтметра – на риску «60». Таким же методом устанавливают нуль и откалибровывают шкалы «200» и «600», регулируя соответствующие потенциометры.

5. Переключатель рода работ устанавливают в положение «Измерение».

6. С помощью основного и подстроечного конденсаторов настраивают контур в резонанс и отсчитывают значение емкости C_1 с точностью до десятых долей пикофарад и добротности Q_1 . При этом поддерживают стрелку прибора «Уровень» на красной риске.

7. Подключают образец диэлектрика с помощью соединительных проводов и вновь настраивают контур в резонанс с помощью основного и подстроечного конденсаторов. Резонансная емкость контура остается прежней. Производят отсчет Q_2 и C_2 . Так как емкость испытуемого образца C_x и емкость измерительного конденсатора C_2 включены параллельно, то должно быть выполнено условие

$$C_x + C_2 = C_1, \quad (7)$$

где C_1 является резонансной емкостью контура, настроенного на

заданную частоту.

8. Таким образом, емкость испытуемого образца

$$C_x = C_1 - C_2. \quad (8)$$

Если производится испытание плоского образца, то относительную диэлектрическую проницаемость можно определить из формулы:

$$C_x = \varepsilon \varepsilon_0 S / h, \quad (9)$$

где $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная вакуума; S – площадь меньшего электрода, м²; h – толщина образца, м.

Если C_x выразить в пикофарадах, то

$$\varepsilon = 0.113 C_x h / S. \quad (10)$$

В работе верхний электрод имеет форму цилиндра диаметром $5 \cdot 10^{-2}$ м, нижний – форму пластины. Испытуемый образец располагается между этими электродами.

Тангенс угла диэлектрических потерь определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = (Q_1 - Q_2) C_1 / Q_1 Q_2 (C_1 - C_2). \quad (11)$$

2.2. Выполнение лабораторной работы на виртуальном куметре

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков с использованием прибора – измерителя добротности (куметра). Для этого применяется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда диэлектриков в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора куметр. Принцип измерения ε и $\operatorname{tg} \delta$ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе. Для начала работы необходимо запустить файл «Танг_диэл» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.7, а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 7, б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного материала диэлектрика.

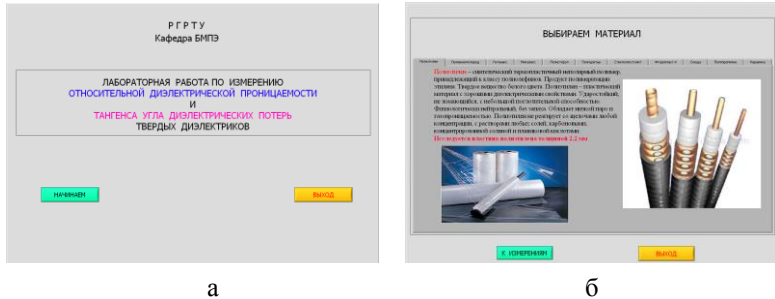


Рис. 7. Внешний вид окна начала работы (а) и выбора материала диэлектрика для исследования (б)

Проведение измерений

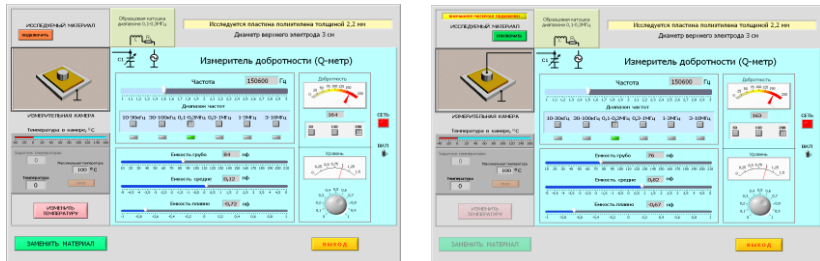
После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения параметров выбранного диэлектрика, показанное на рис. 8. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображаются схема подключения исследуемого образца диэлектрика и используемые при этом электроды.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 0°C . Измерение ϵ и $\text{tg}\delta$ диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.

1. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на 1.

2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.

3. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность», добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.



а

б

Рис.8. Внешний вид окна для проведения измерений без подключенного к куметру исследуемого образца диэлектрика (а) и с подключенным образцом диэлектрика (б)

4. Подключить образец диэлектрика щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур диэлектрике.

5. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с п. 1 - 3 и продолжить в соответствии с п. 4,5.

6. При необходимости выбрать другой диэлектрик, используя кнопку «Заменить материал».

Расчет параметров (C_x , ε и $\text{tg}\delta$) по соотношениям (7) - (10) полностью соответствует приведенному в п. 8 раздела 2.1 методических указаний.

3. Задание по выполнению лабораторной работы

1. Произвести измерение тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости материалов по указанию преподавателя.

2. Результаты измерений и расчетные данные свести в таблицу по приведенному ниже образцу.

3. Построить зависимости $\varepsilon(f)$, $\text{tg}\delta(f)$.

Наименование материала	Толщина h , м	Частота, Гц	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_x , пФ	Q_1	Q_2	ε	$\text{tg}\delta$

4. Содержание отчета

1. Наименование работы.
 2. Цель работы.
 3. Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).
 4. Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
 5. Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными.
- Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

Контрольные вопросы

1. На какие свойства диэлектрика влияет дипольный момент молекул ?
2. Чем отличается полярная молекула от неполярной?
3. Что такое поляризация и какие свойства диэлектрика характеризует это явление?
4. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.
5. Охарактеризуйте основные виды поляризации.
6. Какие виды поляризации присущи полярным и неполярным диэлектрикам?
7. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (поливинилхлорида).
8. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (электрофарфора).
9. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного диэлектрика с дипольно-релаксационной, спонтанной поляризациями и неоднородной структурой (сегнетокерамики).
10. Что такое потери энергии в диэлектриках, какими параметрами они характеризуются?
11. Охарактеризуйте основные виды диэлектрических потерь.
12. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для неполярно-

го диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (поливинилхлорида).

13. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического поля для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (полиэтилен-терефталата).

14. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического поля для неполярного диэлектрика (политетрафторэтилена) и полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (ультрафарфора).

15. Нарисуйте зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля для полярного диэлектрика с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (полиметилметакрилата).

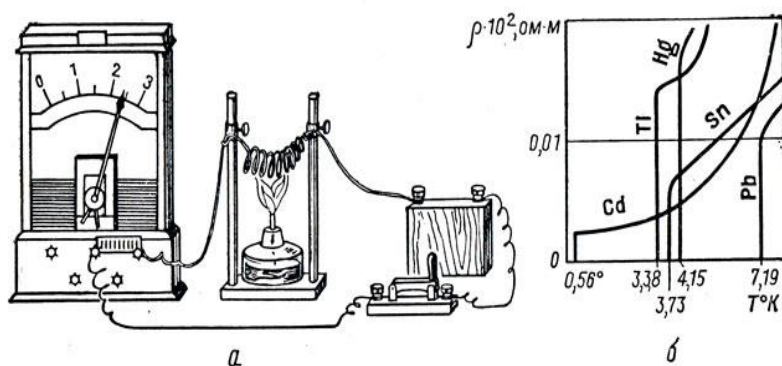
16. Нарисуйте зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля для полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (радиофарфора).

Библиографический список

1. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие.- Рязань: РГРТУ, 2015. - 48 с.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
3. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
4. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.
5. Вихров С.П., Холомина Т.А. Материаловедение /под ред. Ю.М. Солдака: учеб.пособие.– Рязань: РГРТУ, 2006. –160 с.
6. Справочник по электротехническим материалам / под. ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М.: Энергия, 1974. Т.1. – 583 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ

Методические указания к лабораторной работе № 20



Рязань 2016

УДК 621.382

Исследование зависимости удельного сопротивления металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов: методические указания к лабораторной работе № 20; сост.:

С.И. Мальченко, Т.А.Холомина, А.Ю.Холомин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т.- Рязань, 2016. 12 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях влияния температуры и концентрации компонентов на величину удельного сопротивления металлических сплавов, а также методика выполнения лабораторной работы при помощи виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл.5. Ил. 19. Библиогр.: 6 назв.

Сплавы, удельное сопротивление, температура, концентрация

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективно-го пользования) при кафедре микро- и нанoeлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Исследование зависимости удельного сопротивления металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Х о л о м и н Александр Юрьевич

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В.Макушина

Подписано в печать 16. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 0,75.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: исследование зависимости удельного сопротивления двухкомпонентных металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Природа электропроводности металлов и сплавов

Классическая электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных свободных валентных электронов. К электронному газу применялись представления и законы обычных газов. Это привело к выводу законов Ома и Джоуля - Ленца, позволило описать и объяснить ранее обнаруженные экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.

Однако исчерпывающее объяснение явлений электропроводности оказалось возможным на основе квантовой механики. В соответствии с квантово-механическими представлениями причиной наличия электрического сопротивления твердых тел является не столкновение свободных электронов с атомами решетки (как в классической теории Друде), а рассеяние их на дефектах решетки, вызывающих нарушение периодичности потенциала. Идеально правильная, бездефектная неподвижная решетка не способна рассеивать свободные носители заряда и поэтому должна обладать нулевым сопротивлением.

Подвижность и длина свободного пробега электронов в твердом теле зависят от структуры материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления ρ . Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ . С позиций квантовой механики рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. Нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн де Бройля. В металлическом проводнике, где длина волны электрона порядка $5\text{\AA}$, микродефекты создают значительное рассеяние. Это уменьшает подвижность электронов и длину свободного пробега и, следовательно, приводят к росту ρ . Так как в металлах концентрация электронного газа и практически не зависит от температуры (T), то зависимость удельного сопротивления ρ (и обратной величины удельной электропроводности σ) от температуры полностью определяется температурной зависимостью подвижности (μ) и пропорциональной ей длины свободного пробега электронов (λ).

Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается среднестатистическая длина свободного пробега λ , уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 1)

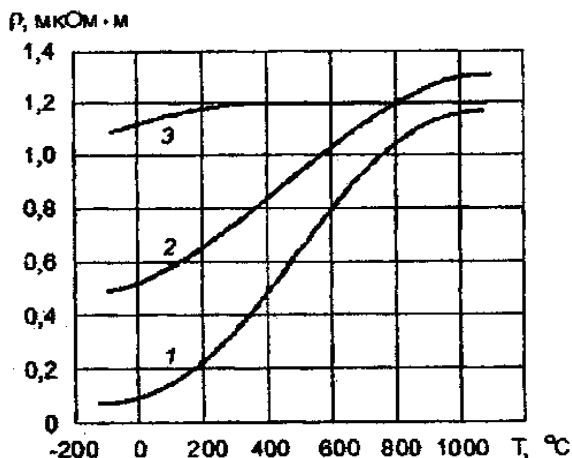


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры: 1 - железо; 2 - электротехническая сталь с содержанием 4 % Si; 3 - сплав Fe-Ni-Cr

1.2. Удельное сопротивление металлов и сплавов

Связь плотности тока J , A/m^2 и напряженности E , V/m электрического поля в проводнике описывается формулой

$$J = \gamma \cdot E \quad (1.1)$$

- (дифференциальная форма закона Ома); где γ , Cm/m – параметр проводникового материала, называемый его *удельной проводимостью*.

В соответствии с законом Ома в области слабых полей γ не зависит от напряженности электрического поля E при изменении последней в весьма широких пределах.

Величина

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \quad (1.2)$$

обратная удельной проводимости и называемая *удельным сопротивлением*

тивлением, для имеющего сопротивления R проводника длиной l с постоянным поперечным сечением S вычисляется по формуле

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l} . \quad (1.3)$$

Диапазон значений удельного сопротивления ρ металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: от 0,016 Ом·мм²/м для серебра и до примерно 10 Ом·мм²/м для железохромоалюминиевых сплавов, т. е. он занимает всего три порядка [1]. Ниже в таблице приведены значения удельного сопротивления различных металлов, расположенных в алфавитном порядке.

Величину удельного сопротивления металлического проводника на основании электронной теории металлов можно определить следующим образом

$$\rho = \frac{2 \cdot m \cdot v_T}{e^2 \cdot n \cdot l_{cp}} , \quad (1.4)$$

где m – масса электрона, v_T – средняя скорость теплового движения электрона внутри металлического проводника, l_{cp} – средняя длина свободного пробега электрона.

В результате преобразования выражения для удельного сопротивления на основе выводов квантовой волновой механики получают соотношение

$$\rho = \frac{h}{K \cdot e^2 \cdot n^{\frac{2}{3}} \cdot l_{cp}} , \quad (1.5)$$

где h – постоянная Планка, K – числовой коэффициент.

Таблица1. Значения удельных сопротивлений проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ в $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,015
Медь	0,0175
Золото	0,023
Алюминий	0,028
Натрий	0,047
Вольфрам	0,05
Железо	0,13
Свинец	0,2
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)	0.42

Для различных проводников скорости хаотического движения примерно одинаковы. Незначительно отличаются также и концентрации свободных электронов, так, например, для меди и никеля разница составляет менее 10%. Поэтому величина удельного сопротивления в основном зависит от средней длины свободного пробега электрона в данном проводнике, которая в свою очередь зависит от строения проводника, его структуры.

Чистые металлы с совершенной кристаллической решеткой характеризуются наименьшим удельным сопротивлением; примеси, искажая решетку, приводят к его увеличению.

К такому же выводу можно прийти, имея в виду волновую природу электронов. Рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. В металлическом проводнике, где длина волны электрона около $5\text{\AA}$, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов, а следовательно, приводят к росту удельного сопротивления материала.

Число свободных носителей заряда (концентрация электронов) с увеличением температуры в металлическом проводнике остается неизменным. Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения электронов, т. е. уменьшается длина свободного пробега, и подвижность электронов понижается. Поэтому удельное сопротивление металлов с повышением температуры окружающей среды повышается (рис. 1). Скачки удельного сопротивления объясняются изменением агрегатного состояния вещества при изменении температуры.

Изменение зависимости удельного сопротивления от температуры, приведенное на рис. 2, для различных металлов и в разных температурных областях неодинаково. В узкой области 1, составляющей несколько градусов, у ряда металлов может наступить состояние сверхпроводимости и на рисунке виден скачок удельного сопротивления при температуре $T_{\text{св}}$. У теоретически совершенно чистых металлов удельное сопротивление должно бы стремиться к 0 (пунктирная кривая), а у технически чистых металлов, не обладающих сверхпроводимостью, оно должно определяться только рассеянием носителей заряда на примесях и так как $\rho_{\text{чист}} \ll \rho_{\text{прим}}$, то $\rho \cong \rho_{\text{прим}}$ (верхняя кривая на этом участке). Чем чище металл, тем область 1 меньше как по абсциссе, так и по ординате. Зависимость «остаточного» сопротивления от чистоты металлов очень резкая и ее можно использовать для определения наличия примесей в металле, например, по отношению

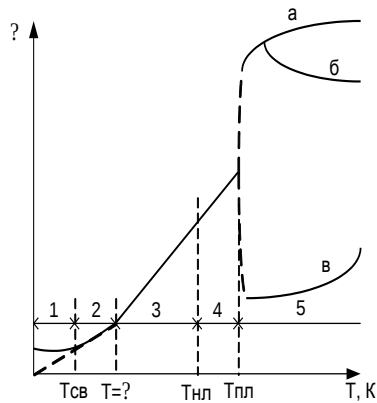


Рис. 2. Теоретическая зависимость удельной электропроводности металлических сплавов от температуры

удельного сопротивления металла при комнатной температуре к его удельному сопротивлению при температуре кипения жидкого гелия (4,2K). Чем это отношение для одного и того же технического металла больше, тем чище металл.

В пределах области 2 наблюдается быстрый рост удельного сопротивления $\rho \sim T^n$, где n – может быть до 5 и убывает с ростом температуры $\sim$ до 1 при $T = \theta$. В этой области рост удельного сопротивления с ростом температуры определяется включением все новых и новых частот тепловых колебаний (фононов) кристаллической решетки металлов, которое заканчивается при температуре $T = \theta$. Для большинства металлов θ лежит в пределах 100 - 400K. В области 3 наблюдается практически линейный участок роста удельного сопротивления за счет линейного возрастания с температурой амплитуд колебаний узлов кристаллической решетки.

В области 4, начало которой условно отмечено температурой $T_{нл}$, отмечается отступление от линейной зависимости. Для многих металлов этот участок кривой невелик и находится вблизи от температуры плавления ($T_{пл}$) металла. Для некоторых переходных и редкоземельных металлов он может начинаться значительно раньше, чем показано на рисунке, т. е. удельное сопротивление металла как бы приходит к некоторому насыщению. Область 5, начинающаяся с $T_{пл}$, характеризует изменение удельного сопротивления в точке плавления и расплавленного металла.

Примеси и нарушения правильной структуры металлов ведут к

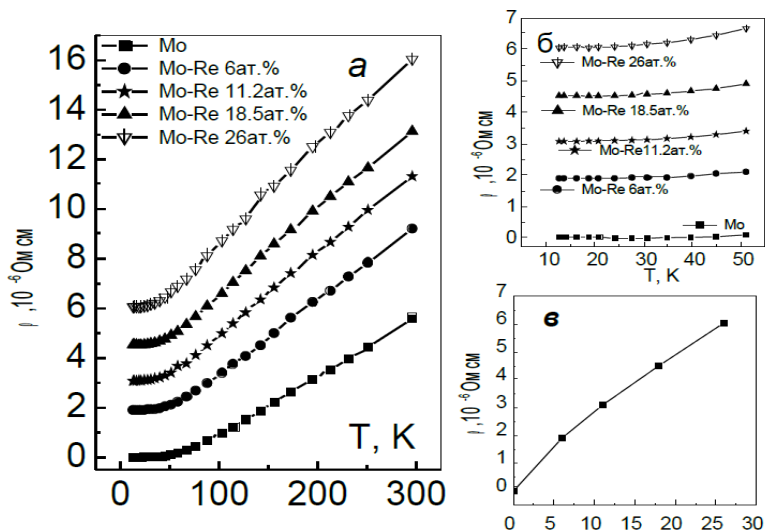


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления сплава молибден-рений от температуры и концентрации компонентов, полученная экспериментально[2]

увеличению их удельного сопротивления. Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют твердый раствор, т.е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого. Зависимость удельного сопротивления сплава молибден-рений от температуры и концентрации компонентов, полученная экспериментально, и представлена на рис. 3.

Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих твердый раствор, от процентного содержания компонентов каждого из них представлена на рис. 4 (кривая а).

Кривая имеет максимум, соответствующий некоторому соотношению содержания компонентов в сплаве; при уменьшении содержания каждого из них ρ падает, приближаясь к соответствующим значениям ρ чистых металлов. Такому изменению соответствует кривая, изображенная на рис. 3 (кривая а).

Обычно наблюдается определенная закономерность и в изменении TKp (TK - температурный коэффициент). Относительно высокими значениями TKp обладают чистые металлы, а у сплавов TKp меньше и даже может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения (рис. 3, кривая б). Это объясняется тем, что у спла-

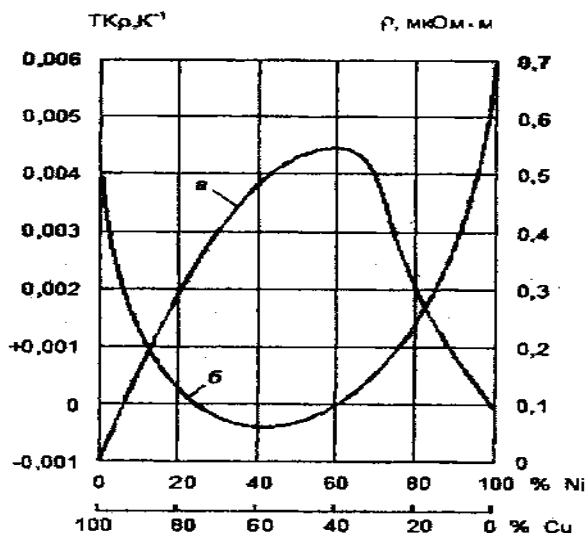


Рис. 4. Зависимость ρ (а) и $TK\rho$ (б) сплавов системы Cu-Ni от состава (в процентах по массе) [1]

Изменение ρ вызывается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется на персональном компьютере, на котором специальной программой смоделирована исследовательская установка и сформированы математические модели изменения удельной электропроводности различных сплавов в зависимости от температуры. Предполагается, что исследуется тонкая проволока определенной длины и диаметра из соответствующего сплава, помещенная в измерительную камеру (в данном случае в виртуальную камеру). В измерительной камере температура изменяется в широких пределах от 10 до 500 °К. Через исследуемый образец пропускается стабильный ток от прецизионного генератора тока и милливольтметром измеряется падение напряжения на исследуемом образце. Величина измерительного тока ограничивается джоулевым разогревом исследуемого образца и для проводника диаметром 0,1 – 0,3 мм ток не должен превышать десятков миллиампер.

Программа запускается двойным щелчком по ярлыку на «Рабочем столе» с названием «Уд_сопр_мет.» Появляется приветственное окно программы и предлагаются варианты дальнейших действий. Управление программой происходит по обычным принципам управления, принятой в операционной системой Windows. В случае желани продолжать выполнение лабораторной работы во вновь появившемся окне следует по указанию преподавателя щелчком левой кнопки мыши по соответствующей закладке выбирать образец для исследования.

Для перехода к измерениям следует использовать кнопку «**К измерениям**». При этом появляется окно с виртуальной установкой (рис. 5) для исследования зависимости удельной электропроводности от температуры. Необходимо щелчком левой кнопки по изображению тумблеров включить все приборы и следовать перечисленным ниже пунктам.

2.1.1. Установить на «Цифровом задатчике тока» величину тока для исследования по указанию преподавателя путем ввода в соответствующие окна необходимых значений или использования элементов управления «инкремент – декремент» у соответствующих окон.

2.1.2. По указанию преподавателя установить параметры исследуемого образца в соответствующем разделе виртуального стенда. Здесь же можно установить процентный состав исследуемого сплава.

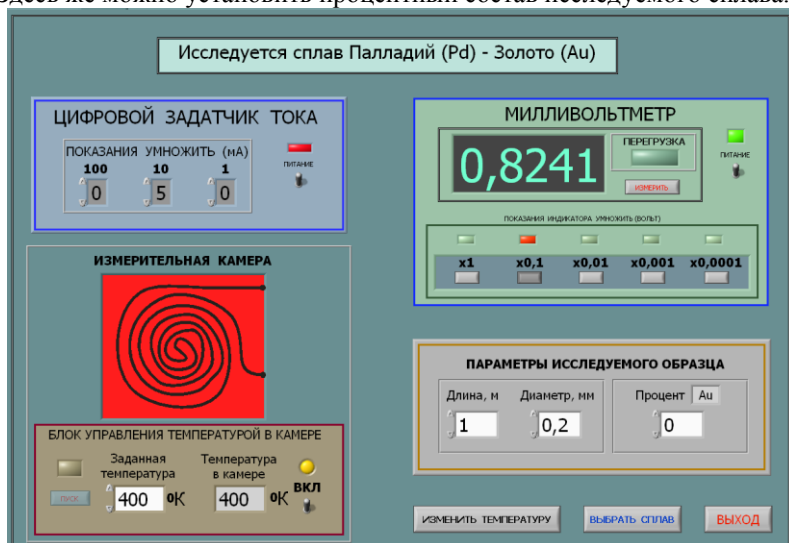


Рис.5. Окно виртуальной установки для исследования

2.1.3. Задать необходимую температуру в камере. Для этого щелкнуть по кнопке **«Изменить температуру»** и в **«Блоке управления температурой в камере»** задать температуру путем прямого ввода данных в окно **«Заданная температура»** или используя элементы управления **«инкремент - декремент»**. После этого используя кнопку **«Пуск»**, запустить процесс изменения температуры. Дождаться выхода измерительной камеры на нужную температуру и после этого можно переходить к измерениям.

2.1.4. Для проведения измерений достаточно щелкнуть на передней панели милливольтметра по кнопке **«Измерить»** и зафиксировать полученные значения напряжения на образце. После этого необходимо определить сопротивление образца и по его размерам рассчитать удельное сопротивление.

3. Порядок выполнения лабораторной работы

3.1. Получить у преподавателя задание на тип исследуемого металлического сплава и диапазон температур для исследования.

3.2. Запустить файл с программой и выбрать заданный сплав для исследования (раздел 2.1).

3.3. Перейти в окно виртуальной исследовательской установки, включить все приборы и с учетом раздела 2.1 приступить к выполнению работы.

3.4. Установить необходимые значения размеров исследуемого образца, процентное содержание компонентов в сплаве, величину тока, температуру в измерительной камере (раздел 2.1.3 и щелкнуть по кнопке **«Измерить»**. В процессе измерения необходимо выбирать оптимальный диапазон шкалы прибора.

3.5. Рассчитать удельное сопротивление образца и занести его значение в таблицу с указанием температуры образца и концентрации компонентов.

3.6. Построить графическую зависимость удельного сопротивления исследованных образцов от температуры.

3.7. Построить графическую зависимость удельного сопротивления исследованных образцов от процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре.

3.8. Оформить полученные результаты в виде таблиц и графиков.

4. Содержание отчета

- 1) Наименование работы.
- 2) Цель работы.

- 3) Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).
- 4) Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
- 5) Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными [5].

5. Контрольные вопросы

Каковы основные отличия проводниковых материалов от непроводниковых?

Какая структура наиболее характерна для металлов и сплавов?

Какой тип химической связи характерен для металлов?

Какие типы пространственных кристаллических решеток наиболее характерны для металлов и сплавов?

Объясните используемую методику измерения зависимости удельного сопротивления проводниковых материалов от температуры и процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре.

Объясните физическую природу зависимости удельного сопротивления проводниковых материалов от температуры и процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре

Обоснуйте правильность (ошибочность) полученных экспериментальных результатов.

Расскажите о применении проводниковых материалов (металлов и сплавов) в приборостроении, радиоэлектронике, медицине.

6. Библиографический список

1. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. - 383 с.

2. Игнатьева Т.А., Великодный А.Н., Саньков А.А. О температурной зависимости удельного сопротивления сплавов Mo-Re, Mo-Re-Nb// Вопросы атомной науки и техники. Серия: вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2004. (14), № 6. - С. 89-92.

3. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2014. – 84 с.

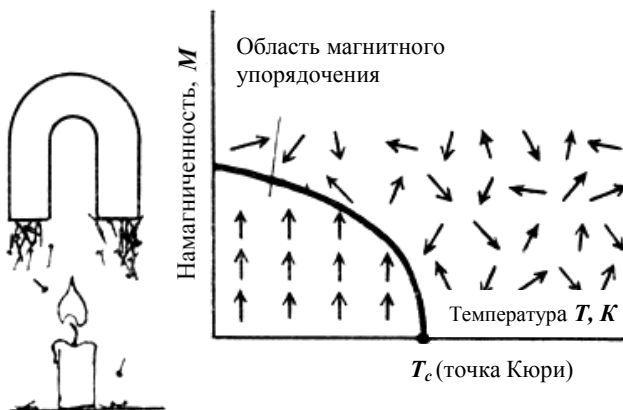
4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2013. – 96 с.

5. Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - М.: Энергия, 1974. - 583с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 7



УДК 621.382

Исследование свойств магнитных материалов: методические указания к лабораторной работе № 7/ сост.: С.И. Мальченко, Т.А. Холомина, М.В. Зубков, А.В. Логвин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; Рязань, 2016. 20 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов перемагничивания ферромагнетиков и явлениях возникновения потерь энергии в магнитных материалах. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего магнитные характеристики пермаллоя, а также виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл. 6. Ил. 11. Библиогр.: 4 назв.

Ферромагнетики, парамагнетики, магнитомягкие материалы, магнитные потери

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав.кафедрой Т.А.Холомина)

Исследование свойств магнитных материалов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
З у б к о в Михаил Владимирович
Л о г в и н Антон Валерьевич

Редактор М.Е.Цветкова
Корректор С.В.Макушина

Подписано в печать 15.11.16. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение свойств ферромагнитных материалов: построение основной кривой магнитной индукции в переменном поле; исследование зависимости магнитной проницаемости от температуры, напряженности и частоты магнитного поля, а также зависимости мощности потерь на вихревые токи и гистерезис от частоты.

1. Краткие теоретические сведения

Все вещества в природе являются магнетиками, т.е. обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств атомов, молекул и их групп.

Магнитные свойства атома в основном определяются магнитными свойствами электронов. Магнитный момент атомного ядра приблизительно в тысячу раз меньше магнитного момента электронной оболочки атома. Магнитный момент электрона возникает вследствие движения электрона по орбите (орбитальный момент) и наличия у него спина (спиновый момент). Магнитный момент многоэлектронного атома представляет собой сумму магнитных моментов всех электронов, включая как орбитальные моменты, так и спиновые.

В соответствии с современными представлениями о магнетизме различают следующие основные типы магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм (нескомпенсированный антиферромагнетизм). Вещества, в которых проявляются эти явления, называются слабомагнитными (*диамагнетики, парамагнетики антиферромагнетики*) либо сильномагнитными (*ферромагнетики и ферримагнетики*). Схематическое расположение моментов электронов атомов для разных по магнитным свойствам веществ иллюстрируется рис. 1.

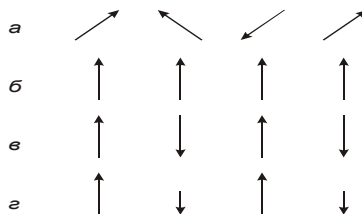


Рис. 1. Схематическое расположение спинов в парамагнитных (а), ферромагнитных (б), антиферромагнитных (в) и ферримагнитных (г) веществах. Диамагнетикам свойственна полная взаимная компенсация магнитных моментов атомов.

Основными магнитными параметрами вещества являются: намагниченность M , А/м; $M = \kappa \vec{H}$, где κ – магнитная восприимчивость; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м. Магнитная индукция B , Тл (тесла), характеризует суммарное магнитное поле внутри материала:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \kappa) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu_a \vec{H}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, численно равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, характеризующая магнитную проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная); $\mu_a = \mu_0 \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Отдельные классы магнетиков различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости, а также по характеру зависимости магнитных характеристик от температуры и напряженности магнитного поля.

Диамагнетиками называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов.

Физическая природа диамагнетизма основана на классическом представлении об атоме как системе электронов, движущихся вокруг ядра по определенным замкнутым траекториям-орбитам с некоторой угловой скоростью.

Атомная магнитная восприимчивость κ диамагнетиков имеет порядок $\kappa \approx - (10^{-6} - 10^{-5})$, т.е. соответствует величине, измеряемой экспериментально, и не зависит от температуры. Магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu \approx 0,99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Диамагнетизм является результатом прецессии всех электронов атомов и молекул, поэтому присущ всем веществам, но проявляется только в том случае, если не перекрывается более сильными пара- и ферромагнетизмом.

К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Mg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Парамагнетиками называются вещества, атомы которых обладают небольшими магнитными моментами обычно за счет нечетного количества валентных электронов. Поскольку все заполненные электронные оболочки имеют нулевой полный момент

количества движения, они обладают также нулевым полным магнитным моментом.

При обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления и суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием сильного внешнего магнитного поля и (или) низкой температуры создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, т.е. тело оказывается намагниченным, однако при обычных полях и температурах намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение $\kappa \sim (10^{-5} - 10^{-2})$, относительная магнитная проницаемость $\mu \approx \approx 1,001$.

На рис. 2, а показана зависимость намагниченности $M(H)$ для диа- и парамагнетиков при слабых полях и при обычных или высоких температурах. В обоих случаях значение M пропорционально H , что свидетельствует о независимости κ от H . Для намагничивания парамагнетиков до насыщения (рис. 2, б), т.е. до состояния, когда все элементарные магнитные моменты будут параллельны внешнему полю, требуется при комнатной температуре поле напряженностью примерно 10^{11} А/м, а при $T = 1$ К - примерно $3 \cdot 10^5$ А/м. Однако в последние годы выяснилось, что в парамагнетиках можно создать высокую намагниченность, не прибегая к сильным магнитным полям, а используя поток квантов света (оптическую накачку).

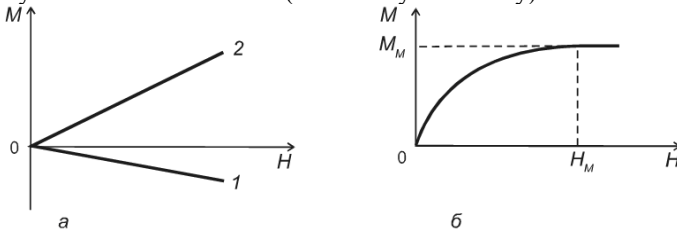


Рис. 2. Зависимость намагниченности M от напряженности магнитного поля H : а - для диамагнетиков (1) и парамагнетиков (2); б - для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

С повышением температуры при неизменной напряженности поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул, и поэтому намагниченность убывает. Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pb и др.

Парамагнетизм в атомах или ионах не существует в одиночку: одновременно с ним всегда имеют место и диамагнитные свойства. Поскольку оба эти эффекта противоположны друг другу по знаку, суммарные магнитные свойства материала определяются преобладающим. У большинства материалов величина парамагнитной восприимчивости значительно больше диамагнитной, т.е. парамагнетизм обычно преобладает над диамагнетизмом.

Парамагнитные вещества используются в качестве рабочих тел в квантовых парамагнитных усилителях и генераторах.

Антиферромагнетики — это вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, поэтому имеет место их взаимная компенсация. Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков мала и составляет $\kappa \approx (10^{-5} - 10^{-3})$. В слабых полях κ и μ практически не зависят от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных являются сложной функцией напряженности поля. В некоторой степени свойства антиферромагнетиков схожи со свойствами парамагнетиков. Пара- и антиферромагнитные вещества объединяют положительная магнитная восприимчивость и компенсация магнитных моментов атомов. Различие заключается в том, что спиновые моменты парамагнетиков ориентированы хаотически, а антиферромагнетиков — параллельно друг другу.

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn; многие окислы, хлориды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: MnO, MnCl₂, MnF₂, MnS₂ и др., аналогично на основе Fe, Co, Ni, Cr и др.

Ферромагнетиками называют вещества, характеризующиеся намагничиванием недостроенных внутренних оболочек атомов, поскольку магнитные моменты заполненных оболочек равны нулю, а внешние валентные электроны металла обобществлены. Такими элементами являются переходные металлы группы железа, имеющие недостроенную 3d-оболочку, и редкоземельные элементы с недостроенной 4f-оболочкой. Наличие магнитного момента у атомов обусловлено нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами, поскольку орбитальные магнитные моменты весьма малы.

Для ферромагнетиков энергетически выгодным в отсутствие внешнего поля является минимальное значение внутренней обменной

энергии, что соответствует параллельному расположению магнитных моментов соседних атомов внутри домена. Домен – это область сильномагнитного материала с суммарным магнитным моментом, складывающимся из элементарных параллельных магнитных моментов соседних атомов. Каждый домен состоит из миллионов элементарных ячеек с одинаковым направлением вектора, которые создают собственный магнитный момент домена. При этом магнитное поле вне кристалла уменьшается, в связи с чем энергия разделенного на домены монокристалла меньше, чем энергия однодоменного кристалла, что соответствует более устойчивому состоянию вещества с минимумом внутренней энергии. Суммарный магнитный момент всех доменных областей без приложения внешнего поля к ферромагнетику равен нулю. При внесении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно наблюдаются процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема).

В слабом поле происходит увеличение объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При отключении слабого маг-

нитного поля положение границ доменов восстанавливается, т.е. процесс носит обратимый характер. При усилении поля изменения структуры доменов более значительны, и

при отключении внешнего поля положение границ доменов не восстанавливается. Образуется остаточная индукция. При дальнейшем увеличении напряженности поля происходит изменение направления магнитного момента доменов от соответствующего оси легкого намагничивания к направлению, совпадающему с направлением внешнего поля. При этом магнитное состояние материала достигает

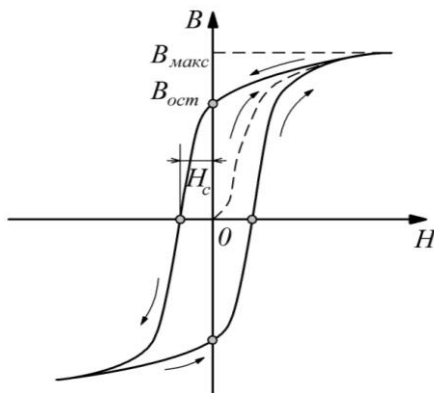


Рис. 3. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля ферромагнетиков (петля гистерезиса), (H_c – коэрцитивная сила; $B_{ост}$ – остаточная индукция)

технического насыщения. Поведение кривой $B(H)$ при циклическом изменении внешнего магнитного поля имеет характерный вид, называемый петлей магнитного гистерезиса, как показано на рис. 3.

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 4. Сплошная кривая, проходящая по вершинам частных петель гистерезиса, называется нормальной (или основной) кривой индукции.

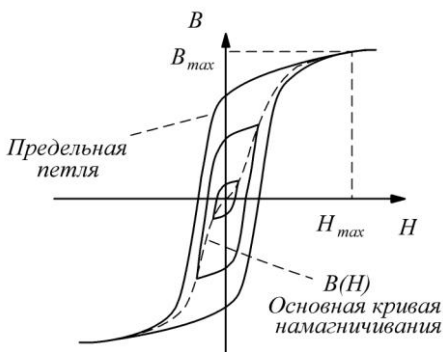


Рис. 4. Предельная петля гистерезиса и основная кривая намагничивания

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы поворота магнитных моментов некоторых доменов и задержка роста зародышей перемангничивания. Под ними понимают небольшие объемы вещества с самопроизвольной намагниченностью обратной по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Основ-

ными параметрами петли гистерезиса являются индукция насыщения B_S (B_{max}), остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_C и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемангничивания (рис. 3). Остаточной называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после отключения внешнего поля. Коэрцитивная сила — напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике.

По величине коэрцитивной силы различают магнитомягкие материалы с $H_C < 100$ А/м и магнитотвердые с $H_C > 10^4$ А/м.

Магнитную проницаемость вещества разделяют на абсолютную

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad (2)$$

и относительную (в дальнейшем слово “относительная” будем опускать)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (3)$$

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

На рис. 5 представлена зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от напряженности магнитного поля, построенная на основе результатов измерения основной кривой намагничивания материала и соотношения (3). При увеличении напряженности магнитного поля магнитная проницаемость растет, затем при достижении состояния насыщения (максимально возможного значения индукции) снижается вследствие того, что

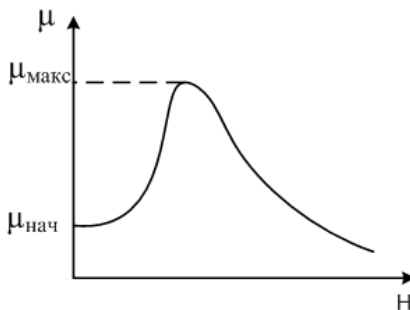


Рис. 5. Зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от напряженности магнитного поля

индукция магнитного поля [числитель в соотношении(3)] остается практически неизменной, а напряженность поля (знаменатель) продолжает расти. При подстановке в соотношение (3) конкретных значений B и H получают различные виды магнитной проницаемости, которые применяют в технике (свыше нескольких десятков). Начальная магнитная проницаемость характеризует возможность использования ферромагнетика в слабых магнитных полях.

Максимальная магнитная проницаемость определяет соответствующее значение индуктивности катушки при использовании материала в качестве сердечника. Так, например, типичное значение магнитной проницаемости для листовой электротехнической стали $\mu_{нач}=250 - 1000$, а $\mu_{макс}= 500 - 30000$. Максимальная магнитная проницаемость, например, магнитомягкого сплава супермаллоя (79 % никеля, 5 % молибдена и 16 % железа)

может достигать 10^5 .

Магнитная проницаемость сильномагнитных веществ зависит также от температуры и частоты магнитного поля [1,2].

Практический интерес представляет температурная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика. Характер этой зависимости оказывается неодинаковым для магнитной проницаемости, измеренной в слабых и сильных полях (рис. 6). Для начальной магнитной проницаемости наблюдается отчетливый максимум при температуре несколько ниже точки Кюри. Возрастание μ при повышении температуры обусловлено главным образом тем, что при нагревании ферромагнетика ослабевают силы, препятствующие смещению доменных границ и ориентации магнитных моментов доменов. Резкий спад магнитной проницаемости при температурах $T > T_K$ связан с резким уменьшением спонтанной намагниченности доменов вследствие перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние (рис. 1, а).

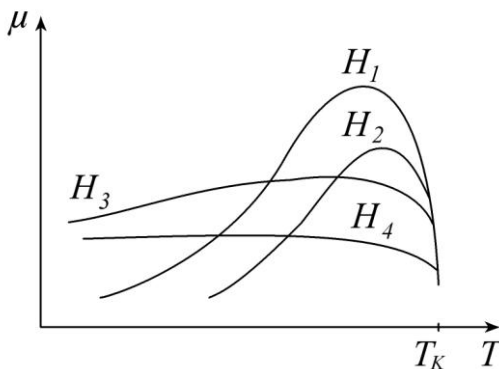


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от температуры при разной напряженности магнитного поля: $H_1 > H_2 > H_3 > H_4$

Снижение магнитной проницаемости с ростом частоты (рис.7) связывают с инерционностью процессов смещения доменных границ и увеличением мощности магнитных потерь [соотношения (4,5)] [1]. Видим, что с ростом начальной магнитной проницаемости снижается частота «спада» f , т.е. проявления инерционности процессов перемагничивания.

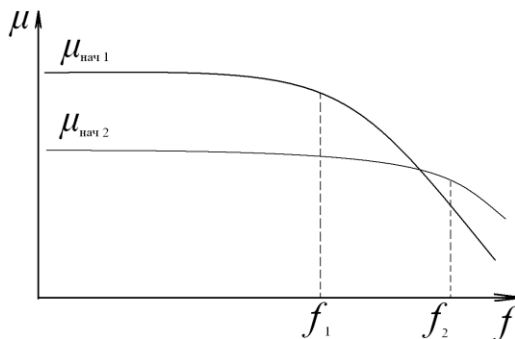


Рис.7. Зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от частоты

Ферримагнетиками (или нескомпенсированными антиферромагнетиками) называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, однако величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой.

К ферримагнетикам относятся ферриты, представляющие собой магнитную керамику, состоящую из смеси окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов. Структурная формула ферритов $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, где Me – двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и др.). Многие свойства ферримагнетиков качественно аналогичны свойствам ферромагнетиков, однако имеются и существенные различия. Например, ферримагнетики (ферриты) отличаются от ферромагнетиков меньшей величиной индукции насыщения и имеют более сложную температурную зависимость основных магнитных параметров.

Преимущества ферритов при работе в ВЧ- и СВЧ-диапазонах обусловлены тем, что их удельное электрическое сопротивление в $10^6 - 10^{11}$ раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, так как они являются оксидными материалами, а не металлами. По значению удельного электрического сопротивления ρ они относятся к классу полупроводников или диэлектриков. Вследствие этого вихревые токи (и соответствующая мощность магнитных потерь) [соотношение (5)] в ферритах очень малы, и они применяются в качестве магнитного материала при частотах до сотен

мегагерц, тогда как металлические магнитные материалы применяются при частотах до нескольких десятков мегагерц.

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферромагнетиков ниже, чем у ферромагнетиков, и достигают значений нескольких десятков тысяч.

При перемагничивании сильномагнитных материалов в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые *потери энергии*. Они складываются из потерь на гистерезис и динамических потерь. В свою очередь, динамические потери включают в себя потери на вихревые токи и магнитное последствие. Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_2 = \frac{f \oint H dB}{D}, \quad (4)$$

где f – частота тока; D – плотность материала; $\oint H dB$ – площадь петли гистерезиса. Для снижения потерь на гистерезис применяют магнитомягкие материалы, для которых характерна узкая петля магнитного гистерезиса.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_{\text{в.т.}} = \frac{f^2 B_{\text{макс}}^2 d^2 \eta}{D \rho}, \quad (5)$$

где η – коэффициент формы; d – толщина материала; $B_{\text{макс}}$ – максимальная индукция, достигаемая в начале цикла; ρ – удельное сопротивление материала. Следует подчеркнуть, что мощность потерь на гистерезис (перемагничивание) увеличивается пропорционально частоте, а на вихревые токи – пропорционально квадрату частоты электромагнитного поля.

В цепях переменного тока рассеяние мощности в катушках индуктивности иногда оценивают тангенсом угла магнитных потерь

$$\text{tg} \delta_M = \frac{r}{\omega L}, \quad (6)$$

где L – индуктивность катушки; r – сопротивление, эквивалентное всем видам потерь мощности в магнитном материале.

Частотный диапазон применения магнитных материалов в значительной степени определяется величиной их удельного сопротивления и значением магнитной проницаемости. Для сердечников катушек индуктивности и трансформаторов применяют металлические магнитомягкие материалы (железо, пермаллой). На высоких и сверхвысоких частотах применяют ферриты и

магнитодиэлектрики, обладающие высоким удельным сопротивлением и малым значением коэрцитивной силы. Для изготовления постоянных магнитов, устройств длительного хранения звука, изображения используют магнитотвердые материалы.

2. Описание методики измерений

В лабораторной работе предусмотрено два варианта выполнения. В первом случае это реальная лабораторная установка с образцом магнитного материала – сплавом пермаллой. С помощью осциллографического метода исследуются магнитные характеристики пермаллоя – основная кривая намагничивания, зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля и частоты, а также частотная зависимость мощности магнитных потерь. Во втором случае лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения магнитных свойств вещества на виртуальном стенде. Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В программу заложены модели характеристик ряда магнитных материалов и их зависимости от параметров внешнего магнитного поля.

2.1. Выполнение лабораторной работы с помощью осциллографического метода

Изучение ферромагнитных материалов производится с помощью установки, принципиальная схема которой приведена на рис. 8.



Рис. 8. Принципиальная схема установки для измерения параметров магнитных материалов в переменных магнитных полях

Здесь M – исследуемый образец из ферромагнитного материала (пермаллой); R_0 – образцовое сопротивление, $R_0=30$ Ом; r – сопротивление фазовращателя, $r=220000$ Ом; C – конденсатор фазовращателя, $C = 10^{-6}$ Ф; 2, 3 и 3, 4 – горизонтальный и

вертикальный входы осциллографа соответственно, 1 – вход сигнала с генератора .

Отклонение луча осциллографа по горизонтали пропорционально падению напряжения на R_0 (рис. 8), которое, в свою очередь, пропорционально величине намагничивающего тока.

Так как отклонение луча по горизонтали пропорционально приложенному напряжению, величину отклонения можно выразить в единицах измерения напряженности поля H . Масштаб по горизонтали определяется по формуле

$$h = \frac{\sqrt{2}U_0 n_1}{\pi r_{cp} R_0 x_0}, \quad (7)$$

где x_0 – расстояние по горизонтали между вершинами гистерезисного цикла, м; U_0 – падение напряжения на R_0 ; n_1 – число витков первичной обмотки испытуемого образца; r_{cp} – средний радиус тороида, м.

Магнитная индукция B пропорциональна выходному напряжению $U_{вых}$, измеренному между точками 3 и 4 вертикального входа усилителя осциллографа. Можно проградуировать отклонение луча по вертикали в единицах измерения магнитной индукции.

Масштаб по вертикальной оси экрана осциллографа

$$b = \frac{2\sqrt{2}U_{вых} r \cdot C}{n_2 S \cdot y_0}, \quad (8)$$

где y_0 – расстояние между вершинами гистерезисного цикла по вертикали, м.

Данные испытываемого образца:

$r_{cp} = 1,9 \cdot 10^{-2}$ м – средний радиус образца;

$D = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ – плотность материала образца (пермаллой);

$n_1 = 1200$ – число витков первичной обмотки;

$n_2 = 800$ – число витков вторичной обмотки;

$S = 0,42 \cdot 10^{-4}$ м² – площадь сечения.

Описание методики измерений

Установить регулятор выходного напряжения генератора на нуль.

Выключить внутреннюю нагрузку генератора, а выходное сопротивление поставить на 6000 Ом. Установить частоту 50 Гц. Включить генератор и осциллограф. Рукояткой регулятора выходного напряжения генератора повысить напряжение и довести образец до насыщения, когда с ростом напряженности магнитного поля не наблюдается значительного увеличения магнитной индукции.

Регулировкой усиления по горизонтали и вертикали на осциллографе установить гистерезисную кривую так, чтобы размеры x и y между вершинами гистерезисной петли по горизонтали и вертикали были целочисленными в масштабной сетке используемого осциллографа, а сама петля гистерезиса занимала максимальную площадь на экране, что повышает точность измерений. При использовании осциллографа С1 – 64А размер петли – 8 на 8 клеток. В дальнейшем положение ручек усиления изменять нельзя до окончания всех измерений.

Градуировка осей осциллографа

Отключить осциллограф и генератор от схемы. Включить внутреннюю нагрузку генератора, выходное сопротивление поставить на 600 Ом. Соединить выход генератора с горизонтальным входом осциллографа. Рукояткой регулятора выходное напряжение генератора повысить так, чтобы максимальное отклонение луча соответствовало расстоянию между вершинами гистерезисной петли по горизонтали, полученной в режиме насыщения. Отметить напряжение по вольтметру генератора. Это напряжение равно U_0 в формуле (7).

Градуировку вертикальной оси произвести аналогичным образом с тем отличием, что напряжение с генератора подается на вертикальный вход осциллографа. Изменяя напряжение на выходе генератора, необходимо добиться отклонения луча по вертикали на экране осциллографа, соответствующего расстоянию между вершинами гистерезисной петли в режиме насыщения. Это напряжение $U_{\text{вых}}$ подставить в формулу (8) для расчета масштаба по вертикальной оси.

Определение потерь в образце ферромагнитного материала

Восстановить схему и зарисовать гистерезисную петлю на кальку. Удельные потери в образце за один период можно определить по формуле

$$W = \frac{P}{f} = \frac{Shb}{D}, \quad (9)$$

где: P – потери в образце; S – площадь гистерезисной петли; D – плотность материала образца.

То же самое повторить для частот 100, 200, 300, 400 Гц. При этом с помощью регулятора напряжения генератора поддерживают постоянной напряженность магнитного поля таким образом, чтобы расстояние между вершинами петли гистерезиса по горизонтали оставалось неизменным при изменении частоты и соответствовало 8 на 8 клеток.

Результаты наблюдений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

Материал	f , Гц	S , м ²	W , Дж/кг	P , Вт/кг	P_g , Вт/кг	$P_{вт}$, Вт/кг

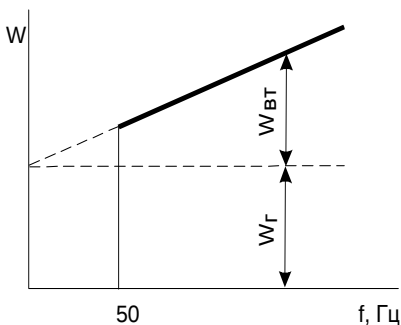


Рис. 9. Графический способ разделения удельных магнитных потерь на составляющие:

$W_{вт}$ - удельные потери на вихревые токи;

W_g - удельные потери на гистерезис

пропорциональна частоте, характеризует потери на вихревые токи (рис. 9). Построив по экспериментальным данным зависимость W от частоты, можно разделить удельные потери на W_g и $W_{вт}$, после чего определить потери на гистерезис и вихревые токи при различных частотах

$$P_g = W_g \cdot f; \quad (10)$$

$$P_{вт} = W_{вт} \cdot f. \quad (11)$$

Определение точек основной кривой индукции и магнитной проницаемости

С помощью регулятора выходного напряжения генератора постепенно увеличить напряженность магнитного поля от нуля до максимального значения. При этом необходимо выбрать не менее пяти значений напряженности магнитного поля, т.е. фиксировать значения x (расстояния по горизонтали между вершинами

По данным таблицы построить зависимость $W(f)$. Известно, что величина мощности потерь на гистерезис в ферромагнитном материале $P_g \sim f$, а на вихревые токи $P_{вт} \sim f^2$. Поэтому та часть **удельных** потерь, которая от частоты не зависит, характеризует потери на гистерезис, а часть **удельных** потерь, которая пропор-

гистерезисного цикла), и точно измерять y (расстояние по вертикали).
Определить

$$H = hx \text{ и } B = by.$$

Повторяют измерения для частот 100, 200, 300, 400 Гц. Измерения при фиксированных значениях H позволяют получить частотные зависимости B и μ .

Относительную магнитную проницаемость определяют по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{by}{\mu_0 \cdot hx} = a \cdot \frac{y}{x}, \quad (12)$$

где $a = \frac{b}{\mu_0 \cdot h}$ - постоянная, равная отношению масштабов по вертикали и горизонтали с учетом магнитной постоянной μ_0 . Экспериментальные и расчетные данные заносят в табл. 2.

Таблица 2

Материал	f , Гц	x , м	y , м	H , А/м	B , Тл	μ

Задание для выполнения лабораторной работы с помощью осциллографического метода

1. Произвести градуировку осей осциллографа.
2. Определить потери в образце пермаллоя при частотах 50, 100, 200, 300, 400 Гц.
3. Измерить и построить основную кривую индукции на частотах 50, 100, 200, 300, 400 Гц.
4. Рассчитать значение магнитной проницаемости, построить зависимости $B(f)$ и $\mu(f)$ при фиксированном значении напряженности магнитного поля.
5. Определить начальную и максимальную магнитные проницаемости и значение коэрцитивной силы ферромагнетика.

2.2. Выполнение лабораторной работы на персональном компьютере

Измерение параметров магнитных материалов осуществляется по внешнему виду петли гистерезиса – зависимости индукции магнитного поля (B , Тл) от величины его напряженности (H , А/м).

Для начала работы необходимо запустить файл «магнитные материалы» на рабочем столе ПК. После запуска файла появится окно, изображенное на рис. 10, а.



а б

Рис. 10. Вид окна начала работы (а) и выбора материала (б)

Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопок управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 10, б. Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлено описание и некоторые характеристики выбранного магнитного материала. После щелчка по кнопке «К измерениям» программа переключается на режим измерения параметров магнитного материала по параметрам петли гистерезиса. На экране отображается окно специализированного измерительного стенда, как показано на рис. 11.

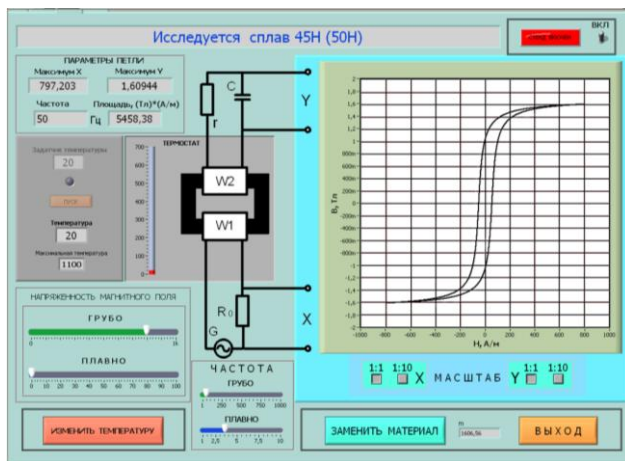


Рис. 11. Окно измерительного стенда

3. Проведение измерений

В окне измерительного стенда отображаются осциллограф, измерительная камера с образцом магнитного материала и элементы управления стендом. Здесь же отображается схема подключения исследуемого образца материала и основные параметры петли гистерезиса.

Необходимо включить стенд щелчком по тумблеру «Вкл». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 °С.

Измерение параметров сильномагнитного материала необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя движок на шкале грубого и плавного изменения частоты (обычно шаг плавного изменения составляет 1 Гц).

2. Изменяя напряженность магнитного поля движками «Грубо» и «Плавно», получить на графопостроителе нужный вид петли гистерезиса. В левом верхнем углу при этом отображаются координаты максимальных значений частной петли, ее площадь и частота изменения внешнего магнитного поля. Для изменения масштаба отображения петли гистерезиса можно использовать соответствующие кнопки на графопостроителе.

3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру», в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и продолжить измерения.

4. Изменяя значение напряженности внешнего магнитного поля, вновь произвести соответствующие измерения параметров петли гистерезиса. При необходимости изменить частоту и температуру в соответствии с пп. 1 и 3 данного раздела.

5. При необходимости выбрать другой магнитный материал используют кнопку «Заменить материал».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного магнитного материала в указанном диапазоне температур и частот.

2. Построить начальную кривую намагниченности на заданной частоте при температуре 20 °С. Для этого установить нужную частоту внешнего магнитного поля и, постепенно увеличивая его напряженность, занести значение координат В и Н в табл. 3, которая приведена далее. По координатам конечных точек петли гистерезиса

рассчитать относительную магнитную проницаемость μ .

Таблица 3

H , А/м				
B , Тл				
μ				

3. Построить график зависимости $B = f(H)$. Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости от величины напряженности магнитного поля, используя соотношение $\mu = B/(\mu_0 H)$. Используя кнопки изменения масштаба на графопостроителе, определить значение коэрцитивной силы H_C для исследуемого материала при максимальном значении напряженности магнитного поля.

4. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от частоты внешнего магнитного поля. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменяя частоту и поддерживая постоянное значение B изменением H , занести данные в табл. 4.

Таблица 4

f , Гц				
H , А/м				
B , Тл				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости от частоты.

5. Исследовать зависимость потерь в материале от частоты магнитного поля. Для этого устанавливать и поддерживать постоянным при изменении частоты значение индукции магнитного поля по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменить частоту и занести полученные значения площади гистерезисной кривой в табл. 5.

Таблица 5

f , Гц				
S , (Тл·А/м)				

6. Рассчитать удельные потери в образце и построить график зависимости удельных потерь в материале от частоты. Удельные

потери (Вт/кг) определяют делением площади петли гистерезиса на плотность вещества с учетом значения частоты изменения магнитного поля.

7. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от температуры на заданной частоте. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца) и поддерживать ее неизменной. Изменять температуру в соответствии с п. 3 раздела 2.2 методического указания и занести полученные значения координат B и H в табл. 6.

Таблица 6

$T, ^\circ\text{C}$				
$H, \text{А/м}$				
$B, \text{Тл}$				
μ				

8. Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости μ ферромагнитного материала от температуры.

5. Содержание отчета

1. Номер работы и ее название.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения, включающие основные понятия, расчетные соотношения и схему измерения.
4. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц и графиков.
5. Сравнение полученных результатов с данными литературы и их критическая оценка.

6. Контрольные вопросы

1. Расскажите о физической природе ферромагнетизма.
2. Назовите основные характеристики ферромагнитных материалов, объясните методы их определения.
3. Какие процессы наблюдаются в материале в различных точках основной кривой намагниченности ферромагнетика?
4. Расскажите об использовании в вычислительной и электронной технике магнитомягких, магнитотвердых материалов. Приведите примеры.
5. Как получают ферриты? Каковы их основные свойства, достоинства и недостатки, области применения?

6. Какими свойствами сильномагнитных материалов определяется возможный частотный диапазон их применения?

7. Дайте определение критической, граничной частоты феррита.

8. Расскажите о потерях в магнитных материалах. От каких факторов они зависят?

9. Расскажите о практических мерах, используемых для снижения потерь на гистерезис и вихревые токи в сильномагнитных материалах.

10. Каковы свойства и области применения тонких ферромагнитных пленок?

11. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от напряженности магнитного поля и объясните физическую природу.

12. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от частоты магнитного поля и объясните физическую природу.

13. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от температуры и объясните физическую природу.

14. Приведите примеры маркировки магнитомягких и магнитотвердых материалов.

15. Расскажите об основных видах магнитной проницаемости.

16. Поясните физический смысл температурного коэффициента магнитной проницаемости.

17. Расскажите о применении в электронной технике магнитоstrictionных материалов.

18. Расскажите о применении в электронной технике термомагнитных материалов и материалов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Библиографический список

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. С. 296-344.

2. Электрорадиоматериалы /под ред. проф. Б.М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978. С. 273–324.

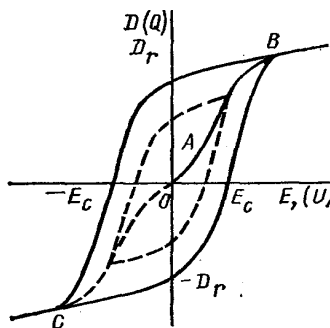
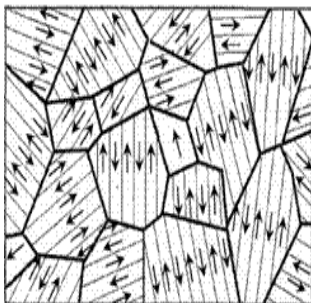
3. Холомина Т.А.,Зубков М.В. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2015. 48 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Материаловедение / под ред. Ю.М. Солдака: учеб.пособие. Рязань: РГРТУ, 2006. 160 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 5



Рязань 2016

УДК 621.382

Исследование свойств сегнетоэлектрических материалов:
методические указания к лабораторной работе № 5/ Рязан. гос.
радиотехн. ун-т; сост.: М.В.Зубков, Т.А.Холомина, С.И. Мальченко.
Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2016. 12 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов поляризации в сегнетоэлектрических материалах и температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего эффективную и реверсивную диэлектрическую проницаемости и точку Кюри в сегнетоэлектриках на переменном и постоянном напряжении.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл. 2. Ил. 7. Библиогр.: 5 назв.

Сегнетоэлектрики, домены, точка Кюри, вариконды

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и нанoeлектроники Рязанского
государственного радиотехнического университета (зав.кафедрой
Т.А.Холомина)

Исследование свойств сегнетоэлектрических материалов

Составители: З у б к о в Михаил Владимирович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович

Редактор М.Е. Цветкова

Корректор Н.А. Орлова

Подписано в печать 10.11.16. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 0,75.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: исследование свойств сегнетоэлектрического материала с помощью осциллографа.

1. Краткие теоретические сведения

Сегнетоэлектриками называют материалы, у которых наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризация. Она возникает под действием внутренних процессов в диэлектрике, без влияния внешнего электрического поля, т.е. полностью определяется внутренней структурой вещества.

По типу химической связи и физическим свойствам все кристаллические сегнетоэлектрики принято подразделять на две большие группы: ионные сегнетоэлектрические кристаллы (сегнетоэлектрики типа смещения) и дипольные сегнетоэлектрические кристаллы (упорядочивающиеся сегнетоэлектрики). Свойства ионных и дипольных сегнетоэлектриков существенно различаются.

Для структуры ионных сегнетоэлектриков характерно наличие кислородного октаэдра, благодаря чему эти сегнетоэлектрики называют сегнетоэлектриками кислородно-октаэдрического типа. Ионные сегнетоэлектрики имеют структуру элементарной ячейки типа перовскита. К ионным сегнетоэлектрикам относятся титанаты бария BaTiO_3 , свинца PbTiO_3 , ниобаты калия KNbO_3 , лития LiNbO_3 , танталат лития LiTaO_3 , йодат калия KIO_3 , барий-натриевый ниобат $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ и др.

К дипольным сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, триглицинсульфат $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COON} \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$, дигидрофосфат калия KH_2PO_4 , нитрит натрия NaNO_2 и др.

В материалах одного химического состава спонтанная поляризация может возникать и исчезать в зависимости от фазового состояния вещества и изменения температуры.

Рассмотрим механизм возникновения спонтанной поляризации на примере одного из наиболее важных сегнетоэлектриков – метатитаната бария BaTiO_3 . На рис. 1 представлена элементарная ячейка его кристаллической структуры при температуре выше 120°C .

При такой высокой температуре BaTiO_3 имеет кубическую решетку и интенсивное тепловое движение ионов препятствует возникновению спонтанной поляризации. При уменьшении температуры до 120°C (точка Кюри) возникает спонтанная поляризация, ион титана при этом приближается к одному из ионов кислорода, в связи с чем решетка деформируется, вытягиваясь вдоль той оси, по которой сместился ион титана. В точке Кюри при температуре 120°C происходит первый фазовый переход решетки из

кубической в тетрагональную, на зависимости $\varepsilon=f(T)$ при этом наблюдается максимум (рис. 2).

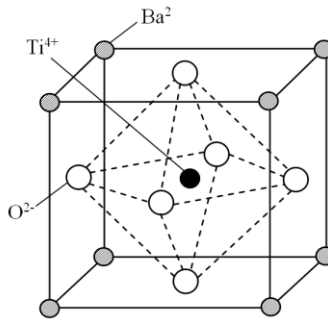


Рис. 1. Элементарная ячейка кристаллической структуры BaTiO_3

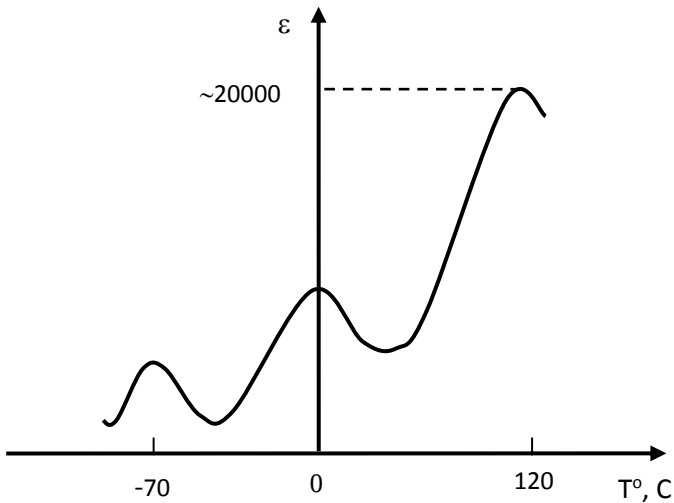


Рис. 2. Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости титаната бария

При дальнейшем охлаждении до температуры 0°C наблюдается второй фазовый переход из тетрагональной структуры в орторомбическую. Переход связан со смещением иона титана одновременно к двум ионам кислорода вдоль диагонали грани элементарной ячейки, которая в этом направлении удлиняется. При 0

$^{\circ}\text{C}$ вектор поляризации меняет направление, на зависимости $\varepsilon=f(T)$ наблюдается второй максимум.

При -70°C происходит следующий и последний фазовый переход, и решетка приобретает более низкую симметрию, моноклинную или триклинную. Этот переход обусловлен тем, что ион титана смещается одновременно к трем ионам кислорода вдоль объемной диагонали элементарной ячейки, причем вектор спонтанной поляризации опять меняет свое направление и ориентируется вдоль объемной диагонали, по которой сместились ионы титана. На зависимости $\varepsilon=f(T)$ наблюдается третий максимум.

При температурах выше точки Кюри спонтанная поляризация невозможна. В этом случае величина внутреннего поля очень сильно зависит от внешнего приложенного напряжения. Небольшое внешнее напряжение вызывает значительное смещение ионов титана и значительную электронную и ионную поляризацию. Поэтому при температурах выше точки Кюри, но вблизи от нее диэлектрическая проницаемость имеет высокое значение. С повышением температуры тепловое движение все больше препятствует направленному смещению ионов титана, в связи с чем диэлектрическая проницаемость резко уменьшается.

Взаимодействие между заряженными частицами соседних элементарных ячеек приводит к согласованному смещению ионов титана либо во всем объеме сегнетоэлектрика, либо в некоторых его областях, называемых доменами. Большие по размеру монокристаллы, а также поликристаллы разбиваются на домены. Каждый домен состоит из миллионов элементарных ячеек (рис.1) с одинаковым направлением вектора поляризации, которые создают собственный электрический момент домена. При этом электрическое поле вне кристалла уменьшается, в связи с чем энергия разделенного на домены монокристалла меньше, чем энергия однодоменного кристалла, что соответствует более устойчивому состоянию вещества с минимумом внутренней энергии. Суммарный электрический момент всех доменных областей без приложения электрического поля к сегнетоэлектрику равен нулю.

При помещении сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле наблюдается его поляризация, характеризующаяся нелинейной зависимостью значения электрической индукции D от значения напряженности электрического поля E (рис. 3).

Эта зависимость выражается кривой, аналогичной петле гистерезиса ферромагнитного материала, и сам процесс поляризации

также во многом идентичен процессу намагничивания ферромагнетика во внешнем магнитном поле.

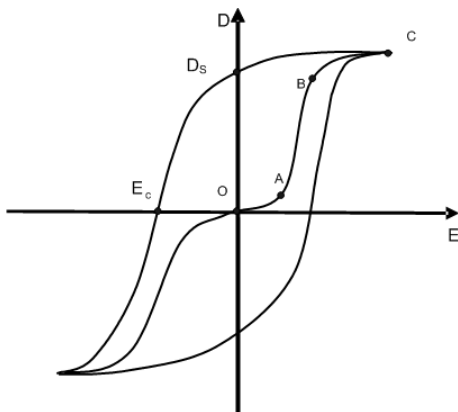


Рис. 3. Зависимость электрического смещения от величины внешнего электрического поля

При увеличении напряженности внешнего электрического поля за счет процессов смещения границ доменов, ориентации вектора электрического момента доменов, сегнетоэлектрик поляризуется до технического насыщения (кривая OABC). При уменьшении напряженности внешнего поля до нуля внутренняя индукция падает до величины D_s , которая называется остаточной. Если приложить поле, равное E_c , в противоположном направлении, поляризация (внутренняя индукция) обращается в нуль. Поле E_c называют коэрцитивным полем.

Для характеристики работы сегнетоэлектриков в различных режимах эксплуатации широко применяется понятие относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = D/\varepsilon_0 E$.

Наиболее часто используют понятие эффективной (или нормальной) диэлектрической проницаемости ε , начальной ε_n , максимальной $\varepsilon_{\max}$, дифференциальной $\varepsilon_{\text{диф}}$, а также реверсивной (или обратимой) диэлектрической проницаемости. Всего существует более 10 разновидностей диэлектрической проницаемости.

Проводя из начала координат прямые, пересекающие основную кривую поляризации в определенных точках, можно определить значения начальной и максимальной диэлектрической проницаемости. Тангенс угла наклона касательной на участке OA характеризует начальную диэлектрическую проницаемость (ε_n), а тангенс угла наклона прямой (касательной), проведенный из начала координат в точку верхнего перегиба кривой OABC (точку B, рис. 3), соответствует максимальной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\max}$. Проводя из начала координат прямые, пересекающие основную кривую поляризации OABC в различных точках и определяя

соответствующие значения тангенса угла наклона указанных прямых, можно построить зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля (рис.4).

Дифференциальную проницаемость $\epsilon_{\text{диф}}$ определяют как производную (дифференциал) от электрической индукции по напряженности электрического поля для любой точки основной кривой поляризации.

Понятие реверсивной диэлектрической проницаемости ϵ_r используется при разработке разделительных цепей электронных усилителей. Для измерения ϵ_r к сегнетоэлектрику прикладывают относительно большое постоянное напряжение (E_n) и малое переменное (δE – удвоенная амплитуда переменного сигнала), на котором определяют емкость конденсатора с сегнетоэлектриком (рис. 5). При приложении постоянного напряжения E_n отметим на кривой поляризации точку М. Если теперь на постоянное напряжение наложить переменное напряжение меньшей амплитуды, т. е. вначале увеличить напряжение на величину δE , а затем уменьшить до величины $E_n - \delta E$, то в процессе этого изменения зависимость D от E изобразится частной петлей гистерезиса. Проведем прямую через крайние точки этой петли, лежащие при $E_n + \delta E$ и $E_n - \delta E$. Угол наклона этой прямой α_r соответствует величине реверсивной диэлектрической проницаемости ϵ_r :

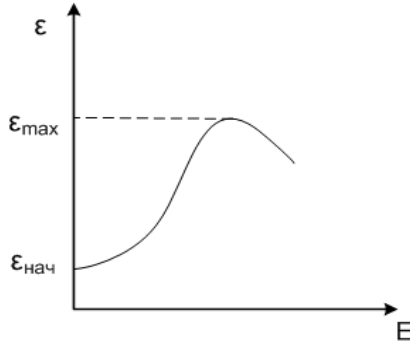


Рис.4. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля

$$\epsilon_p = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{m_D}{m_E} \cdot \operatorname{tg} \alpha_p. \quad (1)$$

Спонтанная поляризация находит широкое применение в радиоэлектронике. Благодаря форме петли гистерезиса (два устойчивых состояния +1 и -1), сегнетоэлектрики можно применять в запоминающих устройствах (ЗУ) ЭВМ.

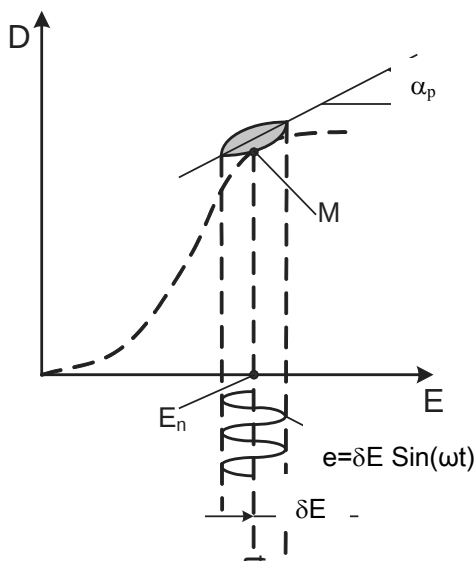


Рис. 5. Определение реверсивной диэлектрической проницаемости по частной петле гистерезиса

Основное требование в этом случае – наличие как можно более прямоугольной петли гистерезиса, что характерно, например, для монокристаллов триглицинсульфата. В отсутствие внешнего поля сегнетоэлектрик имеет два устойчивых состояния, соответствующих двум направлениям остаточной электростатической индукции. Подавая внешнее напряжение различной полярности, сегнетоэлектрик можно переводить из одного логического состояния в другое. На этом основаны запись, считывание и стирание информации. Считывание информации с сегнетоэлектрического ЗУ можно осуществлять, например, оптическим методом или измерением сопротивления тонкой полупроводниковой пленки, нанесенной на поверхность сегнетоэлектрика. Быстродействие сегнетоэлектрического ЗУ может составлять единицы микросекунд.

Существование в сегнетоэлектриках зависимости ϵ от напряженности электрического поля (рис. 4) приводит к аналогичной зависимости емкости сегнетоэлектрических конденсаторов от напряжения.

Такие конденсаторы называют варикондами и применяют в устройствах стабилизации частоты. Конструктивно вариконды

выполняют в виде плоских керамических конденсаторов. Одна из основных характеристик варикондов – коэффициент эффективной нелинейности, определяемый как отношение максимального значения диэлектрической проницаемости к начальному значению диэлектрической проницаемости. Численное значение указанного выше коэффициента может изменяться в пределах от 4 до 50.

Наличие доменной структуры и диэлектрического гистерезиса приводит к сверхвысоким значениям ε в сегнетоэлектриках (10^4 - 10^5). Это делает возможным создание малогабаритных конденсаторов большой удельной емкости. Зависимость ε сегнетоэлектриков от температуры (рис. 2) позволяет использовать их в качестве датчиков температуры. Многие сегнетоэлектрики являются одновременно и пьезоэлектриками.

Спонтанная поляризация сопровождается диэлектрическими потерями, при этом площадь петли диэлектрического гистерезиса пропорциональна мощности потерь. Поэтому практическое применение сегнетоэлектриков возможно только в диапазоне низких частот и в ограниченном интервале температур.

В настоящей работе рассматривается метод измерения эффективной и реверсивной диэлектрических проницаемостей нелинейного сегнетоэлектрического конденсатора с помощью осциллографа.

2. Описание установки и методики измерений

Измерение эффективной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика с помощью осциллографа

Исследование свойств сегнетоэлектриков производят на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 6.

Схема содержит следующие элементы: K1 – ключ, включающий питание установки; R1 – реостат для регулирования напряжения; V1 – вольтметр типа ВЗ – 39; R2, R3 – делители напряжения; C_x – испытуемый сегнетоэлектрический конденсатор; C_o – образцовый конденсатор; 1-2 – горизонтальный вход осциллографа; 3-2 – вертикальный вход осциллографа; 4, 5, 6 – зажимы для подключения вольтметра.

На горизонтальный вход осциллографа подается напряжение с R3, пропорциональное всему приложенному напряжению, которое распределяется между конденсаторами C_x и C_o обратно пропорционально емкости, т.е.

$$C_x/C_o = U_o/U_x, \quad (2)$$

где U_o – напряжение на образцовом конденсаторе; U_x – напряжение на испытуемом конденсаторе.

На вертикальный вход осциллографа подается напряжение с конденсатора C_o , пропорциональное его заряду.

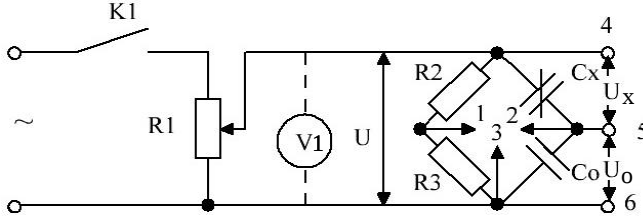


Рис. 6. Принципиальная схема установки для измерения емкости сегнетоконденсатора

Заряды на конденсаторах C_x и C_o равны, так как они включены последовательно.

Из формулы (2) определяется емкость испытуемого сегнетоконденсатора:

$$C_x = C_o U_o / U_x = Q_o / U_x. \quad (3)$$

По полученной осциллограмме можно определить горизонтальный масштаб напряжений m_U и вертикальный масштаб зарядов m_q :

$$m_U = 2U_x \sqrt{2/L_o}, \quad \text{В/дел.} \quad (4)$$

$$m_q = 2U_o C_o \sqrt{2/H_o}, \quad \text{Кл/дел.,}$$

где L_o и H_o – расстояние по горизонтали и вертикали гистерезисной кривой соответственно.

Зная масштабы зарядов и напряжений, можно при любых других значениях U определить заряды и напряжения на обкладках сегнетоконденсатора:

$$\begin{aligned} Q_M &= m_q H / 2, \\ U_{XM} &= m_U L / 2. \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда

$$C_x = m_q H / m_U L = m_c H / L. \quad (6)$$

Зная емкость сегнетоэлектрического конденсатора и его геометрические размеры, можно определить относительную диэлектрическую проницаемость:

$$C_x = \epsilon \epsilon_o S / h, \quad (7)$$

где $\epsilon_o = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; C_x – измеряемая емкость, Ф;

h – расстояние между обкладками конденсатора, м;

S – площадь обкладок конденсатора, м^2 .

Из соотношения (7):

$$\varepsilon = 0.113 C_x h \cdot 10^{12} / S. \quad (8)$$

Достоинство осциллографического метода измерения емкости сегнетоэлектрического конденсатора заключается в его простоте.

Измерение реверсивной диэлектрической проницаемости

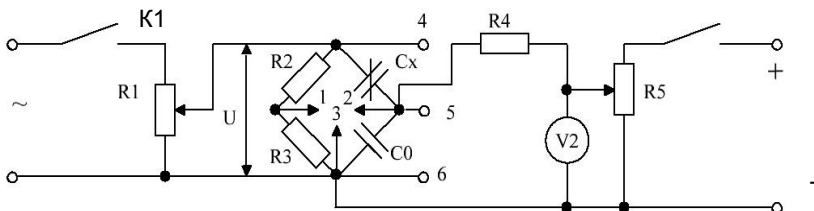


Рис. 7. Принципиальная схема установки для измерения реверсивной емкости сегнетоконденсатора

Измерение реверсивной диэлектрической проницаемости производится на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 7. Она отличается от схемы, приведенной на рис. 6, наличием регулируемого с помощью реостата $R5$ постоянного напряжения, которое подается на образцовый конденсатор через резистор $R4$. Постоянное напряжение измеряется вольтметром $V2$, который находится на панели лабораторного стенда.

Так как оба конденсатора C_0 и C_x в цепь постоянного тока включены параллельно, они находятся под одним напряжением.

При измерении реверсивной емкости следует придерживаться той же методики, что и при измерении эффективной емкости, увеличив усиление осциллографа и определив новые масштабы зарядов и напряжений.

3. Описание методики измерения

1. Собрать схему согласно рис. 6.
2. С помощью ключа $K1$ включить питание установки. Реостатом $R1$ установить напряжение U , равное 130 В по показанию вольтметра $V1$, подключив его к зажимам 4, 6 лабораторного стенда. С помощью рукоятки «Усиление» по горизонтали и по вертикали получить на экране трубки устойчивое изображение петли диэлектрического гистерезиса в пределах экрана осциллографа. Вольтметром измерить

напряжения U_0 и U_x на зажимах 5, 6 и 4, 5 и вычислить масштабы зарядов, напряжений и емкостей по формулам (4).

Таблица 1

U, В	L, дел	H, дел	U_{xm} , В	C_3 , Ф	ϵ_3	E_{xm} , В/м
130						
100						
70						
50						
30						

Рукоятки «Усиление» на осциллографе после определения масштабов не сдвигать!

С помощью реостата R1 изменить напряжение U в пределах от 130 до 30 В, как указано в табл. 1, при этом измерить L и H – расстояния по горизонтали и вертикали между вершинами гистерезисной кривой для каждого значения напряжения. Для удобства отсчета показаний рукоятки «Вертикальные пластины», «Горизонтальные пластины» осциллографа установить в положение «Закор.».

По формулам (6) и (8) определить значения C_3 и ϵ_3 . Расстояние между электродами конденсатора h , диаметр электродов d указаны на лабораторном стенде. Напряженность электрического поля рассчитывать по формуле

$$E_x = U_{xm}/h. \quad (9)$$

Все данные занести в табл. 1., по этим данным построить зависимость $\epsilon_3 = f(E_{xm})$.

Реостатом установить напряжение $U = 130$ В по вольтметру V1. На экране осциллографа добиться отчетливого изображения петли гистерезиса, не выходящей за пределы экрана трубки. Срисовать петлю на кальку и с помощью миллиметровой бумаги измерить ее площадь. Зная эту площадь, можно определить активную мощность, рассеиваемую в диэлектрике, и $\tan \delta$.

$$P = f m_U m_q G, \quad (10)$$

где f – частота сети, Гц;

G – площадь петли гистерезиса, мм^2 .

$$\tan \delta = 4F/\pi H L. \quad (11)$$

При вычислении значений P и $\tan \delta$ необходимо использовать величины m_q и m_U в тех же единицах, что и при вычислении по формуле (6).

3. Собрать схему согласно рис. 7.

Установить переменное напряжение 20 В реостатом R2 и изменять напряжение постоянного тока от нуля до 150 В, как указано в табл. 2.

Определить значения C_p и ε_p . Экспериментальные и расчетные данные свести в табл. 2.

Таблица 2

U, В	L, дел	H, дел	C_p , Ф	ε_p	E, В/м
0					
50					
100					
150					

Примечание. П. 4 выполняется по заданию преподавателя

4. Определить точку Кюри. Собрать схему согласно рис. 6. Сегнетоконденсатор поместить в ванну с минеральным маслом. Реостатом R1 установить напряжение 20 В. С помощью ручек «Усиление» по горизонтали и вертикали получить на экране изображение петли гистерезиса. Вольтметр V1 подключить к зажимам 5, 6 лабораторного стенда и установить предел измерения напряжения «1В». Включить нагревательную ванну и по термометру определить температуру, соответствующую максимальному напряжению вольтметра V1. Выключить установку.

4. Задание

1. Определить масштабы зарядов и напряжений m_q , m_u .
2. Определить активную мощность, рассеиваемую в сегнетоэлектрике P, и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$.
3. Определить значения ε_3 , C_3 при напряжениях $U=30-130В$. Результаты измерений и расчетные данные свести в табл. 1.
4. Построить зависимость $\varepsilon_3=f(E_{XM})$.
5. Измерить и построить зависимость реверсивной диэлектрической проницаемости ε_p сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля постоянного тока при неизменном напряжении переменного тока, т.е. $\varepsilon_p=f(E_0)$ при $E=const$. Результаты измерений и расчетные данные свести в табл. 2.
6. Определить точку Кюри.

5. Содержание отчета

1. Принципиальные схемы испытательных установок.
2. Результаты наблюдений и вычислений в виде таблиц, отдельных записей и кривых, а также формул, по которым производились расчеты.

3. Критическая оценка полученных результатов и сопоставление их с литературными данными.

6. Контрольные вопросы

1. Рассказать о физической природе спонтанной поляризации.
2. Объяснить процессы, обуславливающие поляризацию сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле.
3. Дать определение существующим видам диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков и объяснить методы их определения.
4. Объяснить зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от внешних факторов (напряженности поля, температуры, частоты).
5. Назвать основные сегнетоэлектрические материалы и охарактеризовать области их практического применения.
6. Охарактеризовать области практического применения прямого и обратного пьезоэффектов.
7. Чем отличаются нелинейные диэлектрики от линейных?
8. Каковы особенности диэлектрических свойств биологических объектов?
9. Каков принцип работы датчиков температуры на основе сегнетоэлектрических материалов?
10. Почему сегнетоэлектрические конденсаторы обладают высокой удельной емкостью?

Библиографический список

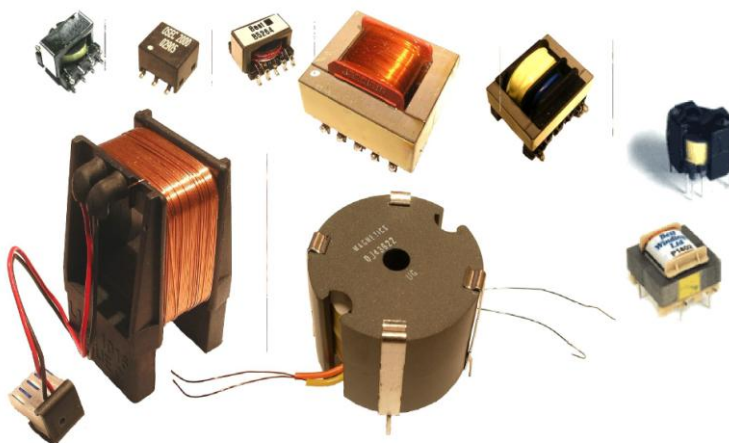
1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. С. 262-273.
2. Электрорадиоматериалы / под ред. Б.М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978. С. 208-225.
3. Материаловедение: учеб. пособие/ С.П. Вихров, Т.А. Холомина; под ред. Ю.М. Солдака. Рязань: РГРТУ, 2006. 160 с.
4. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие/ Т.А. Холомина, М.В. Зубков; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. - Рязань, 2015. 48 с.
5. Методические рекомендации по подготовке студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост. Т.А. Холомина, Е.Н. Евдокимова. Рязань, 2016. 16 с.

4700

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе



Рязань 2013

УДК 621.39

Исследование свойств ферромагнитных материалов: методические указания к лабораторной работе /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.:

С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, Т.А. Холомина. Рязань, 2013. 16 с.

Рассматривается лабораторная работа по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 1. Ил. 7. Библиогр.: 4 назв.

Магнитное поле, напряженность магнитного поля, индукция, магнитная проницаемость, магнитные потери, вихревые токи, ферромагнетики, ферриты

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Исследование свойств ферромагнитных материалов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

Редактор Н.А. Орлова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 20.09.13. Формат бумаги 60х84.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 120 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: определение точек основной кривой магнитной индукции в переменном магнитном поле, изучение зависимости магнитной проницаемости от напряженности и частоты магнитного поля, температуры, а также определение мощности потерь в зависимости от частоты, затрачиваемых на формирование вихревых токов и гистерезис.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Единицы магнитных величин и магнитных свойств веществ

В электромагнитных устройствах автоматики, вычислительной и измерительной техники воздействие на магнитный элемент производится либо магнитным полем тока, проходящего по проводнику или обмотке, либо непосредственно магнитным полем (например, в феррозондах) или магнитным полем, которое сконцентрировано металлическим сердечником. В большинстве случаев основой электромагнитных элементов служит магнитный сердечник. Формируемое током в проводнике магнитное поле является, обычно, внешним по отношению к этому сердечнику. Прежде чем перейти к природе магнитных свойств вещества, напомним единицы магнитных величин в Международной системе единиц (СИ).

Внешнее магнитное поле линейного проводника с током I характеризуется напряженностью H магнитного поля (А/м) и является силовой характеристикой магнитного поля.

Если проводник равномерно намотан с количеством витков w на ферромагнитный сердечник с одинаковым сечением S по всей его длине l (например, на кольцевой сердечник), то напряженность магнитного поля в сердечнике $H = Iw/l$.

Под действием протекающего через проводник тока в сердечниках магнитных элементов создается магнитный поток Φ .

Наряду с напряженностью магнитное поле характеризуется магнитной индукцией B (Тл), определяемой для равномерного поля выражением $B = \Phi/S$, где S – площадь, через которую проходит магнитный поток.

Магнитная постоянная μ_0 (магнитная проницаемость вакуума) представляет собой отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля в вакууме $\mu_0 = B/H$.

Напряженность внешнего магнитного поля не зависит от свойств среды (от свойств вещества), где создается магнитный поток. Магнитная же индукция определяется как напряженностью, так и свойствами среды (вещества), характеризующимися относительной магнитной проницаемостью μ (или просто магнитной проницаемостью), которая показывает, во сколько раз проницаемость вещества больше или меньше проницаемости вакуума.

Магнитная индукция в среде (упрощенно можно представить как магнитное поле внутри вещества)

$$B = \mu\mu_0 H, \quad (1)$$

где $\mu_0 = \mu_a$ – абсолютная магнитная проницаемость вещества.

1.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на пять групп: *диамагнетики*, *парамагнетики*, *ферромагнетики*, *антиферромагнетики* и *ферримагнетики*. Перечисленным видам магнетиков соответствуют пять различных видов магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

К *диамагнетикам* относят вещества, у которых магнитная восприимчивость отрицательна и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.). Большинство полупроводников (кремний, германий, соединения A_3B_5 , A_2B_6) и органических соединений, щелочно-галогидные кристаллы, неорганические стекла и др. также относят к диамагнетикам. Диамагнетиками являются все вещества с ковалентной химической связью и вещества в сверхпроводящем состоянии.

К *парамагнетикам* относят вещества с положительной магнитной восприимчивостью, не зависящей в слабых магнитных полях и при высоких температурах от напряженности внешнего магнитного поля. К числу парамагнетиков относят кислород, окись азота, щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

К *ферромагнетикам* относят вещества с большой положительной магнитной восприимчивостью (до 10^6), которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориен-

тация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании антиферромагнетик испытывает фазовый переход в парамагнитное состояние. Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе металлов типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и т.п.

К *ферримагнетикам* относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры. Наряду с этим ферримагнетики характеризуются и рядом существенных отличий от ферромагнитных материалов. Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но главным образом - различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

1.3. Намагничивание ферромагнитного материала

Под действием внешнего магнитного поля, созданного током в катушке, наложенной на магнитопровод из ферромагнетика, происходит процесс ориентации доменов в магнитопроводе и смещение их границ. Это приводит к намагничиванию стального магнитопровода (т.е. к росту величины внутреннего магнитного поля), причем намагниченность увеличивается с увеличением внешнего магнитного поля.

Намагниченность M (она характеризует магнитное поле внутри вещества) ферромагнитного материала растет только до определенного предельного значения, называемого намагниченностью насыщения M_s . Зависимость $B(H)$ является нелинейной и кривую $B(H)$ можно разделить на четыре участка:

1) практически линейный участок, соответствующий малым напряженностям поля, показывает, что магнитная индукция увеличивается относительно медленно и практически пропорционально напряженности поля;

2) нелинейный участок, на котором магнитная индукция B растет также практически пропорционально напряженности поля, но значительно быстрее, чем на начальном участке;

3) участок, который характеризует замедление роста величины индукции B ;

4) участок магнитного насыщения, где зависимость $B(H)$ снова линейная, но рост индукции B очень сильно замедлен по сравнению со

вторым. Магнитная индукция, которая соответствует намагниченности насыщения, называется *индукцией насыщения* B_s . Такая сугубо нелинейная зависимость объясняется «поведением» доменов ферромагнитного материала, обладающих спонтанной (самопроизвольной) намагниченностью.

При внесении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно наблюдаются процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема). В слабом поле происходит увеличение объема доменов, у которых магнитный мо-

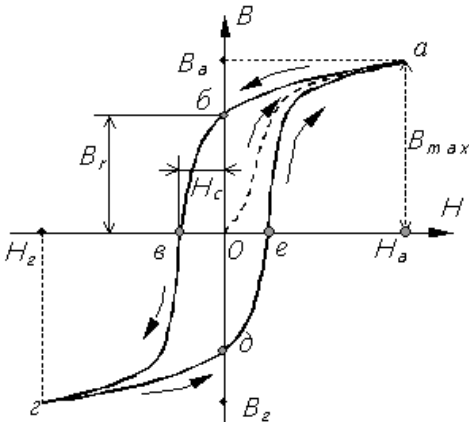


Рис. 1. График перемагничивания ферромагнетиков (петля гистерезиса)

мент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При снятии магнитного поля положение границ доменов восстанавливается, т.е. процесс носит обратимый характер. При усилении поля изменения структуры доменов более значительны и при снятии внешнего поля положение границ доменов не восстанавливается. Образуется остаточная индукция. При дальнейшем увеличении

напряженности поля происходит изменение угла вектора намагниченности доменов из направления вдоль оси легкого намагничивания в направление, совпадающее с направлением внешнего поля. При этом магнитное состояние материала достигает технического насыщения. Поведение кривой $B(H)$ при циклическом изменении внешнего магнитного поля имеет характерный вид, называемый петлей гистерезиса, как показано на рис. 1

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 2. Сплошная кривая, проходящая по вершинам петель, называется нормальной или основной кривой индукции.

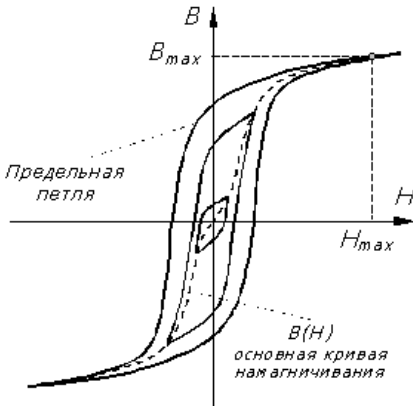


Рис. 2. Предельная петля гистерезиса

насыщения B_s ($B_{\max}$), остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания. Остаточной индукцией называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике. При относительно небольших затра-

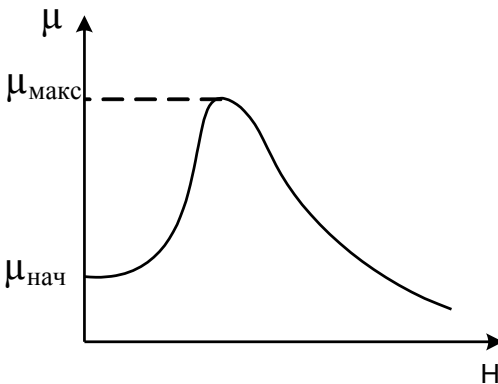


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы поворота магнитных моментов некоторых доменов и задержка роста зародышей перемагничивания. Под ними понимают небольшие объемы вещества с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Основными параметрами петли гистерезиса являются индукция

насыщения B_s ($B_{\max}$), остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания. Остаточной индукцией называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике. При относительно небольших затра-

тах энергии внешнего поля на перемагничивание петля гистерезиса узкая, величина коэрцитивной силы мала. При больших затратах энергии петля гистерезиса широкая и значение коэрцитивной силы большое. Соответственно различают магнитомягкие материалы с $H_c < 100$ А/м и магнитотвердые с $H_c > 10^4$ А/м.

Таким образом, зависимость магнитной индукции от напряженности поля у ферромагнитного материала достаточно сложная и не может быть выражена простой расчетной формулой. Поэтому при расчете магнитных цепей, содержащих ферромагнетики, применяют снятые экспериментально кривые намагничивания $B(H)$ магнитных материалов. Кривая намагничивания впервые была получена экспериментально в 1872 году профессором Московского университета А.Г.Столетовым. На рис. 3 показана зависимость магнитной проницаемости от величины напряженности внешнего магнитного поля

1.4. Процесс перемагничивания ферромагнетиков

Рассмотрим процесс перемагничивания ферромагнетиков. Допустим, что замкнутый магнитопровод из ферромагнитного материала не намагничен и тока в витках катушки нет, т.е. $B=0$ и $H=0$ (начало координат на рис. 1). При постепенном увеличении намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля от нуля до некоторого наибольшего значения магнитная индукция увеличивается по кривой начального намагничивания (Oa) и достигает соответствующего максимального значения B_a (рис. 1). Если затем ток и напряженность магнитного поля уменьшаются, то и магнитная индукция уменьшается, при соответствующих значениях напряженности магнитная индукция несколько больше, чем при увеличении напряженности. Кривая изменения магнитной индукции (участок ab на рис. 1) располагается выше кривой начального намагничивания. При нулевых значениях тока и напряженности поля магнитная индукция имеет некоторое значение B_r , называемое **остаточной индукцией** (отрезок Ob на рис. 1).

Таким образом, магнитная индукция в ферромагнитном материале зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется **гистерезисом**. Оно обусловлено как бы «внутренним трением», возникающим при изменении ориентации магнитных моментов доменов. При изменении направления намагничивающего тока, а следовательно, и направления напряженности магнитного поля и постепенном увеличении тока обратного направления напряженность поля достигает значения H_c , называемого **коэрцитивной силой** (отрезок Oe), при котором магнитная индукция $B=0$. При дальнейшем увеличении тока и напряженности поля магнитопровод намагничивается в противоположном направлении, и при напряженности поля $H_c = -H_a$ магнитная индукция достигнет значения $B_c = -B_a$. Затем при уменьшении тока и напряженности поля до нуля магнитная индукция B_0 становится равной $-B_0$. Наконец, при следующем изменении направления тока и напряженности

поля и увеличении ее до прежнего значения H_a магнитная индукция увеличится также до прежнего значения B_a .

Рассмотренный цикл перемагничивания ферромагнетика по кривой *абвгдеа* называется **гистерезисным циклом** (*петлей гистерезиса*). Такая симметричная замкнутая петля гистерезиса (рис. 2) получается в действительности только после нескольких перемагничиваний с увеличением напряженности магнитного поля до максимального значения. При первых циклах перемагничивания петля несимметричная и незамкнутая. Наибольшая замкнутая петля, которая может быть получена для данного ферромагнитного материала, называется *предельной* (рис. 2). При напряженности поля $H > H_{max}$ получается уже безгистерезисный участок кривой $B(H)$.

Если для данного ферромагнитного материала, выбирая различные наибольшие значения напряженности магнитного поля, получить несколько симметричных петель гистерезиса (рис. 2) и соединить вершины петель, то получим кривую, называемую **основной кривой намагничивания**, близкую к кривой начального намагничивания. Циклическое перемагничивание можно применить для размагничивания магнитопровода, т.е. для уменьшения остаточной индукции до нулевого значения. С этой целью магнитопровод подвергают воздействию изменяющегося по направлению и постепенно уменьшающегося магнитного поля.

1.5. Магнитная проницаемость

Магнитную проницаемость вещества разделяют на абсолютную

$$\mu_a = \frac{B}{H}$$

и относительную (в дальнейшем слово относительная будем опускать)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Подставляя в эти соотношения конкретные значения B и H , получают различные виды магнитной проницаемости, которые применяют в технике (свыше нескольких десятков).

Наиболее часто используют понятия магнитной проницаемости начальной $\mu_{нач}$, максимальной $\mu_{макс}$, эффективной $\mu_{эф}$ и дифференциальной $\mu_{диф}$. Для точки A рис. 4 магнитная проницаемость μ определяется как тангенс угла наклона секущей OA к оси абсцисс, т. е.

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha = \frac{B_A}{\mu_0 H_A}.$$

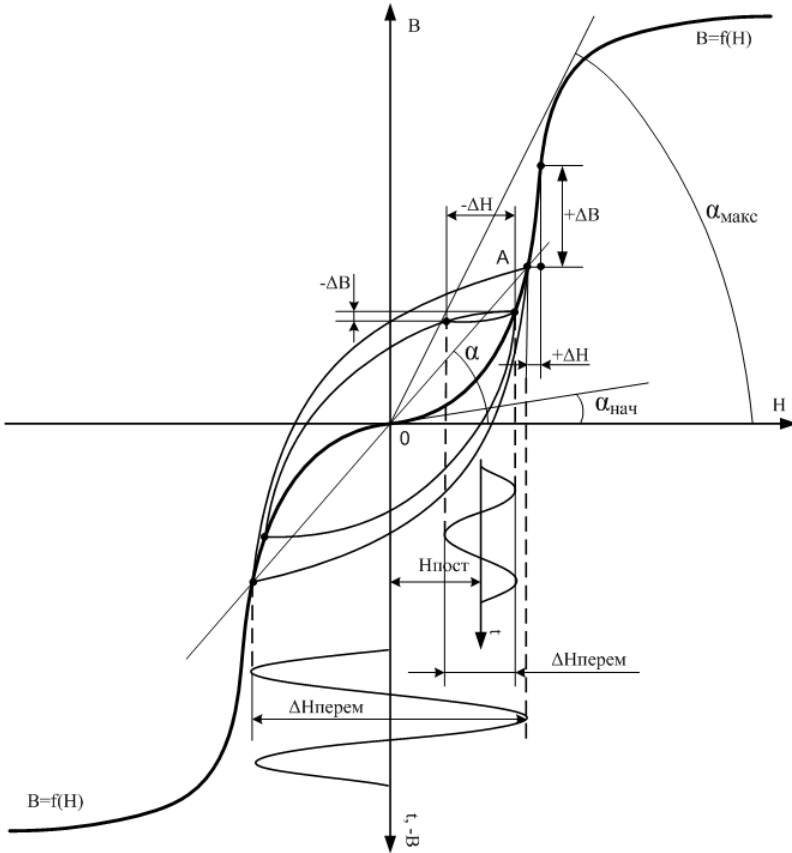


Рис. 4. Определение различных видов магнитной проницаемости

Это эквивалентно воздействию на магнитный материал синусоидального переменного магнитного поля величиной $\Delta H_{перем}$ без постоянной составляющей (рис. 4). В некоторых случаях такую проницаемость называют *эффективной*.

Начальная и максимальная проницаемости представляют собой частные случаи магнитной проницаемости вещества:

$$\mu_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = \operatorname{tg} \alpha_{нач} ;$$

$$\mu_{\max} = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H_{\max}} = \operatorname{tg} \alpha_{\max},$$

т. е. наклон касательной на начальном участке кривой $B = f(H)$ характеризует начальную проницаемость, а наклон прямой, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальному значению магнитной проницаемости.

Дифференциальную проницаемость $\mu_{\text{диф}}$ определяют как производную от магнитной индукции по напряженности магнитного поля для любой точки кривой намагничивания, т.е. она представляет собой тангенс угла наклона между осью абсцисс и касательной к кривой намагничивания в этой точке. Этот угол примерно будет соответствовать углу прямой, проведенной через две точки малого гистерезисного цикла при одновременном воздействии на образец постоянного $H_{\text{пост}}$ и переменного $\Delta H_{\text{перем}}$ магнитного полей (рис. 4) при условии, что выполняется соотношение $\Delta H_{\text{перем}} \ll H_{\text{пост}}$.

Как видно из графиков, магнитная проницаемость с ростом напряженности поля изменяется в весьма широких границах, что затрудняет ее применение для расчетов. На кривой $\mu = f(H)$ (рис. 3) отмечают два характерных значения магнитной проницаемости: начальная – $\mu_{\text{нач}}$ и максимальная – $\mu_{\max}$.

Начальная магнитная проницаемость характеризует возможность использования ферромагнетика в слабых магнитных полях. Максимальная магнитная проницаемость определяет верхнюю границу использования материала. Так, например, типичные значения магнитной проницаемости для листовой электротехнической стали $\mu_{\text{нач}} = 250 - 1000$, а $\mu_{\max} = 500 - 30000$.

1.6. Потери в магнитных материалах

При намагничивании магнитного материала переменным полем в нем возникают потери энергии, приводящие к нагреву материала. Петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемagnetивания, расширяется (увеличивает свою площадь) за счет возникновения различного вида потерь.

Потери на гистерезис P_H , отнесенные к единице объема материала (удельные потери) определяют по формуле

$$P_H = f \frac{\oint H dB}{\gamma},$$

где γ – плотность материала в кг/м^3 , f – частота в Гц.

Наряду с потерями на гистерезис P_H возникают и другие потери в магнитных материалах: *потери на вихревые токи* P_B и *дополнитель-*

ные потери P_D . Петлю гистерезиса на переменном поле называют динамической, а сумму составляющих потерь — полными или суммарными потерями.

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но также и от электрических свойств материала (удельного электрического сопротивления) и формы сердечника. Для листового образца потери P_B можно найти из выражения

$$P_B = \frac{164 d^2 f^2 B_{\text{макс}}^2 \eta}{\gamma \rho},$$

где $B_{\text{макс}}$ — амплитуда магнитной индукции, Тл;

f — частота переменного тока, Гц;

d — толщина листа, м;

γ — плотность материала в кг/м³;

ρ — удельное электросопротивление, Ом·м,

η — коэффициент формы.

Дополнительные потери нельзя рассчитать аналитически, их определяют обычно как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи:

$$P_D = P - (P_H + P_B).$$

2. Выполнение лабораторной работы

Испытание ферромагнитных материалов производится на установке, обобщенная схема которой приведена на рис. 5. Здесь M — испытываемый образец из ферромагнитного материала; R_0 — образцовое сопротивление; r и C — сопротивление и конденсатор фазовращательной цепочки. Соответственно 2 и 3 — горизонтальный и 3 — 4 вертикальный входы осциллографа или графопостроителя, 4 — 1 — вход сигнала с генератора. Отклонение луча осциллографа по горизонтали пропорционально падению напряжения на R_0 , которое, в свою очередь, пропорционально величине намагничивающего тока и, следовательно,

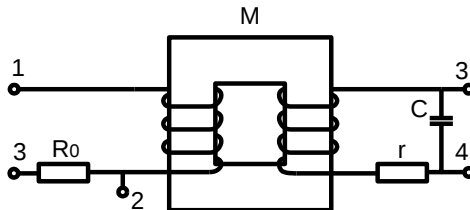


Рис. 5. Схема установки для испытания ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях

Для начала работы необходимо запустить файл «магн_матер» на рабочем столе ПК. После запуска файла появится окно, изображенное на рис. 6, а. Оно отображает название выполняемой лабораторной



работы и кнопок управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 6, б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлено описание и некоторые характеристики выбранного магнитного материала. После щелчка по кнопке «К измерениям» программа переключается на режим измерения параметров магнитного материала по параметрам петли гистерезиса. На экране отображается окно специализированного измерительного стенда, как показано на рис. 7.

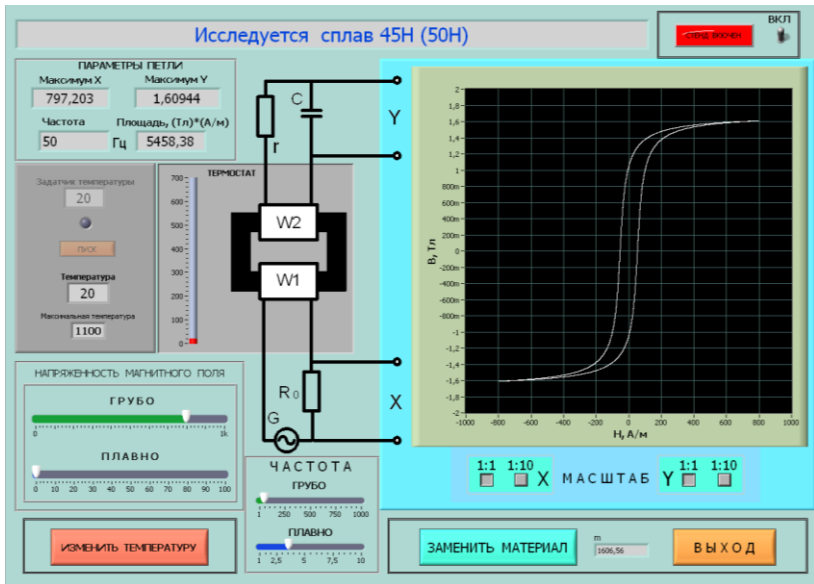


Рис. 7. Окно измерительного стенда

2.1. Проведение измерений

В окне измерительного стенда отображаются осциллограф, измерительная камера с образцом магнитного материала и элементы управления стендом. Здесь же отображается схема подключения исследуемого образца материала и основные параметры петли гистерезиса.

Необходимо включить стенд щелчком по тумблеру «Вкл». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20°C . Измерение параметров материала необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя движок на шкале грубого и плавного изменения частоты (обычно 1 Гц).
2. Изменяя напряженность магнитного поля, движками «Грубо» и «Плавно», получить на графопостроителе нужный вид петли гистерезиса. В левом верхнем углу при этом отображаются координаты максимальных значений частной петли, ее площадь и частота изменения внешнего магнитного поля. Для изменения масштаба отображения петли гистерезиса можно использовать соответствующие кнопки на графопостроителе.
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и продолжить измерения.
4. Изменяя значение напряженности внешнего магнитного поля, вновь произвести соответствующие измерения параметров петли гистерезиса. При необходимости изменить частоту и температуру в соответствии с пунктами 1 и 3 данного раздела.
5. При необходимости выбрать другой магнитный материал, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного магнитного материала в указанном диапазоне температур и частот.
2. Построить начальную кривую намагниченности на частоте 1 Гц при температуре 20 °С. Для этого установить нужную частоту внешнего магнитного поля и, постепенно увеличивая его напряженность, занести значение координат В и Н в таблицу, пример которой показан ниже. По координатам конечных точек петли гистерезиса рассчитать относительную магнитную проницаемость μ .

Н, А/м				
В, Тл				
μ				

Построить график зависимости $B = f(H)$. Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости от величины напряженности магнитного поля, используя соотношение $\mu = B/(\mu_0 H)$. Используя кнопки изменения масштаба на графопостроителе, определить значение коэрцитивной силы H_C для исследуемого материала при максимальном значении напряженности магнитного поля.

3. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от частоты внешнего магнитного поля. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменяя частоту и поддерживая постоянное значение B изменением H , занести данные в таблицу, пример которой показан ниже.

$F, \text{Гц}$				
$H, \text{А/м}$				
$B, \text{Тл}$				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости от частоты.

4. Исследовать потери в материале от частоты магнитного поля. Для этого устанавливать и поддерживать постоянным, при изменении частоты, значение индукции магнитного поля по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменять частоту и занести полученные значения площади гистерезисной кривой в таблицу, пример которой показан ниже.

$F, \text{Гц}$				
$S, (\text{Тл} \cdot \text{А/м})$				

Рассчитать удельные потери в образце и построить график удельных потерь в материале от частоты. Удельные потери (Вт/кг) определяют делением площади петли гистерезиса на плотность вещества с учетом частоты изменения магнитного поля (раздел 1.6.).

5. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от температуры на частоте 1 Гц. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца) и поддерживать ее неизменной. Изменять температуру в соответствии с пунктом 3 раздела 2.1 методического указания и занести полученные значения координат B и H в таблицу, пример которой показан ниже.

$T, ^\circ\text{C}$				
$H, \text{А/м}$				
$B, \text{Тл}$				
μ				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости μ от температуры.

4. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
 - название работы;
 - цель работы;
 - основные теоретические сведения;
 - схемы измерения;
 - полученные расчетные данные;
 - необходимые графики, требуемые по заданию.

5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные физические величины, характеризующие магнитные поля в вакууме и веществе.
2. Чем отличаются диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики?
3. Что такое «домен» ферромагнитного материала?
4. Объясните кривую намагничивания ферромагнетиков.
5. Чем объясняется техническое насыщение величины индукции в ферромагнитном материале?
6. Что такое «коэрцитивная» сила и «остаточная индукция»?
7. Как получается петля гистерезиса ферромагнитного материала?
8. Что такое частные гистерезисные циклы и как строится начальная кривая намагниченности?
9. Как относительная магнитная проницаемость зависит от величины напряженности магнитного поля?
10. Как относительная магнитная проницаемость зависит от частоты изменения напряженности магнитного поля?
11. Как относительная магнитная проницаемость зависит от температуры?
12. Что такое эффективная магнитная проницаемость и как она определяется?
13. Что такое реверсивная магнитная проницаемость и как она определяется?
14. Как определяется статическая и динамическая магнитные проницаемости?
15. Какие виды потерь различают в магнитных материалах и как они определяются?

Библиографический список

1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 350 с.
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 406 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.
4. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учебник для специальности «Полупроводники и диэлектрики» вузов. М.: Высш. школа, 1976. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

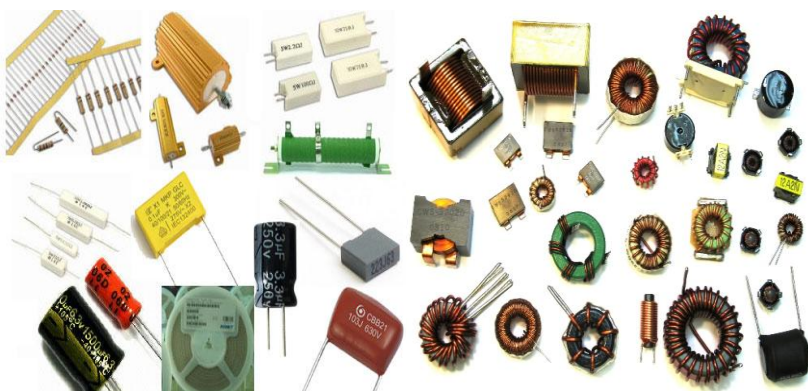
В таблице представлены параметры удельных потерь различных марок стали при промышленной частоте 50 Гц и магнитной индукции стали в сильных полях

Марка	Толщина листа или ленты, мм	Удельные потери Вт/кг, не более, при индукции, Тл, равной	
		1,0	1,5
1211	1,0	5,8	13,4
	0,5	3,3	7,7
1213	1,0	4,7	10,7
	0,65	3,2	7,5
	0,5	2,8	6,5
1411	0,5	2,0	4,4
	0,35	1,6	3,6
1511	0,5	1,55	3,5
	0,35	1,35	3,0
2011	0,65	3,8	9,0
	0,5	3,5	8,0
2111	0,65	4,3	10,0
	0,5	3,5	8,5
2311	0,65	2,5	5,8
	0,5	1,9	4,4

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания
к лабораторным работам



УДК 621.39

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: методические указания к лабораторным работам /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, В.Н. Тимофеев. Рязань, 2012. 84 с.

Рассматриваются лабораторные работы по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 13. Ил. 39. Библиогр.: 6 назв.

Сопротивление диэлектриков, энергия активации, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, конденсатор, катушка индуктивности, электрическая прочность

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Т и м о ф е е в Владимир Николаевич

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 18.06.12. Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,25.

Тираж 50 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения сопротивления твердых диэлектриков и исследование температурной зависимости их удельного сопротивления.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Электропроводность диэлектриков

Необходимым условием наличия электропроводности у любого вещества является существование в нем свободных *заряженных материальных частиц* — носителей зарядов. При наличии электрического поля на каждый носитель тока действует электродвижущая сила E . При этом плотность тока J равна

$$J = n \cdot q \cdot v, \quad (1)$$

где n - концентрация зарядов в данном объеме;

q - величина заряда;

v - скорость движения заряда.

Окончательно электропроводность γ можно определить как

$$\gamma = n \cdot q \cdot \frac{v}{E}. \quad (2)$$

Отношение v/E , определяющее скорость при напряженности поля, равной единице, называют *подвижностью* носителей и обычно обозначают буквой μ .

В диэлектриках можно выделить следующие виды электропроводности.

1. **Электронная электропроводность** характеризуется перемещением электронов под действием поля. Помимо металлов, ее обнаруживают у углерода, некоторых соединений металлов с кислородом, серой и другими веществами и у многих полупроводников. При электронной электропроводности отсутствует видимый перенос вещества с током.

2. **Ионная электропроводность** обуславливается движением ионов. Ее наблюдают у электролитов - растворов и расплавов солей, кислот, щелочей и подобных соединений, а также у многих диэлектриков. Ионы создаются электролитической диссоциацией, т. е. расщеплением молекул веществ на две части: катионы (+) и анионы (-). При движении ионов в электрическом поле имеет место электролиз, т. е. видимый перенос вещества и образование вблизи электродов новых химических веществ. Количество перенесенного с током вещества про-

порционально количеству прошедшего через вещество электрического тока, в соответствии с известными законами Фарадея. Общая проводимость вещества равна сумме анионной и катионной электропроводности.

3. **Молионная электропроводность** обусловлена движением заряженных частиц – молионов (целых сгустков молекул). Наблюдают ее в коллоидных системах, в которых дисперсионная фаза взвешена в дисперсионной среде. Заряженные частицы дисперсионной фазы называют *молионами*. Движение молионов под действием электрического поля называют *электрофорезом*. Большое влияние на электропроводность жидких, а также аморфных вязких материалов (смолы, компаунды) оказывает вязкость вещества.

1.1.1. Электропроводность газов

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами. Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются коротковолновые воздействия (космическое, рентгеновское, радиоактивное излучение), а также тепловое воздействие. Электропроводность газа, обусловленную действием внешних ионизаторов, называют *несамостоятельной*, а обусловленную ударной ионизацией – *самостоятельной* электропроводностью.

В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной проводимости не обнаруживается. При ионизации газа одновременно происходит соединение положительных ионов и отрицательных электронов в нейтральные молекулы. Этот процесс носит название *рекомбинация* и препятствует безграничному росту числа ионов. Это означает, что условие равновесия заключается в равенстве числа вновь образующихся ионов числу рекомбинирующих ионов.

Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение. Ионы и электроны под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникнет ток. Часть ионов будет нейтрализоваться на электродах, часть исчезнет за счет рекомбинации. Увеличение напряжения между электродами приведет к тому, что большая часть не рекомбинированных носителей заряда будет достигать электродов и увеличивать ток в цепи за счет увеличения скорости их перемещения. Причем чем больше будет величина поля, тем больше носителей заряда будет достигать электродов и не успевать рекомбинировать. Плотность тока в этом случае (при относительно слабых напряженностях поля) будет про-

порциональна напряженности поля, т. е. выполняется закон Ома.

При больших напряженностях поля наступит момент, когда все свободные носители заряда из-за высокой скорости движения будут достигать электродов, так и не успевая рекомбинировать. Поскольку количество свободных носителей, возникающих в газе в единицу времени, неизменно, то ток в цепи, при изменении напряженности поля перестанет изменяться. Такой ток называют *током насыщения*.

На рис. 1 показан характер зависимости тока от напряжения в газах. Начальный участок кривой до напряжения U_H соответствует выполнению закона Ома. По мере возрастания величины приложенного напряжения ионы переносятся к электродам, не успевая рекомбинировать, и при некотором напряжении U_H все ионы, создаваемые в газовом промежутке, будут разряжаться на электродах. Дальнейшее увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока, что соответствует горизонтальному участку кривой рис. 1 (ток насыщения при напряжениях от U_H до $U_{кр}$). Ток насыщения для воздуха в нормальных условиях, влажности и расстояния между электродами 1 см наблюдается при напряженностях поля около 0,6 В/м.

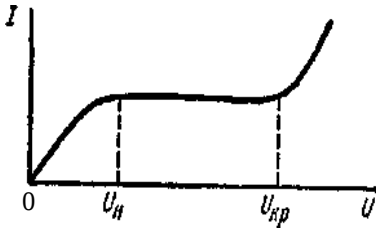


Рис. 1. Зависимость тока в воздушном зазоре от напряжения

Плотность тока насыщения в воздухе весьма мала и составляет величину порядка 10^{-15} А/м². Поэтому воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик до тех пор, пока не создадутся условия для появления ударной ионизации. Ток при увеличении напряжения остается постоянным, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов. При

возникновении ударной ионизации появляется самостоятельная электропроводность (выше $U_{кр}$ на рис. 1) и ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения.

1.1.2. Электропроводность жидкостей

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В нейтральных жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги. В полярных жидкостях электропроводность зависит не только от примесей, иногда она вызывается диссоциацией молекул самой жидкости. Электропроводность жидкостей носит в основном ионный характер. Ионная электропроводность подразделяется на *собственную* и *примесную*.

Собственная электропроводность обусловлена движением ионов, получаемых от частичной диссоциации молекул жидкости. Полярные жидкости, как правило, сильнее диссоциированы и имеют большую электропроводность, чем неполярные. В неполярных и слабополярных жидких диэлектриках (минеральные масла, кремнийорганические, полиизобутиленовые и другие жидкости) электропроводность в основном определяется примесями и не является характерной для данного диэлектрика.

При тепловых колебаниях молекула в некоторых случаях получает достаточную кинетическую энергию для отрыва от соседней молекулы и приобретает поступательное движение. Направление этих перемещений беспорядочно. Однако если молекула имеет электрический заряд, то при приложении электрического поля к жидкости она начинает направленное движение и участвует в проводимости.

В нейтральных жидкостях их электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей (*примесная электропроводность*), в том числе от влаги; в полярных - еще и от диссоциации молекул самой жидкости. Ток в жидкости обусловливается перемещением ионов и молионов. Наблюдается зависимость роста удельной проводимости γ жидких диэлектриков от температуры. Это связано с ростом количества свободных носителей заряда в жидкости за счет увеличения энергии частиц жидкости. Уменьшение вязкости жидкости с увеличением температуры увеличивает подвижность ионов и других заряженных частиц и также способствует увеличению проводимости. Увеличение температуры также способствует активизации явления диссоциации молекул жидкости.

1.1.3. Объемная электропроводность твердых диэлектриков

Твердые диэлектрики предназначены в основном для электрической изоляции различных узлов РЭА. По самому своему назначению электроизоляционные материалы совершенно не должны пропускать электрический ток под действием приложенного электрического напряжения, т. е. они должны быть диэлектриками. Однако «идеальных» диэлектриков не существует и все практически применяемые электроизоляционные материалы при приложении напряжения все же пропускают некоторый, обычно весьма незначительный, ток.

Это обусловлено наличием в технических диэлектриках небольшого числа свободных носителей электрических зарядов, а также инжекцией зарядов из электродов. Такие токи принято называть токами сквозной электропроводности, или токами утечки.

Наряду с токами сквозной электропроводности в диэлектрике могут появляться и токи смещения. Упругое смещение (т.е. смещение на небольшое расстояние и возврат в исходное положение после снятия

электрического поля) любых связанных зарядов в веществе под действием электрического поля до момента установления и получения равновесного состояния обуславливает появление поляризационных токов, или токов смещения в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризациях настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи же, вызванные замедленными видами поляризации, могут быть зафиксированы у многих технических диэлектриков и называются абсорбционными токами.

При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле. Таким образом, полная плотность тока в диэлектрике представляет собой сумму плотностей токов утечки и смещения:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{УТ}} + \mathbf{J}_{\text{СМ}}. \quad (3)$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения (индукции) $\mathbf{D}$:

$$\mathbf{J}_{\text{СМ}} = d\mathbf{D}/dt = \mathbf{J}_{\text{АБ}}. \quad (4)$$

Поляризационные токи (токи смещения или абсорбционные токи) необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков, потому что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только ток утечки, но и сопровождающий его обратимый ток, т.е. ток абсорбции. Вследствие этого может создаться неправильное представление о большой проводимости диэлектрика. Таким образом, проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по току утечки, который сопровождается выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только током утечки, но и активными составляющими поляризационных токов.

Поскольку измерение поляризационных токов даже при замедленных механизмах поляризации осуществить довольно трудно, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на величину тока, измеренную через одну минуту после включения напряжения (т. е. учитывают только токи утечки в диэлектрике). Значение $R_{\text{УТ}}$ (или $R_{\text{ИЗ}}$) в некоторых случаях зависит не только от самого диэлектрика, но и от материала электродов. Особенностью электропроводности диэлектриков в большинстве случаев является ее неэлектронный (*ионный*) характер.

У твердых изоляционных материалов различают объемную и поверхностную электропроводности. Для сравнительной оценки объемной

и поверхностной электропроводности различных материалов используют понятие удельного объемного ρ_v и удельного поверхностного ρ_s сопротивлений.

Принимают, что ρ_v численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит через две противоположные грани этого куба, при этом величина ρ_v выражается в Ом*м.

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывают по формуле

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h}, \quad (5)$$

где R_v — объемное сопротивление, Ом;

S — площадь электрода, м²;

h — толщина образца, м.

Для того чтобы носитель заряда стал свободным, необходимо воздействовать на него некоторой энергией, которую обычно называют *энергией активации*. В процессе прохождения электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы примесей могут частично удаляться, выделяясь на электродах. Это с течением времени приводит к уменьшению проводимости и росту сопротивления диэлектрика.

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена главным образом перемещением ионов, вырываемых из решетки под влиянием флуктуации теплового движения. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы, в частности ионы примесей. При высоких температурах движутся основные ионы кристаллической решетки. В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность зависит от наличия примесей.

В каждом отдельном случае вопрос о механизме электропроводности решается на основании данных об энергии активации носителя заряда. Известно, например, что для каменной соли энергия активации ионов натрия при нормальной температуре составляет около 0,85 эВ. Энергия активации ионов хлора в три раза больше, а энергия активации электронов равна 6 эВ, тогда как средняя энергия теплового движения при комнатной температуре составляет всего лишь 0,025 эВ.

Подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов; в двуокиси титана, например, подвижность электронов составляет около 10^{-4} м²/В*с, тогда как подвижность ионов в алумосиликатной керамике всего лишь $10^{-13} - 10^{-16}$ м²/В*с. В связи с этим в диэлектрике с электронной электропроводностью концентрация электронов в $10^9 - 10^{12}$ раз меньше, чем концентрация носителей в диэлектрике с ионной электропроводностью при одинаковом заряде носителей и оди-

наковом значении удельной проводимости.

Известно, что при ионной электропроводности число диссоциированных ионов находится в экспоненциальной зависимости от температуры, и тогда проводимость может быть представлена следующей зависимостью:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \quad (6)$$

где A и b – коэффициенты зависящие от параметров материала диэлектрика.

Если в диэлектрике электропроводность обусловлена носителями с различной энергией активации $\mathcal{E}_i$, то зависимость электропроводности от температуры может быть представлена в виде

$$\gamma = \sum A_i e^{-\frac{\mathcal{E}_i}{kT}}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана;

A_i – коэффициент, зависящий от параметров носителя заряда;

$\mathcal{E}_i$ – энергия активации носителя заряда.

В связи с этим кривые логарифмической зависимости удельной проводимости от температуры имеют изломы, как показано на рис. 2.

При низких температурах электропроводность обусловлена ионизированными примесями, при высоких температурах она становится собственной. В некоторых случаях излом кривой температурной зависимости логарифма удельной проводимости объясняется тем, что ионы основного вещества имеют различные энергии диссоциации.

Заменяя γ на $1/\rho$, получают выражение для зависимости удельного объемного сопротивления от температуры:

$$\rho = B \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (8)$$

где B и b – постоянные, характеризующие данный материал.

Собственная электропроводность твердых тел и изменение ее от температуры определяются структурой вещества и его составом. В телах кристаллического строения с ионной решеткой электропроводность связана с валентностью ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей удельной проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. Так, для кристалла NaCl удельная проводимость значительно больше, чем для кристаллов MgO или Al_2O_3 .

В большинстве кристаллов удельная проводимость неодинакова по разным осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном к этой оси. Для многих ионных кристаллов и других диэлектриков коэффициент b в формулах (6) и (8) близок к величине 10^4 .

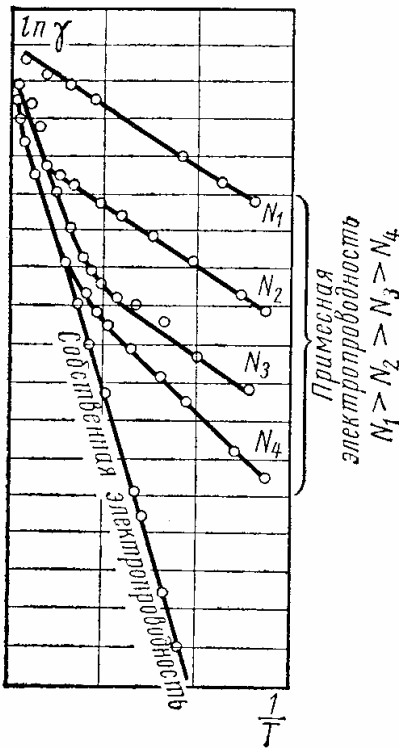


Рис. 2. Температурная зависимость удельной проводимости диэлектриков

В кристаллических телах с молекулярной решеткой (сера, полиэтилен, парафин) удельная проводимость мала и определяется в основном наличием примеси.

Величина удельной проводимости аморфных тел связана, прежде всего, с их составом. Высокомолекулярные органические полимеры обладают удельной проводимостью, зависящей в значительной степени от целого ряда факторов: от химического состава и наличия примесей, от степени полимеризации (например, для фенолформальдегидной смолы), от степени вулканизации (для эбонита). Органические нейтральные аморфные диэлектрики, как, например, полистирол, отличаются очень малой удельной проводимостью.

Большую группу аморфных тел составляют неорганические стекла. Удельная проводимость стекол зависит главным образом от химического состава; это дает возможность в ряде

случаев получать заранее заданную величину удельной проводимости.

Твердые пористые диэлектрики при наличии в них влаги, даже в ничтожных количествах, резко увеличивают свою удельную проводимость. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но при нахождении высушенных материалов во влажной среде величина сопротивления вновь уменьшается.

Степень изменения электрических свойств материалов при увлажнении зависит не только от количества воды, проникшей в поры материала. В том случае, когда поглощенная влага способна образовать нити или пленки по толщине изоляции, которые могут пронизывать весь промежуток между электродами (или значительную область этого промежутка), даже весьма малые количества поглощенной влаги приводят к

резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему материала в виде отдельных, не соединяющихся между собой малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

Наиболее заметное снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, которые содержат растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой проводимостью. В таких диэлектриках при нагревании влажного образца вначале величина ρ уменьшается за счет увеличения степени диссоциации примесей в водном растворе, затем идет удаление влаги - сушка и только при более высоких температурах наблюдается снижение ρ от температуры по законам, приведенным ранее.

Для уменьшения влагопоглощения и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их *пропитка*. Необходимо иметь в виду, что пропитка целлюлозных волокнистых материалов и других пористых органических диэлектриков дает лишь замедление увлажнения материала, не влияя на величину ρ после длительного воздействия влажности. Это объясняется тем, что молекулы пропиточных материалов имеют весьма большие размеры по сравнению с размерами молекул воды и не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры они вообще не могут попасть.

При больших напряженностях электрического поля, близких к напряженностям электрического пробоя, необходимо учитывать возможность появления в твердых диэлектриках электронного тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, благодаря чему наблюдается отступление от закона Ома.

1.1.4. Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s численно равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению $R_{из}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей (следовательно, учитываются объемное и поверхностное сопротивления). Удельное поверхностное сопротивление можно определить по формуле

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{d}{h}, \quad (9)$$

где R_s - поверхностное сопротивление образца материала между парал-

тельно поставленными электродами шириной d , отстоящими друг от друга на расстоянии h .

Полное сопротивление изоляции $R_{из}$ твердого диэлектрика определяется как соединение параллельно включенных поверхностного R_s и объемного R_v сопротивлений. Поверхностная электропроводность чаще всего обусловлена присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Вода, как известно, обладает значительной проводимостью. Достаточно наличия тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную проводимость, которая определяется в основном толщиной этого слоя.

Однако, поскольку сопротивление адсорбированной водяной пленки связано с природой материала, на поверхности которого она находится, удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика. Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому величина относительной влажности является решающим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Особенно резкое увеличение поверхностной проводимости обычно наблюдается, когда величина относительной влажности превышает 50—60 %.

Удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем меньше полярность вещества и чем чище поверхность диэлектрика. Причем присутствие загрязнений на поверхности относительно мало сказывается на удельной поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков и сильно влияет на проводимость гидрофильных диэлектриков.

В зависимости от пределов значений удельного поверхностного сопротивления, обусловленных взаимодействием с влагой, все материалы можно подразделить на несколько групп:

- 1) не растворимые в воде диэлектрики;
- 2) частично растворимые в воде диэлектрики;
- 3) диэлектрики, имеющие пористую структуру.

Не растворимые в воде диэлектрики делятся на две подгруппы:

- а) нейтральные и слабополярные - не смачиваемые водой (парафин, полистирол, янтарь, сера);
- б) дипольные и ионные - смачиваемые водой (канифоль, некоторые виды керамики и др.).

Все материалы подгруппы (а) характеризуются высоким удельным поверхностным сопротивлением, мало зависящим от влажности окружающей среды. Удельное поверхностное сопротивление у материалов подгруппы (б) во влажной среде ниже, чем у материалов подгруппы (а), но может быть и достаточно большим при полном отсутствии загрязнений на их поверхности.

Частично растворимые в воде диэлектрики. К этой группе относятся большинство технических стекол. Таким материалам свойственно более низкое удельное поверхностное сопротивление, в значительной мере зависящее от влажности.

Диэлектрики, имеющие пористую структуру. К этим диэлектрикам относятся волокнистые материалы (органические и неорганические), мрамор и большинство пластических масс. Благодаря пористой структуре во влажной среде эти материалы обнаруживают большую удельную поверхностную проводимость.

Для того чтобы повысить поверхностное сопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности - промывку водой, растворителями, прокаливание при температуре 600—700 °С.

Наиболее эффективной очисткой поверхности изделия, не впитывающего воду, является продолжительное кипячение в дистиллированной воде. Пропитка поверхностных слоев детали парафином или церезином не обеспечивает достаточной устойчивости значений ρ_s при высокой влажности. Это связано с возможностью проникновения влаги в микропоры, поверхности изделия из-за влагопроницаемости перечисленных защитных покрытий. Покрытие керамики и стекол кремнийорганическими лаками значительно повышает величину поверхностного сопротивления изделий во влажной среде.

Таким образом, зависимость удельного поверхностного сопротивления от влажности обусловлена наличием на поверхности диэлектрика гигроскопических и диссоциирующих на ионы веществ. Влага, адсорбируемая поверхностью, способствует появлению ионов из-за ее диссоциации. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то после их удаления можно получить высокое удельное поверхностное сопротивление при любой влажности воздуха. Если эти вещества являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

1.2. Измерение сопротивления диэлектриков

Для определения величины сопротивления диэлектрика обычно используют стандартный способ *амперметра-вольтметра*. Подавая на образец диэлектрика известное по величине напряжение, измеряют ток, протекающий в цепи диэлектрика, с помощью высокочувствительных измерителей тока. Типичные значения величин тока лежат в пределах $10^{-9} - 10^{-16}$ А. Приборы, измеряющие такие токи, обычно называют *пикоамперметрами* (*фемтоамперметрами*, *аттоамперметрами*). Сопротивление диэлектрика рассчитывается по закону Ома как

$$R = U/I. \quad (10)$$

Определение удельного объемного и удельного поверхностного

сопротивлений производится обычно на одном и том же образце, снабженном тремя электродами. Форма и расположение этих электродов для случая плоского образца диэлектрика показаны на рис. 3.

Верхний дисковый электрод А имеет диаметр d_1 , внутренний диаметр кольцевого электрода $d_2 = d_1 + 4$ мм. Таким образом, зазор между этими электродами составляет 4 мм. Нижний дисковый электрод С может иметь диаметр, примерно равный наружному диаметру кольцевого электрода или больше. При измерении объемного сопротивления образца следует пропускать ток сквозь толщу образца между верхним и нижним дисковыми электродами А и С, а при измерении поверхностного сопротивления - через поверхностный слой образца, расположенный в кольцевом зазоре между электродами А и В.

В принципе измерение этих сопротивлений образцов не представляет трудностей, однако на практике далеко не всегда является простым делом, так как вследствие большой величины удельных сопротивлений, особенно в случае высококачественных диэлектриков, в схеме протекают настолько слабые токи, что их измерение осуществляют особо точными приборами, как указано выше.

В настоящей работе измерение удельного сопротивления осуществляется с помощью цифрового аттоамперметра. Ток от источника напряжения пропускается сквозь толщу образца между нижним электродом и верхним дисковым электродом (так называемым измерительным электродом) и измеряется цифровым аттоамперметром.

Измеряемый ток является объемным током утечки, так как поверхностный ток утечки с электрода С не попадет на электрод А и “собирается” кольцевым электродом В, выполняющим роль охранного кольца, и далее отводится на землю, минуя измеритель тока (*пикоамперметр, фемтоамперметр, аттоамперметр*). Охранный электрод, имея практически тот же потенциал, что и измерительный электрод А, способствует устранению краевого эффекта у этого электрода и тем самым создает практически однородное электрическое поле в образце между электродами А и С. Зная величину приложенного к образцу на-

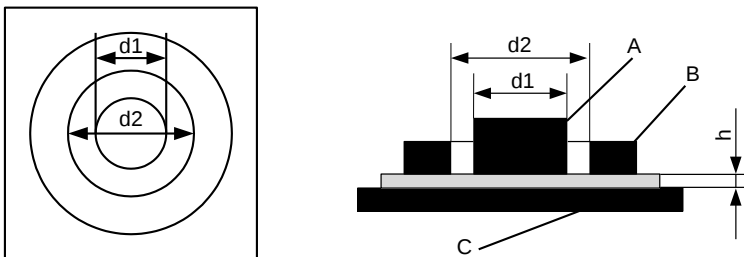


Рис. 3. Схема расположения электродов для измерения удельных сопротивлений плоского образца диэлектрика

пряжения U (в вольтах) и ток, протекающий через образец, можно определить объемное сопротивление образца R_v . Затем, используя формулу (5), можно рассчитать удельное объемное сопротивление диэлектрика.

При измерении поверхностного сопротивления электрод А опять является измерительным, т. е. остается соединенным с измерителем тока, в то время как другие электроды поменялись ролями. Кольцевой электрод В стал измерительным, а электрод С - охранным. При этом измеряется поверхностный ток в кольцевом зазоре между электродами А и В, а объемный ток утечки, который мог бы также проходить от электрода В к электроду А, отводится электродом С на землю и минует измеритель тока. Измерив напряжение U (в вольтах), приложенное к образцу, и поверхностный ток утечки, можно определить поверхностное сопротивление исследуемого диэлектрика.

Для круглых электродов связь между поверхностным сопротивлением образца R_s , удельным поверхностным сопротивлением диэлектрика ρ_s и размерами электродов d_1 и d_2 выражается следующим соотношением:

$$R_s = \rho_s \frac{d_2 - d_1}{\pi \cdot (d_2 - d_1)}, \quad (11)$$

где ρ_s измеряется в омах, а d_1 и d_2 - в любых одинаковых единицах длины.

Измеряя R_s и зная диаметры d_1 и d_2 , можно вычислить величину удельного поверхностного сопротивления испытуемого образца как

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot \pi \cdot (d_2 + d_1)}{d_2 - d_1}. \quad (12)$$

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения удельного сопротивления диэлектрика специальной программой, выполняемой на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения удельного сопротивления ряда диэлектриков в зависимости от изменения температуры окружающей среды и влажности воздуха. Измерение производится стандартным методом амперметра-вольтметра. При измерении сопротивления диэлектрика используется трехэлектродный метод, описанный ранее. Измеряются объемное сопротивление и поверхностное сопротивление, а затем по известным параметрам исследуемого материала и измерительных электродов рассчитываются удельное объемное и поверхностное сопротивления.

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Сопротив_диэл» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления. Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** работы исследуются *удельное объемное сопротивление твердых диэлектриков* и его зависимость от температуры, а **во второй части** исследуется *удельное поверхностное сопротивление* в зависимости от температуры и влажности воздуха. Выбор конкретного вида измерения (объемное или поверхностное сопротивление) выбирается в окне выбора материала (рис.4,б) щелчком левой кнопки мыши по соответствующей кнопке.

2.1. Измерение объемного сопротивления диэлектрика

После щелчка по кнопке «Измерение объемного сопротивления» открывается окно измерения объемного сопротивления диэлектрика, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются измерительные приборы и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображается схема подключения измерительных электродов.

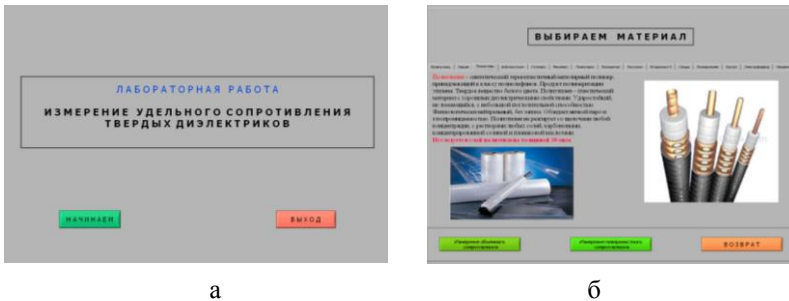


Рис. 4. Внешний вид первого окна лабораторной работы (а) и окна выбора материала диэлектрика (б)

Необходимо включить приборы щелчком по тумблерам «Сеть». По умолчанию в виртуальной измерительной камере установлены температура 20°C и влажность 5 %. Если включены не все приборы и не установлено какое-либо напряжение, то отображается мигающая надпись «Включите приборы и установите напряжение».

Измерение сопротивления диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимое напряжение источника питания, используя кнопки «Инкремент-декремент» рядом с цифровыми индикаторами на панели источника питания. Стрелочный прибор источника дублирует эти показания.

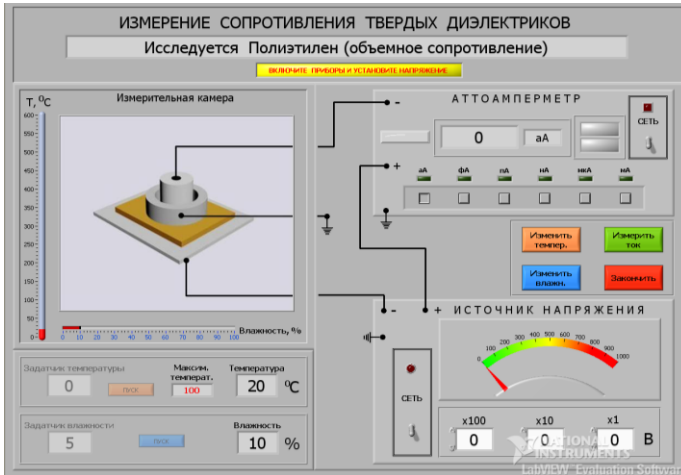


Рис. 5. Окно измерения объемного сопротивления диэлектрика

2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окне «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере. Считается, что объемное сопротивление диэлектрика от влажности воздуха не зависит.

3. Установить масштаб измерения тока прибором «Аттоамперметр», используя кнопки, расположенные под цифровым индикатором величины тока. Рекомендуется начинать с масштаба «нА» (10^{-9} А).

4. Щелкнуть по кнопке «Измерить ток». Через некоторое время на индикаторе отобразится величина тока через диэлектрик. Если моргает индикатор «Перегрузка», изменить масштаб аттоамперметра. Записать значение тока.

5. После проведения необходимого цикла измерений при данной температуре в измерительной камере изменить значение температуры в соответствии с п. 2 этого раздела.

6. Закончив полный цикл измерений объемного сопротивления диэлектрика, щелкнуть по кнопке «Закончить» и выбрать новый материал или режим измерения.

2.2. Измерение поверхностного сопротивления диэлектрика

После выбора режима измерения поверхностного сопротивления щелкнуть по кнопке «Изменить влажность», а в окно «Задатчик влаж-

ности» ввести с клавиатуры нужное значение влажности в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной влажности в измерительной камере и перейти к измерениям тока.

При необходимости изменять температуру в измерительной камере действовать, как указано в п. 2 раздела 2.1.

ВНИМАНИЕ! Процесс измерения поверхностного сопротивления диэлектрика ничем не отличается от измерения объемного сопротивления, но схема подключения измерительных электродов уже другая.

3. Последовательность выполнения работы

1. Исследовать зависимость объемного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Процесс измерения тока занимает определенное время, т.к. при больших сопротивлениях диэлектрика необходимо несколько секунд для установления стационарного состояния при перезарядке паразитных емкостей измерительных электродов. Данные занести в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете объемного сопротивления R_V использовать формулу (10), а при расчете удельного объемного сопротивления использовать формулу (5). Диаметр верхнего электрода 5 см.

Диэлектрик – полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$10^4/T$	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	$R_V, \text{Ом}$	$\rho_V, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$\log(\rho_V)$

Построить зависимость $\log(\rho_V) = F(10^4/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \log(\rho_V)}{\Delta \left(\frac{10^4}{T} \right)} \quad (13)$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot \operatorname{tg} \alpha, \text{ эВ}. \quad (14)$$

2. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур и постоянной влажности, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести

в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете поверхностного сопротивления R_s использовать формулу (10), а при расчете удельного поверхностного сопротивления использовать формулу (12). Диаметр верхнего электрода 5 см, а внутренний диаметр кольцевого электрода 5.4 см.

Диэлектрик - полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
t, °C	T, K	$10^4/T$	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	R_s , Ом	ρ_s , Ом	$\log(\rho_s)$

Построить зависимость $\log(\rho_s) = F(1/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$tg \alpha = \frac{\Delta \log(\rho_s)}{\Delta \left(\frac{10^4}{T} \right)}$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot tg \alpha, \text{ эВ.}$$

3. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от влажности w при постоянной температуре, указанной преподавателем. Для каждого значения влажности в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести в таблицу, по приведенному ниже примеру.

Диэлектрик - полипропилен				
Температура 20 °C				
Напряжение на диэлектрике 200 В				
w, %	$I_{\text{СРЕД}}$	Един. тока	R_s , Ом	ρ_s , Ом

Построить график $\rho_s = F(w)$.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;

- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами;
- ссылку по ГОСТу на изученную справочную литературу.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электропроводность вещества?
2. Назовите основные виды электропроводности диэлектриков.
3. Чем обусловлена электропроводность в газовых диэлектриках?
4. Нарисуйте и объясните график зависимости тока в газах от напряжения между электродами.
5. Что такое *ионизация* и *рекомбинация*?
6. Чем обусловлена электропроводность жидких диэлектриков?
7. Что такое объемное и поверхностное сопротивления твердых диэлектриков и в каких единицах они измеряются?
8. Что такое сопротивление изоляции твердых диэлектриков?
9. Что такое *энергия активации*?
10. Объясните характер температурной зависимости удельной проводимости диэлектриков.
11. Что такое *примесная* и *собственная* электропроводность твердых диэлектриков?
12. Чем обусловлено поверхностное сопротивление диэлектриков?
13. Как и почему влажность воздуха влияет на поверхностное сопротивление твердых диэлектриков?
14. Какие системы электродов и почему используют для измерения объемного и поверхностного сопротивления твердых диэлектриков?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь твердых диэлектриков резонансным методом, исследование температурной и частотной зависимости этих параметров.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Поляризация диэлектриков

Одним из важных понятий при изучении поляризации диэлектриков является *электрический дипольный момент* (в дальнейшем просто

дипольный момент). Электрический дипольный момент определяется как совокупность двух равных по абсолютной величине разноимённых точечных электрических зарядов (это и есть диполь), находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Основной характеристикой электрического диполя является его дипольный момент - вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному (рис. 1) и численно равный произведению заряда q на расстояние l между зарядами: $p = ql$. Дипольный момент определяет электрическое поле диполя на большом расстоянии R от него ($R \gg l$), а также воздействие на диполь внешнего электрического поля.

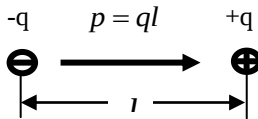


Рис. 1. Электрический диполь: заряды $-q$ и $+q$ на расстоянии l друг от друга. Дипольный момент $p = ql$ полностью определяет электрическое поле диполя на расстояниях $R \gg l$.

Действие внешнего электрического поля на диполь также пропорционально величине его дипольного момента. Однородное поле создаёт вращающий момент, стремящийся повернуть диполь так, чтобы его дипольный момент был направлен по полю. В неоднородном электрическом поле на диполь, кроме вращающего момента, действует также сила, стремящаяся втянуть его в область более сильного поля. Следует понимать, что если положительный и отрицательный заряды совпадают друг с другом (т.е. $l=0$), то электрическое поле будет отсутствовать.

Диэлектрики - это вещества, которые практически не проводят электрический ток. Поведение диэлектриков в электрическом поле определяется их внутренним строением. Как известно, мельчайшей частицей вещества, сохраняющей его химические свойства, является молекула. Молекулы состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. В целом молекулы электронейтральны. Согласно теории ковалентных связей устойчивость молекул достигается путем образования одной или нескольких пар электронов, которые становятся общими для соединяющихся атомов, т.е. одновременно входят в состав оболочек двух атомов.

Для каждого вида зарядов - положительных (ядер) и отрицательных (электронов) - можно найти такую точку, которая будет являться как бы их "электрическим центром тяжести". Эти точки называются *полюсами молекулы*. Если в молекуле электрические центры тяжести

положительных и отрицательных зарядов совпадут, то дипольный момент такой молекулы равен нулю, а следовательно, и электрическое поле, создаваемое этой молекулой, будет отсутствовать. Такую молекулу называют неполярной. Но если молекула построена несимметрично, например состоит из двух разнородных атомов, то общая пара электронов может быть в большей или меньшей степени смещена в сторону одного из атомов. Очевидно, что в этом случае, вследствие неравномерного распределения положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы, их электрические центры тяжести не совпадут. Это приведет к возникновению дипольного момента молекулы и появлению электрического поля вокруг нее. Такие молекулы принято называть полярными.

Для описания макроскопических электрических свойств диэлектриков достаточно ограничиться представлением о том, что в них отсутствуют свободные носители заряда и при помещении диэлектрика в электрическое поле в материале возбуждается множество микроскопических диполей. В случае неполярных молекул это происходит путем смещения в пределах молекул их положительных зарядов в направле-

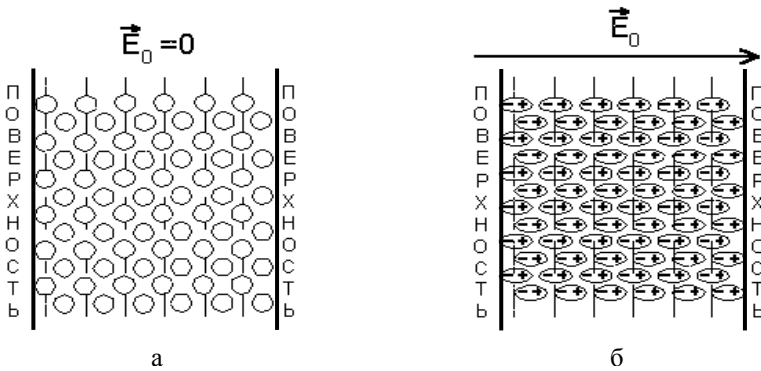


Рис. 2. Поляризация однородного диэлектрика с неполярными молекулами: (а – внешнее электрическое поле отсутствует; б – при воздействии внешнего электрического поля)

нии внешнего поля и отрицательных в противоположном направлении (рис. 2).

Приобретаемый молекулой дипольный момент пропорционален напряженности поля, в котором находится молекула. В системе СИ он записывается как:

$$p = \beta \epsilon_0 E, \quad (1)$$

где β – коэффициент пропорциональности, который называется *поляризуемостью молекулы*, а ϵ_0 – системная константа, называемая *абсо-*

лютой диэлектрической проницаемостью вакуума ($\epsilon_0 = 8,8510^{-12}$ Ф/м).

Для вещества, состоящего из полярных молекул, под действием момента сил происходит преимущественное выстраивание молекул в направлении внешнего поля (рис. 3).

В обоих случаях (неполярных и полярных молекул) в результате появляется дипольный момент и у всего объема диэлектрика. Средний дипольный момент, индуцированный полем в единице объема, называется поляризованностью диэлектрика:

$$P = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{\Delta V} p \quad , \quad (2)$$

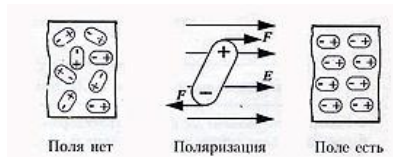


Рис. 3. Ориентация полярной молекулы в электрическом поле

где суммирование производится по всем молекулам, находящимся в объеме ΔV , а дипольный момент p каждой молекулы определяется суммированием по всем заряженным частицам, входящим в молекулу:

$$p = \sum_i e_i l_i \quad , \quad (3)$$

где e_i - заряд каждой частицы, а l_i - ее смещение под действием электрического поля.

Домножив и разделив правую часть выражения (3) на число молекул ΔN , находящихся в объеме ΔV , получим еще одно выражение для поляризованности:

$$p = n \langle p \rangle \quad , \quad (4)$$

где $n = \Delta N / \Delta V$ – концентрация молекул, а $\langle p \rangle$ – средний дипольный момент молекулы.

Вообще говоря, P меняется в диэлектрике от точки к точке, но для широкого класса веществ в каждой точке $P \sim E$. Существуют вещества, обладающие поляризованностью и в отсутствие внешнего поля. Поскольку в целом молекулы нейтральны, то именно дипольный момент и определяет электрическое поле, создаваемое самим материалом, когда его помещают во внешнее поле. В соответствии с принципом суперпозиции поле внутри диэлектрика есть сумма внешнего поля и поля от всех диполей, индуцированных в диэлектрике:

$$E = E_0 + E' \quad , \quad (5)$$

где E_0 - напряженность внешнего электрического поля, а E' – напряженность внутреннего электрического поля, созданного связанными

зарядами вещества диэлектрика. Связанными зарядами называются нескомпенсированные заряды, появляющиеся в результате поляризации молекул диэлектрика, тогда как сторонними – свободные заряды, находящиеся в диэлектрике или вне его. E_0 и E' представляют собой макрополя, т.е. усредненные по некоторому малому объему микрополя, создаваемые сторонними и связанными зарядами соответственно.

Так как каждая молекула поляризуется под воздействием как поля сторонних зарядов, так и поля, создаваемого всеми другими поляризованными молекулами, то поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности именно суммарного поля:

$$P = \kappa \epsilon_0 E, \quad (6)$$

где κ – диэлектрическая восприимчивость вещества.

При поляризации неоднородного диэлектрика (см. рис. 3) смещения зарядов внутри любого выбранного слоя внутри диэлектрика происходят таким образом, что количество связанного заряда, покидающего слой, равно заряду, входящему в него. Таким образом, объемный заряд внутри диэлектрика не образуется. В поверхностных же слоях образуется связанный поверхностный заряд. В случае же неоднородного диэлектрика в каждый слой, мысленно выделенный внутри материала, с одной стороны входит больше заряда, чем выходит с другой, и связанный заряд образуется не только на поверхности, но и в объеме диэлектрика, как это показано на рис. 4.

С учетом вышеперечисленных явлений можно дать определение поляризации и поляризованности диэлектрика.

Поляризация диэлектриков — это явление, связанное со смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом дипольных (полярных) молекул под воздействием внешнего электрического поля.

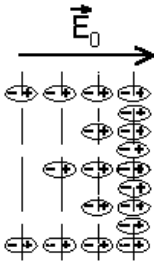


Рис. 4. Поляризация неоднородного диэлектрика

Поляризацию диэлектриков характеризует вектор электрической поляризации. Физический смысл *поляризованности* – это суммарный дипольный момент, который приобретают полярные молекулы, приходящийся на единицу объема диэлектрика. В этом случае в диэлектрике появляется дополнительный заряд Q_d , вызванный явлением *поляризации*, т.е. смещением связанных зарядов в диэлектрике.

Наиболее наглядно явление поляризации проявляется в электрическом конденсаторе. Если на поверхность листового диэлектрического материала с однородными (изотропными) свойствами нанести металлические электроды и подать на них постоянное напряжение, то образо-

вавшийся конденсатор будет накапливать электрический заряд величиной $Q = CU$, где C – емкость конденсатора, U – приложенное напряжение. В свою очередь заряд Q в диэлектрике может быть представлен как $Q = Q_0 + Q_d$, т.е. суммой заряда Q_0 , когда вместо диэлектрика в конденсаторе вакуум, и Q_d – заряда обусловленного поляризацией диэлектрика. Отношение зарядов Q и Q_0 называется относительной диэлектрической проницаемостью (в дальнейшем просто диэлектрической проницаемостью) материала, т.е.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (7)$$

Таим образом, *диэлектрическая проницаемость* ε – это скалярная безразмерная величина (всегда больше единицы), которую можно представить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости такого же конденсатора, между электродами которого вакуум.

1.2. Виды поляризации

В зависимости от механизма поляризации, поляризацию диэлектриков можно подразделить на следующие виды.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек атомов под действием внешнего электрического поля. Это самая быстрая поляризация, время установления которой до 10^{-15} с. Не связана с потерями энергии.

Ионная поляризация — смещение узлов кристаллической структуры под действием внешнего электрического поля, причем смещение узлов решетки происходит на величину, меньшую, чем величина постоянной решетки. Время протекания 10^{-13} с и происходит без потерь энергии.

Дипольная (ориентационная) поляризация — протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Связана с ориентацией диполей во внешнем электрическом поле.

Электронно-релаксационная поляризация — ориентация дефектных (слабо связанных) электронов во внешнем электрическом поле.

Ионно-релаксационная поляризация — смещение ионов слабо закрепленных в узлах кристаллической структуры, либо находящихся в междоузлиях.

Структурная поляризация — ориентация примесей и неоднородных макроскопических включений в диэлектрике. Самый медленный тип.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация — благодаря наличию этого типа поляризации в диэлектрике проявляется нелинейность свойств, то есть явление гистерезиса. Отличается очень высокими значениями диэлектрической проницаемости (от 900 до 7500 у некоторых

видов конденсаторной керамики).

Резонансная поляризация — ориентация частиц, собственные частоты которых совпадают с частотами внешнего электрического поля.

Миграционная поляризация - обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованием объемных зарядов, особенно при высоких градиентах напряжения, имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия.

1.3. Частотная и температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Поляризация диэлектриков имеет максимальное значение в статических электрических полях. В переменных полях, в связи с наличием инерции электронов, ионов и электрических диполей, вектор электрической поляризации зависит от частоты. В связи с этим вводится понятие дисперсии диэлектрической проницаемости. Так как время установления, например, электронной поляризации весьма мало - 10^{-15} с, то даже при наиболее высоких частотах, применяемых в современной электротехнике и радиоэлектронике, поляризация неполярных диэлектриков успевает полностью установиться за время, которое пренебрежимо мало по сравнению с полупериодом переменного напряжения. Поэтому у *неполярных диэлектриков ϵ от частоты не зависит* (рис. 5).

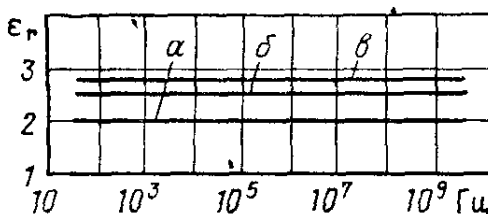


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от частоты для твердых неполярных диэлектриков: а — фторопласт-4; б — полистирол; в — полидихлорстирол

У полярных диэлектриков при повышении частоты диэлектрическая проницаемость сначала также остается неизменной, но начиная с некоторой критической частоты, когда поляризация уже не успевает полностью установиться за один полупериод, величина ϵ снижается (рис. 6).

У неполярных диэлектриков ϵ слабо зависит от температуры, уменьшаясь при повышении температуры вследствие теплового расширения вещества, т. е. уменьшения количества поляризующихся молекул в единице объема вещества. Пример — рис. 7 (резкое изменение

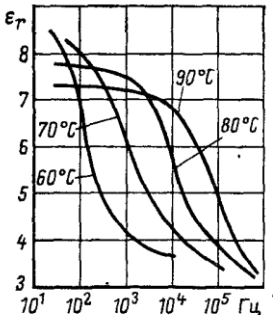


Рис. 6. Зависимость ϵ_r полярного диэлектрика (поливинилацетата) от частоты и температуры

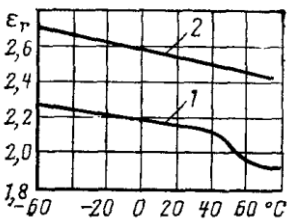


Рис. 7. Зависимость ϵ_r от температуры для неполярных диэлектриков; 1 – парафин; 2 – полистирол

ϵ на графике для парафина соответствует температуре плавления этого кристаллического материала, связанного со скачкообразным изменением плотности вещества).

У диэлектриков ионного строения ϵ при росте температуры обычно возрастает. Однако у некоторых ионных кристаллов ϵ при росте температуры уменьшается. У полярных диэлектриков в области низких температур, когда вещество обладает большой вязкостью или даже находится в кристаллическом состоянии, ориентация дипольных молекул невозможна или, во всяком случае, затруднена. При повышении температуры возможность ориентации диполей облегчается, вследствие чего ϵ существенно возрастает. Однако при еще более высоких температурах вследствие усиления хаотических тепловых колебаний молекул степень упорядоченности ориентации молекул снижается, поэтому ϵ , пройдя через максимум, уменьшается (рис. 8).

В полярных диэлектриках с различными видами поляризации при увеличении частоты происходит скачкообразное уменьшение величины диэлектрической проницаемости по мере того, как постепенно «отключаются» медленные виды поляризации. На температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости таких диэлектриков могут появляться несколько максимумов.

1.4. Потери в диэлектриках

Диэлектрическими потерями называют энергию, вызывающую нагрев диэлектрика, которая рассеивается в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в любом материале протекает сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество

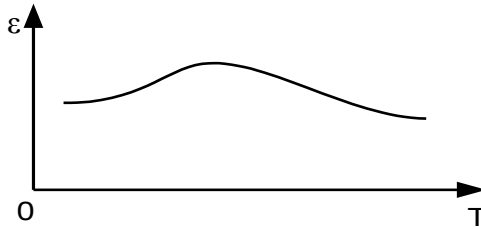


Рис. 8. Типовая зависимость ϵ от температуры для большинства полярных диэлектриков

материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозной электропроводимости, возникает ряд добавочных причин, вызывающих потери энергии в диэлектрике. Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле пользуются понятием угла диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол δ , дополняющий до 90 градусов угол сдвига фаз φ между током I и напряжением U в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика I в такой цепи будет опережать вектор U на 90° , при этом угол δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и соответственно $\tan \delta$ (рис. 9).

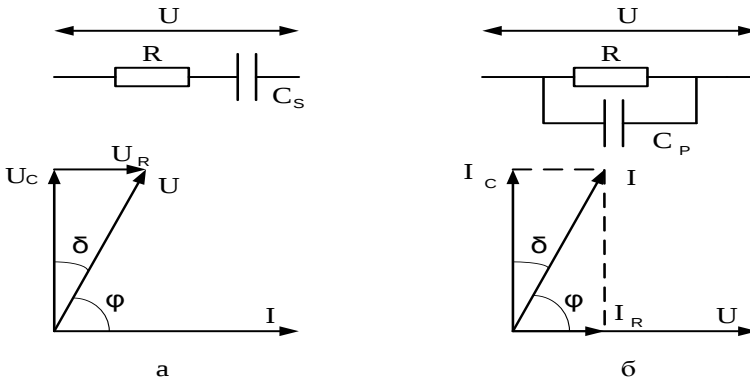


Рис. 9. Эквивалентные схемы и векторные диаграммы диэлектрика с потерями: а – последовательная схема, б – параллельная схема

Диэлектрические потери могут обуславливаться сквозным током

или активными составляющими поляризационных токов. При изучении диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно изобразить это явление в виде кривых, представляющих зависимость электрического заряда на обкладках конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения. При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения, и такой диэлектрик называется линейным.

Если в диэлектрике имеет место замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает нелинейную зависимость. В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь на сквозную электропроводность и потерь от замедленных видов поляризации, возникают электрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, окислов железа и т.д. и значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале. В случае высоких напряжений потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектриков, особенно интенсивно происходящей при высоких частотах. При изучении поведения диэлектрика с потерями при переменном напряжении часто оказывается целесообразным заменить рассматриваемый диэлектрик емкостью без потерь (учитывает явление поляризации) и активным сопротивлением (учитывает электропроводность), соединенными между собой параллельно или последовательно.

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями и находящимся в цепи переменного напряжения. Последовательная и параллельная схема представлены на рис. 8, там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений. Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $z_1 = z_2 = z$ равны их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока I относительно напряжения U равны и значения активной мощности одинаковы.

Из теории переменных токов известно, что:

$$P_a = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (8)$$

Выразим P для последовательной и параллельной схемы через C_s и C_p и угол δ , который является дополнением угла φ до 90 градусов. Для последовательной схемы (рис. 9, а), используя выражения для P_a и соответствующую диаграмму, имеем:

$$P_a = \frac{U}{z} \cdot \frac{U_r}{z} = \frac{U_r^2}{x^2 + r^2} = \frac{U_r^2}{x^2 \cdot (1 + \frac{r^2}{x^2})} = \frac{U^2 \cdot \omega C_s \cdot \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg} \delta} \quad (9)$$

и $\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s$.

Для параллельной схемы (рис. 9,б):

$$P_a = U^2 \cdot \omega C_p \cdot \operatorname{tg} \delta \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_s}. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) можно видеть, что диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку величина диэлектрических потерь пропорциональна квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте поля. Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малым значением угла потерь и диэлектрической проницаемостью, т.к. в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может стать недопустимо большой.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью диэлектрика;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Рассмотрим каждый вид диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационными видами поляризации, в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери вызываются нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля. Это нарушение приводит к рассеянию энергии и нагреву диэлектрика. В температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества (рис. 10). При этой температуре время релаксации частиц диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного переменного напряжения. Если температура такова, что время релаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения, то тепловое движение частиц будет менее интенсивным. Потери уменьшатся, если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полу-

периода изменения напряжения, а интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

Классификация потерь в диэлектриках

Диэлектрические потери	Главные особенности	Виды диэлектриков
1. Обусловленные поляризацией		
релаксационные (дипольные и ионные)	Наличие максимума $\tan \delta$ угла потерь, зависящего от температуры и частоты	Дипольные жидкие и твердые диэлектрики, ионные с неплотной упаковкой
резонансные	Наличие резко выраженного максимума при некоторой частоте (выше 10^{15} Гц), положение которого не зависит от температуры	Все виды диэлектриков
2. Обусловленные электропроводностью	Независимость потерь от частоты ($\tan \delta$ угла потерь с частотой снижается по гиперболе) и заметное возрастание с ростом температуры	Жидкие и твердые диэлектрики. Жидкие и твердые диэлектрики с большой электропроводностью
3. Ионизационные	Наблюдаются при напряжениях выше напряжения ионизации газов и газовых включений внутри диэлектрика	Газообразные и твердые диэлектрики с газообразными включениями
4. Обусловленные неоднородностью структуры	Сложная зависимость потерь от компонентов, входящих в состав диэлектрика и случайных примесей	Неоднородные диэлектрики

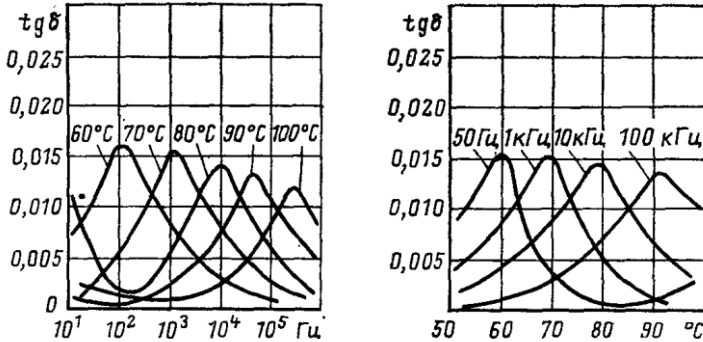


Рис. 10. Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты и температуры для полярного диэлектрика (поливинилацетат)

Резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при световых частотах. Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля. Также эти потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости $\text{tg}\delta$ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура на положение максимума потерь не влияет.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью. Диэлектрические потери, обусловленные сквозной проводимостью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты электрического поля, а $\text{tg}\delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону. Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значения, соответствующие началу ионизации данного газа.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры. Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в производных слюды - миканитах, микалксе и т.д. В таблице приведена классификация потерь в диэлектриках.

1.5. Методика измерения

В лабораторной работе измерение ε и $\operatorname{tg} \delta$ твердых диэлектриков производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 11.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора сигнала G на известном уровне (например, 0,1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать прямо в значениях добротности Q .

Если в контур вносится дополнительная емкость Cx , например в виде емкости, полученной при подключении исследуемого твердого диэлектрика, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура $C = C1 + Cx$, а добротность контура снижается за

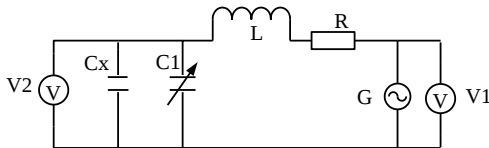


Рис. 11. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

счет потерь различного типа, возникающих в диэлектрике. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0 , по разности показаний конденсатора $C1$ можно определить величину емкости Cx , т.е. это и есть емкость исследуемого диэлектрика. Зная геометрические размеры подключенного диэлектрика можно определить величину ε диэлектрика, используя формулу емкости плоского конденсатора.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{d}, \quad (11)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора, ε_0 - *абсолютная диэлектрическая проницаемость* вакуума ($\varepsilon_0=8,8510^{-12}$ Ф/м), S – площадь обкладок конденсатора, d – расстояние между обкладками конденсатора.

Определяя значение емкости C_x подключенного диэлектрика и учитывая размеры электродов (в работе используется круглый электрод диаметром 3 см), можно рассчитать ε диэлектрика как:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot S} \quad (12)$$

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых диэлектриком в колебательный контур, а следовательно, и $\text{tg}\delta$. При этом $\text{tg}\delta$ можно рассчитать по формуле

$$\text{tg}\delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)} \quad (13)$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном диэлектрике, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном диэлектрике.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого применяется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда диэлектриков в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения ε и $\text{tg}\delta$ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

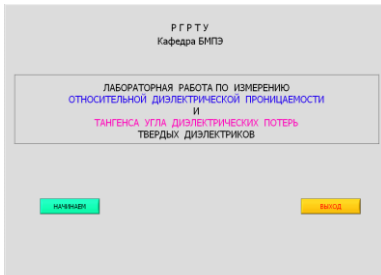
Для начала работы необходимо запустить файл «Танг_диэл» на Рабочем столе ПК. после чего появится окно, изображенное на рис.12,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 12,б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного материала диэлектрика.

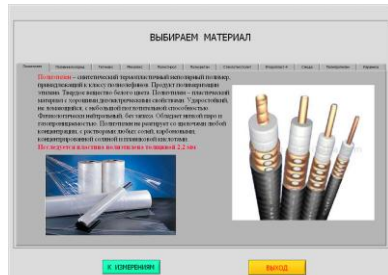
2.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения параметров выбранного диэлектрика, показанное на рис. 13. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображаются схема подключения исследуемого образца диэлектрика и используемые при этом электроды.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 0°C .



а

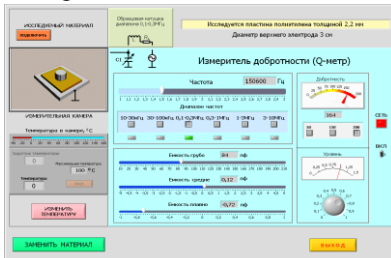


б

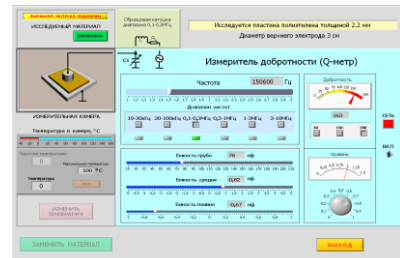
Рис. 12. Внешний вид окна начала работы (а) и выбора материала диэлектрика для исследования (б)

Измерение ϵ и $\text{tg}\delta$ диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.



а



б

Рис. 13. Внешний вид окна для проведения измерений без подключенного к Q-метру исследуемого образца диэлектрика (а) и с подключенным образцом диэлектрика (б)

1. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на 1.
2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик

температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.

3. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

4. Подключить образец диэлектрика щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур диэлектрике.

5. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить в соответствии с пп. 4,5.

6. При необходимости выбрать другой диэлектрик, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного диэлектрика в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 и Q_2 , C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

Диэлектрик 1								
Тем- пер.	Частота	Q_1	C_1	Q_2	C_2	C_x	ε	$\text{tg}\delta$

3. Рассчитать значения ε и $\text{tg}\delta$ для исследуемых диэлектриков по формулам (12) и (13) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое дипольный момент и на что он влияет в диэлектрике?
2. Чем отличается полярная молекула от неполярной?
3. Что такое поляризация диэлектрика и на что влияет это явление?
4. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.
5. Перечислите основные виды поляризации.
6. Чем отличаются электронная поляризация от электронно-релаксационной, ионная от ионно-релаксационной?
7. Какие виды поляризации присущи полярным и неполярным диэлектрикам?
8. Нарисуйте график зависимости ϵ от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
9. Нарисуйте график зависимости ϵ от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.
10. Что такое потери в диэлектриках?
11. Что такое $\operatorname{tg} \delta$ для последовательной схемы замещения диэлектрика?
12. Что такое $\operatorname{tg} \delta$ для параллельной схемы замещения диэлектрика?
13. Нарисуйте график зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
14. Нарисуйте график зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы: измерение с помощью прибора Q-метра емкости и добротности конденсатора при различных частотах и температурах, расчет эквивалентной схемы конденсатора.

1. Теоретические сведения

1.1. Общие сведения о конденсаторах

Конденсаторы, как и резисторы, представляют широкий класс компонентов современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В настоящее время имеется достаточно широкая номенклатура этих элементов, использующих последние достижения науки и техники. Продолжается разработка новых типов конденсаторов с более высокими электрическими, технологическими и эксплуатационными параметрами. Конденсатор – компонент РЭА, предназначенный для накопления электрической энергии и возвращения ее в электрическую цепь. Составляет из электродов (обкладок), разделенных диэлектриком.

Конденсатор характеризуется номинальной емкостью, допустимым отклонением емкости от номинального значения, номинальным рабочим напряжением, сопротивлением изоляции, добротностью и другими параметрами.

Номинальная емкость конденсатора – емкость, которую должен иметь конденсатор в соответствии с ГОСТом. Номинальное значение емкостей, в соответствии с рекомендациями МЭК (Международная электротехническая комиссия), стандартизовано и выбирается из определенных рядов чисел Е3; Е6; Е12; Е24; Е48; Е96; Е192 (цифра указывает количество номинальных значений в каждой декаде). Так, например, для ряда Е6 номинальные значения в пределах декады составляют величины 1.0; 1.5, 2.2; 3.3; 4.7; 6.8. Полное указание номинальной емкости состоит из цифры и обозначения единицы измерений: Ф – фарада; мкФ – микрофарада (10^{-6} Ф); нФ – нанофарада (10^{-9} Ф); пФ – пикофарада (10^{-12} Ф). Фактическое значение емкости может отличаться от номинального в пределах поля допуска, которое исчисляется в процентах от номинального значения и также подчиняется ряду. Имеются буквенная международная кодировка допусков и соответствующие отечественные обозначения. Стоит отметить, что большинство зарубежных компаний – производителей конденсаторов имеют свои условные обозначения типов и параметров конденсаторов. Таблица допусков и их условное обозначение представлены в приложении.

Емкость большинства конденсаторов зависит от температуры. Для ее учета вводят *температурный коэффициент емкости* (ТКЕ), показывающий относительное изменение емкости при изменении температуры на один градус. Для обозначения используется буквенно-цифровая или цветовая (в виде цветных полос или цвета корпуса конденсатора) кодировка. По разновидности ТКЕ конденсаторы разделяют на конденсаторы с ненормируемым ТКЕ, с линейной зависимостью ТКЕ и нелинейной зависимостью ТКЕ.

Для конденсаторов с ненормируемым ТКЕ и нелинейной зависи-

мостью ТКЕ указывается разброс номинальной емкости в диапазоне рабочих температур. Для конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры указывается температурный коэффициент $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (ppm/ $^{\circ}\text{C}$) в рабочем диапазоне температур (обычно $-60 +85^{\circ}\text{C}$). Таблица условных обозначений ТКЕ представлена в приложении.

Номинальное рабочее напряжение – максимальное напряжение, при котором конденсатор может надежно работать в течение гарантированного срока с сохранением своих параметров. Номинальное напряжение меньше испытательного в 1,5...3 раза и значительно ниже пробивного. При испытательном напряжении конденсатор может работать лишь кратковременно. Номинальные напряжения также подчиняются стандартному ряду.

Сопротивление изоляции – сопротивление конденсатора постоянному току. $R_{\text{из}} = U/I_{\text{ут}}$, где U – напряжение; $I_{\text{ут}}$ – сквозной ток (ток утечки). Сквозной ток проводимости имеет электронную или ионную природу. Сопротивление изоляции конденсаторов всех видов, кроме электролитических, велико и выражается в мегаомах, гигаомах, тераомах (10^6 , 10^9 , 10^{12}).

Постоянная времени конденсатора $\tau = R_{\text{из}} \cdot C$ характеризует конденсатор при использовании его в цепи постоянного тока. Постоянная времени обычно используется для характеристики пленочных конденсаторов.

Потери энергии в конденсаторе на заданной частоте определяет *тангенс угла потерь* $\text{tg}\delta$. Потери определяются типом диэлектрика, его качеством, температурой окружающей среды, частотой переменного тока. Изменение $\text{tg}\delta$ происходит в широких пределах от $(10-15) \cdot 10^{-4}$ для фторопластовых, слюдяных, высокочастотных керамических, полистирольных конденсаторов и до $(500-3500) \cdot 10^{-4}$ для оксидных.

Добротность конденсатора $Q = \frac{1}{\text{tg}\delta}$, где $\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_{\text{с}} + \text{tg}\delta_{\text{м}}$. Суммар-

ные потери определяются потерями в диэлектрике и металлических обкладках. На высоких частотах потери за счет поверхностного эффекта растут и добротность конденсатора снижается. Добротность меняется также из-за частотной и температурной зависимости потерь в диэлектрике.

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока, обладает полным сопротивлением (импедансом), включающим кроме емкости омическое сопротивление и индуктивность. На высоких частотах они оказывают большое влияние на амплитуду и форму напряжений и токов цепи, в которую включен конденсатор. Упрощенная эквивалентная схема и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора представлены на рис. 1.

На частоте f конденсатор имеет сопротивление (импеданс)

$$Z = \sqrt{r^2 + \left[\frac{1}{2\pi f C} - 2\pi f L \right]^2}. \quad (1)$$

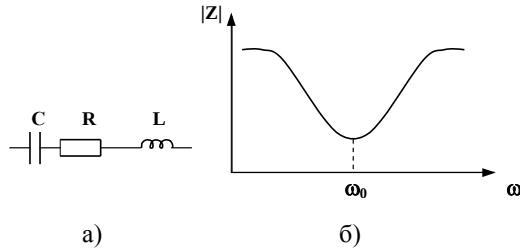


Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора (б)

На высоких частотах конденсатор можно рассматривать как последовательный колебательный контур с резонансной частотой

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\Pi}C}}. \quad (2)$$

На резонансной частоте компенсируются емкостная и индуктивная составляющие импеданса, т. е. $\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L$. Сопротивление резко

снижается, и конденсатор имеет чисто активное сопротивление. На частотах ниже резонансной реактивное сопротивление носит емкостный характер, на частоте выше резонансной – индуктивный (рис. 1, б). Резонансная частота должна быть в 2-3 раза выше рабочей.

Паразитная индуктивность обычно мала, составляет единицы нГн у керамических, слюдяных конденсаторов и сотни нГн у бумажных и пленочных конденсаторов большого номинала. В конденсаторах, изготовленных из диэлектрика с релаксационными видами поляризаций, снижение емкости на частотах $10^5 \dots 10^6$ Гц связано с уменьшением диэлектрической проницаемости. В электролитических конденсаторах емкость начинает уменьшаться уже на частотах $10^2 \dots 10^4$ Гц.

1.2. Конденсаторы для современной малогабаритной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением ее массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров конденсаторов основных типов, соизмеримых по габаритным характе-

ристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа. Такие конденсаторы выпускаются в специальных корпусах (SMD), и их называют ЧИП конденсаторы. Пример такого рода конденсаторов показан на рис. 2. Обычно ЧИП конденсаторы упаковываются в ленту, которая снабжена перфорацией и позволяет легко выбирать их различными автоматами при установки на печатную плату.

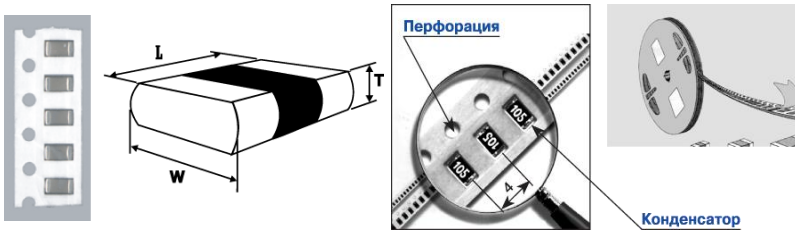


Рис. 2. ЧИП конденсаторы

ту.

Линейные размеры таких конденсаторов лежат в пределах от десятых долей до единиц миллиметров. ЧИП конденсаторы используются в малагабаритных, переносных и других типах РЭА. В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом большое количество компаний производит ЧИП конденсаторы от простых керамических до электролитических с величинами номиналов от единиц пикофарад до десятков микрофард. Такие конденсаторы могут использоваться практически в любых диапазонах частот. В качестве примера ниже в табл. 1 и 2 приведены типовые размеры и некоторые параметры ЧИП конденсаторов компании производителя Vibrant Development.

Таблица 1

Типоразмеры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

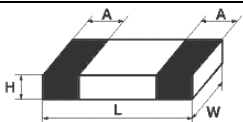
Типоразмер	L	W	H		A
			Min	Max	
1210 	3,2 мм	2,60 мм	1,0 мм	1,25 мм	0,75 мм

Таблица 2

Параметры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

Диэлектрик	NPO	X7R
Диапазон номинальных емкостей	1пФ - 3.3нФ	470 пФ-0.1мкФ
Диапазон рабочих температур	-55 + 125 °C	-55 + 125 °C

2. Методика проведения измерений

В данной работе определяются параметры конденсатора: номинальная емкость, $\text{tg}\delta$, активное сопротивление потерь и ТКЕ. В лабораторной работе измерение параметров конденсаторов производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора - измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная

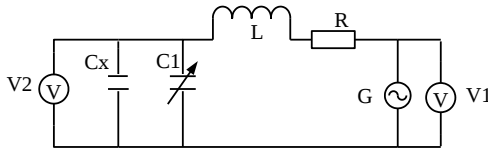


Рис. 3. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

схема Q-метра показана на рис. 3.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать в значениях добротности.

Если в контур вносится дополнительная емкость Cx , например в виде емкости исследуемого конденсатора, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура $C = C1 + Cx$, а добротность контура снижается за счет потерь различного типа, возникающих в подключенном конденсаторе. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0 , по разности показаний конденсатора $C1$ можно определить величину емкости Cx , т.е. это и есть емкость исследуемого конденсатора.

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых конденсатором в колебательный контур, а следова-

тельно, и его $\operatorname{tg}\delta$. При этом $\operatorname{tg}\delta$ можно рассчитать по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)}, \quad (3)$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном исследуемом конденсаторе, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном к Q-метру исследуемому конденсатору.

3. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом емкости исследуемого конденсатора и тангенса угла его диэлектрических потерь с применением прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда конденсаторов от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения C_X и $\operatorname{tg}\delta$ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лаб_конденсатор» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис. 4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора



Рис. 4. Окна запуска лабораторной работы

конденсатора, как показано на рис. 4,б.

Выбор конденсатора осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием конденсатора. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного типа конденсаторов

для исследования в лабораторной работе.

3.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно проведения измерений прибором Q-метр, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом конденсатора. На рис. 5,а исследуемый конденсатор не подключен к прибору Q-метр, а на рис. 5,б подключен. Здесь же отображается функциональная схема подключения исследуемого кон-

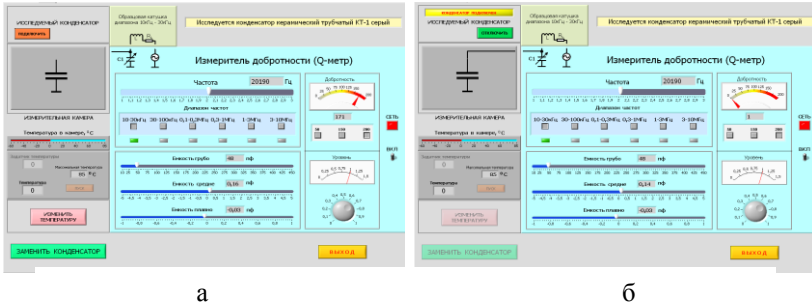


Рис. 5. Окно проведения измерений прибором Q-метр

денсатора.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 °С. Измерение параметров конденсатора необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на отметку «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру», в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.
4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . В процессе проведения измерений на одной частоте значения Q_1 и емкость C_1 остаются постоянными. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного

конденсатора.

5. Подключить исследуемый конденсатор щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур конденсаторе.

6. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить измерения как в пп. 4,5.

7. При необходимости выбрать другой конденсатор, используя кнопку «Заменить конденсатор».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретных конденсаторов в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 и Q_2 , C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

3. Рассчитать значения C , X_C , Q , R_{Π} для исследуемых конденсаторов по формулам (4) – (8) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием преподавателя:

$$\text{– емкость конденсатора } C = C_2 - C_1; \quad (4)$$

$$\text{– реактивное сопротивление } X_C = \frac{1}{2\pi f C}; \quad (5)$$

$$\text{– добротность конденсатора } Q = \frac{(C_2 - C_1)Q_1Q_2}{C_1(Q_1 - Q_2)}; \quad (6)$$

$$\text{– активное сопротивление } R_{\Pi} = \frac{C_1Q_1 / Q_2 - Q_1}{2\pi f C_1Q_1Q_2}; \quad (7)$$

$$\text{– тангенс угла потерь конденсатора } \operatorname{tg}\delta = 1/Q. \quad (8)$$

4. Определить ТКЕ конденсатора в указанном диапазоне температур и сопоставить его со значениями, указанными в приложении к лабораторной работе.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;

- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Классификация и маркировка конденсаторов

Классифицируют конденсаторы по типу диэлектрика. Сокращенные обозначения содержат три элемента. Первый элемент - буква или сочетание букв - определяет тип конденсатора (К - постоянной емкости; КП - переменной емкости; КТ - подстроечный; КС - конденсаторной сборки). Второй элемент – число, обозначающее используемый вид диэлектрика: 10 – керамические на номинальное напряжение до 1600 В; 15 – керамические на номинальное напряжение 1600 В и выше; 20 – кварцевые; 21 – стеклянные; 22 – стеклокерамические; 23 – стеклоэмалевые; 31 – слюдяные малой мощности; 32 – слюдяные большой мощности; 40 – бумажные на номинальное напряжение до 2 кВ с обкладками из фольги; 41 – бумажные на номинальное напряжение 2 кВ и выше с обкладками из фольги; 50 – электролитические фольговые алюминиевые; 51 – электролитические фольговые танталовые, ниобиевые и др.; 52 – электролитические объемно-пористые; 53 – полупроводниковые оксидные; 54 – металлические оксидные; 60 – воздушные; 61 – вакуумные; 71 – полистирольные; 72 – фторопластовые; 73 – полиэтилентерефталатные лавсановые; 72 – комбинированные; 76 – лакопленочные; 77 – поликарбонатные. Третий элемент – порядковый номер, присваиваемый при разработке. Дополнительно может содержать буквенное обозначение (П – для работы в цепях постоянного и переменного токов; Ч – для работы в цепях переменного тока; И – для работы в импульсных режимах; У – для работы в цепях постоянного тока и в импульсных режимах).

Обозначения и маркировка применяются двух типов в зависимости от размера конденсатора. На конденсаторах большого размера обозначаются тип, номинальная емкость, допустимое отклонение емкости в процентах, номинальное напряжение, марка завода-изготовителя, месяц и год выпуска.

При маркировке применяются обозначения полные или сокращенные (кодированные). Кодированные обозначения номинальной емкости состоят из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква обозначает множитель p , n , μ , m , F (соответственно 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} , 1) для значений емкости, выраженных в фарадах. Например, 5,6 пФ–5р6; 150 пФ–150р(п15); 2,2 мкФ–2 μ 2; 10

мФ-10т. Кодированные обозначения допустимых отклонений приводятся в справочной литературе (в таблицах).

Ниже представлена кодировка допускаемых отклонений емкости конденсаторов. Буквенное обозначение допуска указано для международного и российского стандартов.

Допуск, %	Буквенное обозначение	Цвет
$\pm 0,1$ пФ*	B (Ж)	Не указан
$\pm 0,25$ пФ*	C (У)	Оранжевый
$\pm 0,5$ пФ*	D (Д)	Желтый
± 1 пФ*	F (Р)	Коричневый
± 2	G (Л)	Красный
± 5	J (И)	Зеленый
± 10	K (С)	Белый
± 20	M (В)	Черный
± 30	N (Ф)	Не указан
-10...+30	Q (О)	Не указан
-10...+50	T (Э)	Не указан
-10...+100	Y (Ю)	Не указан
-20...+50	S (Б)	Фиолетовый
-20...+80	Z (А)	Серый
* Для конденсаторов емкостью меньше 10 пФ		

Кодировка ТКЕ конденсаторов.

Конденсаторы с ненормируемым ТКЕ			
Группа ТКЕ	Допуск при -60...+85 °С (%)	Буквенный код	Цвет*
H10	± 10	B	Оранжевый (+черный)
H20	± 20	Z	Оранжевый (+красный)
H30	± 30	D	Оранжевый (+зеленый)
H50	± 50	X	Оранжевый

			(+голубой)
H70	± 70	E	Оранжевый (+фиолетовый)
H90	± 90	F	Оранжевый (+белый)
* Современная цветовая кодировка. Цветные полосы или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.			

Конденсаторы с линейной зависимостью емкости от температуры

Обозначение ГОСТ	Международное	ТКЕ (ppm/°C) *	Буквенный код	Цвет**
П100	P100	+100	A	Красный (+фиолетовый)
П33		+33	N	Серый
МП0	NP0	0(+30...-75)	C	Черный
M33	N030	-33 (+30...-80)	H	Коричневый
M47	N050	-47 (+30...-80)	M	Желтый
M75	N080	-75 (+30...-80)	L	Красный
M150	N150	-150 (+30...-105)	P	Оранжевый
M220	N220	-220 (+30...-120)	R	Желтый
M330	N330	-330 (+60...-180)	S	Зеленый

M470	N470	-470 (+60...-210)	T	Голубой
M750	N750	-750 (+120...-330)	U	Фиолетовый
M1500	N1500	-1500(-1300)	V	Оранжевый (+оранжевый)
M2200	N2200	-2200	K	Желтый (+оранжевый)

* В скобках приведен реальный разброс для импортных конденсаторов в диапазоне температур -55...+85°C.

** Современная цветовая кодировка. Цветные полосы или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.

Конденсаторы с нелинейной зависимостью от температуры

Группа ТКЕ*	Допуск, %	Температура,** °C	Буквенный код***	Цвет***
Y5F	± 7,5	-30...+85		
Y5P	± 10	-30...+85		Серебряный
Y5R		-30...+85		Серый
Y5S	± 22	-30...+85	R	Коричневый
Y5U	+22...-56	-30...+85	S	
Y5V (2F)	+22...-82	-30...+85	A	
X5F	± 7,5	-55...+85		
X5P	± 10	-55...+85		
X5S	± 22	-55...+85		
X5U	+22...-56	-55...+85		Синий

X5V	+22...-82	-55...+85		
X7R (2R)	± 15	-55...+85		
Z5F	± 7,5	-10...+85	B	
Z5P	± 10	-10...+85	C	
Z5S	± 22	-10...+85		
Z5U (2E)	+22...-56	-10...+85	E	
Z5V	+22...-82	-10...+85	F	Зеленый
* Обозначение приведено в соответствии со стандартом EIA, в скобках - IEC. ** В зависимости от технологий, которыми обладает фирма, диапазон может быть другим. *** В соответствии с EIA. Некоторые фирмы пользуются другой кодировкой.				
		Отечественное обозначение ТКЕ	Замена на:	
		M1500, M750	X7R	
		H10, H20, H30, H50, H70, H90	Y5V	
		ПЗЗ, МП0, М47	NP0	

7. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. От чего зависит емкость конденсатора?
2. Для чего используют конденсаторы в РЭА?
3. Что такое тангенс дельта и добротность конденсатора?
4. От чего зависит добротность конденсатора?
5. Нарисуйте эквивалентную схему конденсатора и объясните назначение ее элементов.
6. Что такое номинальная емкость конденсатора и допускаемые отклонения?
7. Что такое ТКЕ и от чего он зависит?
8. Как классифицируются конденсаторы?
9. Как сокращенно обозначаются значения емкости конденсаторов?

10. Из каких диэлектрических материалов выполняются конденсаторы?
11. Объяснить зависимости, полученные в работе.
12. Объяснить график частотной зависимости полного сопротивления конденсатора.
13. На какие группы разделяют ТКЕ конденсаторов?
14. Как добротность конденсатора зависит от температуры?
15. Как добротность конденсатора зависит от частоты?
16. Каковы конструктивные особенности СВЧ конденсаторов?
17. Какие конструктивные особенности конденсаторов для малогабаритной аппаратуры?
18. Почему растет $\tan \delta$ конденсатора на высоких частотах?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения пробивного напряжения и определение электрической прочности диэлектрических материалов

1. Основные теоретические сведения

1.1. Электрический пробой твердых диэлектриков

Надежность и долговечность электрической изоляции проводов, диэлектрика конденсаторов и других деталей радиоэлектронной аппаратуры, особенно работающих при повышенных электрических напряжениях, зависят от электрической прочности диэлектрика. Электрическая прочность диэлектрика зависит от напряжения пробоя $U_{пр}$, т.е. напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, а именно потеря диэлектриком изолирующих свойств.

Электрическую прочность диэлектрика в однородном электрическом поле определяют величиной пробивного напряжения $U_{пр}$, отнесенной к толщине диэлектрика d или расстоянию между электродами, – т.е. напряженностью электрического поля при пробое $E_{пр}$. Пробивное напряжение $U_{пр}$ в большинстве случаев прямо пропорционально величине d , зависит от параметров диэлектрика и окружающей среды и характеризует конкретную конструктивную особенность данного изделия. Напряженность электрического поля при пробое $E_{пр}$ не зависит от толщины и поэтому характеризует электрическую прочность материала диэлектрика:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}. \quad (1)$$

Электрическая прочность измеряется в В/м, однако допускаются

производные единицы измерения: МВ/м, кВ/мм, кВ/см. Величина $E_{пр}$ характеризует способность диэлектрика противостоять разрушающему действию электрического поля и зависит в первую очередь от агрегатного состояния изолятора и его свойств.

Различают четыре вида электрического пробоя твердых диэлектриков.

- 1) электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков;
- 2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;
- 3) тепловой (электротепловой) пробой;
- 4) электрохимический пробой.

Каждый из указанных видов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля (постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты), наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор, от условий охлаждения, времени воздействия напряжения.

Электрический пробой обычно происходит в диэлектриках с низкой электропроводностью, низким тангенсом угла диэлектрических потерь и хорошим отводом тепла.

1. Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков характеризуется весьма быстрым развитием. Он протекает за время, меньшее $10^{-7} - 10^{-8}$ с, и не обусловлен тепловой энергией, хотя электрическая прочность при электрическом пробое в некоторой степени все же зависит от температуры.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих изначально свободных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Под действием электрического поля и имея некоторую длину свободного пробега λ , электроны разгоняются и получают дополнительную кинетическую энергию $W = qU_{\lambda}$, где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ . Электроны, достигшие определенной критической скорости при столкновении с нейтральной молекулой или атомом, могут производить отщепление одного или нескольких новых электронов. Каждый из отщепленных от атомов и молекул электронов может ускоряться электрическим полем и выбить при достаточно набранной энергии еще несколько других электронов. Таким образом, возникает лавинообразное увеличение количества свободных электронов и за счет лавинного умножения таких электронов возникает участок в диэлектрике с повышенной проводимостью.

Это приводит к резкому возрастанию проводимости твердого диэлектрика в месте формирования электронной лавины, и возникает явление электрического пробоя. Как правило, резкое возрастание тока

приводит к повышенному выделению тепла и в месте возникновения лавины происходит разрушение структуры диэлектрика.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние разогрева диэлектрика за счет высокой электропроводности и диэлектрических потерь, также обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Для однородного поля и полной структурной однородности материала напряженность поля при электрическом пробое может служить мерой электрической прочности вещества. Такие условия удается наблюдать для монокристаллов щелочно-галогенидных соединений и некоторых органических полимеров. В этом случае $E_{пр}$ достигает сотен мегавольт на метр и более. Для однородных материалов наблюдается существенная разница между значениями пробивного напряжения в однородном и неоднородном электрических полях.

2. *Электрический пробой неоднородных диэлектриков* характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения. Так же, как и электрический пробой однородного диэлектрика, он весьма быстро развивается.

Наличие газовых включений и других неоднородностей с меньшей диэлектрической проницаемостью ϵ , меньшей чем в самом материале диэлектрика, приводит к неравномерному распределению напряженности электрического поля по объему материала. Это влечет увеличение напряженности электрического поля в веществе с меньшей величиной ϵ и первоначальное возникновение пробоя именно в этом месте. Возникновение пробоя, например в газовом промежутке, приводит к нарушению структуры вещества диэлектрика в месте его соприкосновения с неоднородностью и местному разогреву. Возникают локальные механические и тепловые напряжения, приводящие к растрескиванию вещества. Все это ведет к росту проводимости в локальном месте диэлектрика, увеличению плотности тока и дальнейшему разогреву. Электропроводность диэлектриков увеличивается с ростом температуры, и, следовательно, растет ток в локальном месте. Таким образом формируется лавинообразный процесс увеличения электропроводности в локальном месте диэлектрика и возникает пробой. Напоминаем, что причиной этого процесса являлась неоднородность в структуре диэлектрика.

Пробивные напряжения для неоднородных диэлектриков, находящихся во внешнем однородном или неоднородном поле, как правило, имеют невысокие значения и мало отличаются друг от друга.

Принято считать, что в однородном поле электрическая прочность стекол, фарфора и других твердых диэлектриков не зависит от толщины образца. Однако основные работы по изучению влияния сте-

пени однородности поля на электрическую прочность проводились лишь со стеклом при очень малых толщинах образцов - от 0,05 до 0,2 - 0,5 мм, когда число дефектов невелико. Понятно, что с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает число газовых включений и снижаются электрические прочности как в однородном, так и в неоднородном поле. Иногда на опыте можно видеть, что электрическая прочность керамики при электродах, создающих внешнее неоднородное поле, будет даже выше, чем при электродах, обеспечивающих однородное поле. Так, электрическая прочность образцов рутиловой керамики толщиной 1,6 - 1,7 мм при постоянном напряжении для электродов игла - плоскость составляет примерно 24 МВ/м, а для плоских электродов - всего 12,5 - 15 МВ/м.

Из этого следует, что чем меньше площадь электродов, тем выше может быть значение электрической прочности керамических материалов вследствие уменьшения числа инородных включений, попадающих в пределы поля, хотя поле в этом случае резко неоднородное. Снижение электрической прочности твердых диэлектриков при увеличении площади электродов наблюдается не только у керамики, но и у других материалов: бумаги, картона, лакотканей.

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее значения. Выше этого значения наблюдается заметное снижение электрической прочности, что говорит о появлении теплового механизма пробоя.

Низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытой пористостью (непропитанная бумага, дерево, пористая керамика). Электрическая прочность их сравнительно мало отличается от таковой для воздуха; исключение составляет бумага с повышенной плотностью. Твердые диэлектрики с закрытыми порами, например плотная керамика, характеризуются более высокой электрической прочностью. Наличие газовых включений в твердой изоляции особенно опасно при высоких частотах. На высоких частотах в газовых промежутках возникает сильная ионизация и возможно образование плазмы. Это приводит к появлению активных химических веществ по краям газового включения, которые могут иметь более высокую проводимость, инициировать локализацию тока и вызвать электрический пробой в локальном месте, как описано выше. Электрический пробой неоднородных диэлектриков при прочих равных условиях требует применять материалы с большей толщиной для улучшения изоляционных свойств электроустановок.

Высокой электрической прочностью характеризуются диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений. К ним относятся: слюда, пропитанная жидким диэлектриком бу-

мага, стекла. Статистические исследования напряжения пробоя диэлектриков показали, что коэффициент вариации (Квар) напряжения пробоя для неоднородных диэлектриков превышает значение 0,15, а для однородных - менее 0,15. Чем однороднее диэлектрик, тем меньше для него значение Квар.

3. *Тепловой пробой.* Характерен для диэлектриков с высокой электропроводностью, большим значением тангенса угла диэлектрических потерь и плохим теплоотводом. Этот пробой сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих потере им электроизоляционных свойств в локальном месте, связанной с чрезмерным возрастанием сквозной электропроводности или диэлектрических потерь. Пробивное напряжение при тепловом пробое зависит от целого ряда факторов: частоты электрического поля, условий охлаждения, температуры окружающей среды и др. При нахождении

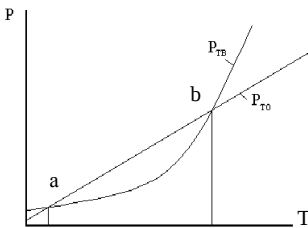


Рис. 1. Зависимости мощности выделения тепла ($P_{ТВ}$) и мощности отвода тепла ($P_{ТО}$) от температуры

диэлектрика в электрическом поле часть энергии электрического поля рассеивается в диэлектрике из-за диэлектрических потерь, сквозной проводимости, в результате чего диэлектрик нагревается. Повышение температуры диэлектрика по сравнению с окружающей средой ведет к увеличению теплоотвода. Дальнейшее развитие процессов зависит от соотношения скоростей отвода тепла и тепловыделения. На рис.1 показаны зависимости мощности тепловыделения ($P_{ТВ}$) и мощности отвода тепла ($P_{ТО}$) от температуры окружающей среды для неполярного диэлектрика.

Как видно из приведенного рисунка, в области температур от точки а до точки б мощность отвода тепла превышает мощность тепловыделения, поэтому повышения температуры не происходит, т.е. система находится в равновесии. Для перехода в область за точку б необходимо дополнительное выделение тепла. Это обусловлено тем, что при росте температуры увеличивается электропроводность диэлектрика, растут ток и выделяемое в диэлектрике тепло. Рост температуры увеличивает электропроводность и выделяемое тепло. Создается лавнообразный процесс увеличения тепловыделения, кривая тепловыделения $P_{ТВ}$ на рис. 1 поднимается выше кривой теплоотвода и начинается необратимый разогрев диэлектрика, приводящий к его пробое и разрушению. Этот процесс может происходить достаточно быстро, и

температура диэлектрика начинает быстро расти. Нагрев материала диэлектрика может привести к его растрескиванию, оплавлению, обугливанию, что снижает электрическую прочность диэлектрика и ведет к его разрушению.

Очевидно, что стойкость к электротепловому пробоем зависит как от свойств самого материала (у полярных диэлектриков диэлектрические потери выше и стойкость к электротепловому пробоем ниже), так и от конструкции изолятора. Чем больше поверхность изолятора, тем больше тепла рассеивается в окружающую среду и меньше вероятность электротеплового пробоя.

Следует также отметить, что в случае, когда рабочая температура изолятора приближается к точке b , любое повышение температуры приведет к выходу изоляции из строя. В то же время в случае, когда рабочая температура находится ниже точки b , колебания температуры не столь опасны. Нагрев диэлектрика (при нахождении его при температуре ниже точки b) приведет к увеличению мощности отвода тепла. Поэтому мощности выделения и отвода тепла сравниваются.

4. *Электрохимический пробой* имеет особенно существенное значение при нахождении диэлектрика в химически агрессивных средах, при повышенной температуре и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развиваются электролитические процессы, обуславливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции. Уменьшение сопротивления диэлектрика стимулирует увеличение через него тока и дополнительное выделение тепла. Температура диэлектрика возрастает, и это активизирует электролитические и электрохимические процессы в веществе, что в свою очередь уменьшает сопротивление изоляции и приводит к росту тепловыделения. Таким образом, возникает лавинообразный процесс роста температуры изоляции и к ее разрушению.

Такое явление часто называют старением диэлектрика в электрическом поле, поскольку оно приводит к постепенному снижению электрической прочности, заканчивающемуся пробоем при напряженности поля, значительно меньшей пробивной напряженности, полученной при кратковременном испытании. Это явление имеет место в органических (пропитанная бумага, резина и т.д.) и некоторых неорганических диэлектриках (например, титановая керамика).

Электрохимический пробой требует для своего развития длительного времени. Это связано с явлением электропроводности, приводящим к медленному выделению в материале малых количеств химически активных веществ, или с образованием полупроводящих соединений. В керамике, содержащей окислы металлов переменной валентно-

сти (например, TiO_2), электрохимический пробой встречается значительно чаще, чем в керамике, состоящей из окислов алюминия, кремния, магния, бария.

Наличие щелочных окислов в алюмосиликатной керамике способствует возникновению электрохимического пробоя и ограничивает допустимую рабочую температуру. При электрохимическом пробое большое значение имеет материал электрода. Серебро, из которого могут быть выполнены электроды, способно диффундировать в керамику и облегчает электрохимический пробой в противоположность, например, золоту.

1.2. Физические явления электрического пробоя в газообразных диэлектриках

Внешней изоляцией во многих видах электротехнических конструкций, таких как трансформаторы, конденсаторы, линии электропередачи, служит воздух. Электрическая прочность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с $E_{\text{пр}}$ большинства жидких и твердых диэлектриков.

Небольшое число содержащихся в газе положительных и отрицательных ионов и электронов вызвано в основном внешними воздействиями (радиационный фон, ультрафиолетовое излучение и др.). Эти носители зарядов, как и нейтральные молекулы газа, находятся в беспорядочном тепловом движении. При наложении электрического поля заряды получают некоторую добавочную скорость и начинают перемещаться вдоль вектора поля или в противоположном направлении, в зависимости от знака заряда. При этом заряженная частица в газе приобретает дополнительную энергию

$$W = qU_{\lambda}, \quad (2)$$

где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ носителя заряда

Если поле достаточно однородно, то можно принять $U_{\lambda} = E\lambda$, где E - напряженность поля. Отсюда

$$W = Eq\lambda. \quad (3)$$

Добавочная энергия заряженных частиц сообщается молекулам, с которыми они сталкиваются. Если эта энергия достаточно велика, происходит возбуждение атомов и молекул, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту, или даже ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы. Условие, определяющее возможность ионизации:

$$W \geq W_{\text{и}}, \quad (4)$$

причем W включает в себя и энергию теплового движения, обычно

небольшую при нормальной температуре.

Из формул (2) и (3) получаем условие ионизации нейтральной молекулы вещества:

$$Eq\lambda \geq W_{\text{и}}. \quad (5)$$

Энергию ионизации $W_{\text{и}}$ обычно характеризуют ионизационным потенциалом

$$U_{\text{и}} = W_{\text{и}}/q. \quad (6)$$

Ионизационный потенциал большинства различных газов изменяется в пределах от 4 до 25 эВ, что соответствует энергии ионизации 4 - 25 эВ.

При заданных значениях давления газа и температуры ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, поскольку q и λ постоянны для каждого газа при данных конкретных условиях. Эта напряженность поля $E_{\text{пр}}$ называется начальной напряженностью.

В некоторых газах, например в кислороде, углекислом газе, парах воды, отделившийся электрон при одной из ближайших встреч с другой нейтральной молекулой соединяется с ней, превращая ее в электроотрицательный ион. Присоединение, «прилипание» электрона к нейтральной молекуле приводит в подобных случаях к такой перестройке ее электронной оболочки, что в итоге энергия молекулы, захватившей лишний электрон, оказывается меньше энергии нейтральной молекулы на некоторую величину, которую называют энергией сродства к электрону. Она колеблется у большинства различных газов в пределах 0,75 - 4,5 эВ. В инертных газах - в аргоне, неоне, гелии, криптоне, ксеноне, а также в азоте - отрицательные ионы не возникают. При разряде в воздухе образуются положительные ионы газов, содержащихся в атмосфере: O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ , NO^+ .

Скорость электрона (километр в секунду), прошедшего без столкновений разность потенциалов U (вольт), определяется выражением

$$v \approx 600\sqrt{U}. \quad (7)$$

Подставляя в эту формулу ионизационные потенциалы, получаем, что электрон способен ионизировать газовые молекулы, когда скорость его движения свыше 1000 км/с.

Казалось бы, подобно электронам, и положительные ионы, разогнанные полем, сталкиваясь с нейтральными частицами газа, должны вызывать ионизацию газа. В действительности при энергиях до сотен и тысяч электрон-вольт соударения положительных ионов с частицами газа непосредственно не приводят к ионизации газа. Такое различное действие электронов и положительных ионов на частицы газа объясня-

ется тем, что электроны имеют значительно большую подвижность, чем ионы. Кроме того, отщепляемый электрон отталкивается электроном, столкнувшимся с частицей газа, и, наоборот, притягивается положительным ионом. Сказывается также и то, что для электрона длина свободного пробега больше, чем для иона. Если положительный ион, разогнанный полем, испытывает соударение с периферическим электроном на внешней электронной оболочке нейтральной частицы, то условия для отщепления электрона оказываются неблагоприятными, так как при большом различии массы энергия, отдаваемая электрону при ударе, мала. Ионизация при соударении ионов с частицами газа зависит от химической природы столкнувшихся частиц, поскольку соударения являются элементарным актом химической реакции. При разряде в газе, находящемся между металлическими электродами, положительные ионы высвобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода.

В некоторых случаях электрон, разогнанный полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее, как указывалось выше, в возбужденное состояние. В следующий момент эта возбужденная молекула отдает свою избыточную энергию в форме электромагнитного излучения — испускает фотон. Фотон может поглощаться какой-либо другой молекулой, которая получает дополнительную энергию, и ее электро-

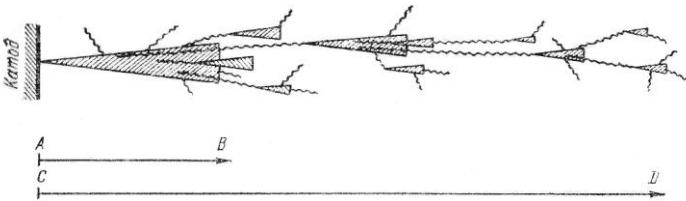


Рис. 2. Схематическое изображение распределения стримера при пробое газа

ны внешней оболочки уже имеют меньшую энергию ионизации. Эти молекулы гораздо легче ионизируются другими электронами. Такая внутренняя фотонная ионизация газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особенно быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной проводимостью газа.

На рис.2 представлена схема, поясняющая, почему рост электропроводящего канала — стримера — происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. На рис.2 лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути

фотонов. Внутри каждого конуса, представляющего собой развивающуюся лавину, газ ионизируется ударами электронов; вновь отщепленные электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые ими частицы газа, и таким образом лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, направляющихся к катоду.

Волнистые линии исходят из атомов, которые были возбуждены ударами электронов и вслед за тем испустили фотоны. Двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте, соответствующем концу волнистой линии, увеличивают энергию электронов молекул газа. В таких молекулах ионизация происходит при меньших энергиях разогнанного полем электрона и освобожденные здесь электроны, устремляясь к аноду, порождают новую лавину далеко впереди первой лавины. Таким образом, пока первая лавина вырастает, скажем, на длину малой стрелки АВ (рис.2), намечающийся канал повышенной проводимости газа, т. е. стример, распространяется на длину большой стрелки CD.

В следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг друга, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа.

Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока положительно заряженных частиц, направленного к катоду. Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы. Поясним это подробнее. Электронные лавины оставляют на своем пути большое число вновь образованных положительных ионов, концентрация которых особенно велика там, где лавины получили свое наибольшее развитие, т. е. около анода. Если концентрация положительных ионов здесь достигает определенного значения (близкого к 10^{12} ионов в 1 см^3), то, во-первых, обнаруживается интенсивная фотонная ионизация, во-вторых, электроны, освобождаемые частицами газа, поглотившими фотоны, притягиваются положительным пространственным зарядом в головную часть положительного стримера и, в-третьих, вследствие ионизации концентрация положительных ионов на пути стримера увеличивается. Насыщение электронами пространства, заполненного положительными зарядами, превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. Под влиянием ударов положительных ионов на катоде образуется катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа. Обычно пробой газа происходит практически мгновенно: длительность подготовки пробоя газа при длине промежутка 1 см составляет порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ с. Чем больше напряжение, приложенное к газовому промежутку, тем быстрее

может развиваться пробой. Если длительность воздействия напряжения очень мала, то пробивное напряжение повышается. Это повышение обычно характеризуют коэффициентом импульса

$$\beta = U_{np} / U_{np50}, \quad (8)$$

где U_{np} - пробивное напряжение при данном импульсе; U_{np50} - пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении частотой 50 Гц. Коэффициент импульса в резко неоднородных электрических полях может достигать значения 1,5 и даже превышать его. Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой. Рассмотрим явление пробоя газа в однородном поле. Однородное поле можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами при расстоянии между ними, соизмеримом с диаметром сферы. В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Между электродами возникает искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность. Появление искры при заданном расстоянии между электродами используют для определения значения приложенного напряжения (измерение высоких напряжений с помощью шаровых разрядников).

При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение электрической прочности воздуха. Это явление можно объяснить трудностью формирования разряда при малом расстоянии между электродами. При нормальных условиях, т. е. при давлении 0,1 МПа и температуре около 20 °С, электрическая прочность воздуха при расстоянии между электродами 1 см составляет примерно 3 МВ/м; а при $h = 5$ мкм она достигает 70 МВ/м.

Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности (т. е. от давления, если температура постоянна). При малых изменениях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа. Поэтому для расчета пробивных напряжений воздуха применяется формула

$$U_{np} = U_{np0} \delta, \quad (9)$$

где U_{np} - пробивное напряжение при данных температуре и давлении; U_{np0} - пробивное напряжение при нормальных условиях ($t = 20$ °С и давлении $p = 0,1$ МПа). Относительная плотность воздуха δ рассчитывается по соотношению

$$\delta = 0,386 \frac{p}{t + 273}, \quad (10)$$

где t - температура, °С; p - давление, мм рт. ст. При нормальных ус-

ловиях окружающей среды $\delta = 1$.

При больших давлениях и соответственно повышенной плотности газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше; тем самым уменьшается длина свободного пробега электронов и, как следует из формулы (4), для того чтобы пробой произошел, должна быть увеличена напряженность электрического поля.

При уменьшении давления вначале наблюдается падение электрической прочности, как это видно из рис.3; когда же давление доходит до некоторого предела (ниже атмосферного давления) и разрежение достигает высоких степеней, электрическая прочность начинает

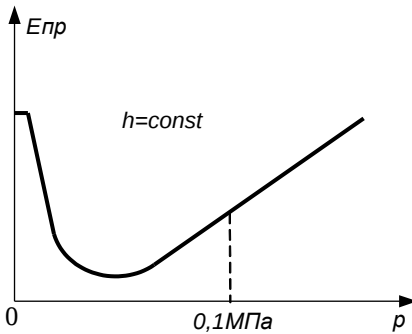


Рис. 3. Зависимость электрической прочности газа от давления

снова возрастать. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. При высоком вакууме пробой можно объяснить явлением вырывания электронов из поверхности электрода (холодная эмиссия). В этом случае электрическая прочность доходит до весьма высоких значений, зависит от материала и состояния поверхно-

сти электродов и больше не изменяется («полочка» на рис.3). Большую электрическую прочность вакуума используют в технике при конструировании вакуумных конденсаторов для больших напряжений высокой частоты.

Газы при больших давлениях применяются в качестве изоляции для высоковольтной аппаратуры, а также в производстве кабелей и конденсаторов высокого напряжения. Химический состав газа заметно влияет на электрическую прочность. Закономерности, которым подчиняется пробой газов в неоднородном поле, заметно отличаются от описанных выше закономерностей, наблюдаемых при пробое в однородном поле. Неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, между проводами линий электропередачи, между сферическими поверхностями при расстоянии между ними, превышающем диаметр сферы, и т. д.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде короны в местах, где напря-

женность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения между электродами.

Электрическая прочность воздушного зазора зависит от радиационного фона. Это связано с тем, что рост радиации приводит к увеличению количества свободных носителей заряда в газе и облегчает формирование электронной лавины. Радиоактивность измеряется в различных единицах. Мерой радиоактивности служит активность. Одной из единиц измерения служит Беккерель (Бк), что соответствует 1 распаду в секунду. Содержание активности в веществе часто оценивают на единицу веса вещества (Бк/кг) или объема (Бк/куб.м).

Также используется еще такая единица активности, как кюри (Ки). Это - огромная величина: 1 Ки = 37000000000 Бк. Активность радиоактивного источника характеризует его мощность. Так, в источнике активностью 1 кюри происходит 37000000000 распадов в секунду.

Как было сказано выше, при этих распадах источник испускает ионизирующее излучения. Мерой ионизационного воздействия этого излучения на вещество является экспозиционная доза. Часто измеряется в рентгенах (Р). Поскольку 1 рентген - довольно большая величина, на практике удобнее пользоваться миллионной (мкР) или тысячной (мР) долями рентгена.

1.3. Статистические методы исследования электрического пробоя диэлектриков

О величине электрической прочности материала нельзя судить по результатам одного опыта из-за большого разброса значений $U_{пр}$, полученных в одних и тех же условиях испытания (толщина диэлектрика, размер электродов, температура окружающей среды, скорость повышения напряжения и т.д.). Разброс значений $U_{пр}$ одинаковых образцов может достигать 50 %.

Чтобы судить о величине электрической прочности материала, необходимо произвести большое число испытаний на пробой (не менее 10), а экспериментальные результаты обработать статистическим методом. Наилучшим приближением к истинному значению пробивного напряжения является среднее арифметическое из n измерений:

$$U_{np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{inp} \quad (11)$$

Мера отклонения отдельного измерения величины пробивного напряжения U_i от истинного значения $U_{пр}$ есть среднеквадратичное отклонение σ , которое не зависит от числа измерений, но зависит от свойств самого материала и от условий проведения эксперимента. Мера отклонения среднего значения пробивного напряжения от истинного значе-

ния U_{np} есть среднеквадратичная величина σ_m , которая зависит от числа измерений n . Величины σ и σ_m связаны между собой соотношением

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

Для определения σ_m можно воспользоваться формулой Питерса. Если определим для i – го измерения остаток

$$|A_i| = U_{inp} - U_{np} \quad (13)$$

и найдем среднее значение n остатков, взятых без учета знака,

$$r = \frac{1}{n} \sum_i |A_i|, \quad (14)$$

то формула Питерса примет вид

$$\sigma_m \approx \frac{5}{4\sqrt{n-1}} r. \quad (15)$$

Это выражение связывает среднеквадратичное отклонение среднего значения пробивного напряжения от истинного. Пробивное напряжение в этом случае

$$U_{np} = U_{np} + \sigma_m. \quad (16)$$

Чем менее однородным является материал, тем больше σ_m и σ . Степень однородности определяется по коэффициенту вариации:

$$K_{var} = \frac{\sigma}{U_{np}}. \quad (17)$$

К однородным материалам относятся такие, для которых $K_{var} < 0,15$, к неоднородным – материалы с $K_{var} > 0,15$. Пробивную напряженность (электрическую прочность) определяют по формуле (1) при постоянном напряжении, переменном напряжении промышленной частоты, напряжениях высокой частоты и импульсных напряжениях. Чаще всего определение E_{np} производят при переменном напряжении промышленной частоты.

2. Методика измерений электрической прочности

Измерение пробивного напряжения диэлектрика производят обычно с помощью установок, обобщенная принципиальная схема которых приведена на рис.4. Схема содержит: Т – повышающий трансформатор, максимальное выходное напряжение которого может быть 10 кВ и более. Коэффициент трансформации определяет максимальное напряжение, которого можно достичь при заданном максимальном входном напряжении. АТ – автотрансформатор с плавной регулировкой напряжения; Р – реле максимального тока, отключающее высоковольтный трансформатор при пробое образца; МП1, МП2 – магнитные пускатели; которые подключают сеть к автотрансформатору. Л1 и Л2 – сигнальные лампы. V – вольтметр переменного тока. Резистор R ограничивает максимальную величину тока через образец при пробое.

При испытании образцы располагают на плоском нижнем электроде, выполненном из нержавеющей стали. В качестве верхнего электрода обычно применяют шары различных диаметров. Для определения пробивного напряжения испытуемый образец располагают между электродами, находящимися под защитным колпаком, имеющим блокировочный контакт. Магнитные пускатели подключают электрическую сеть к автотрансформатору, после чего можно подавать с него напряжение на первичную обмотку трансформатора Т. Путем ручного или автоматического увеличения автотрансформатором напряжения на первичной обмотке трансформатора Т напряжение на испытуемом образце плавно повышается до его пробоя. Напряжение, при котором произойдет пробой, фиксируют с помощью вольтметра V. В случае пробоя испытуемого образца магнитные пускатели МП1 и МП2 отключают автотрансформатор от электрической сети. После этого образец материала заменяют на другой и обеспечивают подготовку следующего цикла измерения.

3. Выполнение лабораторной работы

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

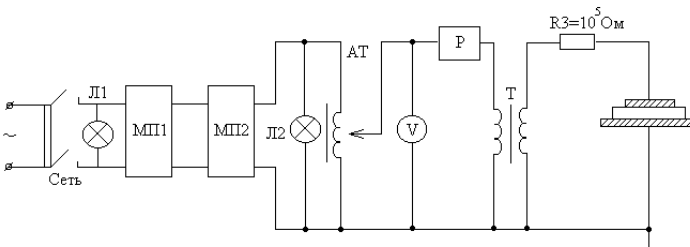
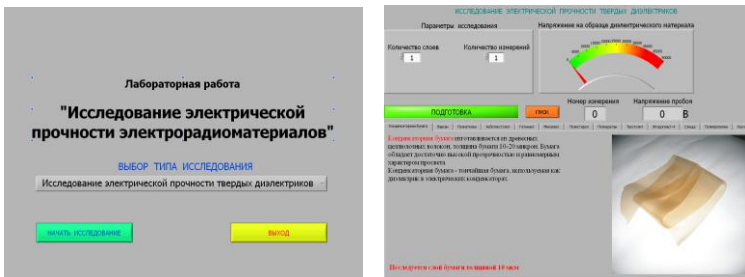


Рис. 4. Функциональная схема установки для измерения напряжения электрического пробоя твердых диэлектриков

зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Пробой_диэл» на Рабочем столе ПК. После чего появится окно, изображенное на рис.5,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления.

Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** исследуется *электрическая прочность твердых диэлектриков*, а **во второй части** исследуется *электрическая прочность воздушного зазора*. Начинать работу можно с любой из частей, выбрав в меню «Выбор типа исследования» щелчком левой кнопки мыши нужный тип исследования. Начинается исследование со щелчка левой кнопкой мыши по кнопке «Начать исследование».

3.1. Исследование электрической прочности твердых



а

б

Рис. 5. Внешний вид окна «Выбора типа исследования» (а) и окна исследования пробивного напряжения диэлектрика (б)

диэлектриков

Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.5,б. В нижней части панели происходит выбор материала для исследования щелчком по соответствующей вкладке. На каждой вкладке представлены конкретный материал диэлектрика и его краткое описание. Указывается толщина исследуемого образца материала. В верхней части панели задаются параметры исследования в виде количества слоев материала и количества необходимых измерений. Числовые значения в цифровые элементы управления задаются стандартным способом операционной системы Windows. (выделить и изменить).

ВНИМАНИЕ! Процесс измерения полностью автоматизирован и заканчивается автоматически после выполнения заданного количества измерений. Индикатор зеленого цвета «Подготовка» указывает на то, что происходит подготовка высоковольтной установки к началу измерений. Процесс измерения задается нажатием кнопки «Пуск». Процесс измерения напряжения пробоя отображается индикатором «Внимание! Высокое напряжение». Полученный массив измеренных данных отображается на специальном *индикаторе массива* справа в верхней части панели. Элементы массива, не уместившиеся на индикаторе, могут быть просмотрены с использованием кнопок *инкремент – декремент*, отображаемых слева в верхней части индикатора массива (рис.6). Цифровой индикатор рядом с кнопками *декремент – инкремент* указывает на индекс элемента массива, который всегда отображается в верхней строке *индикатора массива*. После выполнения полного цикла заданного количества измерений на панели управления появляются дополнительные кнопки, которые позволяют изменить параметры исследования (количество слоев, количество измерений) или прекратить исследование и перейти на выбор другого исследования (рис.7). На панель управления также выведены дополнительные индикаторы, отображающие процесс выполнения исследований.

После выполнения полного цикла заданного количества измерений на панели управления появляются дополнительные кнопки, которые позволяют изменить параметры исследования (количество слоев, количество измерений) или прекратить исследование и перейти на выбор другого исследования (рис.7). На панель управления также выведены дополнительные индикаторы, отображающие процесс выполнения исследований.



Рис. 6. Отображение массива измеренных значений

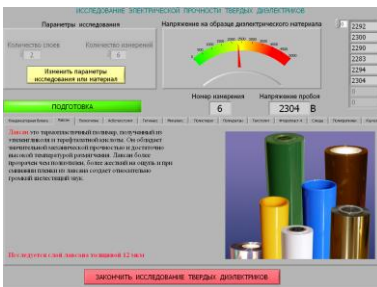


Рис. 7. Экран ПК после выполнения цикла измерений

3.2. Исследование электрической прочности воздушного зазора

Это исследование происходит в различных состояниях воздушного зазора в измерительной камере. Исследуется напряжение пробоя при различных *давлениях воздуха и радиационных фонах*. Для перехода к этой части лабораторной работы необходимо в первом окне ра-

боты (рис.5,а) выбрать из меню соответствующий пункт. Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.8. Она состоит из двух частей. Каждая их них активизируется только в своем режиме работы. После перехода к исследованию воздушного зазора появляется панель управления насосом (рис. 8,а), задающим давление в измерительной камере. После задания нужного давления, включения насоса и достижения заданного давления можно переходить к измерению напряжения пробоя. Для этого используются соответствующие кнопки панели управления.

Панель управления исследованием напряжения пробоя воздушного зазора показана на рис. 8,б. Элементы управления этой панели во многом соответствуют ранее описанной панели управления при исследовании напряжения пробоя твердых диэлектриков.



Рис. 8. Окна управления насосом (а) и измерения напряжения пробоя воздушного зазора (б)

4. Последовательность выполнения работы

4.1. Исследовать электрическую прочность твердых диэлектриков, указанных преподавателем. Для этого:

а) произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя для каждого слоя. Количество слоев также указывает преподаватель;

б) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m для каждого из слоев как
$$U_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i ;$$

в) построить график $U_m = F(N)$ и определить среднюю величину пробивной напряженности электрического поля (электрическую прочность) как $E = U_m/d$, где d – толщина исследуемого образца;

г) для максимального количества слоев исследуемого диэлектрика разделить диапазон напряжений пробоя между максимальным и минимальным значениями на несколько (5-7) зон и построить гистограмму распределения количества напряжений пробоя попавших в вы-

деленные зоны;

д) определить среднеквадратичное отклонение σ напряжений пробоя для максимального количества слоев диэлектрика как

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_i - U_m)^2}{N}};$$

е) определить коэффициент вариации напряжения пробоя для максимального количества слоев диэлектрика.

4.2. Исследовать электрическую прочность воздушного зазора. Для этого:

а) установить величину давления (Р) в измерительной камере по указанию преподавателя и для обычного радиационного фона 15 мкР/ч произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя;

б) произвести измерения (по п. 2.2 а) для указанных преподавателем давлений в измерительной камере при неизменном радиационном фоне;

в) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m воздушного зазора для каждого значения давления в измерительной камере;

г) построить график $U_m = F(P)$;

д) установить давление в измерительной камере 750 мм рт. ст. и, увеличивая указанное преподавателем значение радиационного фона (R), произвести по 5 измерений напряжения пробоя воздушного зазора для каждого значения радиационного фона;

е) определить пробивного напряжения U_m для каждого значения радиационного фона R и построить график $U_m = F(R)$.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электрический пробой диэлектриков?
2. В каких единицах и почему именно в них измеряется электри-

ческая прочность диэлектриков?

3. В каких диэлектриках возможен электрический пробой, тепловой пробой, электрохимический пробой?

4. Что такое энергия ионизации?

5. Как возникает электрический пробой в газообразных диэлектриках?

6. Что такое стример и какова его роль в электрическом пробое газообразных диэлектриков?

7. Как развивается тепловой пробой?

8. Как и почему происходит электрический пробой твердых неоднородных диэлектриков?

9. Как происходит электрический пробой твердых однородных диэлектриков?

10. Как происходит электрохимический пробой твердых диэлектриков?

11. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от давления газа?

12. Что такое коэффициент вариации пробивного напряжения и что он определяет?

13. Как пробивное напряжение диэлектрика зависит от его толщины?

14. Почему для исследования пробивной прочности диэлектрика используют статистические методы?

15. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от уровня радиации?

16. Почему при одинаковой толщине газообразного и твердого диэлектрика пробивное напряжение твердого диэлектрика значительно выше, чем у газообразного?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы: ознакомление с основными электрическими параметрами высокочастотных катушек индуктивности и методами измерения этих параметров на переменном токе высокой частоты.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Общие сведения о катушках индуктивности

Катушки индуктивности, трансформаторы, дроссели относятся к моточным компонентам радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Основ-

ной рабочий элемент – обмотка, используемая для реализации магнитных свойств. Доля моточных компонентов в устройствах РЭА составляет от 3 до 8 %. В высокочастотных катушках индуктивности используется индуктивный характер сопротивления в диапазоне 100 кГц – 10 ГГц. Катушки индуктивности обладают свойством оказывать реактивное сопротивление переменному току при незначительном сопротивлении постоянному току. Совместно с конденсаторами они используются для создания фильтров, осуществляющих частотную селекцию электрических сигналов, а также для создания элементов задержки сигналов и запоминающих элементов, осуществления связи между цепями через магнитный поток и т.д. В отличие от резисторов и конденсаторов они не являются стандартизованными изделиями, а изготавливаются для конкретных целей и имеют такие параметры, которые необходимы для осуществления тех или иных преобразований электрических сигналов. Катушки индуктивности в основном применяются:

- для колебательных контуров (параллельных и последовательных);
- получения магнитной связи за счет магнитного поля между отдельными участками цепей РЭА (связанные контуры);
- создания в электрической цепи реактивного сопротивления индуктивного характера (дрессели).

Материал проводника обмотки катушки – металл с большой проводимостью. Форма катушек может быть любой, но большее применение получили катушки цилиндрические.

Виды намотки – однослойная, многослойная, однослойная с шагом, универсальная, внавал.

Катушки индуктивности по конструкции можно разделить на несколько групп: каркасные и бескаркасные, с сердечниками и без сердечников, экранированные и неэкранированные.

Свойства высокочастотных катушек индуктивности характеризуются следующими параметрами:

- номинальная величина индуктивности (от единиц нГн до сотен мГн);
- добротность катушки (порядка 10-200);
- собственная емкость катушки (в зависимости от конструкции от долей до десятков пФ);
- температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

Однослойная катушка образуется путем размещения провода по поверхности каркаса в один слой по винтовой линии. Витки обмотки располагаются плотно, виток к витку, или на некотором расстоянии друг от друга. В первом случае обмотка называется сплошной, во втором – с шагом. Фактически при сплошной обмотке не представляется

возможным уложить провод без зазора, и расстояние между осевыми линиями двух соседних витков (шаг намотки τ) оказывается несколько больше, чем диаметр провода в изоляции ($d_{из}$):

$$\tau = \alpha d_{из}, \quad (1)$$

где α – коэффициент неплотности обмотки.

Длиной обмотки однослойной катушки ℓ является расстояние между осевыми линиями двух крайних витков:

$$\ell = \tau(N-1), \quad (2)$$

где N – число витков катушки.

Наружный диаметр катушки:

$$D = D_0 + 2d_{из}, \quad (3)$$

где D_0 – диаметр каркаса. Для однослойных катушек с достаточной точностью можно считать $D \approx D_0$.

Величина индуктивности L_0 однослойной катушки без сердечника определяется по формуле:

$$L_0 = K_L N^2 D \cdot 10^{-8}, \text{ Гн}, \quad (4)$$

где K_L – поправочный коэффициент, значение которого приведено в табл. 1; значение D подставляется в мм.

Таблица 1

ℓ / D	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
K_L	20	17	15,5	13	11,3	10	9,2	7,7
ℓ / D	1	1,5	2	3	4	5	6	10
K_L	6,8	5	4	2,7	2,2	1,8	1,5	1

При введении в катушку *магнитного сердечника* ее индуктивность возрастает в μ_c раз (μ_c – действующая магнитная проницаемость сердечника):

$$L_C = L\mu_c. \quad (5)$$

Величина μ_c зависит от начальной магнитной проницаемости материала, формы и размера сердечника, размеров катушки и от частоты. Сердечники различают по материалу и по форме. В качестве сердечников могут использоваться как магнитные, так и немагнитные материалы. Наиболее широкое применение находят сердечники круглого и прямоугольного сечения, броневые (с замкнутой или разомкну-

той магнитной цепью) и цилиндрические. Индуктивность катушек с кольцевыми сердечниками и равномерно распределенной однослойной обмоткой определяется по формуле:

$$L_c = \frac{LSN^2 \mu_a 10^{-7}}{D_{\text{ср}}}, \text{ Гн}, \quad (6)$$

где $D_{\text{ср}}$ - средний диаметр кольца, м; S - сечение кольца, м²; N - число витков; μ_a - начальная магнитная проницаемость кольца.

Цилиндрические сердечники применяются для увеличения индуктивности катушек и как элемент настройки. Индуктивность катушки с цилиндрическим сердечником и однослойной равномерной обмоткой рассчитывается по формуле:

$$L_c = \frac{\mu_c N^2 D^2 \cdot 100}{(\ell / D) + 0,44}, \text{ Гн}, \quad (7)$$

где ℓ - длина намотки; D - диаметр намотки. Формула (7) справедлива при соотношении $\ell / D \leq 5$.

Индуктивность катушки с многослойной намоткой и магнитным сердечником определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_c N^2 D_{\text{ср}} \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{3D_{\text{ср}} + 9h + 10t} - \Delta L, \text{ Гн}, \quad (8)$$

где $D_{\text{ср}}$ - средний диаметр намотки; h - высота катушки; t - радиальная ширина намотки; ΔL - поправка на шаг намотки.

$$\Delta L = \mu_c [\ln(d_{\text{из}} / d_0) + 0,1]. \quad (9)$$

В катушках индуктивности помимо основного эффекта взаимодействия тока и магнитного поля наблюдаются паразитные эффекты, вследствие которых сопротивление катушки не является чисто реактивным и равным $X_L = \omega L$. Наличие паразитных эффектов ведет к появлению потерь в катушке, оцениваемых сопротивлением потерь r_n , которое определяет добротность катушки индуктивности.

Добротность катушек индуктивности в общем случае определяется формулой:

$$Q = \frac{\omega L}{r_n}, \quad (10)$$

где L - индуктивность катушки, Гн; ω - частота, рад/с; r_n - общее сопротивление потерь в катушке, Ом.

Потери в катушке создаются в обмотке, каркасе и экране. Рас-

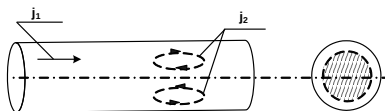


Рис. 1. Иллюстрация скин-эффекта

смотрим некоторые из них.

1. Скин - эффект

При прохождении высокочастотного тока магнитное поле тока J_1 наводит индуктивный ток J_2 , который на поверхности совпадает с током J_1 , а в объеме - противоположно направлен. Поэтому уменьшается действующее сечение проводника (см. рис.1, заштрихованная часть проводника).

2. Эффект близости

Если расстояние между витками большое, то поля соседних витков не влияют друг на друга. При сближении наблюдается процесс вытеснения тока к внутренним областям (рис. 2).

Увеличение диаметра d провода приводит к уменьшению омического (активного) сопротивления катушки, а также обусловленного действием магнитного поля внутри витка, но к росту сопротивления за счет эффекта «близости», обусловленного действием соседних витков. Поэтому существует оптимальное сечение провода при заданных габаритах катушки, значениях её индуктивности и рабочей частоты.

3. Сердечники.

Введение ферромагнитного сердечника позволяет увеличить индуктивность катушки:

$$L_c = L_{\mu c}. \quad (11)$$

При той же индуктивности можно уменьшить число витков. Сердечник вносит дополнительные потери, однако при определенных условиях добротность катушки возрастает, если индуктивное сопротивление растёт больше, чем потери, вносимые сердечником. В качестве

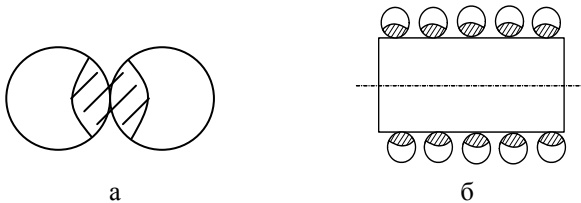


Рис. 2. Иллюстрация эффекта близости: а - в соседних витках;
б - в соседних слоях

сердечников используются ферромагнетики с высоким удельным сопротивлением (малы потери на вихревые токи). Это ферриты и магнитодиэлектрики.

Магнитодиэлектрики - композиционный материал, где наполнителем служит ферромагнитный порошок, а в качестве связующего звена - органический (фенолоформальдегидная смола, эпоксидная смола, полистирол) или неорганический (стёкла) изолятор. За счет высокого

сопротивления связующих веществ сопротивление сердечника очень высокое и потери на вихревые токи минимальны.

Добротность катушки с сердечником:

$$Q = \frac{\mu_c w L}{r_n + r_c}, \quad (12)$$

где r_c – сопротивление потерь, вносимых сердечником в катушку.

При $r_c \ll r_n$ добротность катушки при введении сердечника возрастает в μ_c раз. При увеличении частоты тока μ_c уменьшается, а потери растут. При некотором значении частоты

$$\frac{\mu_c}{1 + (r_c / r_n)} < 1 \quad (13)$$

добротность катушки уменьшается.

Собственная емкость катушек индуктивности (C_0) складывается из суммарных емкостей, существующих между отдельными витками, а также между витками и другими элементами конструкции катушки. Наименьшим значением C_0 обладают однослойные катушки.

Температурная стабильность параметров катушек индуктивности характеризуется температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ). Значение ТКИ, как правило, положительное. ТКИ задается следующим соотношением:

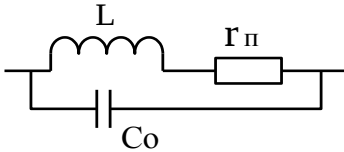
$$TKI = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T}, \quad (14)$$

где ΔL – изменение значения индуктивности в диапазоне температур ΔT .

Увеличение индуктивности катушки при росте температуры определяется следующими явлениями:

- увеличиваются длина и диаметр каркаса, что приводит к изменению шага обмотки и диаметра витков;
- увеличиваются длина и диаметр провода обмотки, что приводит к тем же последствиям;
- увеличивается сопротивление провода обмотки, что может снижать добротность катушки;
- увеличиваются потери в материалах каркаса и изменяется его диэлектрическая проницаемость, что может изменять собственную емкость C_0 .

Все перечисленные явления приводят к изменениям индуктивности, добротности и собственной емкости катушек, что в большинстве случаев крайне нежелательно. Устранить или скомпенсировать действие этих дестабилизирующих факторов не представляется возможным, однако при рациональном выборе конструкции их действие можно свести к минимуму. Зависимость Q от температуры определяется температурным коэффициентом добротности $ТКД$.



(15)

$$ТКД = \frac{\Delta Q}{Q \cdot \Delta T}.$$

Рис. 3. Эквивалентная схема катушки

Практически величина добротности лежит в пределах от 10 до 200. Повышение добротности достигается оптимальным выбором диаметра провода, увеличе-

нием размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями. С учетом потерь и собственной емкости катушку индуктивности можно представить в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 3. Сопротивление $г_p$ характеризует общие потери энергии в катушке индуктивности, вызванные различными факторами, а C_0 - собственную емкость катушки индуктивности.

1.2. Катушки индуктивности современной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров катушек индуктивности, соизмеримых по габаритным характеристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа.

Обычно катушки индуктивности для поверхностного монтажа имеют три конструктивных разновидности: многослойные, толстопленочные и намотанные. На рис. 4 показан внешний вид малогабаритных ЧИП катушек.

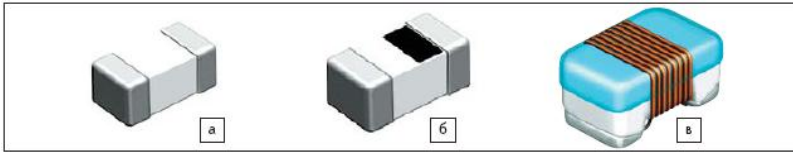


Рис. 4. Внешний вид ЧИП катушек индуктивности для поверхностного монтажа: а - многослойные индуктивности, б - толсто пленочные индуктивности, в - намотанные индуктивности

Типичные варианты конструкций катушек индуктивности, например, компании MuRata показаны на рис. 5. Конструктивно катушки выполнены в четырех вариантах, схематично изображенных на рис. 5.

Катушки, представленные на рис. 5,а, содержат в конструкции сердечник из окиси алюминия с вертикальным расположением проводочной обмотки. Катушки такой конструкции являются высокочастотными и предназначены для работы на частотах до 6 ГГц. Эти конструкции отличаются высокой добротностью и большими токами.

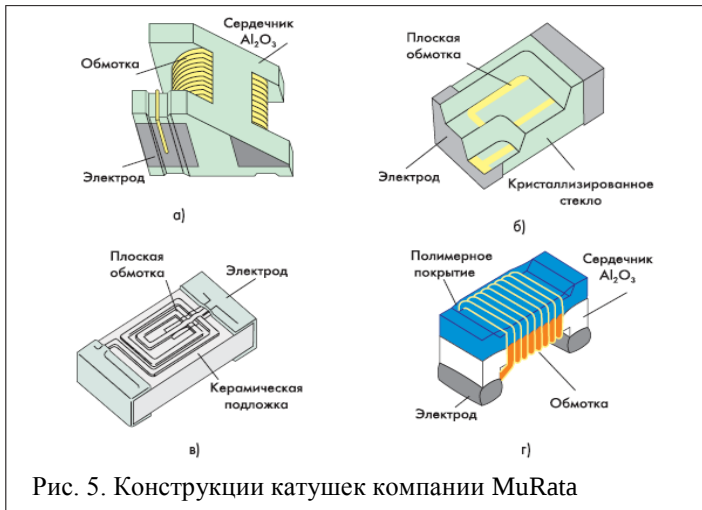


Рис. 5. Конструкции катушек компании MuRata

Катушки, приведенные на рис. 5,б, представляют собой многослойную конструкцию, где в качестве каркаса используют специальное стекло. Обмотка катушки в таком варианте выполнена пленочным проводником, нанесенным несколькими слоями внутри каркаса. Это позволяет получить катушку индуктивности для высокочастотного диапазона с малыми размерами корпуса и достаточно большими тока-

ми. Катушки, представленные на рис. 5,в, изготовлены на стеклянной основе однослойным пленочным проводником. Эти катушки обладают малыми отклонениями от номинала и имеют рекордно малые размеры (0,6х0,3х0,3 мм). Они предназначены для применения в сложной малогабаритной переносной РЭА, например такой, как мобильные телефоны.

Катушки, представленные на рис. 5,г, отличаются от других горизонтальной проволоочной обмоткой. При этом каркас катушки выполнен из окиси алюминия, а корпус сверху покрыт полимерным материалом, который защищает и фиксирует обмотку. Эти катушки допускают работу в диапазоне температур $-50...+120^{\circ}\text{C}$. Верхняя рабочая частота ограничена собственным резонансом катушки и для некоторых катушек составляет 11 – 18 ГГц.

Некоторые производители малогабаритных катушек используют в качестве каркаса высококачественную ферритовую керамику. В настоящее время различные производители выпускают широкую номенклатуру катушек индуктивности для поверхностного монтажа. Так, например, в табл. 2 представлены основные характеристики и внешний вид некоторых образцов катушек индуктивности компании SUMIDA

Таблица 2

Максимальные размеры, мм			Индуктивность, мкГн	Внешний вид
Высота	Длина	Ширина	Мин	
3,5	4,8	4,3	1	
4,8	6,1	5,5	10	
4,0	8,1	7,3	10	
5,5	10,4	9,6	10	
5,9	13,1	12,1	10	

В табл. 3 представлены основные параметры некоторых катушек индуктивности для поверхностного монтажа компании Yageo (ЧСР – частота собственного резонанса катушки).

Таблица 3

Се- рия	Индуктив- ность, L	Точ- ность, %	Доброт- ность, Q	ЧСР, мГц	Сопротивле- ние, Ом	Сила тока, мА
CL	0,047 – 18мкГн	10,20	25 –45	18 – 320	0,15 –0,75	5 –300
NL	0,1 – 1000мкГн	10,20	28 –50	2,5 – 700	0,44 –50	30 – 450
CLH	1,0 –470 нГ	5,10	8	1250 – 6000	0,1 –2,0	200,30 0
LCN	1,6 –270 нГ	5,10	16 –40	900 – 1250 0	0,03 –2,8	170 – 700

В табл. 4 представлены основные параметры некоторых СВЧ катушек индуктивности компании MuRata, выполненные по конструктивному варианту, показанному на рис. 5, а.

Таблица 4

Внешний вид	Индуктивность, нГн	Добротность	ЧСР, мГц	Сопротивление, Ом
	39 ± 5%	80	1700	0,09
	47 ± 5%	65	1600	0,23
	68 ± 5%	65	1200	0,23
	100 ± 5%	60	900	0,38
	150 ± 5%	35	350	0,26
	220 ± 5%	45	500	0,7

1.3. Метод измерения параметров катушек индуктивности

В лабораторной работе измерение основных параметров катушек индуктивности производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 6.

В приборе используется явление резонанса в последовательном

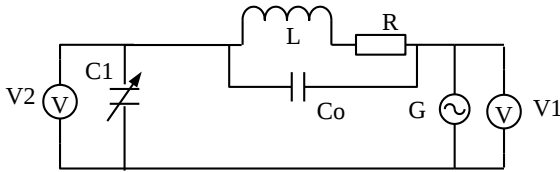


Рис. 6. Принципиальная схема измерителя добротности (Q-метра)

колебательном контуре. Этот контур сформирован исследуемой катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором $C1$. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G , частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G , изменяя емкость конденсатора $C1$, контур настраивается в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре $V2$. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров $V2$ и $V1$, т.е. $Q = V2/V1$. Если поддерживать напряжение генератора G на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра $V2$ можно проградуировать прямо в значениях добротности Q . При предположении, что конденсатор $C1$ практически не имеет потерь, добротность в контуре при резонансе будет определять параметр Q катушки индуктивности.

Рассмотрим основные соотношения в системе катушка индуктивности со своей эквивалентной схемой (рис. 3) и последовательно включенным образцовым конденсатором $C1$. В этой системе возможны два вида резонанса - последовательный на частоте $F_{\text{пос}}$, определяемой соотношением

$$F_{\text{пос}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot (C_1 + C_0)}} \quad , \quad (16)$$

и параллельный на частоте $F_{\text{пар}}$, определяемой соотношением

$$F_{\text{пар}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_0}} \quad . \quad (17)$$

Параллельный резонанс – это собственный резонанс катушки индуктивности, обусловленный собственной емкостью C_0 . На частоте собственного резонанса добротность катушки индуктивности максимальна. После частоты собственного резонанса добротность катушки индуктивности резко падает из-за влияния собственной емкости катушки, поэтому катушки индуктивности практически не используют

на частотах выше частоты собственного резонанса.

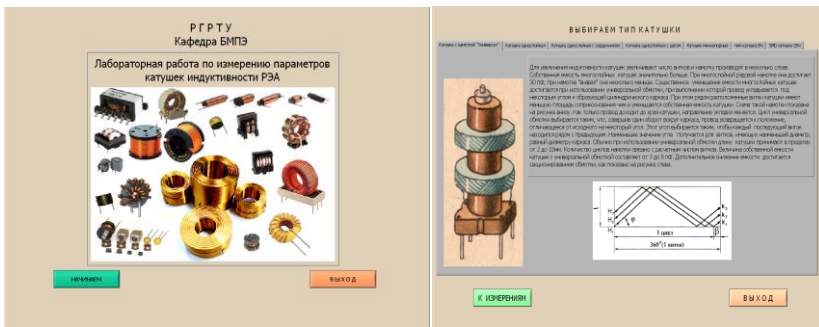
Последовательный резонанс в контуре Q-метра происходит на более низкой частоте, чем параллельный. Добротность всего контура при этом практически соответствует добротности исследуемой катушки, если не учитывать потери в конденсаторе C_1 . При $C_1 \gg C_0$, как обычно и бывает, можно по формуле (16) определить индуктивность исследуемой катушки.

Используя соотношение (17) можно определить собственную емкость катушки индуктивности, построив график зависимости добротности от частоты и определить частоту максимального значения добротности катушки.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом параметров катушек индуктивности с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда катушек индуктивности, в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лаборт_индукт» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.7,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, приме-



а

б

Рис. 7. Вид рабочих окон программы: а - вид окна начала работы с программой; б - вид окна выбора катушки индуктивности для исследования

няемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора типа катушки индуктивности, как показано на рис. 7,б.

Выбор катушки индуктивности осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранной катушки индуктивности.

3. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения добротности катушки индуктивности прибором Q-метр, показанное на рис. 8. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом катушки. Здесь же отображается схема подключения исследуемой катушки индуктивности.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По



Рис. 8. Окно управления прибором Q-метр

умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 °C. Измерение добротности катушки необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задат-

чик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и щелкнуть по кнопке «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и перейти к измерениям.

4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение температуры, частоты измерительного сигнала, значения добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1 . Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

5. Изменить частоту сигнала и произвести новые измерения как в п. 4.

6. При необходимости изменить температуру в камере как в п. 3.

7. При необходимости выбрать другую катушку, используя кнопку «Заменить катушку».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретной катушки индуктивности в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1 , C_1 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже. Рекомендуется начать с температуры в измерительной камере 20°C .

Темпер.	Частота	Q_1	C_1	L	r_{Π}	μ_c

3. Рассчитать значения L для исследуемых катушек, используя формулу (16), и построить графики зависимости добротности и индуктивности от частоты при температуре 20°C .

4. Рассчитать значение сопротивления потерь r_{Π} катушки, используя формулу (10), и построить график зависимости r_{Π} от частоты.

5. На частоте, указанной преподавателем, определить среднее значение ТКИ и ТКД по формулам (14) и (15).

6. В случае исследования катушки с магнитным сердечником дополнительно рассчитать значение μ_c , используя формулу (5), и занести данные в дополнительный столбец таблицы. Построить зависимость μ_c от температуры при фиксированной частоте.

5. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
 - название работы;
 - цель работы;
 - основные теоретические сведения;
 - конструктивные особенности исследуемых катушек;
 - схемы измерения;
 - полученные расчетные данные;
 - необходимые графики, требуемые по заданию.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Назначение катушек индуктивности при использовании их в РЭА.
2. От чего зависит величина индуктивности катушки?
3. Назовите основные классические конструкции катушек индуктивности.
4. Перечислите основные параметры катушек индуктивности.
5. Что такое собственная емкость катушки индуктивности и от чего она появляется?
6. Какие способы уменьшения собственной емкости катушки вы знаете?
7. Нарисуйте эквивалентную схему катушки индуктивности и объясните назначение ее элементов.
8. Зачем в катушку индуктивности помещают магнитный сердечник и на какие параметры катушки индуктивности он влияет?
9. Что такое ТКИ и как он определяется?
10. Что такое ТКД и как он определяется?
11. Что такое собственный резонанс катушки индуктивности?
12. Что такое собственное сопротивление катушки и из чего оно состоит?
13. Как каркас катушки влияет на ее параметры?
14. Какие конструкции современных катушек индуктивности используют для поверхностного монтажа?
15. Что такое ЧИП катушки и как конструктивно они выполнены?

Библиографический список

1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.- 350 с.: ил.

2. Пасынков В. В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1986. - С. 325-359.

3. Электрорадиоматериалы / под ред. Б. М. Тареева. - М.: Высшая школа, 1978. - С. 122 – 130.

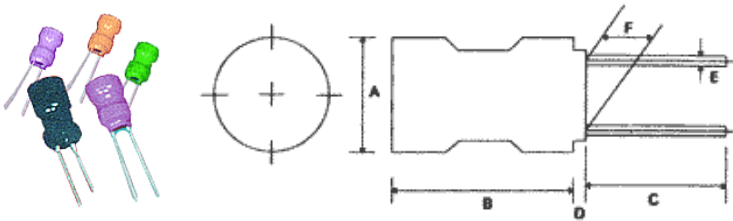
4. Справочник по схемотехнике для радиолюбителя /под ред. В.П.Боровского.- Киев: Техника, 1987.- 431 с.

5. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т /под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 1. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 584 с., ил.

6. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 3. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 896 с., ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры и характеристики некоторых малогабаритных катушек индуктивности отечественных производителей



Индуктивность РК0406

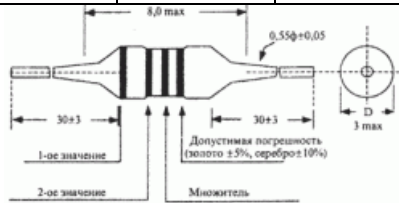
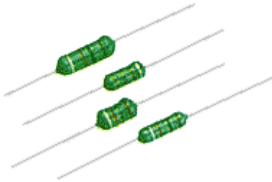
Ана-
КИГ

A (макс)	B (макс)	C (мин)	D (макс)	E (± 0.05)	F (макс)
5.0	8.0	15.0	3.0	0.55	2.0 ± 0.5

лог

Тип	Индуктивность, мкГн	Добротность, Q, мин	Резонансная частота, МГц, мин	Активное со- противление, Ом, макс
РК0406- 1R0M- S0	1.0	130	120	0.035
РК0406- 4R7M- S0	4,7	100	50	0,140
РК0406- 6R8M-	6,8	100	30	0,15

S0				
PK0406-100M-S0	10	80	20	0,23
PK0406-220K-S0	22	80	10	0,45



Индуктивность ЕС24

Аналоги ДПМ, ДМ

Система обозначений

ЕС	24-	330	K-	T5	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

- (1) Тип**
(2) Форма
(3) Индуктивность
(4) Точность
(5) Вид формовки
(6) "А" -- упаковка в ленте

Цвет	Значение	Множитель	Точность, %
Черный	0	1	-
Коричневый	1	10	-
Красный	2	100	-
Оранжевый	3	1000	-
Желтый	4	-	-
Зеленый	5	-	-
Голубой	6	-	-
Фиолетовый	7	-	-
Серый	8	-	-
Белый	9	-	-
Черный	-	-	±20
Серебряный	-	0.01	±10
Золотой	-	0.1	±5

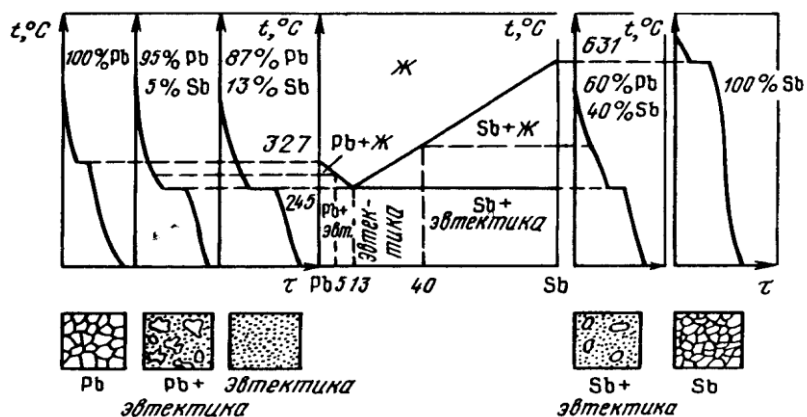
Тип	Индуктивность, мкГн	Точность, %	Добротность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное сопротивление, макс, Ом
EC24-R027M-CC	0.027	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	500	0.02
EC24-R033M-CC	0.033	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	490	0.02
EC24-R039M-CC	0.039	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	480	0.02

Тип	Индук- тивность, мкГн	Точность, %	Доброт- ность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное со- противление, макс, Ом
EC24- R33K	0.33	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	350	0.16
EC24- R39K	0.39	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	320	0.18
EC24- R47K	0.47	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	300	0.26
EC24- R56K	0.56	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	280	0.38
EC24- R68K	0.68	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	250	0.42
EC24- R82K	0.82	M($\pm 20\%$) [K($\pm 10\%$)]	40	25.2	200	0.55
EC24- 150K	15	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	16	0.88
EC24- 180K	18	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	15	1.00
EC24- 220K	22	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	60	2.52	13	1.20
EC24- 270K	27	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	60	2.52	11	1.35
EC24- 330K	33	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	10	1.50
EC24- 390K	39	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	9.5	1.70
EC24- 470K	47	K($\pm 10\%$) [J($\pm 5\%$)]	50	2.52	8.5	2.30

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПО КРИВЫМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Методические указания к лабораторной работе № 21



Рязань 2016

УДК 621.382

Построение диаграмм состояния металлических сплавов по кривым охлаждения: методические указания к лабораторной работе № 21; сост.: С.И. Мальченко, Т.А.Холомина, А.Ю.Холомин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т.- Рязань, 2016. 20 с.

Приведены краткие сведения по теории образования, физико-химическим свойствам и особенностям построения диаграмм состояния металлических сплавов на основе данных метода термического анализа, а также методика выполнения лабораторной работы при помощи виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Ил. 12. Библиогр.: 7 назв.

Металлические сплавы, термический анализ, диаграммы состояния

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективного пользования) при кафедре микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Построение диаграмм состояния металлических сплавов по кривым охлаждения

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Х о л о м и н Александр Юрьевич

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В.Макушина

Подписано в печать 16. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 0,75.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение метода термического анализа сплавов - зависимости их фазового состояния от температуры и концентрации компонентов при помощи моделирования в среде инженерного графического программирования LabVIEW кривых охлаждения металлических сплавов разного состава и построения диаграмм состояния.

1. Основные теоретические сведения

Диаграммы состояния сплавов показывают фазовый состав сплава данных компонентов при любой концентрации и при любой температуре. Диаграммы строят при медленном охлаждении, поэтому структуры на диаграмме соответствуют равновесному состоянию. Критические точки сплавов - это температуры фазовых превращений.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор) различают следующие основные типы диаграмм состояния:

- 1) при образовании компонентами механической смеси;
- 2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
- 3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
- 4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать элементы диаграмм состояния разных типов. [1-5].

Образование сплавов из компонентов, кристаллизующихся в твердом состоянии в **механическую смесь**, происходит, когда элементы обладают ограниченной растворимостью, а также из компонентов, не участвующих в образовании сплава - химического соединения. Механические смеси, таким образом, могут состоять из кристаллов чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. При образовании механической смеси кристаллические решетки отдельных фаз не меняются.

При изучении диаграмм состояния сплавов, компоненты которых в твердом состоянии не растворяются друг в друге (например, свинец—сурьма, олово—цинк), необходимо четко представлять, что такое **эвтектика**. Эвтектический сплав образуется в результате того, что компоненты друг в друге не растворяются, и представляет собой очень тонкую механическую смесь двух фаз. Так как обе фазы кристаллизуются одновременно при одной и той же температуре, то отдельные кристаллы

обеих фаз не успевают вырасти до значительных размеров и образуют настолько мелкую механическую смесь, что практически их нельзя разделить. Поэтому эвтектика обладает специфическими, только ей присущими свойствами. Эти свойства резко отличаются от свойств входящих в нее компонентов. Необходимо обратить внимание на то, что температура окончательного затвердевания сплавов, образующих эвтектику, от состава сплава не зависит. На диаграмме образование эвтектики характеризуется горизонтальной линией, при этом состав жидкого сплава при температуре окончательного затвердевания всегда одинаковый. Это означает, что состав эвтектики во всех сплавах один и тот же, количество же эвтектики в разных сплавах разное. Сплавы, состав которых соответствует минимальной температуре кристаллизации (плавления) называются эвтектическими. Сплавы, состав которых соответствует концентрациям компонентов до эвтектического и после эвтектического состояния называются соответственно до- и заэвтектическими. [1-3].

Сплавы – **твердые растворы** могут обладать как ограниченной, так и неограниченной растворимостью компонентов. Существуют сплавы – твердые растворы, создаваемые замещением компонентов или внедрением одного из компонентов в кристаллическую решетку другого [1-3]. Особенности диаграмм состояния сплавов с неограниченной и ограниченной растворимостью компонентов более подробно рассмотрены в [1-2].

Твердые растворы — это сложные, но однородные вещества, поэтому под микроскопом твердые растворы, подобно чистому металлу, представляют собой однородные кристаллические зерна. В сплавах, образующих твердые растворы, в отличие от сплавов с эвтектикой, температуры и начала, и конца затвердевания зависят от состава и все сплавы затвердевают в определенном интервале температур. Если вещества обладают неограниченной растворимостью, то ни в одном сплаве не будет кристаллов свободных компонентов, т.е. все сплавы данной системы однофазны и представляют собой однородный твердый раствор

подавляющее большинство сплавов обладают ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии, причем предел растворимости уменьшается с уменьшением температуры (например, сплавы свинец—олово, медь—серебро, алюминий— CuAl_2). В этих случаях эвтектика появляется только в тех сплавах, в которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости.

В сплавах, у которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости, структура после окончательного затвердевания представляет собой однородный твердый раствор. Уже в твердом состоянии, в связи с уменьшением предела растворимости при

понижении температуры, из твердого раствора начинает выделяться вторая фаза. Например, в сплавах свинец—олово, содержащих менее 19,5% олова, в сплавах медь—серебро, содержащих менее 7% серебра, и в сплавах алюминий— SiAl_2 , содержащих менее 5,67% меди, при охлаждении ниже кривой растворимости начинает образовываться вторая фаза и при комнатной температуре сплавы получают двухфазными.

Отметим, что процессы кристаллизации из одного твердого состояния в другое происходят по тем же законам, что и из жидкого, т.е. путем зарождения центров кристаллизации и последующего их роста, поэтому для образования второй фазы охлаждение должно быть медленным. Следует иметь в виду, что продукты вторичной кристаллизации всегда мельче, чем первичной. Важно помнить, что у сплавов, у которых есть превращения в твердом состоянии, можно менять структуру, а значит, и свойства путем нагрева и охлаждения с различной скоростью, т.е. путем термической обработки.

Диаграммы состояния сплавов, образующих устойчивое **химическое соединение** (магний—кальций, цинк—магний), можно рассматривать как состоящие из двух самостоятельных диаграмм, у которых вторым компонентом является химическое соединение [1-4].

Элементы сплавов, образующие химические соединения, обычно резко отличаются по размерам атомов, строению электронных оболочек и параметрам кристаллических решеток. К образованию химических соединений склонны элементы, далеко расположенные друг от друга в периодической таблице Д.И. Менделеева.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может изменяться в широких пределах. Получение химического соединения A_mB_n с образованием однородного кристаллического вещества возможно только при строго определенных соотношениях концентраций компонентов. При этом образуется кристаллическая решетка, не похожая на решетки сплавляемых компонентов. Примером может служить сплав Cu-Mg при содержании 17 % Mg . Свойства сплава – химического соединения резко отличаются от свойств элементов, образующих его.

Сплавы – химические соединения не всегда встречаются в чистом виде. Например, при избытке растворимого компонента возможно образование химического соединения в комбинации с твердым раствором.

Физические, механические и технологические свойства сплава зависят от его структуры. Зависимость между типом диаграммы состояния сплава и его свойствами, установленную Н.С.Курнаковым и А.А.Бочваром Диаграммы состав—свойства для сплавов разных типов приведены в [1-3].

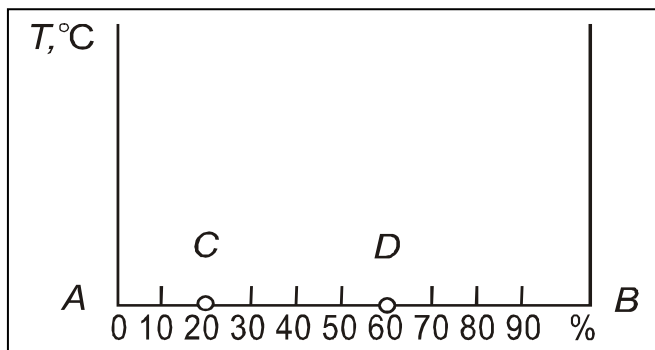


Рис. 1.1. Координаты для изображения диаграммы состояния двухкомпонентной системы

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение фазового состояния сплавов и критических точек в зависимости от концентрации компонентов и температуры в условиях термодинамического равновесия.

Для того чтобы обеспечить равновесное состояние системы охлаждение сплава из жидкого состояния осуществляют очень медленно. *Равновесными* считаются такие условия, при которых процессы, протекающие в системе, являются обратимыми. В данном случае процессы, происходящие при охлаждении сплава, должны в точности совпадать с процессами, протекающими при его нагреве.

Диаграмму состояния строят в координатах температура–концентрация (рис. 1.1). Для сплавов, состоящих из двух компонентов *A* и *B*, состав характеризуется отрезком прямой, принятым за 100%. Крайние точки *A* и *B* соответствуют 100% чистых компонентов. Любая точка на этом отрезке характеризует состав двойного сплава. Так, например, точка *C* соответствует сплаву, состоящему из 20% *B* и 80% *A*; точка *D* – 60% *B* и 40% *A*.

Для построения диаграммы состояния из компонентов изготавливают серию сплавов различного состава и для каждого из них строят кривую охлаждения по результатам термического анализа в координатах температура–время (так же, как для металлов). Особенности поликристаллического строения сплавов в твердом состоянии изучаются с помощью оптического микроскопа обычно при 100 – 1000-кратном увеличении. Атомная структура сплавов и параметры кристаллических решеток определяются методом рентгеноструктурного анализа.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг

в друге, образуя однородный жидкий раствор), различают следующие основные типы диаграмм состояния:

- 1) при образовании компонентами механической смеси;
- 2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
- 3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
- 4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать фрагменты диаграмм состояния разных типов.

1.1. Диаграмма состояния сплавов из компонентов, образующих в твердом состоянии механическую смесь

Экспериментально установлено, что при совместной кристаллизации сплавов, компоненты которых не растворяются друг в друге в твердом состоянии, температура начала кристаллизации всегда ниже, чем у исходных компонентов. Температура же окончания процесса перехода в твердое состояние одинакова для сплавов любого состава двухкомпонентной системы.

На рис. 1.2 приведены кривые охлаждения для разных концентраций компонентов A и B , а также диаграмма состояния сплава. Выше линии KCN рис. 1.2,б все сплавы двухкомпонентной системы).

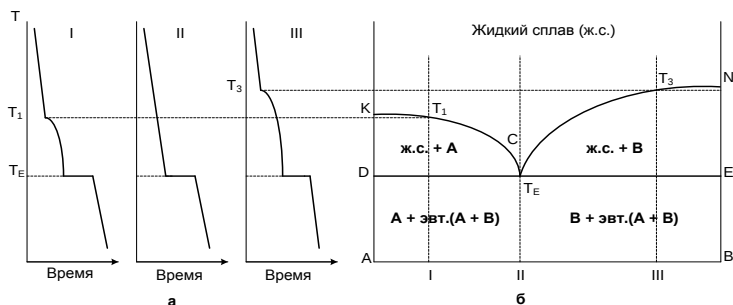


Рис. 1.2. Кривые охлаждения с концентрацией компонентов I, II, III (а) и диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии сплав типа механической смеси компонентов A и B (б)

представляют собой однофазный расплав (жидкий сплав - ж. с.). Эта линия называется **линией ликвидуса** (с греч. – жидкий), линия DCE – **линией солидуса** (с греч. – твердый). Ниже линии DCE все сплавы находятся в твердом состоянии. Сплав, соответствующий точке C , называ-

ется *эвтектическим* (эвтектикой; с греч. – легко плавящийся

В доэвтектических сплавах сначала при охлаждении ниже линии ликвидуса КС выделяются кристаллы компонента А, а в заэвтектических – ниже линии CN – кристаллы компонента В. После затвердевания, т.е. ниже линии солидуса ДСЕ, доэвтектические сплавы состоят из кристаллов А и эвтектики, а заэвтектические – из кристаллов В и эвтектики.

1.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Рассмотрим построение диаграммы состояния для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии. Например, экспериментально получены кривые охлаждения компонентов А и В и сплавов I (70% А и 30% В), II (50% А и 50% В) и III (20% А и 80% В) (рис. 1.3,а). Кристаллизация компонента А начинается и заканчивается при постоянной температуре t_A . Аналогично происходит кристаллизация компонента В при температуре t_B . Кристаллизация сплавов I, II и III происходит в некотором интервале температур. Кристаллизация сплава I начинается при температуре t_1 и заканчивается при температуре t_2 с образованием твердого раствора α . Аналогично происходит кристаллизация и двух других сплавов – при температуре t_3 начинается и при температуре t_4 заканчивается затвердевание сплава II, а сплава III – при температурах t_5 и t_6 соответственно. Разница только в интервале температур начала и конца кристаллизации.

Если на оси абсцисс сетки в координатах температура – концентра-

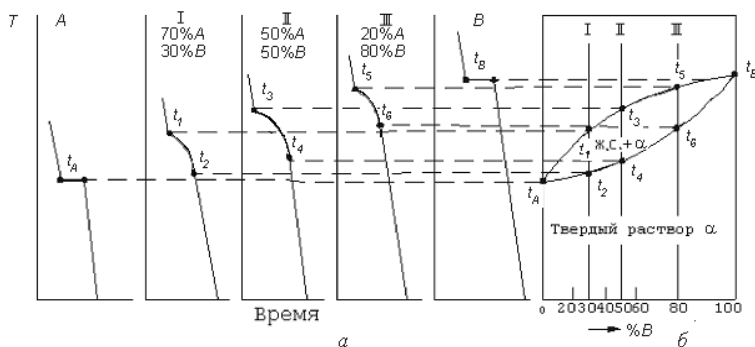


Рис. 1.3. Построение диаграммы состояния сплавов для случая неограниченной растворимости компонентов А и В в твердом состоянии:

а – кривые охлаждения; б – диаграмма состояния

ция (рис. 1.3, б) отметить точками исследованные сплавы и в каждой из этих точек восстановить перпендикуляры, т.е. провести линии сплавов, затем на эти линии, а также на левую и правую ординаты температур, соответствующие компонентам A (левая) и B (правая), перенести найденные критические точки от t_A до t_B , и одноименные (имеющие одинаковый физический смысл) критические точки соединить плавными кривыми, то получится диаграмма состояния сплавов A и B с неограниченной растворимостью указанных компонентов A и B в твердом состоянии (рис. 1.3, б).

На этой диаграмме кривая $t_{At_1t_3t_5t_B}$ – кривая начала затвердевания сплавов – линия ликвидуса, а кривая $t_{At_2t_4t_6t_B}$ – кривая конца затвердевания – линия солидуса.

1.3. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Один из видов такой диаграммы состояния показан на рис. 1.4. Число фаз в данной системе три – жидкий раствор, твердый раствор компонента B в компоненте A (обозначим его α) и твердый раствор компонента A в компоненте B (обозначим его β).

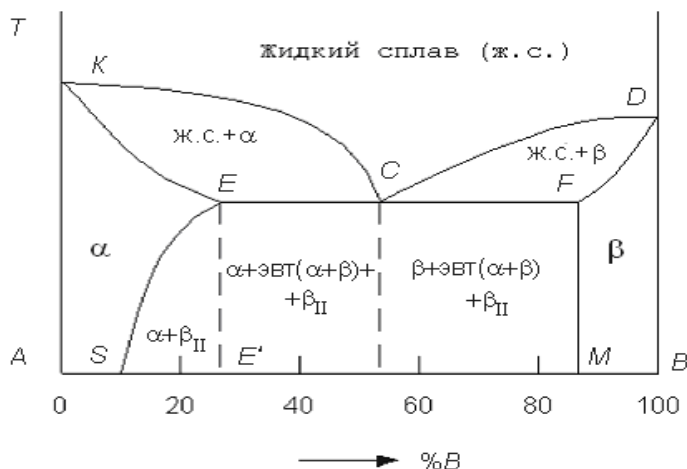


Рис. 1.4. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов A и B в твердом состоянии

На этой диаграмме линия KCD – линия ликвидуса, линия $KECFD$ – линия солидуса. По линии ликвидуса KC из жидкого сплава выделяются кристаллы α , а по линии CD – кристаллы β . На линии солидуса KE

сплавы затвердевают с образованием кристаллов α , на линии DF – кристаллов β . На линии солидуса ECF происходит одновременная кристаллизация α - и β -фаз с образованием эвтектики. Сплав состава, соответствующего точке C , после затвердевания состоит только из одной эвтектики $\alpha+\beta$. Аналогично ранее рассмотренному случаю сплавы, по своему составу находящиеся левее эвтектической точки C (на линии EC), после затвердевания имеют структуру α +эвтектика ($\alpha+\beta$) и являются доэвтектическими. Сплавы, по своему составу лежащие правее точки C (на линии CF), после затвердевания имеют структуру β +эвтектика ($\alpha+\beta$) и являются заэвтектическими.

Линия ES показывает ограниченную растворимость в твердом состоянии компонента B в компоненте A , уменьшающуюся с понижением температуры, а линия FM – растворимость компонента A в B , не изменяющуюся с понижением температуры.

Точка E характеризует предельную растворимость компонента B в компоненте A , а точка F – то же для A в B . Если кристаллизуются сплавы, состав которых находится левее точки S (или правее точки M), то при любой температуре в твердом состоянии все количество компонентов B (или A) находится в твердом растворе, и структура таких сплавов состоит из зерен α (или β). В сплавах, состав которых находится между точками S и E' , т.е. за пределом растворимости B в A , образовавшиеся при затвердевании кристаллы α при понижении температуры ниже линии ES пересыщены компонентом B и поэтому происходит выделение из них избыточных кристаллов, которыми являются кристаллы β концентрации, соответствующей точке M , называемые вторичными (β_{11}). После полного охлаждения эти сплавы имеют структуру, состоящую из кристаллов α состава точки S и кристаллов β_{11} – $\alpha + \beta_{11}$. В сплавах состава линии EC , имеющих после затвердевания структуру α + эвтектика ($\alpha+\beta$), из кристаллов α тоже выделяются кристаллы β , и после полного охлаждения будет структура α + эвтектика ($\alpha+\beta$)+ β_{11} .

Процесс выделения вторичных кристаллов из твердого раствора называется *вторичной кристаллизацией*, в отличие от образования кристаллов в жидком сплаве (*первичная кристаллизация*).

1.4. Диаграмма состояния сплавов с образованием компонентами химического соединения

Химическое соединение обозначают A_mB_n . Это означает, что в данном соединении на m атомов компонента A приходится n атомов компонента B . Диаграмма состояния для случая образования компонентами сплава – химического соединения, состав которого при нагреве и охла-

ждении не изменяется, приведена на рис. 1.5.

Данная диаграмма составлена как бы из двух диаграмм: компонент A – химическое соединение A_mB_n и компонент B – химическое соединение A_mB_n . В сплавах левее точки C (соответствующей по составу химическому соединению A_mB_n) компонента A имеется больше, чем входит в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах левее точки C образуется эвтектика $\alpha + A_mB_n$. В сплавах правее точки C компонента B больше, чем может входить в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах образуется эвтектика $A_mB_n + \beta$.

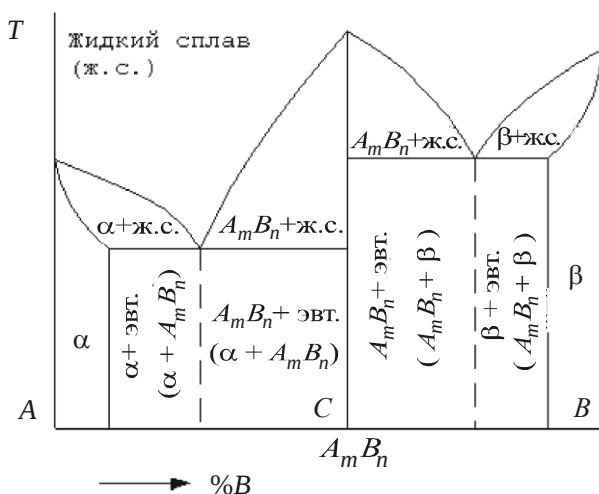
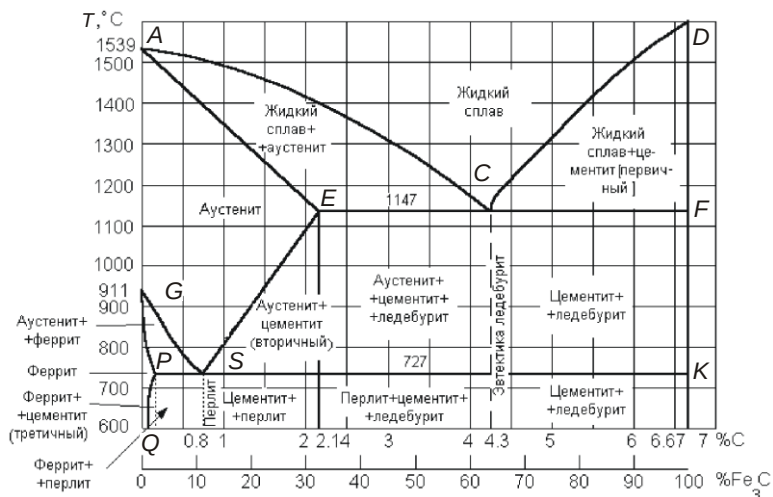


Рис. 1.5. Диаграмма состояния сплавов для случая образования компонентами A и B сплава – химического соединения

1.5 Диаграмма состояния сплава железо-цементит($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$)

Стали и чугуны, относящиеся к черным сплавам (в отличие от цветных), составляют около 95% мирового выпуска металлопродукции. Поэтому изучение диаграммы состояния сплава железо-цементит ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$) имеет большое значение для технических специалистов. Диаграмма состояния $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ (в несколько упрощенном виде) приведена на рис. 1.6. Анализ диаграммы состояния показывает, что она содержит фрагменты диаграмм состояния сплавов, которые создаются при образовании компонентами механической смеси; твердых растворов внедрения с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии; образовании компонентами химического соединения.



Подробное рассмотрение особенностей сплавов на основе железа и углерода приведено в учебных пособиях[1-4,7]. Разнообразие свойств сплавов обусловлено, прежде всего, полиморфизмом железа. В сплавах

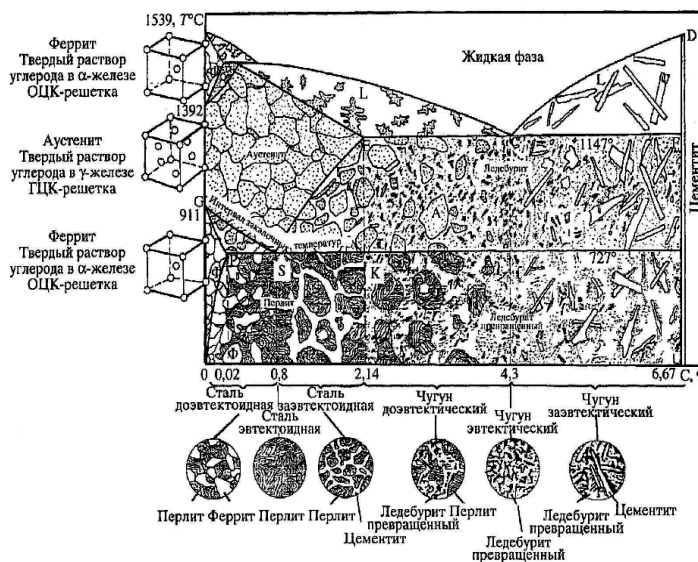


Рис. 1.7 Основные фазы на диаграмме состояния железо - цементит

имеются три твердые фазы – феррит, цементит и аустенит и эти же фазы в структурно связанном состоянии: эвтектоид – перлит и эвтектика – ледебурит (Рис.1.7).

В сплавах железо–углерод при распаде аустенита возможна кристаллизация углерода в свободном состоянии в виде графита.

Графит является неметаллической фазой, он мягок и обладает низкой пластичностью, располагается в основной массе сплава, имеет развитую объемную форму в виде пластинок.

Диаграмма состояния системы железо–цементит используется на практике для определения видов и режимов термической обработки стали с целью придания сплаву необходимых свойств.

2. Описание лабораторной работы

Работа выполняется на персональном компьютере (ПК), на котором сформирована программа, моделирующая установку для термического анализа сплавов. При работе с программой используются обычные приемы управления, характерные для операционной системы Windows. Для начала работы следует запустить на исполнение файл **Терм_анал_спл.** На экране появится окно с названием лабораторной



Рис.2.1. Окно приветствия лабораторной работы

работы, как показано на рис. 2.1.

Для продолжения работы следует использовать кнопку «Продолжить». Если передумали, то кнопку «Выход». Если работа будет продолжена, то появится окно с элементами теории, в котором, используя кнопку «Начинаем», можно приступить к выполнению работы. При этом на экране монитора появится виртуальная лабораторная установка для термического анализа сплавов, как показано на рис.2. 3.

В установке предусмотрено исследование восьми различных образцов сплавов, каждый из которых имеет восемь различных

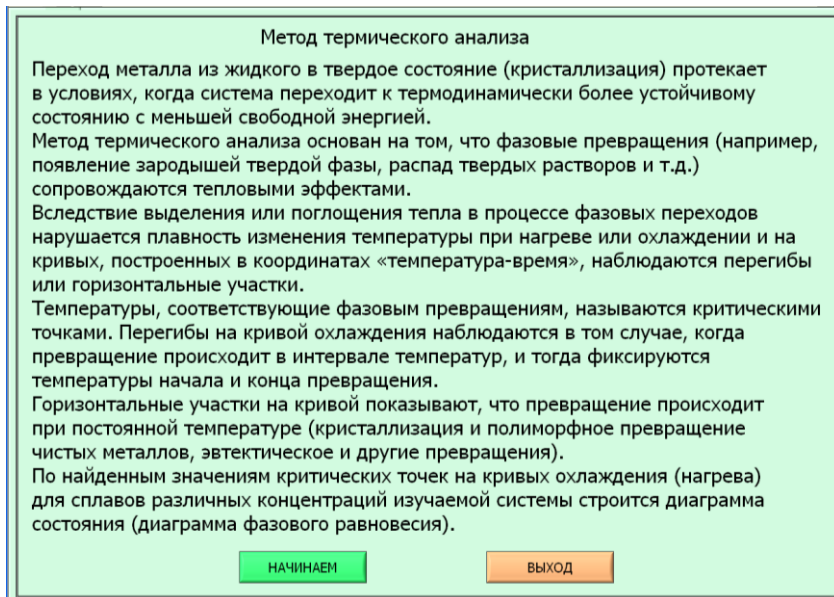


Рис. 2.2. Окно с описанием метода термического анализа

процентных составов компонентов. Вначале необходимо выбрать образец для исследования и его состав. Щелчок мышкой по кнопке «Образец - X» позволяет выбрать необходимый образец, а по кнопке «Состав - X» процентный состав образца. Процентный состав после выбора образца отображается в соответствующих окнах. Окончательный результат подтверждается щелчком по кнопке «Выбран». После этого необходимо включить приборы щелчком по соответствующим тумблерам. Если приборы не включены перед началом работы, то появится предупреждающее сообщение программы. На табло в верхней части окна отображается информация о режимах

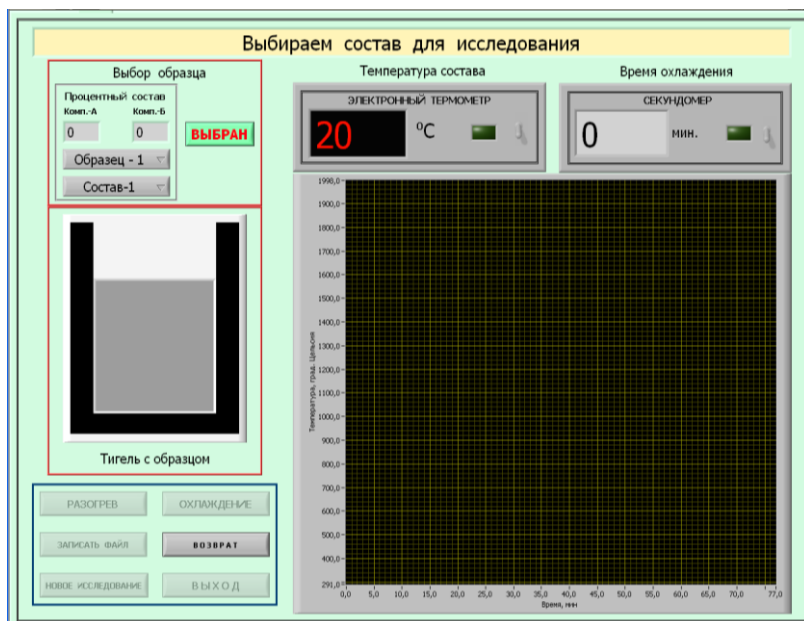
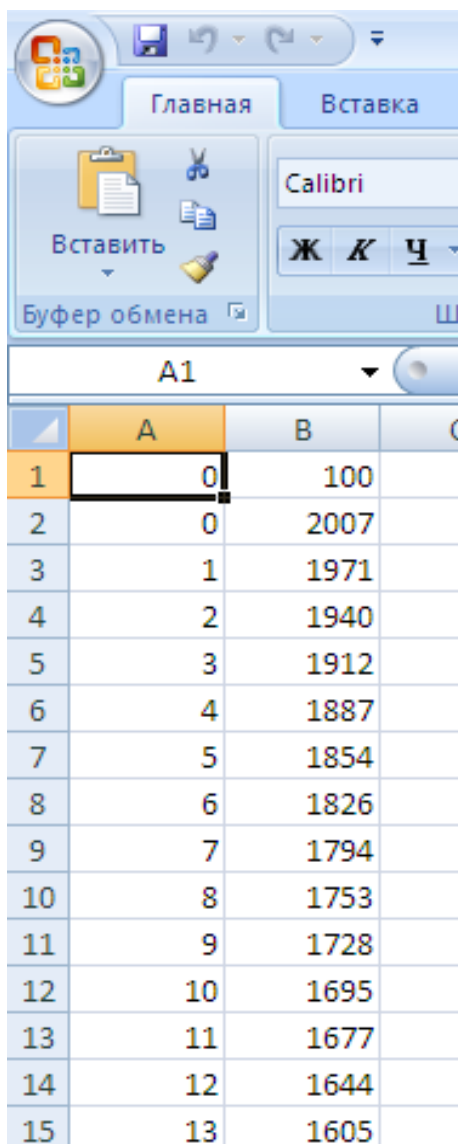


Рис. 2.3. Окно виртуальной лабораторной установки для проведения термического анализа

работы установки.

Работа начинается с разогрева образца в виртуальном тигле до температуры 2000°C . Для этого следует щелкнуть по кнопке «Разогрев». В этом случае включается «электронагреватель» и температура расплава возрастает. При достижении температуры 2000°C установка переходит в режим ожидания. Для охлаждения состава следует щелкнуть по кнопке «Охлаждение» и предполагается, что тигель с расплавом начинает охлаждаться естественным образом за счет теплообмена с окружающей средой. На графической панели отображается по вертикали температура расплава, а по горизонтали время в минутах. В программе для удобства использован режим ускорение времени при проведения анализа.

На графической панели строится график зависимости температуры сплава от времени. После окончания построения графика массив данных можно записать в файл для дальнейшего анализа. Для этого следует использовать кнопку «Записать в файл».



	A	B
1	0	100
2	0	2007
3	1	1971
4	2	1940
5	3	1912
6	4	1887
7	5	1854
8	6	1826
9	7	1794
10	8	1753
11	9	1728
12	10	1695
13	11	1677
14	12	1644
15	13	1605

Рис. 2.4. Массив данных, загруженный в программу Excel для анализа

ВНИМАНИЕ! Файл всегда записывается в папку «Student» на рабочем столе с расширением *.txt. Имя файла может быть любым. Рекомендуется делать его уникальным с указанием номера группы и процентным составом (можно указать и фамилию одного из студентов бригады), например **322Иванов-4-7.txt**. Студент Иванов, группа 322, образец 4 состав 7. Таким образом, после выполнения лабораторной работы в этой папке будет восемь различных файлов с разными составами для одного образца. Эти файлы можно загрузить в программу Excel для дальнейшей обработки.

Возможен вариант, когда на графике охлаждения расплава на графической панели (рис. 2.3) фиксируются особые точки охлаждения расплава с известной концентрацией компонентов и затем, составив соответствующую таблицу, можно приступить к анализу диаграммы состояния расплава и ее построению.

Для работы в программе Excel необходимо **Открыть** файл с Вашими данными и указать вариант расширения *.txt. В дальнейшем указать **Формат данных** (с

разделителями) «Далее», Символом разделителя является (знак табуляции) «Далее», Формат данных столбца (общий) «Готово» (такая последовательность команд характерна для Excel 2003). После этого в программе отобразится массив данных, как показано на рис. 2.4. В первых строчках столбцов указывается процентный состав вещества А и В, а ниже идут данные взятые из Ваших файлов. Слева время в минутах, а справа температура в градусах Цельсия.

Затем, используя эти массивы данных, можно в программе Excel построить графики изменения температуры при охлаждении расплава. Для этого следует выделить оба столбца (кроме первых строк) и **Вставить** в программу **Точечную диаграмму** любого вида. На экране появится график охлаждения расплава. Пример такого графика показан на рис. 2.5 перед разделом «Содержание отчета».

Таким образом, можно построить восемь графиков охлаждения расплавов с различной процентной концентрацией компонентов. Затем их можно использовать для построения диаграммы состояния образца сплава.

3. Выполнение работы

1. Получить у преподавателя задание (номер образца) на проведение термического анализа указанного образца сплава.

2. Запустить на исполнение файл с лабораторной работой, как указано в разделе 2 методического пособия. Рекомендуется ознакомиться с общетеоретической частью работы, и затем перейти в режим термического анализа расплава.

3. Выбрать указанный преподавателем образец сплава для исследования.

4. Выбрать «Состав-1» и после этого щелчком по кнопке «Выбран» подтвердить факт выбора образца и состава компонентов.

5. Включить все приборы и произвести разогрев сплава до температуры 2000°C щелчком по кнопке «Разогрев». Дождаться остановки разогрева расплава.

6. Приступить к охлаждению расплава щелчком по кнопке «Охлаждение». На графической панели будет отображаться график изменения температуры при охлаждении расплава.

7. После достижения минимальной температуры сплава следует записать полученный массив данных в файл для дальнейшей обработки, как показано в разделе 2 методических указаний используя кнопку «Записать в файл». Имя файла задавать, как рекомендовано в разделе 2 методического указания. Щелчком по кнопке «Новое исследование» перейти к исследованию нового состава сплава.

8. Повторить пункты с 4 по 7 методических указаний для каждого состава сплава.

9. Используя программу Excel построить восемь графиков охлаждения сплава с разными составами компонентов.

10. Используя полученные графики, построить диаграмму состояния исследуемого сплава.

11. Оформить полученные результаты в виде таблиц и графиков.

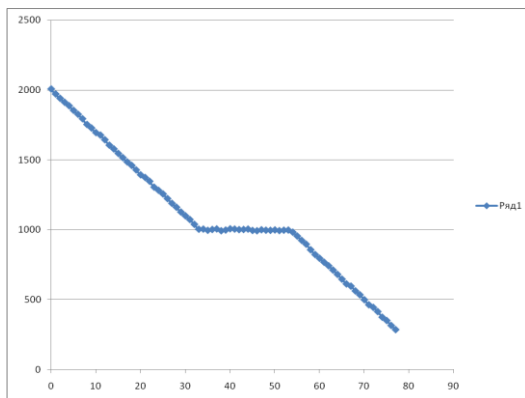


Рис. 2.5. График охлаждения расплава построенный в программе Excel

4. Содержание отчета

- 1) Наименование работы.
- 2) Цель работы.
- 3) Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).
- 4) Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
- 5) Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными

5. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлен горизонтальный участок на кривых охлаждения металлов и сплавов?
2. Что такое критическая точка на кривых охлаждения или нагревания металлов и сплавов?
3. Какой физический процесс является основой процесса получения сплава?

4.Какой процесс называется термическим анализом металлов и сплавов?

5.По каким признакам легированный металл отличается от сплава?

6.Что происходит при перекристаллизации металлов в твердом состоянии?

7.Какое явление называется полиморфизмом?

8.Что происходит при перекристаллизации металлов в твердом состоянии?

9. Что такое диаграмма состояния сплава?

10.Что такое линия ликвидуса?

11.Что такое линия солидуса?

12.Какие свойства характерны для эвтектического сплава?

13.Какие сплавы называются заэвтектическими?

14.Что такое твердая эвтектика?

15.Что такое эвтектоид?

16.Какие фазы содержит сплав с ограниченной растворимостью компонентов А и В в твердом состоянии (по диаграмме состояния)?

17.Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

18.Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

19.Поясните особенности основных типов диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов.

20.Какие фазы входят в структуры сплавов железа с углеродом в соответствии с диаграммой состояния при нормальной температуре?

21.Какой сплав называется аустенитом?

22.Какой сплав называется ферритом?

23.Какой сплав называется цементитом?

24.По диаграмме $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ определите максимальное содержание углерода в аустените при 800°C .

25.При исследовании структуры стали установлено, что в ней содержится примерно 30% перлита. Каков состав этой стали по углероду?

26.Какая группа материалов называется сталями?

27.Из каких компонентов состоит структура заэвтектоидной стали?

28.Из каких компонентов состоит структура заэвтектоидной стали?

29.Из каких фаз состоит перлит?

30.Изобразите схему охлаждения сплава $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ с 3% С, отметив на ней структурные состояния сплава.

31.Из какой фазы и при каких температурных условиях образуется цементитная составляющая в структуре стали с 1% углерода ?

32.Какие технологические операции включает процесс термической обработки стали?

33.Какова цель термической обработки стали?

34.Каковы основные виды термообработки стали?

35.От чего зависит температура превращения перлита в аустенит железо-углеродистых сплавов в реальных условиях нагрева?

36.Какова цель закалки стали?

37.Для каких сталей отжиг можно заменить более дешевой обработкой — нормализацией?

38.Каковы преимущества изотермического отжига стали по сравнению с полным?

39.Какова цель полного отжига стали?

40.Какова цель рекристаллизационного отжига как метода термической обработки стали?

41.Какова цель отжига 1-го рода как метода термической обработки стали?

42.Какова цель отжига 2-го рода как метода термической обработки стали?

43.Температура нагрева эвтектоидной стали 750°C, далее - охлаждение в воде. Какой это вид термообработки?

6. Библиографический список

1.Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.- 383 с.

2. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов. – М.: Высш шк., 2004. – 519 с.

3.Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб.пособие. – Рязань: РГРТА, 2014. – 84 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб.пособие. – Рязань: РГРТА, 2013. – 96 с.

5.Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - М.: Энергия, 1974. - 583с.

6.Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. Электротехнические материалы: Учебник для электротехнических и энергетических специальных вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304с

7.Кузьмин Б.А., Абраменко Ю.Е., Ефремов В.К. Технология металлов и конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 351с.