



**Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический
университет**

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«ХИМИЯ И ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛЫ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**для студентов дневной и заочной форм обучения
направления 6.050901 — «Радиотехника»**

Севастополь

2013

УДК 621.396.1

Лабораторный практикум по дисциплине «Химия и электрорадиоматериалы»: методические указания для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника»/ сост.

А.Н. Трушкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — 87 с.

Целью данной методической разработки является оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в подготовке к выполнению лабораторного практикума по дисциплине «Химия и электрорадиоматериалы», а также в получении ими теоретических знаний и практических навыков в выборе материалов при разработке и эксплуатации современных электрорадиотехнических устройств.

Методические указания написаны на основании программы дисциплины «Химия и электрорадиоматериалы». Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций (протокол № 5 от 23 января 2013 г)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Щекатурин А.А.

Ответственный за выпуск: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций

Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Лабораторная работа №1. Исследование микроструктур проводниковых материалов.....	5
2. Лабораторная работа №2. Исследование параметров магнитных материалов осциллографическим методом.....	24
3. Лабораторная работа №3. Исследование влияния химического состава, механической и термической обработок на магнитные свойства металлов и сплавов.....	42
4. Лабораторная работа №4. Исследование влияния химического состава на электросопротивление металлов и сплавов.....	55
Лабораторная работа №5. Исследование влияния химического состава и температуры на относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь диэлектриков.....	64
6. Лабораторная работа №6. Исследование частотных характеристик диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков...	74
Библиографический список.....	87

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Химия и электрорадиоматериалы» изучается студентами направления 6.050901 — «Радиотехника» дневной формы обучения во 2-ом семестре и заочной формы обучения в 4-ом семестре. В данную методическую разработку включены шесть лабораторных работ. Методические рекомендации по выполнению каждой лабораторной работы содержат следующие разделы: цель работы; теоретическая часть; описание лабораторного макета; порядок выполнения лабораторной работы; порядок оформления отчета; порядок защиты отчета; выводы; контрольные вопросы; библиографический список.

Студенты осуществляют предварительную подготовку к лабораторным занятиям и перед выполнением лабораторной работы получают допуск: отвечают на теоретические вопросы; объясняют принцип работы лабораторного макета; назначение органов управления приборов; входящих в лабораторный макет.

Бригада для выполнения лабораторной работы состоит из 2...3 студентов. В процессе выполнения работы ведется протокол, в котором отображается весь ход работы, фиксируются результаты экспериментов. После завершения работы преподаватель просматривает полученные данные и подписывает протокол.

На основании протокола каждый студент оформляет отчет, который должен содержать титульный лист установленного образца и следующие разделы: цель работы; теоретическая часть; описание принципа действия лабораторной установки; экспериментальные данные; результаты обработки экспериментальных данных (графики, рассчитанные параметры и др.); выводы по работе; библиографический список.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Цель работы

Исследование особенностей микроструктур металлов и сплавов, возникающих при различных режимах термообработки и механических воздействий.

1.2. Теоретическая часть

1.2.1. Влияние механических воздействий на свойства металлов и сплавов

Для улучшения механических и магнитных свойств металлических заготовок применяют специальные виды механической обработки: холодную прокатку и волочение. Прокатка металлов является таким видом пластической обработки, когда исходная заготовка обжимается вращающимися валками прокатного стана для придания её поперечному сечению заданной формы и размеров.

Волочение осуществляется путем обработки металлов давлением, при которой изделия (заготовки) круглого или фасонного профиля (поперечного сечения) протягиваются через отверстие, сечение которого меньше сечения заготовки. В результате поперечные размеры изделия уменьшаются, а длина увеличивается. Волочение широко применяется в производстве пруткового металла, проволоки, труб и другого и производится на волочильных станах, основными частями которых являются волоки и устройство, тянущее через них металл.

Холодная прокатка электротехнического металла позволяет получать текстурованный лист (текстура — это преимущественная ориентация кристаллов в листе, при которой ось их легкого намагничивания совпадает с направлением прокатки). У такого листа энергетические потери на пере-

магнитное и коэрцитивная сила меньше, чем у нетекстурированного.

При горячей прокатке металл заготовки уплотняется благодаря удалению пустот и газовых пузырей, однако физические дефекты решетки (точечные дефекты, вакансии, дислокации и другие), которые неизбежно возникают при прокатке, повышают её удельное электросопротивление.

Волочением обрабатывают стали разнообразного химического состава, а также практически все цветные металлы (золото, серебро, медь, алюминий, и др.) и их сплавы. Изделия, полученные волочением, обладают высоким качеством поверхности и высокой точностью размеров поперечного сечения. Однако, как и при прокатке, удельное электросопротивление изделий из-за образования физических дефектов решетки повышается.

1.2.2. Влияние термических воздействий на свойства металлов и сплавов

Термическое воздействие заключается в нагреве изделия до заданной температуры, выдержке его при этой температуре в течение некоторого времени и охлаждении с различными скоростями [1]. Процесс термической обработки существенно влияет на механические, электрические и магнитные свойства металлов и сплавов, так как при нагреве и охлаждении происходят изменения в их кристаллическом строении [2]. Применяется термическая обработка для повышения износостойкости, усталостной прочности, улучшения других механических и физических свойств деталей и конструкций.

Способность некоторых металлов при термической обработке образовывать несколько типов кристаллических решеток называется **полиморфизмом**. Различные типы кристаллического строения называют **аллотропической формой** или **аллотропической модификацией**.

Процесс перехода из одного типа кристаллического строения в другое называется **аллотропическим превращением**.

Рассмотрим особенности аллотропических превращений железа.

Аллотропические модификации железа принято обозначать буквами греческого алфавита: δ — дельта; γ — гамма; β — бета; α — альфа.

При нагревании железа до температуры $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше оно из твердого состояния переходит в жидкое. При охлаждении ниже этой температуры начинается процесс кристаллизации, причем в начале образуется δ -железо, имеющее решетку объемноцентрированного куба. При дальнейшем охлаждении железа до $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ δ -железо принимает аллотропическую форму γ -железа: решетка объемно-центрированного куба перестраивается в решетку гранецентрированного куба.

В интервале температур от 1400 до $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ железо находится в аллотропической форме γ -железа с решеткой гранецентрированного куба.

Охлаждение от $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызывает переход γ -железа в β -железо и восстановление магнитных свойств железа.

При охлаждении железа до температуры $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ магнитные свойства железа полностью восстанавливаются, так как доменная структура железа при достижении температуры $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ оказывается полностью сформированной.

Охлаждение железа ниже температуры $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызывает переход β -железа в α -железо: решетка гранецентрированного куба перестраивается в решетку объемноцентрированного куба (рис.1.1).

Кроме железа, аллотропические превращения могут испытывать кобальт, олово, марганец и другие металлы. Температуры, при которых происходят структурные превращения, называются **критическими точками** [3].

Твердый раствор углерода в α -железе принято называть **ферритом** (от латинского слова «феррум» — железо). В твердом растворе α -железа в узлах кристаллической решетки железа находятся атомы углерода. При температуре $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ в α -железе может содержаться до $0,02\%$ углерода, а при

20 °C — лишь 0,006% углерода.

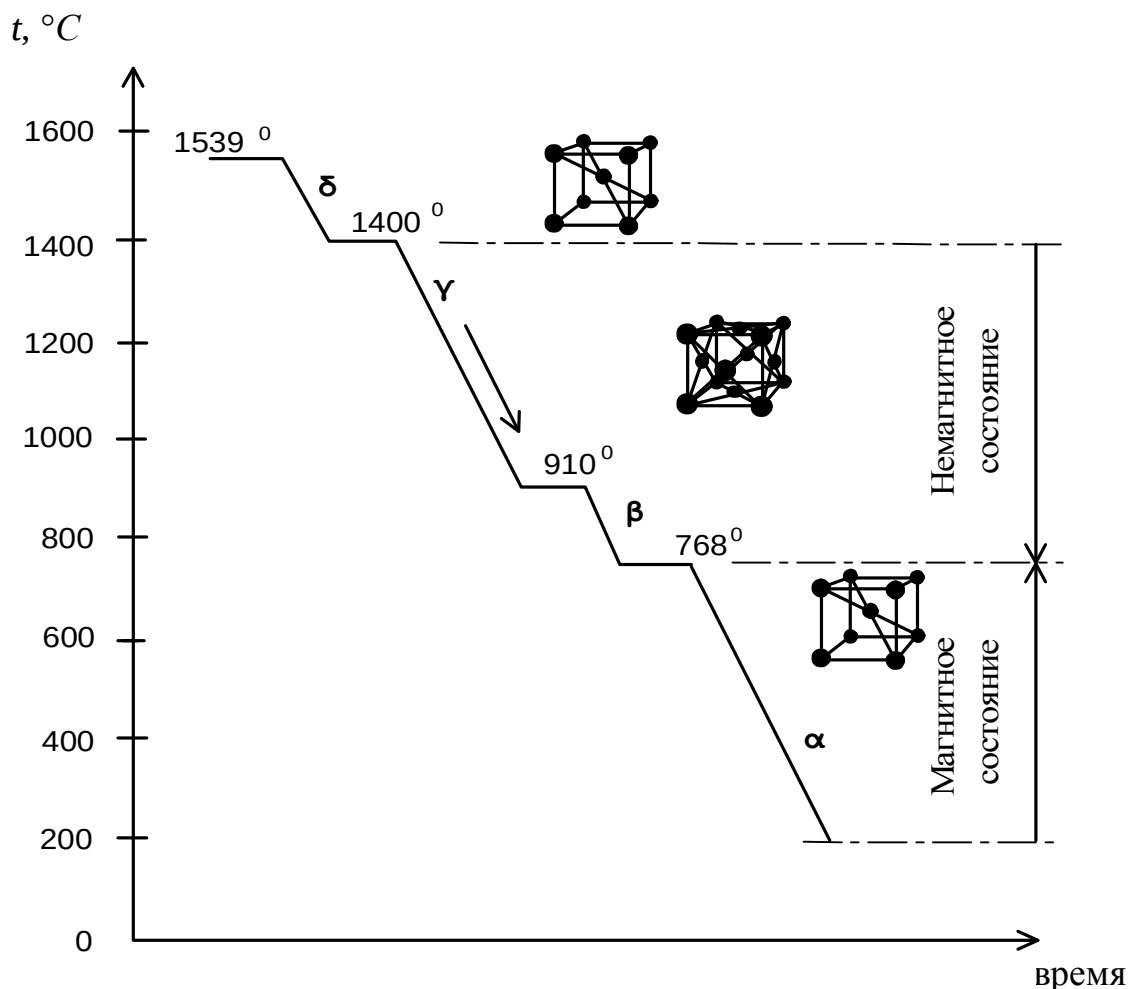


Рис. 1.1 — Диаграмма аллотропических превращений чистого железа при охлаждении

Феррит обладает высокой пластичностью, но относительно низкими твердостью и прочностью. Его магнитные свойства сохраняются при нагревании до точки Кюри (768 °C). Под микроскопом структура феррита отличается наличием светлых зерен. Кристаллическая решетка феррита — кубическая, объемно-центрированная.

Химическое соединение железа с углеродом называют **цементитом** (карбидом железа). Цементит содержит 6,67% углерода и при нагревании до 210 °C сохраняет магнитные свойства. Цементит обладает высокой твердостью ($HB\ 760...800$) и повышенной хрупкостью. Под микроскопом в структуре стали и чугуна цементит наблюдается в виде игл и отдельных

включений.

Твердый раствор углерода и других элементов в γ -железе принято называть **аустени́том** (по имени английского металлурга У. Роберта Аустена). Аустенит немагнитен, отличается высокой пластичностью, значительными прочностью и вязкостью. Твердость аустенита лежит в пределах *HB* 170...220. Микроструктура аустенита представляет собой зерна в виде многогранников. Кристаллическая решетка — кубическая гранецентрированная.

Механическая смесь кристаллов феррита и цементита называется **перлитом**. Эта структура образуется в результате распада аустенита при медленном охлаждении. Чистый перлит содержит 0,8% углерода. В зависимости от формы образования цементита перлит бывает пластинчатый (цементит в виде пластинок) и зернистый. Механические свойства перлита зависят от степени измельчения частичек цементита. Перлит с наиболее мелкими частицами цементита обладает высшими механическими свойствами. Твердость пластинчатого перлита лежит в пределах *HB* 160...250, зернистого в пределах *HB* 160...220.

Смесь, состоящую из кристалликов цементита и аустенита, называют **ледебуритом**. Она образуется при кристаллизации жидкого сплава, содержащего 4,3% углерода.

Рассмотрим основные виды термической обработки.

Полным отжигом принято называть нагрев изделия до температуры выше верхней критической точки на (20...30) °C и выдержку при этой температуре определенное время с последующим медленным охлаждением. Применяется полный отжиг для уменьшения зернистости структуры и достижения требуемых механических свойств стали.

Неполным отжигом называется нагрев изделия до температуры, лежащей между верхней и нижней критическими точками, и выдержка при этой температуре с последующим медленным охлаждением. Применяется

неполный отжиг главным образом для заэвтектоидных сталей (сталей, содержащих более 0,8% углерода) с той же целью, что и полный отжиг.

Нормализацией называется нагрев изделия до температуры выше верхней критической точки на (30...50) °C, выдержка его при этой температуре с последующим охлаждением на воздухе. Применяется нормализация для уменьшения зернистости структуры и достижения требуемых механических свойств низко- и среднеуглеродистых сталей, а также как подготовительная операция перед закалкой.

Полной закалкой называется нагрев изделия до температуры выше верхней критической точки на (30...50) °C, выдержка при этой температуре и последующее его резкое охлаждение в воде, масле или в какой-либо другой закалочной среде (в зависимости от химического состава, объема и конфигурации закаливаемых изделий). Полная закалка стали применяется, главным образом, для получения высокой твердости.

Неполной закалкой называется нагрев изделия до температуры, лежащей между верхней и нижней критическими точками, выдержка его при этой температуре с последующим резким охлаждением. Применяется неполная закалка, в основном, для заэвтектоидных сталей.

Поверхностной закалкой называется нагрев поверхностного слоя изделия до температуры закалки (посредством электрического тока, высокотемпературного пламени или другим способом) с последующим быстрым охлаждением. Применяется поверхностная закалка для получения высокой твердости в относительно тонком слое без изменения структуры и твердости более глубоко расположенных слоёв.

Отпуском называется нагрев закаленной стали до температуры ниже нижней критической точки и выдержка её при этой температуре с последующим быстрым или медленным охлаждением. Применяется с целью снятия остаточных напряжений, частичного снижения твердости, повышения вязкости и улучшения обрабатываемости резанием.

Отпуском низким называется нагрев закаленной стали до температуры (150...250) °C, выдержка её при этой температуре с последующим быстрым или медленным охлаждением. Применяется для снятия остаточных напряжений, частичного снижения твердости, хрупкости, повышения вязкости и улучшения обрабатываемости резанием.

Отпуском средним называется нагрев закаленной стали до температуры (350...475) °C, выдержка её при этой температуре с последующим быстрым или медленным охлаждением. Применяется для уменьшения внутренних напряжений, повышения пластических и упругих свойств пружин и рессор.

Отпуском высоким называется нагрев закаленной стали до температуры (500...680) °C, выдержка её при этой температуре с последующим быстрым или медленным охлаждением. Применяется для уменьшения твердости, увеличения пластичности. При высоком отпуске почти полностью снимаются внутренние напряжения.

Термическим улучшением называется комплексная термическая обработка стали, состоящая из закалки и высокого отпуска.

Старением называется нагрев деталей до температуры (550...570) °C, выдержка при этой температуре в течение (3...5) ч. и охлаждение вместе с печью со скоростью (20...40) °C в час до температуры (150...200) °C, а затем охлаждение на воздухе. Применяется для деталей и инструментов с целью повышения прочности и стабильности их размеров.

1.2.3. Влияние механической и термической обработки на магнитные и механические свойства металлов и сплавов

Совокупность операций деформации, нагрева и охлаждения (в различной последовательности), в результате которых осуществляется формирование окончательной структуры металла, а следовательно, и его свойств, называется термомеханической обработкой.

Термомеханическая обработка обеспечивает повышенную прочность по сравнению с обычной термической обработкой за счет совмещения деформаций с операциями термической обработки. Относительная магнитная проницаемость стали значительно повышается при ее холодной прокатке и последующем отжиге. В результате элементарная ячейка железокремнистого сплава формируется в виде объемноцентрированного куба, для которого направлениями легкого намагничивания являются его ребра. Зёрна сплава в кристаллографическом отношении получают преимущественную ориентацию, которую называют **текстурой прокатки** (упорядочение зерен и связанная с этим анизотропия свойств наблюдается и при горячей прокатке).

1.2.4. Свойства материалов высокой проводимости

К материалам высокой проводимости, имеющим широкое промышленное применение, относятся: медь и ее сплавы (бронзы, латуни); алюминий и его сплавы; низкоуглеродистая сталь.

Медь — проводниковый материал промышленного назначения с удельным сопротивлением $\rho \approx 0,0172 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

По электропроводности она занимает второе место после серебра ($\rho \approx 0,016 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$).

Промышленностью производится медь различных марок, например: М00, М0, М2, М3, М4. По механическим свойствам различают медь МТ — твердую неотожженую и медь ММ — мягкую отожженную. Медные заготовки выпускаются в виде слитков, труб, прутков, листов, проволоки и лент. Марки меди, свойства полуфабрикатов и изделий из меди и методы испытаний при приемке регламентируются ГОСТ 859-78.

Электропроводность медных заготовок и изделий весьма чувствительна к наличию примесей. В качестве проводников используют материалы с содержанием меди не менее 99,9%.

К недостаткам меди следует отнести малую механическую прочность

(малое сопротивление материала к деформации и разрушению), которая к тому же резко снижается при нагревании до температур (100...200) °C, и относительно высокую стоимость.

Наличие кислорода в меди резко ухудшает её механические свойства, поэтому в общем количестве примесей (0,1%) его должно быть не более 0,08%.

Легирование меди оловом, кадмием, бериллием, цинком устраняет указанные недостатки меди с небольшой потерей электропроводности полученных сплавов по отношению к мягкой меди. Влияние примесей Ag (серебра), Cd (кадмия), Zn (цинка), Sn (Олова), Al (алюминия), Be (бериллия), As (мышьяка), Fe (железа), P (фосфора) на электропроводность γ меди показано на рис.1.2.

Из рис. 1.2 видно, что даже наличие примесей серебра (металла, превосходящего медь по электропроводности) увеличивает электросопротивление медного сплава. Наиболее сильное влияние на электропроводность медного сплава оказывает фосфор.

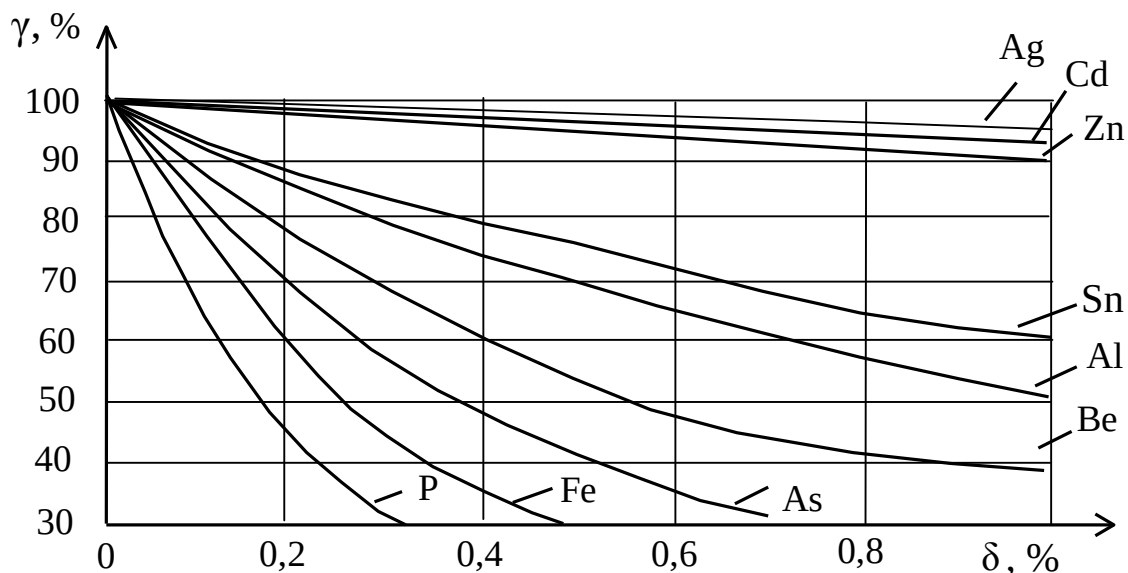


Рис. 1.2 — Влияние концентрации примесей на электропроводность γ меди

Бронза — медный сплав, в котором содержание цинка не превышает

содержания основных легирующих элементов (олова, алюминия, бериллия, железа, кремния, никеля, марганца и др.). В приборостроении и радиоэлектронике наибольшее распространение получили: бериллиевая бронза Бр.Б2, кадмиевая бронза Бр.Кд1, алюминиевая бронза Бр.АМц 9-2.

В состав бронзы Бр.Б2 входит 2% Be, 0,35% Ni, остальное — медь. Данный материал обладает рядом свойств, делающим его весьма ценным для приборостроения: бронза Бр.Б2 имеет высокие пределы прочности, упругости, текучести, усталости, высокую циклическую прочность, твердость, износостойкость, коррозионную стойкость в пресной и морской воде. Она является немагнитным материалом и обладает высокой морозостойкостью.

В состав бронзы Бр.Кд1 входит от 1,2% до 9% Cd, остальное — медь. Кадмиевая бронза Бр.Кд1 обладает высокими электрическими свойствами: удельное сопротивление бронзы Бр.Кд1 $\rho = 0,03 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Она обладает высокой сопротивляемостью к истиранию. Нагрев бронзы до 250°C не изменяет ее механических свойств. Применяется бронза Бр.Кд1 для токоведущих деталей, работающих на механический износ.

В состав бронзы Бр.АМц 9-2 входит от 8% до 10% Al, от 1,5% до 2,5% Mn, остальное — медь. Алюминиевая бронза Бр.АМц 9-2 может применяться для изготовления литых деталей, так как отличается высокой пластичностью, хорошей обрабатываемостью давлением, коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и в морской воде [2].

Латунь — сплав меди с цинком, обладающий более высокой механической прочностью и повышенным значением удельного электрического сопротивления по сравнению с медью. Латунь, например, Л96 ($\rho = 0,031 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) содержат от 95% до 97% меди. Они применяются при производстве контактных пластин и других токоведущих деталей [2].

Латунь многокомпонентные или специальные, кроме цинка, содержат добавки алюминия, никеля, железа, марганца, свинца и др. Например, ла-

тунь алюминиево-никеле-кремнисто-марганцевая ЛАНКМц 72-2-2,5-0,5-0,5 содержит 73%...76% меди и широко применяется в приборостроении.

Алюминий — металл с малой удельной массой, обладающий высокой электропроводностью и высокой коррозионной стойкостью [1]. Выпускается трех сортов:

а) технической чистоты, в который входят марки от А85 до А0 (содержание от 99,8 до 99,0 % Al);

б) высокой чистоты, в который входят марки алюминия от А995 до А95 (от 99,995 до 99,95 % Al);

в) особой чистоты, включающий только одну марку А999 (не менее 99,999% Al).

Удельная проводимость отожженного алюминия марки А999 составляет 62% от удельной проводимости чистой меди.

Сталь проводниковая — сплав железа с углеродом, применяемый в качестве проводников при небольших токовых нагрузках. Проводники изготавливают из сталей марок «Сталь 10», «Сталь 20», которые содержат 0,1% и 0,2% углерода соответственно. Удельное электросопротивление стали всегда выше, чем у чистого железа, так как примеси, как правило, уменьшают электропроводность за счет искажения кристаллической решетки (рис. 1.3) [3].

1.2.5. Свойства материалов высокого сопротивления

Материалы высокого омического сопротивления ($\rho > 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) создают на основе металлов, образующих твердые растворы. В зависимости от назначения, к высокоомным сплавам предъявляют специальные требования, например: сплавы для образцовых сопротивлений должны иметь наименьшее значение термо-ЭДС в паре с медью; реостатные — малый температурный коэффициент электросопротивления и т.п. Кроме того, для многих случаев применения требуется технологичность сплавов — возможность изготовления из них тонкой гибкой проволоки.

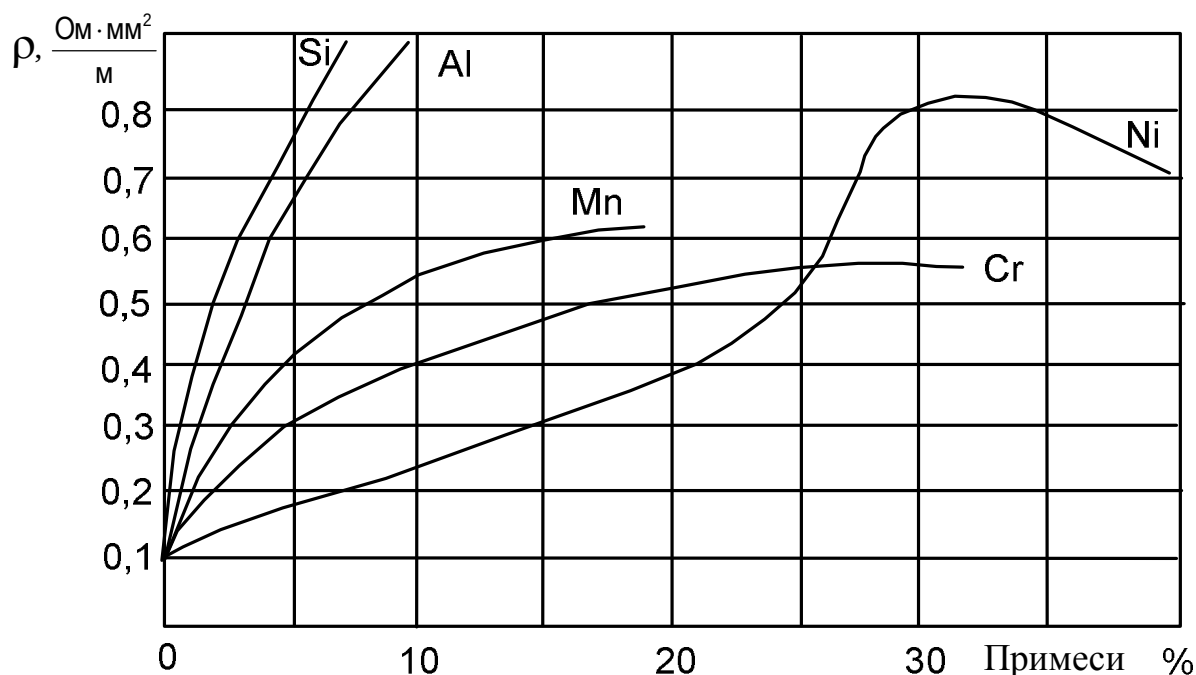


Рис. 1.3 — Зависимость удельного электросопротивления железа от содержания примесей

Необходимо, чтобы сплавы, используемые для приборов широкого потребления — реостатов, электроплиток, электрических чайников, паяльников и т. п., имели невысокую стоимость. Многие сплавы этой группы имеют следующие особенности: высокое удельное сопротивление; малый температурный коэффициент сопротивления; мелкокристаллическую структуру.

1.2.6. Сплавы для эталонных сопротивлений

Для производства эталонных сопротивлений применяют следующие медно-никелевые сплавы: константан, манганин.

Константан — это сплав, содержащий около 60% меди, 40% никеля, что соответствует минимуму температурного коэффициента удельного сопротивления TK_ρ при довольно высоком значении удельного сопротивления ρ в сплаве Cu-Ni: при нормальной температуре оно составляет (0,48...0,52) $\text{мкОм} \cdot \text{м}$. Название "константан" объясняется малым изменением удельного сопротивления при изменении температуры: величина

ТКр лежит в пределах $(5 \cdot 10^{-6} \dots 25 \cdot 10^{-6}) \text{ K}^{-1}$. Зависимости удельного электросопротивления ρ и температурного коэффициента ТКр константана от процентного содержания никеля приведены на рис. 1.4.

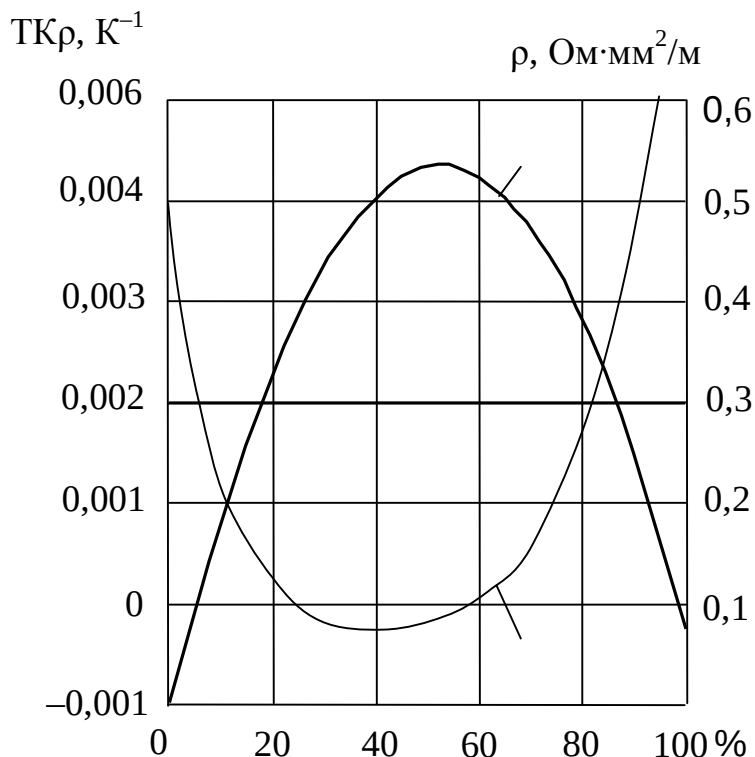


Рис. 1.4 — Зависимость ρ (а) и ТКр (б) константана от наличия примеси Ni

Применяется константан для изготовления термопар, служащих для измерения температуры, которая не превышает нескольких сотен градусов, реостатов и нагревательных элементов, длительно работающих при температуре около 450°C .

Манганин, названный так из-за наличия в нем марганца, содержит, кроме меди и никеля, еще и марганец. Примерный его состав: Cu — 85%, Mn — 12%, Ni — 3%. Значение удельного электросопротивления ρ манганина порядка $(0,42 \dots 0,48) \text{ мкОм} \cdot \text{м}$; ТКр — порядка $(6 \cdot 10^{-6} \dots 50 \cdot 10^{-6}) \text{ K}^{-1}$. Сопротивление манганиновой проволоки линейно возрастает с повышением давления от 0 до 1 ГПа, поэтому она применяется для изготовления датчиков, с помощью которых измеряют высокие гидростатические дав-

ления [2].

1.2.7. Сплавы высокого сопротивления на основе железа

К группе сплавов высокого сопротивления на основе железа относятся сплавы никеля с хромом, а также более сложные сплавы с добавками железа, марганца, кремния, иногда молибдена, вольфрама и других элементов. Сплошная оксидная пленка, образующаяся при нагреве нихрома, фехраля, хромалю и других сплавов обеспечивает их высокую нагревостойкость.

Нихром — сплав системы Fe-Ni-Cr. Он имеет структуру твердого раствора хрома и железа в никеле. Нихромы легко подвергаются протяжке в сравнительно тонкую проволоку или ленту. Однако, как и в константане, в этих сплавах велико содержание дорогого компонента — никеля. Максимальная рабочая температура для марок Х15Н60, Х20Н80 составляет (1000...1100) °С. Применяются нихромы в основном для нагревательных элементов.

Фехраль, хромаль — сплавы системы Fe-Cr-Al. Имеют структуру твердого раствора хрома и алюминия в железе. Эти сплавы более твердые и хрупкие по сравнению с нихромом, однако намного дешевле его [1]. Максимальная рабочая температура для сплавов марок 1Х25Ю5, 0Х25Ю5 составляет (1000...1400) °С. Сплавы Фехраль, хромаль используют для электронагревательных устройств большой мощности и промышленных печей.

Копель, алюмель, хромель, платинородий и другие сплавы применяют для изготовления термопар. Под термопарой понимают пару проводников из различных материалов, электрически соединенных на одном конце. На другом конце пары, благодаря термоэлектрическому эффекту, возникает термо-ЭДС, величина которой зависит от использованных для термопары материалов и от разности температур между ее концами. Термопары применяют, в основном, как датчики температуры для измерительных

приборов и систем.

Копель — сплав системы Ni-Cu. Он содержит 44% никеля и 56% меди.

Алюмель — сплав системы Ni-Al-Si-Mg, содержащий 95% никеля. Остальное приходится на примеси алюминия, кремния и магния.

Хромель — сплав системы Ni-Cr. Содержит 90% никеля и 10% Cr.

Платинородий — сплав системы Pt-Rh. Содержит 90% платины и 10% родия.

Для термопар чаще всего применяются следующие сочетания сплавов, обеспечивающих их работу при различных температурах:

- а) платинородий-платина — до 1600 °C;
- б) медь-константан — до 350 °C;
- в) медь-копель — до 350 °C;
- г) железо-константан — до 600 °C;
- д) хромель - копель — до 600 °C;
- е) хромель-алюмель — до (900...1000) °C.

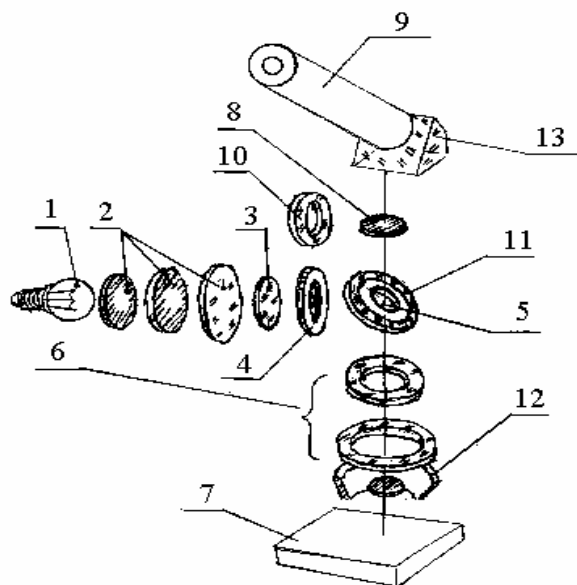
1.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из оптического микроскопа ММУ-1 с исследуемыми образцами.

1.3.1. Принцип работы микроскопа ММУ-1

Микроскоп ММУ-1 построен по схеме отраженного света (рис.1.5).

Источник света 1 находится в фокусе двухлинзового коллектора 2. Оптическая система направляет свет на объект, далее свет отражается от непрозрачного объекта и направляется обратно в объектив. При работе в **светлом поле** за коллектором устанавливается осветительная линза 3 и диафрагма 4.



- 1 — источник света; 2 — коллектор; 3 — осветительная линза;
 4 — ирисовая диафрагма; 5 — полупрозрачная пластинка; 6 — объектив;
 7 — объект; 8 — линза; 9 — окуляр; 10 — диафрагма темного поля;
 11 — кольцевое зеркало; 12 — параболический конденсор;
 13 — призма окулярной насадки.

Рис. 1.5 — Схема оптической системы микроскопа ММУ-1

После линзы 3 свет падает на полупрозрачную пластину 5 и, частично отразившись от неё, попадает в объектив 6. Пройдя объектив 6, свет падает на объект 7, отражается от него и возвращается в объектив 6.

Объект (шлиф) находится в фокусе объектива, поэтому отраженные от него лучи идут в виде параллельного пучка и собираются линзой 8 в фокальной плоскости окуляра 9.

При работе **в темном поле** на место линзы 3 и диафрагмы 4 устанавливается диафрагма 10, центральная зона которой непрозрачна. Свет, вышедший из коллектора 2, параллельным пучком, падает на кольцевое зеркало 11 и, отразившись от него, попадает на параболический конденсор 12. Конденсор 12 (от лат. *condense* — сгущаю, уплотняю) выполнен в виде короткофокусной линзы или системы линз и предназначен для освещения рассматриваемого образца. При таком освещении лучи света почти полно-

стью отражаются от объекта и минуют объектив. В объектив попадают лишь те лучи, которые упадут на отдельные неровности зеркально гладкого объекта на темном фоне.

В данной лабораторной работе микроскоп используется в режиме темного поля.

1.3.2. Приготовление микрошлифов для исследования с помощью микроскопа ММУ-1

Изучение свойств металлов и сплавов производится на специально изготовленных образцах (микрошлифах), имеющих плоскую, отполированную поверхность: чем выше качество полирования, тем меньше искажения структуры поверхности микрошлифа.

Полирование производится на быстровращающихся дисках, обтянутых замшей или мягким сукном, с применением полирующей смеси. Заключительными операциями полирования являются промывание микрошлифа водой, затем обработка растворителем жиров и просушивание.

Для выявления микроструктуры подготовленный образец подвергают травлению химическим реактивом, тип которого выбирают в зависимости от состава, структурного строения сплавов и цели исследования. Обычно применяют слабые растворы кислот, щелочей или солей в воде или спирте.

Для травления коррозионностойких сплавов используют концентрированные растворы кислот. Поверхность шлифа под действием реактива травителя преобразуется в многоэлектродный гальванический элемент, состоящий из большого числа микроскопических электродов. Электроды, имеющие наиболее электроотрицательный потенциал, играют роль микроскопических анодов и растворяются, образуя впадины на поверхности шлифа. Электроды, имеющие менее отрицательный потенциал (катоды), остаются без изменения. В результате на поверхности шлифа образуются выступы и впадины, характеризующие микроструктуру металла (сплава).

Чем меньше зерна, тем быстрее травится шлиф, так как больше гальванических элементов на единицу поверхности, из-за чего интенсивнее идет растворение. При травлении реактив в первую очередь воздействует на границы зерна, которые в травленном шлифе станут углублениями. Свет, попадая в углубления, будет рассеиваться, и в поле зрения микроскопа они будут казаться темными, а зерна — светлыми.

В лабораторной работе исследуются следующие микрошлифы:

- №1 («сталь 20»);
- №2 («латунь Л68»);
- №3 («бронза Бр.АМц 10-2»);
- №4 («медь М0б»);
- №5 («алюминий АЕ»).

1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

1.4.1. Изучить теоретическую часть методических указаний.

1.4.2. Ознакомиться с лабораторной установкой.

1.4.3. Рассмотреть и зарисовать (сфотографировать) микроструктуру исследуемых образцов.

1.4.4. По каждому образцу выполнить анализ результатов наблюдений, связав особенности микроструктуры с видами термообработки, химическим составом и возможными электрическими, магнитными и механическими свойствами.

1.4.5. В выводах дать оценку возможностей металлографического анализа свойств электрических, магнитных и механических металлов и сплавов, видов их термообработки и предложить наиболее целесообразные области применения исследуемых материалов в электротехнике.

1.5. Контрольные вопросы

1.5.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

- 1.5.1.1. В чем сущность металлографического анализа?
- 1.5.1.2. Какие металлы составляют основу жаростойких сплавов?
- 1.5.1.3. Что такое твердый раствор?
- 1.5.1.4. Какие технологические операции обеспечивают полный отжиг?
- 1.5.1.5. Какие технологические операции обеспечивают закалку полную?
- 1.5.1.6. Какие технологические операции обеспечивают закалку неполную?
- 1.5.1.7. Чем отличается отпуск средний от отпуска низкого?
- 1.5.1.8. Чем отличается отпуск высокий от отпуска среднего?
- 1.5.1.9. Какие технологические операции обеспечивают термическое улучшение?

1.5.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

- 1.5.2.1. Какому виду термообработки подвергался микрошлиф материала «сталь 20» (образец №1)?
- 1.5.2.2. Какая форма зерен наблюдается на поверхности микрошлифа материала «латунь Л68» (образец № 2)?
- 1.5.2.3. Как ориентированы зерна на поверхности микрошлифа материала «бронза Бр.АМц 10-2» (образец № 3)?
- 1.5.2.4. Какой вид термообработки обеспечивает получение микроструктуры, наблюдаемой на поверхности микрошлифа материала «медь М0б» (образец № 4)?
- 1.5.2.5. Какими механическими свойствами обладает материал «алюминий АЕ» (образец № 5)?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

2.1. Цель работы

Изучение осциллографического метода исследования основных химических и физических свойств магнитных материалов.

2.2. Теоретическая часть

2.2.1. Краткие теоретические сведения о магнитных материалах

Общие требования к магнитомягким материалам можно сформулировать следующим образом:

- 1) материал должен легко намагничиваться и размагничиваться, т. е. петля гистерезиса должна быть узкой, чему соответствует малое значение коэрцитивной силы и большие значения начальной и максимальной магнитных проницаемостей;
- 2) материал должен обладать большой индукцией насыщения, т. е. обеспечивать прохождение максимальной величины магнитного потока через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода;
- 3) при работе в переменных полях изделия из магнитомягкого материала должны иметь малые потери, которые складываются из потерь на гистерезис, вихревые токи и магнитное последствие.

При большой индукции насыщения можно получить наименьшие габариты, массу устройства. Снижение потерь обеспечивает повышение энергетического КПД, позволяет увеличить рабочую индукцию, что также способствует уменьшению массы и габаритов устройства.

Существенными факторами являются степень линейности кривой намагничивания (на определенном участке) и прямоугольности петли гистерезиса [1].

В данной лабораторной работе исследуются три вида магнитомягких

материалов: электротехническая сталь, железо-никелевый сплав — пермаллой и магнитный полупроводник — феррит.

Электротехническая сталь 3411 (холоднокатаная, текстурированная с содержанием кремния до 3,8%) имеет малую степень прямоугольности петли гистерезиса. Существенное влияние на электрические свойства стали оказывают примеси кремния. С увеличением содержания кремния удельное электросопротивление стали повышается, что приводит к уменьшению вихревых токов и, следовательно, энергетических потерь. Кроме того, легирование кремнием повышает временную стабильность магнитных свойств электротехнической стали.

Однако промышленные марки электротехнической стали содержат не более 5% Si. Это объясняется тем, что кремний ухудшает механические свойства стали и придает ей хрупкость и ломкость. Такая сталь непригодна для штамповки.

Кроме того, с введением кремния уменьшается индукция насыщения (примерно 0,05 Тл на 1% Si), так как кремний является немагнитным материалом.

С повышением частоты потери в магнитопроводе из электротехнической стали повышаются, поэтому уже на частотах выше 100 Гц КПД силового трансформатора с магнитопроводом из электротехнической стали резко падает [2].

Пермаллой — это железо-никелевый сплав с высокой магнитной проницаемостью. Введение никеля в количестве от 30% до 82% оказывает существенное влияние на свойства сплавов, а именно: резко увеличивает магнитную проницаемость, повышает антикоррозионные свойства, увеличивает чувствительность к пластическим деформациям и снижает величину удельного электросопротивления, что ведет к увеличению потерь на вихревые токи. Пермаллой имеет крутую (близкую к прямоугольной петлю гистерезиса).

В работе исследуются сплавы 50Н, 50НХС, 79НМ (по заданию преподавателя): 50Н — нелегированный низконикелевый пермаллой с содержанием 50% никеля; 50НХС — низконикелевый пермаллой с содержанием никеля 50%, легированный хромом и кремнием; 79НМ — высоконикелевый пермаллой (79% никеля), легированный молибденом (3,8%...4,1%).

ФЕРРИТЫ — это соединения окиси железа Fe_2O_3 с окисями других металлов. Ферриты представляют собой окисные полупроводники, обладающие магнитными свойствами [2].

В работе исследуются ферриты 1,3ВТ; 0,9ВТ; 3ВТ. Феррит 1,3ВТ содержит окиси магния, марганца, железа. Феррит 0,9ВТ содержит окиси магния, марганца, железа, цинка, кальция. Феррит 3ВТ содержит окиси лития, магния, марганца, железа. Все вышеперечисленные ферриты имеют высокую степень прямоугольности петли гистерезиса, обладают коэрцитивной силой 1,3; 0,9; 3 эрстеда соответственно.

Для разработки электромагнитной аппаратуры с оптимальными в заданных условиях работы параметрами необходимо знание статических (не изменяющихся во времени) и динамических (изменяющихся во времени) характеристик магнитных сердечников. В переменных полях при достижении определенных частот изменения напряженности H и индукции B характеристики перемагничивания подвергаются существенному влиянию следующих факторов:

- вихревых токов;
- магнитной вязкости (временного запаздывания изменения B по сравнению с изменением H при практическом отсутствии макроскопических вихревых токов);
- аккомодации, т.е. приспособления вещества к изменениям намагниченности;
- резонансных эффектов, обуславливающих реагирование магнитных

моментов атомов и ядер на некоторые определенные частоты внешнего поля.

Петля перемангничивания, полученная в переменном поле, называется динамической, а кривая намагничивания, проходящая через вершины симметричных динамических петель, — динамической кривой намагничивания (рис. 2.1).

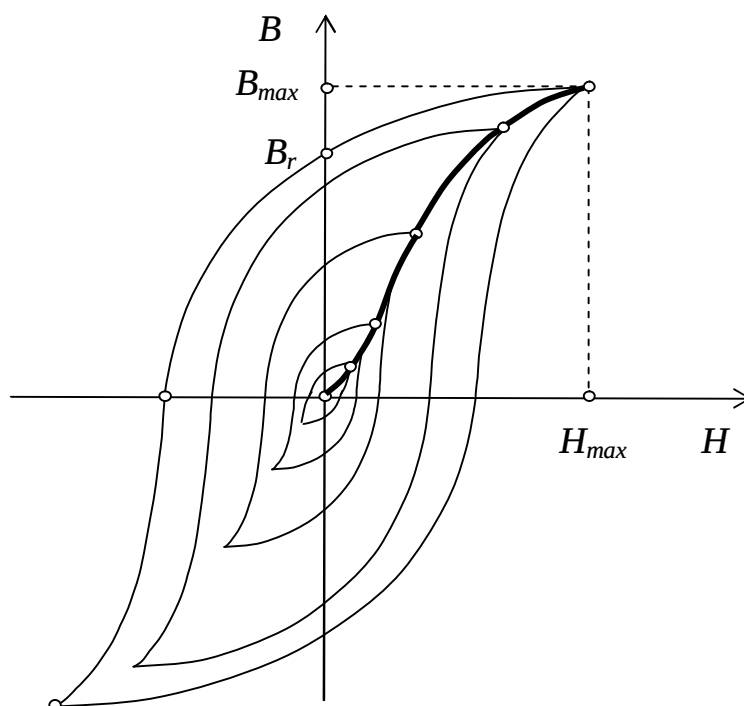


Рис. 2.1 — Динамические петли перемангничивания, полученные в переменном поле и динамическая кривая намагничивания

Основными динамическими характеристиками сердечников на переменном токе являются:

- динамическая петля гистерезиса;
- динамическая кривая намагничивания;
- комплексная магнитная проницаемость;
- удельные потери.

Статические характеристики замкнутых тороидальных сердечников можно считать характеристиками материала.

Так как перемангничивание в переменном поле связано не только с потерями на гистерезис, как в квазипостоянных полях, но и с потерями на вихревые токи, то динамическая петля больше по площади и шире статической.

Динамическая петля перемангничивания может значительно отличаться по форме от статической. Ее вид зависит от формы, величины, амплитуды, частоты перемангничивающего поля, химического состава материала, толщины пластин сердечника, наличия или отсутствия на сердечнике вторичных нагруженных обмоток и др. Динамическая петля имеет форму эллипса при низких значениях индукции, когда функция $B(t)$ и $H(t)$ практически синусоидальны. С ростом частоты она напоминает статическую при средних значениях индукции и низкой частоте, когда основную роль в процессе перемангничивания играют потери на гистерезис, отдаляется по форме от статической при высоких значениях индукции насыщения, когда растут потери на вихревые токи. При росте потерь на вихревые токи характерным отличием динамической петли от статической является широкий и закруглённый "носик".

Одной из основных статических характеристик сердечников является предельная петля перемангничивания (гистерезиса).

Применительно к динамической петле перемангничивания, строго говоря, это понятие отсутствует, так как с ростом амплитуды напряженности поля, превышающей напряженность технического насыщения в статическом режиме (H_{max}), предельная петля перемангничивания неуклонно увеличивается за счет возрастания потерь, вызванных повышением скорости перемангничивания сердечника. Поэтому следует говорить о динамической петле перемангничивания при определенной амплитуде H_{max} поля и частоте.

В частных случаях, когда пренебрежимо малы вихревые токи, вследствие то ли низкой частоты поля, то ли высокого, как, например, у ферритов удельного электрического сопротивления, то ли незначительной тол-

щины ленты, а магнитным последствием из-за низкой скорости перемагничивания можно пренебречь, динамические петли на переменном токе оказываются квазистатическими.

2.2.2. Описание осциллографического метода исследования магнитных характеристик материалов

Для экспериментального определения динамических характеристик применяется осциллографический метод. Уступая другим методам в точности измерений, осциллографический метод, погрешность которого от 7% до 10%, выгодно отличается по трудоемкости и не имеет равных по наглядности (возможности не только измерять, но и визуально наблюдать влияние различных факторов — частоты, температуры, механических напряжений и др. на характеристики в широких пределах их изменения). Структурная схема установки для получения на экране осциллографа динамических петель перемагничивания тороидальных сердечников показана на рис. 2.2.

Максимальное значение напряжённости намагничивающего поля замкнутой магнитной цепи за период определяется по формуле

$$H_{max} = \frac{I_{max} W_1}{L},$$

где I_{max} — максимальное значение за период намагничивающего тока в первичной обмотке; L — средняя длина магнитной цепи; W_1 — число витков намагничивающей обмотки.

Из закона электромагнитной индукции следует [2], что

$$e_2(t) = -W_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = -W_2 S \frac{dB(t)}{dt}, \quad (2.1).$$

где $e_2(t)$ — ЭДС, наводимая во вторичной обмотке, В; $\Phi(t)$ — магнитный поток, Вб; W_2 — число витков во вторичной обмотке; $B(t)$ — магнитная индукция, Тл; S — площадь поперечного сечения исследуемого образца, м².

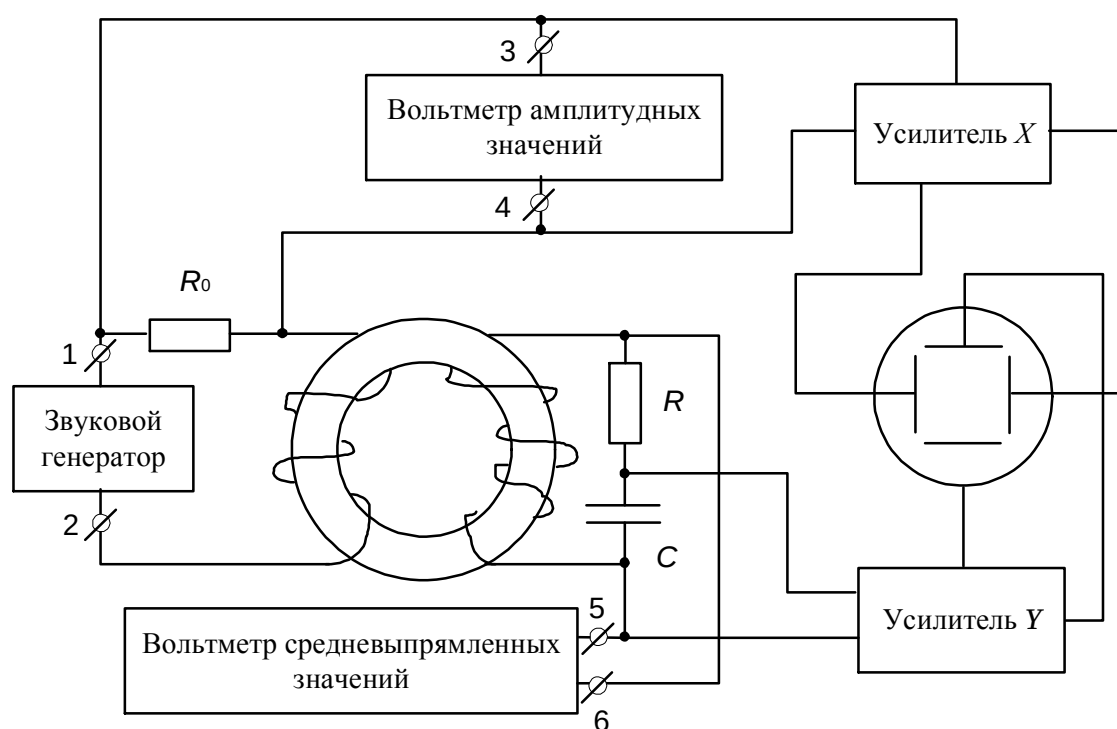


Рис. 2.2 — Схема установки для исследования материалов осциллографическим методом

Откуда изменение во времени магнитной индукции в магнитопроводе определяется интегралом

$$B(t) = -\frac{1}{W_2 S} \int e_2(t) dt, \quad (2.2)$$

Известно, что напряжение $u_C(t)$ на конденсаторе связано с протекающим через него током $i_2(t)$ соотношением

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int i_2(t) dt,$$

где $i_2(t)$ — мгновенное значение тока во вторичной обмотке; C — электрическая емкость конденсатора.

При подаче $e_2(t)$ на зажимы цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора R и конденсатора C , и при выполнении условия $R \ll 1/\omega C$ напряжение $u_C(t)$ на конденсаторе с учетом (2.1) и (2.2) можно описать формулой [1]

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_2(t) dt \approx \frac{1}{RC} \int e_2(t) dt \approx -\frac{W_2 S B(t)}{RC}.$$

Напряжение $u_c(t)$ подаётся на вход Y осциллографа. На вход X подаётся напряжение U_{R0max} (с эталонного сопротивления $R_0 = 1$ Ом, включённого последовательно в намагничивающую обмотку).

$$U_{R0max} = R_0 I_{max} = \frac{R_0 H_{max} L}{W_1}.$$

При одновременном приложении этих напряжений к горизонтальным и вертикальным пластинам осциллографа на его экране получится кривая, характеризующая зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

Таким образом, на экране осциллографа будет виден гистерезисный цикл испытуемого образца магнитного материала. Геометрическое место точек вершин гистерезисных циклов, полученных при различных напряжениях, дает динамическую кривую намагничивания.

Для определения максимальной индукции B_{max} , достигаемой в течение цикла, представим выражение для магнитного потока в виде

$$\Phi(t) = \Phi_{max} \cos(\omega t),$$

где Φ_{max} — амплитуда магнитного потока.

Тогда ЭДС индукции во вторичной обмотке

$$e_2(t) = -W_2 \frac{d(\Phi_{max} \cos(\omega t))}{dt} = W_2 \omega \Phi_{max} \sin(\omega t). \quad (2.3)$$

Амплитуда магнитного потока может быть выражена следующим образом

$$\Phi_{max} = B_{max} S. \quad (2.4)$$

С учетом (2.3) для ЭДС индукции во вторичной обмотке получим

$$e_2(t) = 2W_2 \pi f B_{max} S \sin(\omega t).$$

Во вторичную обмотку стенда включен вольтметр средневыпрямленных значений. Поэтому

$$E_{\text{cp}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e_2(t) dt = \frac{4\pi}{T} \int_0^{T/2} f W_2 B_{\text{max}} S \sin(\omega t) dt = 4 f W_2 B_{\text{max}} S.$$

Откуда

$$B_{\text{max}} = \frac{E_{\text{cp}}}{4 f W_2 S}.$$

2.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из звукового генератора ГЗ-33, подключенного к клеммам «1», «2» первичной обмотки трансформатора. Вторичная обмотка трансформатора нагружена на RC цепочку. Исследуемые образцы в виде тороидов с размещенными на них обмотками поочередно подключаются к макету с помощью галетного переключателя (на схеме макета переключатель не показан). Напряжение с образцового сопротивления R_0 подается на вход «X» (клеммы «3», «4»), а напряжение с конденсатора C на вход «Y» электроннолучевого осциллографа. Параллельно входам «X» подключен вольтметр амплитудных значений. Вторичная обмотка соединена со входом вольтметра средневыпрямленных значений.

2.4. Порядок выполнения лабораторной работы

2.4.1. Порядок выполнения экспериментальной части лабораторной работы

2.4.1.1. Ознакомиться с лабораторным макетом для снятия петель перемагничивания. Регулятор выходного напряжения звукового генератора вывести на минимум. Установить переключатель выбора материала в положение, соответствующее схеме измерения параметров электротехнической стали.

2.4.1.2. Включить звуковой генератор в цепь первичной обмотки (к клеммам «1», «2»), вольтметр амплитудных значений к клеммам «3» и «4», вольтметр средневыпрямленных значений к клеммам «5» и «6».

2.4.1.3. Выбрать верхний предел частоты f_B перемагничивания сердечника из исследуемого материала. Это выполняется следующим образом: при максимальном выходном напряжении звукового генератора следует повышать частоту до тех пор, пока регулировкой усиления осциллографа по «X» и «Y» еще возможно получить изображение петли перемагничивания исследуемого сердечника, занимающее примерно 3/4 площади экрана осциллографа.

В дальнейшем при наблюдении всех петель данного сердечника усиление желательно не изменять, чтобы заново не градуировать шкалу на экране осциллографа.

2.4.1.4. Вольтметром амплитудных значений измерить падение напряжения U_{R0max} на калибровочном сопротивлении R_0 и результат измерения записать в таблицу 2.1.

2.4.1.5. Отключить провод, идущий на вход «Y» осциллографа с RC цепи вторичной обмотки и измерить значение протяженности $2X_{max}$ следа электронного луча, совпадающего на экране осциллографа с осью абсцисс и результат записать в таблицу 2.1. Восстановить изображение петли, подключив провод с RC цепи вторичной обмотки ко входу «Y» осциллографа.

Таблица 2.1 — Экспериментальные данные

Частота, Гц	Показания вольтметров, В	Величина, м
$f_B =$	$U_{R0max} =$	$2X_{max} =$
$f_H =$	$E_{cp} =$	$2Y_{max} =$

2.4.1.6. Установить зависимость формы и параметров петли от частоты перемагничивания. Для этого, поддерживая неизменными U_{R0max} и усиление по «X» и «Y» осциллографа, получить на экране петли перемагничивания на частотах средней f_{cp} и нижней f_H . Нижнее значение частоты

$f_H = 50$ Гц. Среднее значение частоты определяется по формуле

$$f_{CP} = \frac{f_B + f_H}{2}.$$

2.4.1.7. На частоте f_H измерить вольтметром средневывпрямленных значений ЭДС E_{cp} на зажимах вторичной обмотки и результаты измерений занести в таблицу 2.1.

2.4.1.8. Отключить от входа «X» осциллографа провод, идущий с первичной обмотки, измерить протяженность $2Y_{max}$ следа луча, совпадающего на экране с осью ординат и результат измерения занести в таблицу 2.1. Восстановить изображение петли, подключив провод с первичной обмотки ко входу «X» осциллографа.

2.4.1.9. Масштабы по осям B и H определить по формулам:

$$m_B = \frac{2B_{max}}{2Y_{max}} = \frac{E_{cp}}{4W_2 f S Y_{max}}, \text{ Тл/м};$$

$$m_H = \frac{2H_{R0max}}{2X_{max}} = \frac{W_1 U_{R0max}}{R_{0max} L X_{max}}, \text{ А/м}^2.$$

При этом считать, что $W_1 = 80$ и $W_2 = 100$.

2.4.1.10. С помощью координатной сетки на экране осциллографа определить координаты точек Y_k и X_k на петле гистерезиса (рис. 2.3).

2.4.1.11. Вычислить на нижней частоте B_k и H_k по формулам

$$B_k = m_B Y_k; H_{R0k} = m_H X_k.$$

по четырнадцать значений соответственно для верхней и нижней ветвей петли гистерезиса. Результаты измерения и расчета занести в таблицу 2.2.

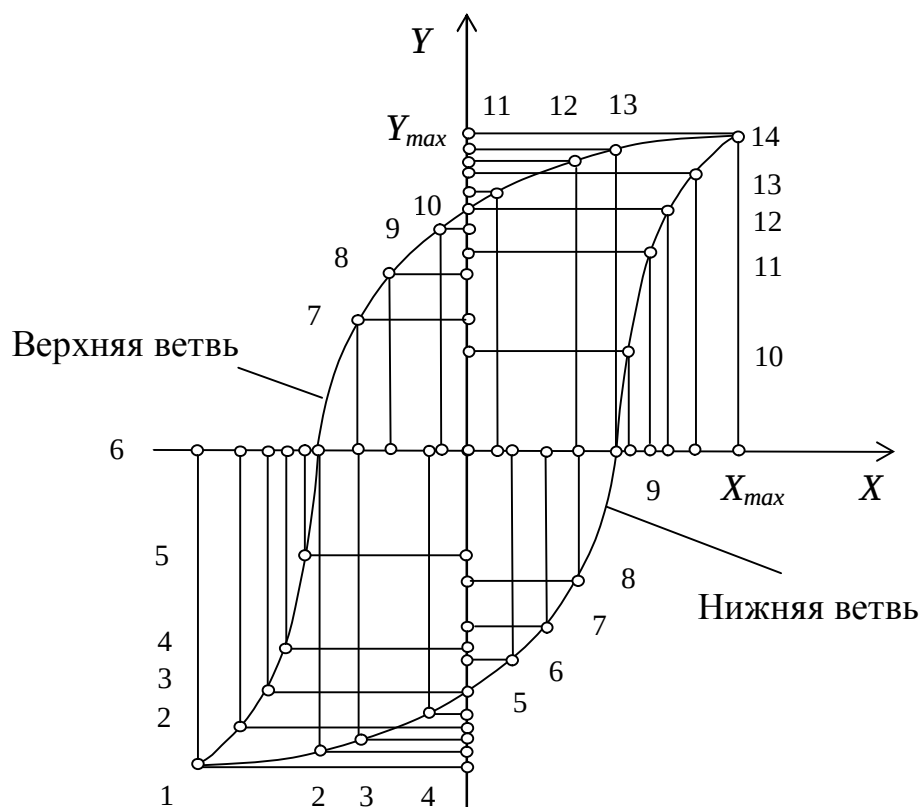


Рис. 2.3 — Пример расположения отсчетных точек на петле гистерезиса

Таблица 2.2 — Координаты Y_k и X_k точек петли гистерезиса

[illegible]

Продолжение таблицы 2.2

Номера точек (верхняя ветвь)													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Y_k													
B_k													
X_k													
H_k													

Повторить аналогичные измерения на средней (f_{cp}) и верхней (f_v) частотах и результаты измерений занести в аналогичные таблицы 2.3 и 2.4.

2.4.2. Порядок выполнения расчетной части лабораторной работы

2.4.2.1. Изучить методику расчета удельных потерь, суть которой состоит в следующем.

Удельные потери, определяются по величине площади петли гистерезиса по формуле [3]

$$P = \oint B(H) dH.$$

Приближенная зависимость $B(H)$ определяется интерполированием экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Верхняя и нижняя петли гистерезиса могут быть аппроксимированы полиномом четвертой степени

$$B(H) = A_0 + A_1 H + A_2 H^2 + A_3 H^3 + A_4 H^4.$$

Так как ни одна из найденных точек не удовлетворяет уравнению

$B = f(H)$, то можно получить для n точек следующую систему:

$$\begin{aligned} A_0 + A_1 H_1 + A_2 H_1^2 + A_2 H_1^3 + A_2 H_1^4 - B_1 &= \delta_1; \\ A_0 + A_1 H_2 + A_2 H_2^2 + A_2 H_2^3 + A_2 H_2^4 - B_2 &= \delta_2; \\ &\dots\dots\dots \\ A_0 + A_1 H_n + A_2 H_n^2 + A_2 H_n^3 + A_2 H_n^4 - B_n &= d_n, \end{aligned}$$

где $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ называются невязками.

Отклонение аппроксимирующей функции от экспериментальной зависимости характеризуется суммой квадратов невязок. Согласно принципу наименьших квадратов, наилучшие значения коэффициентов $A_0 \dots A_n$ будут те, для которых сумма квадратов невязок будет наименьшей.

$$\sum_{k=1}^{k=14} (A_0 + A_1 H_k + A_2 H_k^2 + A_2 H_k^3 + A_2 H_k^4 - B_k)^2 = \phi_1(A_0 \dots A_n).$$

Поэтому функция ϕ_1 должна иметь минимум

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial A_0} = 0; \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial A_1} = 0; \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial A_2} = 0; \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial A_3} = 0 \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial A_4} = 0. \quad (2.5)$$

Используя (2.5), приходим к системе независимых нормальных уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{k=14} (A_0 + A_1 H_k + A_2 H_k^2 + A_2 H_k^3 + A_2 H_k^4 - B_k) &= 0; \\ \sum_{k=1}^{k=14} (A_0 + A_1 H_k + A_2 H_k^2 + A_2 H_k^3 + A_2 H_k^4 - B_k) H_k &= 0; \\ \sum_{k=1}^{k=14} (A_0 + A_1 H_k + A_2 H_k^2 + A_2 H_k^3 + A_2 H_k^4 - B_k) H_k^2 &= 0; \\ \sum_{k=1}^{k=14} (A_0 + A_1 H_k + A_2 H_k^2 + A_2 H_k^3 + A_2 H_k^4 - B_k) H_k^3 &= 0; \\ \sum_{k=1}^{k=14} (A_0 + A_1 H_k + A_2 H_k^2 + A_2 H_k^3 + A_2 H_k^4 - B_k) H_k^4 &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Обозначим:

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{n=14} H_k = c_1; \sum_{k=1}^{n=14} H_k^2 = c_2; \sum_{k=1}^{n=14} H_k^3 = c_3; \sum_{k=1}^{n=14} H_k^4 = c_4; \sum_{k=1}^{n=14} H_k^5 = c_5; \sum_{k=1}^{n=14} H_k^6 = c_6; \\
& \sum_{k=1}^{n=14} H_k^7 = c_7; \sum_{k=1}^{n=14} H_k^8 = c_8; \sum_{k=1}^{n=14} B_k = c_9; \sum_{k=1}^{n=14} B_k H_k = c_{10}; \sum_{k=1}^{n=14} B_k H_k^2 = c_{11}; \sum_{k=1}^{n=14} B_k H_k^3 = c_{12}; \\
& \sum_{k=1}^{n=14} B_k H_k^4 = c_{13}.
\end{aligned} \tag{2.7}$$

С учетом (2.7) система уравнений (2.6) принимает вид:

$$\begin{aligned}
& A_0 14 + A_1 c_1 + A_2 c_2 + A_3 c_3 + A_4 c_4 = c_9; \\
& A_0 c_1 + A_1 c_2 + A_2 c_3 + A_3 c_4 + A_4 c_5 = c_{10}; \\
& A_0 c_2 + A_1 c_3 + A_2 c_4 + A_3 c_5 + A_4 c_6 = c_{11}; \\
& A_0 c_3 + A_1 c_4 + A_2 c_5 + A_3 c_6 + A_4 c_7 = c_{12}; \\
& A_0 c_4 + A_1 c_5 + A_2 c_6 + A_3 c_7 + A_4 c_8 = c_{13}.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

2.4.2.2. Взять из таблицы 2.2 текущие значения H_k и B_k и рассчитать в математической системе *MathCAD* промежуточные коэффициенты $c_1 \dots c_{13}$ для верхней и нижней петель гистерезиса.

2.4.2.3. Сформировать матрицы значений.

Для верхней ветви:

$$M1 := \begin{pmatrix} 14 & c1 & c2 & c3 & c4 \\ c1 & c2 & c3 & c4 & c5 \\ c2 & c3 & c4 & c5 & c6 \\ c3 & c4 & c5 & c6 & c7 \\ c4 & c5 & c6 & c7 & c8 \end{pmatrix}; \quad M2 := \begin{pmatrix} c9 \\ c10 \\ c11 \\ c12 \\ c13 \end{pmatrix}.$$

Для нижней ветви:

$$M3 := \begin{pmatrix} 14 & c11 & c22 & c33 & c44 \\ c11 & c22 & c33 & c44 & c55 \\ c22 & c33 & c44 & c55 & c66 \\ c33 & c44 & c55 & c66 & c77 \\ c44 & c55 & c66 & c77 & c88 \end{pmatrix}; \quad M4 := \begin{pmatrix} c99 \\ c1010 \\ c1111 \\ c1212 \\ c1313 \end{pmatrix}.$$

Используя функцию ***Isolve (M1, M2)*** определить неизвестные коэффициенты $A_0 \dots A_4$ для верхней и нижней ветвей петли гистерезиса.

Составить уравнения для верхней и нижней ветвей петли гистерезиса

$$B_H(H) = A_0 + A_1 H + A_2 H^2 + A_3 H^3 + A_4 H^4.$$

В системе ***MathCAD*** вычислить удельные потери p для нижней, средней и верхней частот по следующей формуле

$$p = k \frac{f}{D} \left(\int_{H_{min}}^{H_{max}} B_B(H) dH - \int_{H_{min}}^{H_{max}} B_H(H) dH \right),$$

где $k=0,03$ — коэффициент, зависящей от массы магнитопровода; f — частота перемагничивания магнитопровода; D — плотность материала магнитопровода (выбирается из справочника [4]); H_{max} — значение напряженности магнитного поля в точке №14; H_{min} — значение напряженности магнитного поля в точке №1 (с целью удобства вычисления потерь H_{min} принимается равной нулю).

Результаты вычисления удельных потерь для трех материалов представить в виде таблицы 2.3.

Таблица 2.3 — Результаты определения удельных потерь

Частота перемагничивания магнитопровода	Удельные потери магнитопровода, P , Дж/м ³		
	Электротехническая сталь	Пермаллой	Феррит
f_H			
f_{CP}			
f_B			

2.5. Порядок оформления отчета

2.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

2.5.2. Сформулировать цель работы.

2.5.3. Кратко изложить результаты теоретического анализа, касающегося влияния химического состава, вида термообработки на магнитные, электрические и механические свойства магнитных материалов.

2.5.4. Изобразить принципиальную схему лабораторного макета и описать назначение входящих в него приборов.

2.5.5. Кратко описать методику измерений и расчетов потерь в исследуемых образцах.

2.5.6. Привести результаты расчетов в виде таблиц и графиков.

2.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения работы.

2.6. Содержание выводов

2.6.1. Анализ результатов теоретического исследования, касающегося влияния химического состава, вида термообработки на электрические, магнитные, механические свойства и на потери в магнитных материалах.

2.6.2. Анализ результатов экспериментального исследования, в котором должна быть отражена взаимосвязь между химическим составом, видом термообработки исследуемых образцов, их электрическими, магнитными, механическими свойствами и потерями.

2.6.3. Анализ вариантов наиболее целесообразного применения исследуемых магнитных материалов в электрорадиотехнике.

2.7. Контрольные вопросы

2.7.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

2.7.1.1. Какие основные статические параметры характеризуют ферромагнитные материалы?

2.7.1.2. Чем вызывается отличия динамических характеристик ферро-

магнитных материалов от статических?

2.7.1.3. Какие основные динамические параметры характеризуют ферромагнитные материалы?

2.7.1.4. Как получить симметричные и предельные циклы гистерезиса?

2.7.1.5. Почему образцы при испытании имеют замкнутую форму?

2.7.1.6. Как определить напряженность магнитного поля в образце?

2.7.1.7. Каковы основные функциональные блоки измерительной установки?

2.7.1.8. Какие сплавы называются пермаллоями и в чем особенности их свойств?

2.7.1.9. Какие стали являются электротехническими?

2.7.1.10. Что такое ферриты?

2.7.1.11. Какие существуют методы уменьшения величины потерь в магнитных материалах?

2.7.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

2.7.2.1. Как производилась градуировка вертикальной и горизонтальной осей на сетке осциллографа?

2.7.2.2. Как изменялась ширина петли гистерезиса исследуемых образцов в зависимости от частоты генератора?

2.7.2.3. Как изменились ширина петли гистерезиса и потери в образце феррита при перестройке генератора с нижней частоты на верхнюю?

2.7.2.4. Какой из исследуемых материалов имеет максимальную площадь петли гистерезиса на максимальной частоте генератора?

2.7.2.5. Как изменились ширина петли гистерезиса и потери в образце электротехнической стали при перестройке генератора с нижней частоты на верхнюю?

2.7.2.6. Какие выводы по применению электротехнической стали можно сделать после анализа результатов эксперимента?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, МЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

3.1. Цель работы

Изучение основных химических и физических свойств магнитных материалов методом амперметра-вольтметра.

3.2. Теоретическая часть

3.2.1. Основные сведения о магнитных материалах

Магнитным материалом называют материал с высокой магнитной проницаемостью. Общепринято выделение двух основных групп магнитных материалов: магнитомягких и магнитотвёрдых. Характерными свойствами магнитомягких материалов являются их способность намагничиваться до насыщения в слабых полях и малые потери на перемагничивание.

Магнитотвердые материалы имеют высокую остаточную индукцию B_r и большую коэрцитивную силу H_C .

Магнитные материалы принято классифицировать по их основному химическому составу, который в значительной степени определяет технологию производства, электрические, магнитные, механические свойства и область применения материала.

Одним из наиболее широко применяющихся магнитомягких материалов является электротехническая сталь, представляющая собой сплав железа с кремнием (от 0,5% до 5% кремния). Кремний при соединении с железом образует твердый раствор, который способствует увеличению удельного сопротивления сплава. При введении в железо кремния его электрическое сопротивление увеличивается, что способствует уменьшению вихревых токов в магнитопроводе и, следовательно, снижению потерь в трансформаторе с этим магнитопроводом. Магнитные свойства техниче-

ски чистого железа при легировании его кремнием также улучшаются (возрастают начальная и максимальная проницаемости, уменьшается коэрцитивная сила, существенно улучшается его временная стабильность свойств). Положительное действие кремния на магнитные свойства технически чистого железа объясняется рядом причин. Кремний переводит углерод из вредной для магнитных свойств формы цементита в графит. Действуя как раскислитель, он связывает часть растворенных в металле газов, способствует росту зерен и уменьшению констант магнитной анизотропии и магнитострикции. Наибольшее значение максимальной магнитной проницаемости наблюдается при содержании от 6,5% до 6,8% кремния, чему соответствует близкая к нулю магнитострикция. Однако, в технике применяют сплавы с содержанием кремния не выше 5%. Это связано с тем, что кремний ухудшает механические свойства сплава, повышая его твердость и хрупкость.

Влияние углерода, серы, кислорода, марганца, фосфора на магнитные свойства электротехнической стали отрицательно. Для улучшения магнитных свойств стали необходимо тщательно очищать ее от примесей и подвергать особой термообработке.

Для получения свойств, характеризующих магнитотвердые материалы, применяют высокоуглеродистые стали, а также стали, легированные хромом, кобальтом, молибденом, которые способствуют образованию высокодисперсионных карбидов. Однако магнитные свойства материалов в значительной степени определяются видом и качеством термообработки.

Термическая обработка — это специальная тепловая операция, которая заключается в нагреве материала до определённой температуры, выдержки при ней и быстром или медленном охлаждении.

В зависимости от температуры нагрева материала и скорости его охлаждения различают четыре основных вида термической обработки: закалку; отпуск; нормализацию и отжиг [4].

Закалка применяется для получения магнитотвердых материалов. Она состоит из следующих технологических операций: нагрева стали до определенной температуры (для стали «У9», например, температура закалки равна 723 °С); выдержке при этой температуре; охлаждении в воде (масле, эмульсиях, расплавах солей и других охладителях). В результате закалки получается неравновесная мартенситная структура, отличающаяся высокой твердостью.

Вследствие мелкодисперсной структуры суммарная удельная поверхность зерен больше. В местах соприкосновения зерен кристаллическая решетка искажается. Внутренние напряжения при намагничивании препятствуют росту доменов и ориентации магнитных моментов в направлении поля. Искажение кристаллической решетки и создание внутренних напряжений приводят к повышению коэрцитивной силы, т.е. сталь становится магнитотвёрдой.

Исследования показали, что оптимальные магнитные свойства магнитотвёрдого материала можно получить в том случае, если в структуру, кроме мартенсита, ввести, высокодисперсные карбиды. Такое состояние, условно названное «дисперсионным твердением», обеспечивается специальной термообработкой, при которой не все карбиды переходят в твердый раствор и часть выделяется в высокодисперсном виде. Это способствует не только увеличению коэрцитивной силы, но и увеличению остаточной индукции, так как при меньшем растворении карбидов мартенсит содержит меньше углерода и, следовательно, имеет более высокое магнитное насыщение.

Отпуск применяется для снятия внутренних напряжений. Он приводит к улучшению магнитных свойств; понижению коэрцитивной силы и увеличению магнитной проницаемости.

Отжиг и нормализация используются для получения магнитомягких материалов. Температура нагрева при отпуске сталей всегда ниже крити-

ческой точки $A_{or} = 723\text{ }^{\circ}\text{C}$, при отжиге и нормализации значительно выше точки A_{or} . При отжиге сталь охлаждается вместе с печью. При нормализации и отпуске сталь охлаждается на воздухе. Наиболее полное снятие внутренних напряжений кристаллической решетки осуществляется при отжиге, а, следовательно, материал при этом обладает более высокой магнитной проницаемостью.

Элементарная ячейка железосилицистого сплава представляет собой объемноцентрированный куб, для которого направлениями «легкого» намагничивания являются его ребра, а направлению самого «трудного» намагничивания соответствуют пространственные диагонали. Поэтому свойства электротехнической стали значительно улучшаются в результате образования текстуры при её холодной прокатке (структуры материала, характеризующейся ориентацией ребер объемноцентрированного куба вдоль направления холодной прокатки). Таким образом, при холодной прокатке получают преимущественную ориентацию кристаллов, которую называют текстурой прокатки. При отсутствии текстуры имеет место хаотическое расположение кристаллов. Вследствие этого материал приобретает изотропные свойства.

Однако деформация в холодном состоянии приводит к появлению больших внутренних напряжений и, следовательно, к росту H_C . Поэтому эти напряжения обычно снимают отжигом.

При нагреве холоднокатаной стали до температуры выше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается рекристаллизация, сопровождающаяся бурным ростом кристаллов и одновременной ориентацией их вдоль направления легкого намагничивания. В результате ребра кубов оказываются расположенным параллельно к направлению прокатки. Такую текстуру называют ребровой текстурой рекристаллизации [1].

Технологический процесс производства стали с ребровой текстурой весьма сложен и включает: горячую и холодную прокатки; промежуточ-

ный отжиг; холодную прокатку и окончательный отжиг при высокой температуре (1100...1500) °С.

В этой работе изучаются материалы:

а) электротехническая сталь (ГОСТ 21427-78) марки 1512 (горячекатаная, изотропная, с содержанием кремния до 4,8%, нормированная по удельным потерям, определенным при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц);

б) марки 3-111 (холоднокатаная: анизотропная, с ребровой текстурой, с содержанием кремния до 3,8%, нормированная по удельным потерям, определяемым при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц);

в) углеродистая сталь У9 (с содержанием углерода 0,9 % после закалки, отпуска, отжига);

г) специальные мартенситные стали EX, EX3, E7B6 и др.

При приемо-сдаточных испытаниях магнитные характеристики материалов определяют обычно в постоянных магнитных полях. Но так как эксплуатация материалов производится в переменных полях, то необходимо умение определять и знать магнитные свойства сталей в динамических условиях, в частности, в магнитном поле промышленной частоты 50 Гц [2].

В отличие от статических магнитных характеристик, определенных в постоянных магнитных полях, которые можно считать характеристиками материала, магнитные характеристики в переменных магнитных полях зависят от многих факторов и лишь условно могут быть названы характеристиками материала.

При помещении образца из ферромагнитного материала в переменное поле, в нем возникают вихревые токи, создающие свой магнитный поток, направленный в данный момент времени противоположно магнитному потоку от внешнего магнитного поля. Это приводит к неравномерности индукции и напряженности поля по сечению образца. И индукция, и напря-

женность поля внутри образца убывают с удалением от поверхности. При определении характеристик в переменных магнитных полях мы можем определить напряженность поля только на поверхности образца, а индукцию только среднюю по сечению образца (независимо от метода испытания). Вследствие этого при той же максимальной напряженности поля на поверхности образца, что и при испытании

в постоянном магнитном поле, измеряется меньшая по величине индукция, причем получаемые значения B и H не соответствуют истинным их значениям, меняющимся от точки к точке в сечении образца.

Распределение B и H зависит также от статических магнитных свойств испытуемого материала, так как, чем выше его магнитная проницаемость, тем больше выражен поверхностный эффект, т.е. тем сильнее уменьшается напряженность поля и индукция, с увеличением глубины проникновения в образец [3].

Обычно при работе в переменных магнитных полях используются листовые материалы. Чем тоньше листы, из которых изготовлен образец, тем ближе (при прочих равных условиях) получаемые характеристики к аналогичным характеристикам в постоянных магнитных полях. Влияние поверхностного эффекта тем сильнее, чем выше частота переменного магнитного поля, следовательно, магнитные характеристики зависят и от частоты. Наконец, магнитные характеристики в переменных магнитных полях зависят от формы кривой индукции и напряженности поля, т.е. от наличия и величины высших гармоник и кривых индукции и напряженности магнитного поля. Из сказанного выше ясна условность магнитных характеристик, определяемых в переменных магнитных полях.

Чтобы использовать магнитные характеристики в переменных магнитных полях, необходимо знать условия, в которых они определены, а именно:

— материал образца (марку);

- толщину (в некоторых случаях форму образца);
- частоту переменного магнитного поля;
- форму кривой индукции или напряженности поля;
- метод определения характеристик.

Ферромагнитное вещество, находящееся в периодически изменяющемся магнитном поле, меняет свое магнитное состояние за период по динамической петле гистерезиса. Геометрическое место вершин этих петель даст динамическую кривую намагничивания, т.е.

$$B_{max} = f(H_{max}),$$

где B_{max} — максимальное значение индукции за период, в течение которого напряженность магнитного поля достигла максимального значения H_{max} .

Амплитудная магнитная проницаемость ферромагнетика в переменном магнитном поле выражается формулой [1]

$$\mu = \frac{B_{max}}{\mu_0 H_{max}},$$

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

Площадь петли гистерезиса определяет потери на перемагничивание и вихревые токи (при переменном поле).

Возможности применения той или иной стали определяются численными значениями всех или части перечисленных параметров или же соотношениями между ними.

3.2.2. Описание метода исследования характеристик магнитных материалов

Магнитные характеристики в переменных полях промышленной частоты можно определить с помощью метода амперметра - вольтметра. Образец при этом используется в форме тороида или рамки, которая собирается из тонких пластин исследуемого материала. На исследуемый образец

(рис. 3.1) наматываются намагничивающая обмотка W_1 и измерительная обмотка W_2 . Ток в цепи обмотки W_1 определяется при помощи амперметра А, а индуцируемая ЭДС в обмотке W_2 измеряется вольтметром В2.

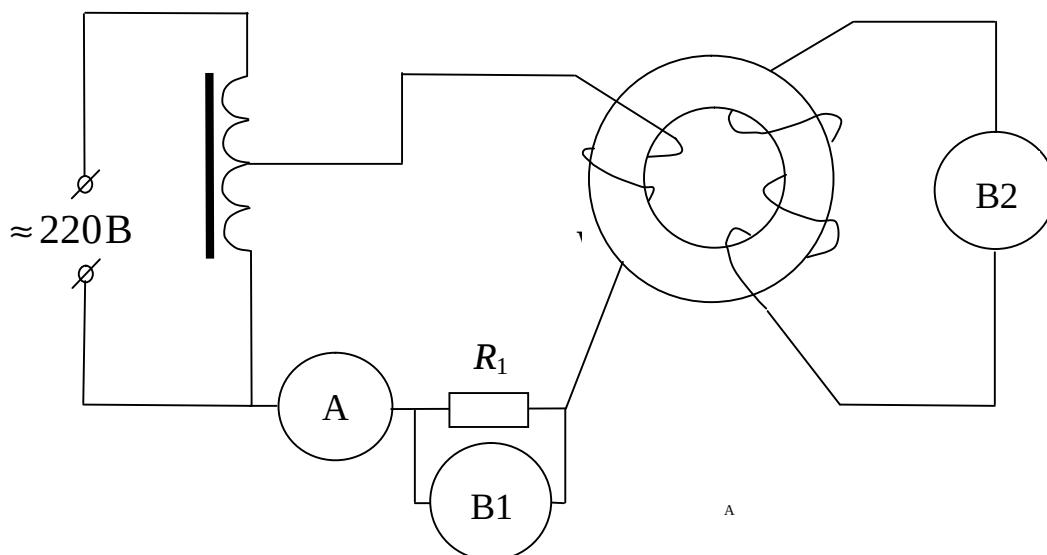


Рис. 3.1 — Схема установки для измерения кривой магнитной индукции методом амперметра-вольтметра

Для регулировки тока в намагничивающей обмотке служит лабораторный автотрансформатор АТ, который не искажает синусоидальной формы кривой тока.

Максимальное значение напряженности намагничивающего поля замкнутой магнитной цепи за период определяется по формуле [1]

$$H_{max} = \frac{I_{max} W_1}{l}, \quad (3.1)$$

где I_{max} — максимальное значение намагничивающего тока за период, А;

W_1 — число витков намагничивающей обмотки; l — средняя длина магнитной цепи, м.

Расчет максимальной магнитной индукции образца, создаваемой полем, производится по формуле [2]

$$B_{max} = \frac{E_{cp}}{4fW_2S}, \quad (3.2)$$

где E_{cp} — средневывпрямленное значение э.д.с. на вторичной обмотке;
 W_2 — число витков вторичной обмотки; f — частота тока, Гц; S — попе-
 речное сечение образца, м².

Пропуская через намагничивающую цепь определенные значения тока и
 измеряя при помощи вольтметра э.д.с. на вторичной обмотке, можно по
 приведенным формулам рассчитать максимальную напряженность
 магнитного поля и максимальную магнитную индукцию за период, по-
 строить кривую индукции, а также определить амплитудную магнитную
 проницаемость

$$\mu = \frac{B_{max}}{\mu_0 H_{max}}. \quad (3.4)$$

3.3. Описание лабораторной установки

Исследование магнитных свойств сталей методом амперметра-
 вольтметра в переменном магнитном поле частотой 50 Гц проводится на
 установке У5011, электрическая схема которой показана на рисунке 1. В
 лабораторной работе измерение ведется при частоте 50 Гц. По измеренно-
 му падению напряжения определяется максимальное значение тока намаг-
 нивания за период

$$I_{max} = \frac{U_{R0max}}{R_0}, \quad (3.5)$$

где U_{R0max} , В — амплитудное значение напряжения, измеряемое вольт-
 метром В1 типа В4-1А.

Максимальная за период напряженность магнитного поля в образце
 определяется по формуле (3.1). В цепь намагничивания последовательно
 включается амперметр "А" для установки и контроля тока. Следует обра-

туть внимание на то, что показания амперметра не входят в расчетные формулы, ибо максимальное за период значение тока определяется по показаниям вольтметра В1 согласно формуле (3.5).

Средневыпрямленное значение э.д.с $E_{\text{ср}}$ на вторичной обмотке измеряется вольтметром В2, а величина индукции B_{max} вычисляется по формуле (3.2).

Намагничивающиеся приборы для испытания образцов располагаются на специальной подставке, снабженной роликами для передвижения. Пульт управления оформлен в виде стола, на лицевой панели которого расположены измерительные приборы, ручки регулирующих автотрансформаторов и переключателей, выключателей питающего напряжения и сигнальные лампочки.

3.4. Порядок выполнения лабораторной работы

3.4.1. Порядок выполнения теоретических исследований

3.4.1.1. Получив индивидуальные задания, изучить по литературным и справочным источникам характеристики исследуемых материалов.

3.4.1.2. По литературным и справочным источникам установить возможный частотный диапазон использования испытуемых материалов.

3.4.2. Порядок выполнения экспериментальных исследований

3.4.2.1. Подключить источник питания частотой 50 Гц к зажимам клеммной колодки пульта с обозначениями "220 В – 50 Гц".

3.4.2.2. Подключить намагничивающую обмотку установки к зажимам клеммной колодки пульта с обозначением "Намагничивающая обмотка" установки.

3.4.2.3. Подключить измерительную обмотку установки к зажимам клеммной колодки пульта с обозначением "Измерительная обмотка".

3.4.2.4. Переключатель (ПЗ) установить в положение "1 кГц, 50 Гц".

3.4.2.5. Переключатель предела измерения тока намагничивания уста-

новить в положение "10 А".

3.4.2.6. Вставить образец (пакет) в намагничивающий аппарат и закрепить винтами.

3.4.2.7. Кабель милливольтметра В1 подключить к зажимам клеммной колодки пульта с обозначением " $R_0 = 0,01 \text{ Ом}$ ".

3.4.2.8. Рукоятку пределов измерения установить в положение "300", включить милливольтметр; дать прогреться 15 минут и ручкой "установка нуля" установить нуль на шкале прибора.

3.4.2.9. Включить питание установки правым кнопочным выключателем пульта.

3.4.2.10. Ручкой правого автотрансформатора установить ток намагничивания 0,5 А.

3.4.2.11. Снять показания $E_{\text{ср}}$ (В) вольтметра В2 средневыпрямленных значений.

3.4.2.12. Снять показания милливольтметра В1 U_{max} (В).

3.4.2.13. Изменить ток намагничивания до 0,5 А и снова измерить средневыпрямленное значение напряжения $E_{\text{ср}}$ (В).

Ток намагничивания при испытании каждого образца менять от 0 до 5 ампер через каждые 0,5 А.

3.4.2.14. Для каждого опыта рассчитать

$$I_{\text{max}} = \frac{U_{r \text{ max}}}{R_0}, \quad B_{\text{max}} = \frac{E_{\text{ср}}}{4 f W_2 S}, \quad \mu = \frac{B_{\text{max}}}{\mu_0 H_{\text{max}}}, \quad H_{\text{max}} = \frac{I_{\text{max}} W_1}{l},$$

где S — поперечное сечение образца, м^2 .

При расчетах учесть $R_0 = 0,01 \text{ Ом}$, $W_1 = 300$, $W_2 = 600$, $l = 1 \text{ м}$.

Для стали У9 $S = 31 \cdot 10^{-6}$, м^2 . Для сталей 1512 и 3411 $S = 28 \cdot 10^{-6}$, м^2 .

3.4.2.15. Подобные измерения провести с электротехнической сталью и сталью У9 (сырой, закаленной и отпущенной при 200 °С, 250 °С, 500 °С) и специальной сталью.

Для каждого образца заполнить отдельную таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Результаты расчета магнитных характеристик стали У9

U_{max} , В	E_{cp} , В	I_{max} , А	H_{max} , А/м	B_{max} , Тл	μ

3.4.2.16. По заполненным таблицам для каждого образца построить графики

$$B = f(H_{max}), \mu = f(H_{max}).$$

3.5. Порядок оформления отчета

3.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

3.5.2. Сформулировать цель работы.

3.5.3. Кратко изложить результаты теоретического анализа, касающегося влияния химического состава, вида термообработки на магнитные, электрические и механические свойства магнитных материалов.

3.5.4. Изобразить принципиальную схему лабораторного макета и назначение входящих в него приборов.

3.5.5. Кратко описать методику измерений и расчетов магнитной индукции и напряженности магнитного поля в исследуемых образцах.

3.5.6. Привести результаты расчетов в виде таблиц и графиков.

3.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения работы.

3.6. Содержание выводов

3.6.1. Анализ результатов теоретического исследования, касающегося влияния химического состава, вида термообработки на магнитную индукцию и на относительную магнитную проницаемость исследуемых мате-

риалов.

3.6.2. Анализ результатов экспериментального исследования, в котором должна быть отражена взаимосвязь между химическим составом, видом термообработки и основными параметрами исследуемых материалов.

3.6.3. Анализ вариантов наиболее целесообразного применения исследуемых магнитных материалов в электрорадиотехнике.

3.7. Контрольные вопросы

3.7.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

3.7.1.1. Какие основные виды магнитной проницаемости характеризуют ферромагнитный материал при намагничивании постоянным полем?

3.7.1.2. Какие параметры характеризуют материал при намагничивании переменным полем?

3.7.1.3. Какое влияние оказывают на магнитные свойства материалов углерод?

3.7.1.4. Какое влияние оказывает на магнитные свойства материалов кремний?

3.7.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

3.7.2.1. Какая из экспериментальных зависимостей $B = f(H_{max})$.

для исследуемых образцов сталей имеет максимальную крутизну?

3.7.2.2. Какая из экспериментальных зависимостей $B = f(H_{max})$ для исследуемых образцов сталей имеет минимальную крутизну?

3.7.2.5. Чем отличаются между собой экспериментальные зависимости $\mu = f(H_{max})$ для сталей отпущенных при 200 °C, 250 °C, 500 °C?

3.7.2.6. Как изменялось напряжение на входе вольтметра В2 при увеличении напряжения на входе вольтметра В1?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

4.1. Цель работы

Изучение влияния химического состава, механической и термической обработок на электрические свойства проводниковых материалов мостовым методом

4.2. Теоретическая часть

4.2.1. Электропроводность металлов

Наличие свободных носителей зарядов в металлах и сплавах приводит к высоким значениям электропроводности и теплопроводности. Предположим, что у всех электронов скорость V_T теплового движения одна и та же (по расчетам она равна примерно 100 км/ч). Время свободного пробега между предыдущим и последующим неупругими (при неупругом столкновении энергия электрона передается атому) столкновениями с узлами кристаллической решетки определяется формулой [1]

$$\tau = \lambda_{\text{ср}} / V_T, \quad (4.1)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ — средняя длина свободного пробега; V_T — средняя скорость теплового движения электрона.

При помещении металла в электрическое поле свободные электроны помимо хаотического теплового движения начнут участвовать в направленном движении против силовых линий поля. С одной стороны, сила F поля, действующая на свободный электрон, определяется выражением

$$F = eE,$$

где e — заряд электрона; E — напряженность электрического поля.

С другой стороны, по второму закону Ньютона, сила равна

$$F = ma,$$

где m — масса электрона; a — ускорение, которое электрон приобретает на промежутке пути между предыдущим и последующим столкновениями с узлами кристаллической решетки.

Исключая из этих уравнений F и разрешая полученное уравнение относительно ускорения a , получим

$$a = eE/m. \quad (4.2)$$

В момент, следующий непосредственно после неупругого столкновения электрона с узлом кристаллической решетки, его скорость равна нулю (полная отдача энергии узлу кристаллической решетки).

В конце свободного пробега непосредственно перед столкновением электрон будет иметь максимальную скорость

$$V_{max} = a \tau. \quad (4.3)$$

В результате средняя скорость упорядоченного движения

$$V_{cp} = V_{max} / 2 = a \tau / 2. \quad (4.4)$$

Подставляя в выражение (4.4) время свободного пробега τ из формулы (4.1) и ускорение a из выражения (4.2), получим для средней скорости упорядоченного движения

$$V_{cp} = e E \tau / (2m) = e E \lambda_{cp} / (2mV_T). \quad (4.5)$$

Плотность тока, как известно, это количество электричества, проходящее через единичное сечение проводника за единицу времени. Она рассчитывается по формуле

$$J = eNV_{cp}, \quad (4.6)$$

где N — концентрация электронов в проводнике.

С учетом (4.5), (4.6) для плотности тока можно записать [2]

$$J = e^2 N \lambda_{cp} E / (2mV_T) = \gamma E, \quad (4.7)$$

где γ — удельная электрическая проводимость материала.

Таким образом, удельная электрическая проводимость может быть выражена через среднюю длину свободного пробега, концентрацию электронов в проводнике и скорость теплового движения электронов

$$\gamma = e^2 N \lambda_{\text{ср}} / (2m V_T).$$

4.2.2. Электропроводность сплавов

Как известно, причинами рассеяния электронных волн в металле являются не только тепловые колебания узлов решетки, но и статические дефекты структуры, которые также нарушают периодичность потенциального поля кристалла. Наиболее существенный вклад в уменьшение электропроводности металлов вносят рассеяния на примесях, которые всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнения, либо в виде легирующего (преднамеренно вводимого) элемента. Следует заметить, что любая примесная добавка приводит к повышению удельного электросопротивления, даже если она обладает повышенной проводимостью по сравнению с основным металлом.

4.2.3. Влияние механических воздействий на электропроводность металлов и сплавов

Большое влияние на электропроводность металлов и сплавов оказывают механические воздействия. При всестороннем сжатии у большинства металлов удельное сопротивление уменьшается. Это объясняется сближением атомов и уменьшением амплитуды тепловых колебаний решетки.

При упругом растяжении и кручении межатомные расстояния увеличиваются. Это сопровождается усилением рассеяния электронов и возрастанием удельного электросопротивления. Влияние упругого растяжения или сжатия при условии пропускания тока вдоль действующей силы учитывается формулой [2]

$$\rho = \rho_0 (1 \pm \phi \sigma),$$

где ρ — удельное электросопротивление образца при механическом воздействии; ρ_0 — удельное электросопротивление образца при отсутствии механического воздействия; φ — коэффициент удельного электросопротивления по давлению; σ — механическое напряжение в сечении образца.

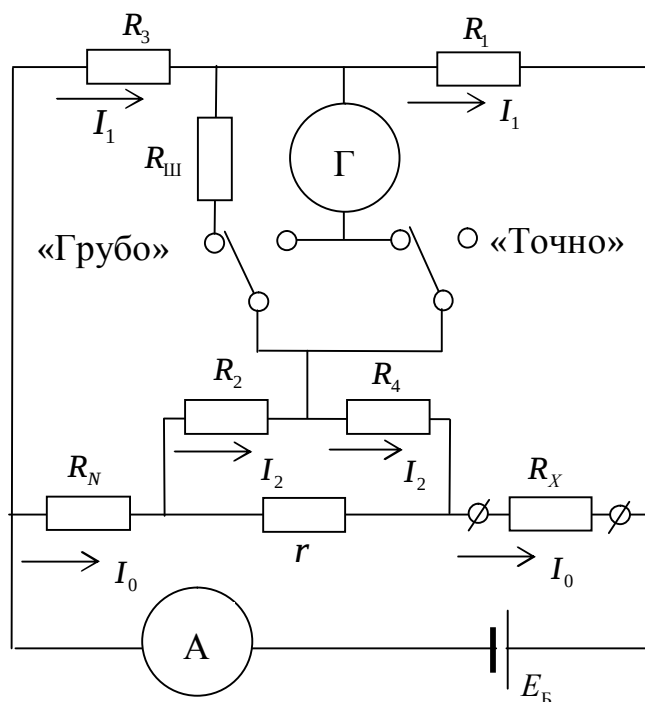
4.2.4. Влияние термообработки на электропроводность металлов и сплавов

Термическая закалка приводит к повышению удельного электросопротивления, что связано с искажениями кристаллической решетки, появлением внутренних напряжений. При рекристаллизации путем термической обработки (отжига) удельное электросопротивление может быть снижено до первоначального значения, поскольку происходит “залечивание” дефектов и снятие внутренних напряжений.

4.2.5. Мостовой метод измерения малых сопротивлений

Основная погрешность мостов постоянного тока определяется его чувствительностью, погрешностью значений сопротивлений плеч, сопротивлений монтажных проводов и контактов. Дополнительная погрешность возникает при изменении температуры и за счет сопротивлений внешних проводов и контактов, при помощи которых присоединяется резистор с неизвестным сопротивлением. Для уменьшения погрешности величину сопротивления соединительных проводов и контактов измеряют этим же мостом отдельно и вычитают из полученного результата. Для уменьшения погрешности измерения сопротивлений соединительных проводов и контактов при измерении сопротивлений, меньших одного Ома, разработаны так называемые **двойные мосты**. На рис. 4.1 показана схема двойного моста.

В этой схеме один контакт гальванометра G присоединен к добавочной цепи, в которую введены два значительных по сравнению с X и N сопротивления R_2 и R_4 .



X — измеряемое малое сопротивление;
 N — образцовое малое сопротивление;
 r — сопротивление вспомогательного резистора (медной шины);
 $R_1...R_4$ — сопротивления резисторов в плечах моста.

Рис. 4.1 — Электрическая схема двойного моста

Сопротивления R_1 и R_3 также велики по сравнению с R_X и R_N . В такой схеме влияние сопротивления соединительных проводов и зажимов практически исключается.

Действительно, благодаря наличию значительных сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , сила тока в них мала по сравнению с силой тока в R_X и R_N . Следовательно, падение напряжения на соединительных проводах на всех участках мало. Если мост сбалансирован, то через гальванометр ток не идет. Тогда через сопротивления R_1 и R_3 идет одинаковый ток I_1 , через сопротивления R_2 и R_4 ток I_2 , а через сопротивления R_X и R_N ток I_0 . По закону Кирхгофа

$$R_N I_0 + R_2 I_2 = R_3 I_1; \quad R_X I_0 + R_4 I_2 = R_1 I_1.$$

Откуда получим

$$\frac{R_N}{R_X} = \frac{R_3}{R_1} \frac{I_1 - \frac{R_2}{R_3} I_2}{I_1 - \frac{R_4}{R_1} I_2}.$$

Подбираем резисторы так, чтобы выполнялось условие $R_2/R_3 = R_4/R_1$.

Тогда получим $R_N/R_X = R_3/R_1$; $R_X = R_N R_1/R_3$.

Откуда для удельного электросопротивления имеем

$$\rho = \frac{R_X S}{l}. \quad (4.8)$$

4.3. Описание лабораторной установки

Мост постоянного тока Р-329, используемый в лабораторном макете (рис. 4.1), может работать как обычный одинарный и как двойной мост. Пределы измерений сопротивлений от 10^{-6} до 10^6 Ом, причем одинарным мостом измеряют сопротивления от 50 до 10^6 Ом, а двойным — от 10^{-6} до 100 Ом. Погрешность измерения двойным мостом составляет $\pm 1,5\%$ при измерении сопротивлений от 10^{-6} до 10^{-5} Ом и не более $\pm 0,5\%$ при измерении сопротивлений от 10^{-3} до 10^2 Ом.

На лицевой панели двойного моста в лабораторной работе используются следующие органы управления:

« R_N » — сопротивление образцовой катушки;

« R_1 » — переключатель сопротивления первого плеча моста;

« R_3 » — штепсельный магазин другого плеча моста.

Для устранения влияния термо-эдс, возникающей в контактах, на точность измерений, изменяют направления тока, проходящего через измеряемое сопротивление и образцовую катушку, на противоположное. Значение измеряемого сопротивления определяют как среднее арифметическое двух измерений.

4.4. Порядок выполнения лабораторной работы

4.4.1. Измерить штангенциркулем длину, ширину и высоту каждого из семи исследуемых образцов, рассчитать их площадь поперечного сечения S и записать результаты измерений в таблицу 4.1.

4.4.2. Измерить R_x , подключив поочередно к клеммам «1» и «2» моста каждый из семи исследуемых образцов (показания со шкал ручек управления моста снимаются после осуществления его баланса ручками «Грубо» и «Точно».

4.4.3. Рассчитать удельное электросопротивление материалов исследуемых образцов по формуле (4.8) и результаты занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 — Результаты измерений и расчета

№ п/п	Тип образца	Размеры образца		Результаты измерения электросопротив- ления образца, Ом	Результаты расчета удельного электросопротив- ление образца, Ом·м
		Длина, мм	Площадь попереч- ного сечения, м ²		
1	Сталь сырая				
2	Сталь закаленная				
3	Сталь легиро- ванная				
4	Сталь «от- пуск 200»				
5	Сталь «от- пуск 350»				
6	Сталь «от- пуск 500»				
7	Сплав Cu- Ni				

4.4.4. Построить график удельного электросопротивления материалов исследуемых образцов от температуры отпуска.

4.5. Порядок оформления отчета

4.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

4.5.2. Сформулировать цель работы.

4.5.3. Кратко изложить результаты теоретического анализа, касающегося влияния химического состава, вида термообработки на электрические и механические свойства проводниковых материалов.

4.5.4. Изобразить принципиальную схему лабораторного макета и назначение входящих в него приборов.

4.5.5. Кратко описать методику измерений и расчетов удельного электросопротивления исследуемых образцов.

4.5.6. Привести результаты расчетов в виде таблицы и графика.

4.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения работы.

4.6. Содержание выводов

4.6.1. Сравнительный анализ теоретического и экспериментального исследований, в котором должна быть указана взаимосвязь между изучаемыми

материалами, химическим составом, видом термообработки исследуемых образцов и их электрическими свойствами.

4.6.2. Анализ вариантов наиболее целесообразного применения исследуемых проводниковых материалов в электрорадиотехнике.

4.7. Контрольные вопросы

4.7.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

4.7.1.1. Как влияют примеси на электрическое сопротивление металлов и сплавов?

4.7.1.2. Как изменяется электросопротивление сплавов типа твердого раствора в зависимости от процентного содержания входящих компонент?

4.7.1.3. Почему удельное сопротивление сплавов типа твердых растворов выше, чем у чистых металлов?

4.7.1.4. Какое влияние оказывает термическая обработка на электросопротивление металлов и сплавов ?

4.7.1.5. Какое влияние оказывает легирующие присадки на электросопротивление металлов и сплавов?

4.7.1.6. Как исключить влияние термоэдс, возникающей в контактах?

4.7.1.7. Как определить величину измеряемого сопротивления при использовании схемы двойного моста?

4.7.1.8. Как снять внутренние напряжения в металлах и сплавах?

4.7.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

4.7.2.1. Какой образец обладает наибольшим удельным сопротивлением?

4.7.2.2. Какой образец сильно нагревается при измерениях и почему?

4.7.2.3 Почему при измерениях добиваются нулевого положения стрелки индикатора?

4.7.2.4. На сколько отличается результат измерения удельного сопротивления исследуемого образца при вычислении среднего значения по отношению к результатам измерения для прямого и обратного направления протекающего тока?

4.7.2.5. Каким методом определялось удельное электросопротивление исследуемых образцов?

4.7.2.6.Как влияет величина тока, питающего мост, на точность измерения удельного электросопротивления исследуемых образцов?

4.7.2.7.Как подготовить исследуемый образец к измерениям?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ТАНГЕНС УГЛА ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

5.1. Цель работы

Исследование влияния химического состава и температуры на относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь диэлектриков

5.2. Теоретическая часть

5.2.1. Влияние температуры на относительную диэлектрическую проницаемость диэлектриков

В однородном электростатическом поле с напряженностью $E_{\text{вн}}$ дипольные молекулы принимают ориентированное положение. На поверхности материала появляются связанные поверхностные заряды. Эти заряды некомпенсированы в отличие от внутренних зарядов и именно они создают собственное поле диэлектрика $E_{\text{внутр}}$, вызванное поляризацией, напряженность которого направлена навстречу напряженности внешнего поля. Суммарная напряженность поля E оказывается несколько меньшей, чем в случае отсутствия диэлектрика между электродами. Величина, характеризующая степень ослабления напряженности внешнего поля внутренним полем диэлектрика называется **относительной диэлектрической проницаемостью**. Она является одной из важнейших электрических характеристик диэлектрика и обозначается буквой ϵ [1]

$$\epsilon = \frac{E_{\text{вн}}}{\Delta E},$$

где $\Delta E = E_{\text{вн}} - E_{\text{внутр}}$.

Значение ϵ зависит от вида поляризации. Для полярных диэлектриков ϵ обычно больше, чем для неполярных и зависит от температуры, частоты приложенного напряжения и влажности. Температурная зависимость полярного диэлектрического материала Фторопласт-3 приведена на рис 5.1.

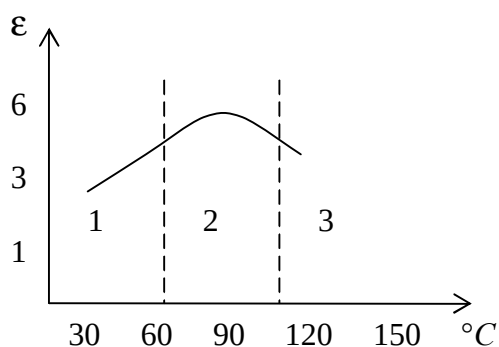


Рис. 5.1 — Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика Фторопласт-3.

На этом графике можно выделить три характерные области изменения ϵ от температуры: область 1 — высокой вязкости материала; область 2 — средней вязкости; область 3 — низкой вязкости.

В области 1 с увеличением подвижности частиц диэлектрика облегчается процесс поляризации и растет относительная диэлектрическая проницаемость. В области 2 ϵ достигает своего максимума. При дальнейшем увеличении (область 3) температуры хаотическое тепловое движение частиц мешает процессу ориентации диполей, разрушая его. При этом ϵ начинает падать. В области 3 также снижается и твердость диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков от температуры меняется незначительно, так как увеличение ϵ за счет ослабления сил связи между частицами компенсируется уменьшением ϵ за счет теплового расширения диэлектрика [2].

5.2.2. Влияние температуры и химического состава на тангенс угла потерь диэлектриков

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках следует рассматривать в связи с особенностями их структуры. Для большинства видов электрокерамики количество ионов, участвующих в релаксационной поляриза-

ции, непрерывно возрастает с увеличением температуры, и температурная зависимость $\operatorname{tg}\delta$ в первом приближении имеет экспоненциальный характер. На рис. 5.2 приведена зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для щелочных стекол.

Эти потери вызваны передвижением слабо связанных ионов и рассматриваются как потери, обусловленные электропроводностью. Они проявляются при температурах выше $(50\text{--}100)^\circ\text{C}$. Чем большую сквозную электропроводность имеет стекло, тем при более низкой температуре наблюдается возрастание тангенса угла потерь.

Главным фактором, определяющим диэлектрические потери в неорганических стеклах является наличие окислов. Например, наличие щелочных окислов (Na_2O , K_2O) при отсутствии тяжелых окислов (BaO , PbO) вызывает значительное повышение $\operatorname{tg}\delta$. Введение тяжелых окислов уменьшает $\operatorname{tg}\delta$. Диэлектрические потери в керамике зависят от характера кристаллической и стекловидной фаз и соотношения между ними. Потери в керамике резко возрастают при наличии электропроводных включений, а также абсорбированной влаги при наличии открытой пористости [1]. На рис. 5.2 приведена зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для титаносодержащей кера-

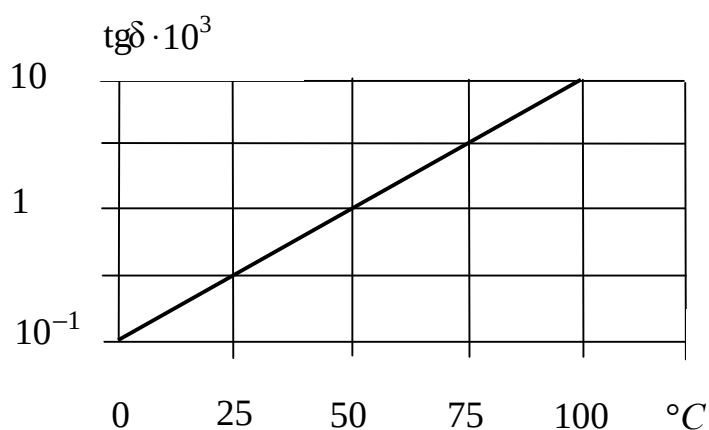


Рис. 5.2 — Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для титаносодержащей керамики

мики.

Диэлектрические характеристики слюды зависят от температуры. Примеси даже в небольших количествах резко ухудшают электрические свойства слюды.

На рис. 5.3 приведена зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для мусковита.

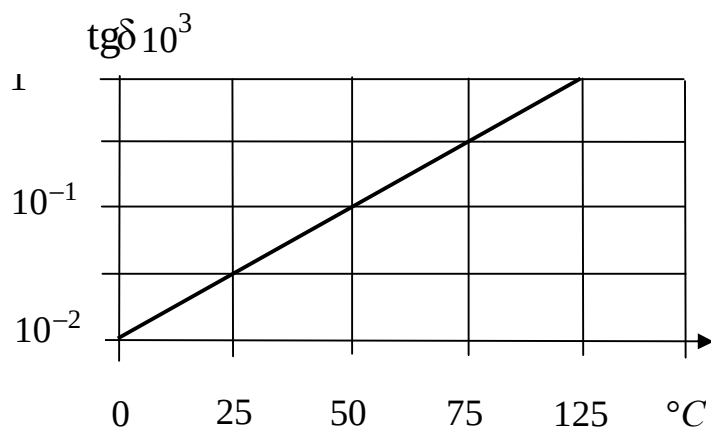


Рис. 5.3 — Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для мусковита

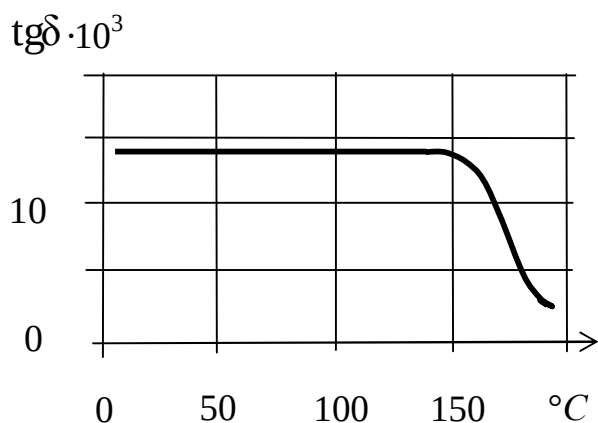


Рис. 5.4 — Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для титаната бария

Диэлектрические потери в сегнетоэлектрике мало изменяются с изменением температуры в области самопроизвольной поляризации и резко падают при температуре выше точки Кюри, когда сегнетоэлектрические свойства теряются и самопроизвольная поляризация исчезает [2].

На рис. 5.4 представлены зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для титаната бария.

5.2.3. Описание метода измерения диэлектрической проницаемости диэлектриков

Метод основан на измерении емкости плоского конденсатора с воздушным диэлектриком и с диэлектриком из исследуемого материала.

В случае плоского конденсатора его емкость определяется соотношением

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (5.1)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; S — площадь обкладки, м²; d — толщина диэлектрика, м.

С достаточной для практики точностью можно допустить, что относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_v = 1$. Тогда, используя выражение (5.1), по размерам обкладок конденсатора и расстоянию между ними, можно рассчитать емкость конденсатора с воздушным диэлектриком. Емкость конденсатора с диэлектриком из исследуемого материала измеряется с помощью прибора Е7-8.

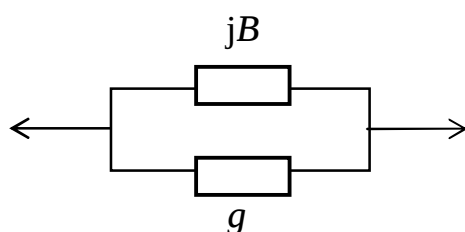
Диэлектрическая проницаемость диэлектрика вычисляется из выражения

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_v}, \quad (5.2)$$

где C_d — емкости конденсаторов с диэлектриком из исследуемого материала и с воздухом.

5.2.4. Описание метода измерения тангенса угла диэлектрических потерь

Конденсатор с исследуемым диэлектриком имеет комплексное сопротивление и поэтому может быть представлен в виде схемы замещения. При параллельной схеме замещения (рис.5.5) полная проводимость $\bar{Y}$, представляется в виде суммы активной g и реактивной jB проводимостей



$$\bar{Y} = g + jB.$$

Если характер реактивной проводимости емкостной, то

Рис. 5.5 — Схема замещения конденсатора

$$\bar{Y} = g + j\omega C, \quad B = \omega C,$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота изменения электрического поля, в котором находится конденсатор.

Тогда тангенс угла диэлектрических потерь можно определить следующим образом [2]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{g}{\omega C}.$$

5.3. Описание лабораторной установки

5.3.1. Структурная схема лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из измерителя Е7-8, набора исследуемых образцов, электрической печи и датчиков температуры. На рис. 5.6 приведена структурная схема лабораторной установки.

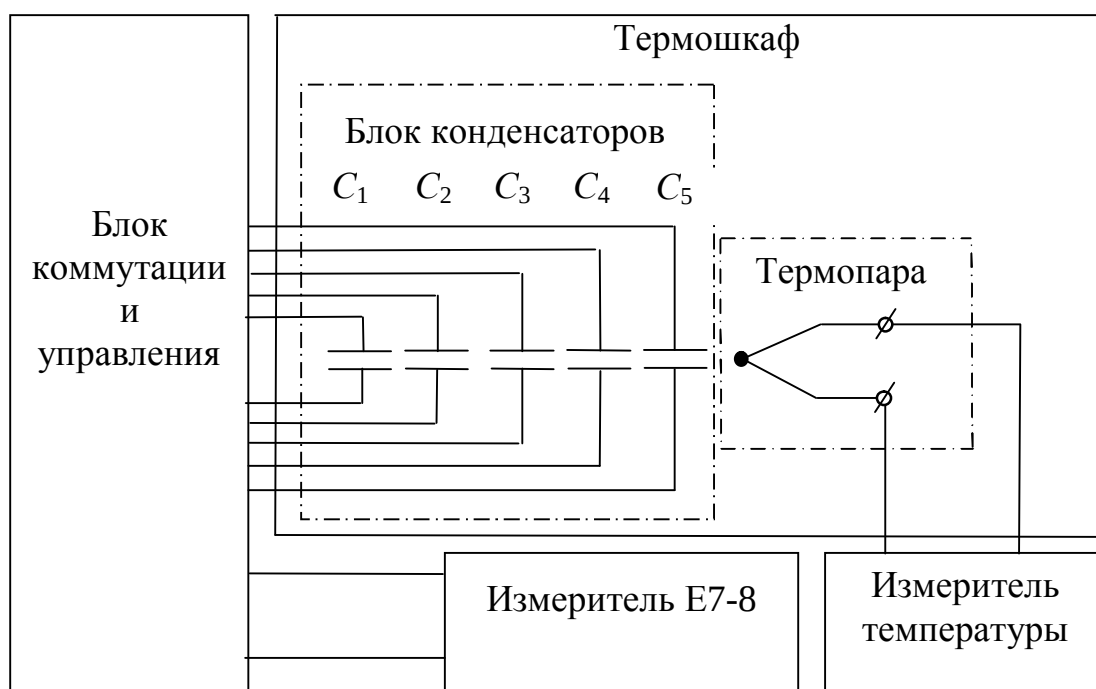


Рис. 5.6 — Структурная схема лабораторной установки на основе измерительного моста Е7-8

5.3.2. Измеритель Е7-8

Измеритель Е7-8 предназначен для измерения емкости конденсатора с исследуемым диэлектриком и определения его тангенса угла потерь. Измерительная схема прибора представляет собой четырехплечий мост, условие баланса которого обеспечивается автоматически.

5.3.3. Конденсаторы для исследования свойств диэлектриков

Конденсатор представляет собой две обкладки из алюминия с лепестками для подпайки соединительных проводов. Все конденсаторы с диэлектриками в соответствие с таблицей 4.1 объединены конструктивно в блок, от которого отходят провода на блок коммутации и управления.

5.3.4. Термошкаф с измерителем температуры

Термошкаф обеспечивает нагрев конденсаторов с диэлектриками до необходимой температуры. В качестве датчика температуры используется термопара, изготовленная из сплавов хромель-алюмель и вырабатывающая термо-э.д.с. в диапазоне температур от комнатной до 300 °С. Сигнал с датчика поступает на вольтметр, проградуированный в градусах по Цельсию.

5.4. Порядок выполнения лабораторной работы

5.4.1. Ознакомиться с содержанием настоящих методических указаний и с рекомендуемой литературой.

5.4.2. По указанию преподавателя выбрать из таблицы 5.1 вариант задания, изучить по литературным и справочным источникам характеристики исследуемого материала.

5.4.3. С помощью микрометра определить геометрические размеры выбранного образца и записать результаты измерений в таблицу 5.1.

5.4.4. Рассчитать площадь обкладок конденсатора с исследуемым диэлектриком, его емкость (для случая воздушного диэлектрика) по формуле (5.1). Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 5.1.

5.4.5. Включить прибор Е7-8 и дать ему прогреться в течении 15 минут.

5.4.6. Подключить конденсатор с диэлектриком к прибору Е7-8. Печь включить и измерять значение исследуемой емкости $C_{дi}$ и $\text{tg}\delta$ в диапазоне

температур от 20 °С до 100 °С через каждые десять градусов. Результаты измерений поместить в таблицу 5.2.

Таблица 5.1 — Варианты материалов и результаты измерений

Исследуемый диэлектрик	Марка	Геометрические размеры конденсатора и его емкость для воздушного диэлектрика				
		Расстояние d , мм	Длина A , м	Ширина B , м	Площадь обкладок S , м ²	C_B , пФ
1 Фторопласт	ФТ-3	1,5				
2 Слюда	СО	1				
3 Стекло	С-35-9	2				
4 Керамика	VI-a-4	2,5				
5 Полистирол	ПС-С	1,2				
6 Полипропилен		5				
7 Стеклотекстолит	СВФЭ	1,5				
8 Текстолит	Вч	1,5				
9 Гетинакс	Дв	2				
10.Фторопласт фольгированный	ФАФ	3				

5.4.7. Для каждого материала рассчитать значение диэлектрической проницаемости ϵ по результатам измерения емкости C_d в диапазоне температур по формуле (5.2). Результаты расчётов и измерений занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 — Результаты исследования температурных зависимостей

Температура, °С	Температурные зависимости параметров исследуемого диэлектрика		
	C_d , пФ	$\epsilon = C_d / C_B$	$\operatorname{tg} \delta$
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			

5.4.8. Построить графики зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь от температуры для исследуемых материалов.

5.4.9. Сравнить значения найденных параметров со справочными данными и сделать выводы о причинах расхождения полученных результатов исследований с ожидаемыми.

5.5. Порядок оформления отчета

5.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

5.5.2. Кратко изложить результаты анализа влияния химического состава, технологии производства на электрические, механические и другие свойства диэлектриков.

5.5.3 Кратко изложить результаты экспериментальных исследований.

5.5.4. Изобразить принципиальную схему лабораторного макета и описать принцип его работы.

5.5.5. Привести результаты расчетов, таблицы, графики, полученные при выполнении лабораторной работы.

5.5.6. Сформулировать выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

5.6. Содержание выводов

5.6.1. Анализ результатов теоретических исследований.

5.6.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.

4.6.3. Сравнительный анализ теоретического и экспериментального исследований с указанием причин расхождения ожидаемых теоретически и полученных на практике результатов.

5.7. Контрольные вопросы

5.7.1. Вопросы для подготовки к выполнению работы

5.7.1.1. Как строится классификация диэлектриков по виду поляризации?

5.7.1.2. Какие существуют основные виды поляризации диэлектриков?

5.7.1.3. Какие наблюдаются различия в частотных характеристиках диэлектрической проницаемости твердых и газообразных диэлектриков?

- 5.7.1.4. Какова область применения исследуемого материала?
- 5.7.1.5. Что такое влагопроницаемость диэлектриков?
- 5.7.1.6. Что такое вязкость диэлектриков?
- 5.7.1.7. Что такое нагревостойкость диэлектриков?
- 5.7.1.8. Что такое холодостойкость диэлектриков?
- 5.7.1.9. Что такое теплопроводность диэлектриков?
- 5.7.1.10. Что такое температурный коэффициент линейного расширения материала?
- 5.7.1.11. Что такое электрическая прочность диэлектрика?
- 5.7.1.12. Какие внешние факторы влияют на электрическую прочность диэлектрика?
- 5.7.1.13. Как выглядят векторная диаграмма и эквивалентная схема диэлектрика с потерями для последовательной схемы замещения?
- 5.7.1.14. Как выглядят векторная диаграмма и эквивалентная схема диэлектрика с потерями для параллельной схемы замещения?
- 5.7.1.15. Какие виды потерь существуют в диэлектриках?
- 5.7.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы**
- 3.7.2.1. Чем отличаются между собой экспериментальные зависимости ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ для текстолита и стеклотекстолита?
- 5.7.2.2. Как менялось значение диэлектрической проницаемости ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ полярного диэлектрика полиметилметакрилата (органического стекла) при увеличении температуры окружающей среды от двадцати до ста градусов?
- 5.7.2.3. Чем отличаются между собой экспериментальные зависимости ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ гетинакса и слюды?
- 5.7.2.4. Как менялось значение диэлектрической проницаемости ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ политетрафторэтилена при увеличении температуры окружающей среды от двадцати до ста градусов?

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

6.1. Цель работы

- изучить основные свойства диэлектриков;
- изучить методы экспериментального исследования частотных характеристик диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков;
- систематизировать, закрепить и углубить теоретические и практические знания по изучаемой дисциплине.

6.2. Теоретическая часть

6.2.1. Поляризация диэлектриков

Одной из важнейших характеристик диэлектрика, имеющей особое значение для техники, является его относительная диэлектрическая проницаемость ϵ . Эта величина представляет собой отношение заряда Q , полученного при некотором напряжении на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду Q_0 , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум.

В любом веществе имеются связанные заряды. Под действием электрического поля они смещаются относительно своих равновесных состояний. В результате этого каждый элементарный объем диэлектрика dV приобретает индуцированный (наведенный) электрический момент $d\vec{p}$. Количественно интенсивность поляризации диэлектрика определяется поляризованностью $\vec{P}$, равной отношению индуцированного электрического момента объема диэлектрика к этому объему, когда последний стремится к нулю.

$$\frac{\mathbf{r}}{P} = \frac{d\mathbf{p}}{dV}.$$

Образование индуцированного электрического момента $\mathbf{p}$ в диэлектрике и представляет собой явление поляризации.

Различают четыре основных вида поляризации: электронная; ионная; дипольная; миграционная.

Электронная поляризация — это упругое смещение электронных орбит относительно положительно заряженного ядра.

Время установления электронной поляризации ничтожно мало и составляет порядка 10^{-15} с. При этом диэлектрическая проницаемость ϵ для чисто электронной поляризации определяется выражением

$$\epsilon = n^2,$$

где n — коэффициент преломления для материалов с $\mu \approx 1$.

Электронная поляризация происходит во всех атомах любого вещества и, следовательно, во всех диэлектриках, независимо от наличия других видов поляризации. При этом рассеивания энергии в диэлектрике не происходит.

Ионная поляризация — это смещение друг относительно друга разноименно заряженных ионов в веществах с ионными связями.

При воздействии электрического поля ионная поляризация осуществляется практически мгновенно. Время ее установления порядка 10^{-13} с. При этом рассеивания энергии в диэлектрике не происходит.

Дипольная поляризация — это поворот (ориентация) молекул, имеющих постоянный электрический момент, в направлении электрического поля. Она нарастает и убывает замедленно, характерна для полярных диэлектриков и на нее существенное влияние оказывает температура.

Миграционная поляризация — это перемещение (миграция) зарядов в полупроводниковых включениях диэлектрика и накоплении их на границах раздела этих включений. Процессы установления и снятия ми-

грационной поляризации сравнительно медленны и могут продолжаться секунды, минуты и даже часы. Время установления электронной и ионной поляризации весьма мало, поэтому у таких диэлектриков нет заметной частотной зависимости ϵ на частотах, используемых в радиотехнике.

У полярных диэлектриков ϵ начинает снижаться уже в радиочастотном диапазоне, когда частота внешнего электрического поля приближается к частоте релаксации диэлектрика. Время T , в течение которого дипольная поляризованность уменьшится в e раз после выключения поля, называют временем релаксации, а частоту $f_{\text{рел}} = 1/T$ — частотой релаксации.

Изменение ϵ с изменением частоты называют **дисперсией диэлектрической проницаемости**. Дисперсию, выраженную в монотонном снижении ϵ , называют релаксационной. Она характерна для дипольной и миграционной поляризаций. Ионная и электронная поляризации претерпевают **резонансную дисперсию**, при которой ϵ вначале растет, затем уменьшается, проходя через максимум. На рис. 6.1 приведена зависимость ϵ от частоты f для полярного полимера — политрифторхлорэтилена при температуре 20°C .

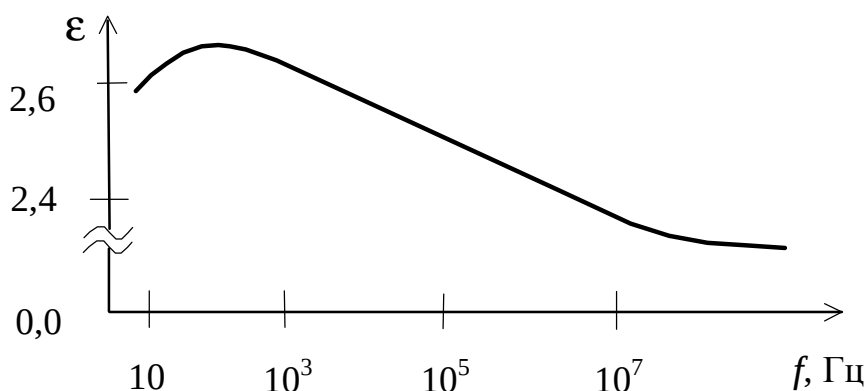


Рис 6.1 — Зависимость диэлектрической проницаемости политрифторхлорэтилена от частоты при температуре 20°C .

В диэлектрике, помещенном в переменное электрическое синусоидальное поле с напряженностью E и угловой частотой ω , возникают электрические токи двух видов: ток смещения и ток проводимости.

Плотность тока смещения определяется выражением

$$J_{\text{см}} = j\omega\epsilon_0\epsilon E,$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Плотность тока $J_{\text{пр}}$ проводимости рассчитывается по формуле

$$J_{\text{пр}} = \gamma_a E,$$

где γ_a — удельная активная проводимость диэлектрика на угловой частоте ω , E — напряженность внешнего электрического поля.

Плотность общего тока J равна векторной сумме плотностей токов смещения и проводимости. В идеальном диэлектрике (без потерь, при $\gamma_a = 0$), ток чисто реактивный и его плотность

$$J = J_{\text{см}} = j\omega\epsilon_0\epsilon E.$$

Однако у реальных диэлектриков, с γ_a отличной от нуля, суммарный ток сдвинут на угол $\delta = 90^\circ - \varphi$ относительно тока идеального диэлектрика (φ — угол сдвига фаз между током и напряжением). Чем больше γ_a , тем больше угол δ , характеризующий степень отличия реального диэлектрика от идеального. Угол δ между векторами плотностей переменного тока диэлектрика и тока смещения на комплексной плоскости называют углом диэлектрических потерь. Тангенс этого угла является одним из

$$\text{tg}\delta = J_{\text{пр}}/J_{\text{см}} = \gamma_a / (\omega\epsilon_0\epsilon)$$

важнейших параметров не только диэлектриков, но также конденсаторов, изоляторов, и других электроизоляционных элементов. Введение безразмерного параметра $\text{tg}\delta$ удобно потому, что он не зависит от формы и размеров участка изоляции, а определяется лишь свойствами изоляционного материала.

На рис.6.2 приведена зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты f для полярного полимера — политрифторхлорэтилена при температуре 20°C .

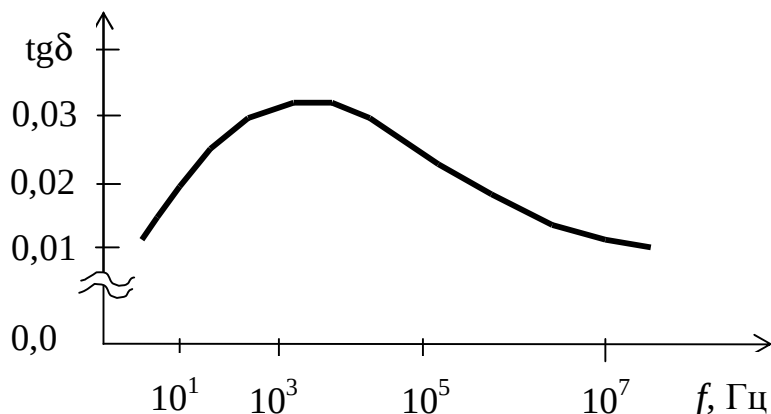


Рис. 6.2 — Зависимость тангенса угла потерь политрифторхлорэтилена от частоты

6.2.2. Метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков плоского конденсатора

В случае плоского конденсатора его емкость определяется соотношением

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \quad (6.1)$$

где S — площадь обкладки; d — толщина диэлектрика.

С достаточной для практики точностью можно допустить, что относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_{\text{в}} = 1$. Тогда, используя выражения (6.1), по размерам обкладок конденсатора и расстоянию между ними, можно рассчитать емкость конденсатора с воздушным диэлектриком.

Емкость конденсатора с диэлектриком из исследуемого материала измеряется с помощью прибора Е 4-5А.

Формула для расчета емкости $C_{\text{д}}$ конденсатора с исследуемым диэлектриком при его параллельном подключении к контуру имеет вид:

$$C_{\text{д}} = C_1 - C_2, \quad (6.2)$$

где C_1 — емкость контура с исследуемым конденсатором; C_2 — емкость контура без исследуемого конденсатора.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_B}, \quad (6.3)$$

где C_d — емкость конденсатора с диэлектриком из исследуемого материала; C_B — емкость конденсатора с диэлектриком из воздуха.

Тангенс угла потерь диэлектрика в исследуемом конденсаторе определяется по следующей формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_1(Q_1 - Q_2)}{Q_1 Q_2 (C_2 - C_1)}, \quad (6.4)$$

где C_1 — емкость конденсатора с воздушным диэлектриком в пикофарадах; C_2 — емкость конденсатора с исследуемым диэлектриком в пикофарадах; Q_1 — добротность конденсатора с воздушным диэлектриком; Q_2 — добротность конденсатора с исследуемым диэлектриком.

6.2.3. Метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков неплоского конденсатора

Представляет интерес исследование частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков, используемых в выпускаемых промышленностью конденсаторах. Как известно, от этих параметров зависят частотная характеристика емкости конденсатора, а также его потери в рабочем диапазоне частот. Расчет емкости такого конденсатора в предположении, что вместо исследуемого диэлектрика между его обкладками находится воздух практически невозможен, так как геометрические параметры этого конденсатора неизвестны пользователю. Однако относительное изменение ε в диапазоне частот можно выявить путем обработки измерений по следующей формуле

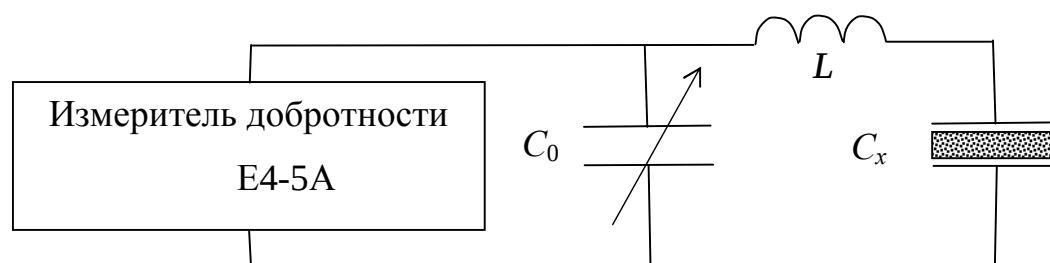
$$\varepsilon^* = \frac{C_i}{C_{f_{\min}}} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{f_{\min}}}, \quad (6.5)$$

где ε^* — нормированное значение диэлектрической проницаемости на

частоте измерения; C_i — значение емкости конденсатора на частоте измерения; $C_{f_{\min}}$ — значение емкости конденсатора на минимальной частоте рабочего диапазона; ε_i — значение диэлектрической проницаемости на частоте измерения; $\varepsilon_{f_{\min}}$ — значение диэлектрической проницаемости на минимальной частоте рабочего диапазона. Расчет $\operatorname{tg} \delta$ проводится по формуле (6.4).

6.3. Описание лабораторного макета

Схема лабораторного макета показана на рис.6.3.



C_x — конденсатор с исследуемым диэлектриком;
 L_0 — образцовая индуктивность; C_0 — образцовая емкость

Рис. 6.3 — Схема лабораторного макета для исследования частотной зависимости ε и $\operatorname{tg} \delta$

Генератор синусоидальных колебаний собран на лампе 6НЗП по двухтактной схеме с емкостной обратной связью. Напряжение, снимаемое с генератора, вводится в измерительный колебательный контур, состоящий из внешней катушки индуктивности и переменного конденсатора, сопряженного со шкалой, проградуированной в пикофарадах. Напряжение на выходе генератора измеряется вольтметром уровня “К”. Напряжение, снимаемое с измерительного колебательного контура, детектируется диодным детектором, собранным на лампе 2Д1С, усиливается усилителем на лампе 6Н2П и измеряется Q-вольтметром. Выпрямитель для питания анодных цепей ламп собран по мостовой схеме на полупроводниковых диодах.

Прибор позволяет непосредственно измерять добротность катушек индуктивности. Кроме того, путем косвенных измерений прибором E4-5A

можно измерять величину емкости и тангенса угла потерь диэлектрика внешнего конденсатора, а также индуктивность катушек индуктивности. Измеритель Е4-5А работает в диапазоне частот от 15 до 250 мегагерц. Для уменьшения неравномерности амплитудно-частотной характеристики этот диапазон разбит на пять поддиапазонов. Каждый из этих пяти поддиапазонов имеет свой колебательный контур. В комплект измерителя входят пять индуктивностей, каждая из которых предназначена для работы на своем поддиапазоне частот [7].

На рис. 6.4 приведена структурная схема прибора Е4-5А.

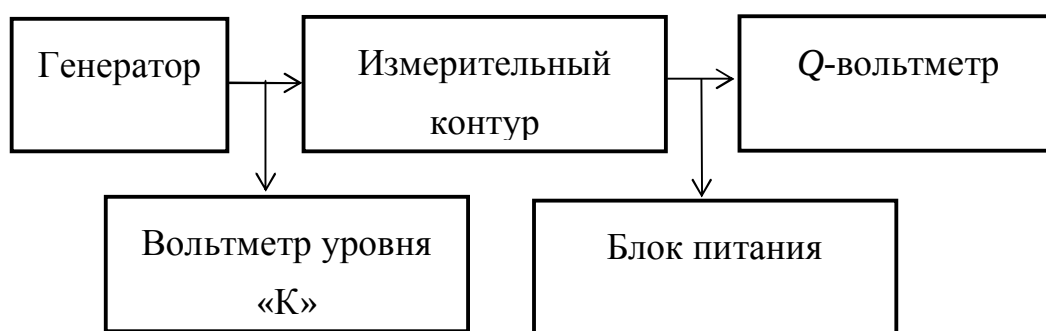


Рис. 6.4 — Структурная схема прибора Е4-5А

Основная погрешность низкочастотной градуировки конденсатора измерительного блока по емкости ± 1 пФ.

Основная погрешность измерения добротности при нормальных условиях:

- на частотах (15...100) МГц — $\pm 10\%$;
- на частотах (100...250) МГц — не нормируется.

Основная погрешность низкочастотной градуировки конденсатора измерительного блока по емкости ± 1 пФ.

Основная погрешность измерения добротности при нормальных условиях:

- на частотах (15...100) МГц — $\pm 10\%$;
- на частотах (100...250) МГц — не нормируется.

6.4. Порядок выполнения лабораторной работы

6.4.1. Получить у преподавателя индивидуальное задание и выбрать исходные данные из таблиц 6.1, 6.2.

Размеры обкладок конденсаторов: $a = 100$ мм; $b = 100$ мм.

Таблица 6.1 — Варианты заданий по плоскому конденсатору

Исследуемый диэлектрик	Марка диэлектрика	Толщина диэлектрика	Вариант задания
Фторопласт	Фторлон-4	2	0
Слюда	СО	0,5	1
Стекло	С-35-9	2	2
Керамика	V1-a-4	2	3
Полистирол	ПС-С	3	4
Фторопласт армированный	ФАФ	3	5
Стеклотекстолит	СВФЭ	3	6
Текстолит	Вч	3	7
Полистирол	ПС-С	2	8
Гетинакс	Дв	3	9

Таблица 6.2 — Варианты заданий по неплоскому конденсатору

№	Тип конденсатора	Вариант задания
1	К10-7В-100пФ	0
2	К10-78-220Пф	1
3	К77-1-100пФ	2
4	КД-1-270пФ	3
5	КСО-1-470пФ	4
6	СГМ-1-330пФ	5
7	КТК-1-150пФ	6

Продолжение таблицы 6.2

8	КТК-1-220пФ	7
9	КТ4-1-180пФ	8
10	КМ-6-ПЗЗ-270 пФ	9

6.4.2. Включить прибор Е4-5А тумблером "СЕТЬ".

6.4.3. Произвести прогрев прибора Е4-5А в течении 15 минут.

6.4.4. К клеммам "Lx" прибора подключить соответствующую требуемому диапазону f образцовую катушку индуктивности.

6.4.5. Исследуемый конденсатор подключить к клеммам параллельно.

6.4.6. Контур прибора настроить в резонанс на частоте измерения " f " и определить значения резонансной ёмкости C_2 и добротности Q_2 контура.

6.4.7. Исследуемый конденсатор отключить от прибора и контур вторично настроить в резонанс на ту же частоту путём изменения ёмкости измерительного конденсатора. При этом определить значения C_1 и Q_1 .

6.4.8. Результаты измерений занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 — Экспериментальные и расчетные данные для плоского конденсатора

f , МГц	15	20	25	26	30	43	60	73	75	100	125	130	145
C_1 , пФ													
C_2 , пФ													
Q_1													
Q_2													
ε													
$\text{tg } \delta$													

Примечание: измерения необходимо проводить на двух крайних и средней точках каждого диапазона. В случае если не удастся найти резонанс в рекомендуемой точке, необходимо продолжить поиск резонанса на ближайшей частоте.

Продолжение таблицы 6.4

Q_1													
Q_2													
ε^*													
$\operatorname{tg} \delta$													

6.5. Порядок оформления отчета

6.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

6.5.2. Сформулировать цель работы.

6.5.3. Изложить сущность физических явлений, определяющих частотные зависимости ε и $\operatorname{tg} \delta$.

6.5.4. Изобразить принципиальную схему лабораторного макета и описать принцип его работы.

6.5.6. Привести результаты расчетов, графики, таблицы, полученные при выполнении лабораторной работы.

6.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

6.6. Контрольные вопросы

6.6.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

6.6.1.1. Как диэлектрики классифицируются по виду поляризации?

6.6.1.2. Как количественно определяется интенсивность поляризации?

6.6.1.3. Какие существуют виды поляризации диэлектриков?

6.6.1.4. От чего зависит диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков?

6.6.1.5. Чем отличаются частотные зависимости диэлектрической проницаемости полярных и неполярных диэлектриков?

6.6.1.6. Какие вы знаете основные свойства и области применения ис-

следуемого материала?

6.6.1.7. Что такое диэлектрические потери в диэлектрике ?

6.6.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

6.6.2.1. Какие основные характеристики имеет прибор Е4 - 5А?

6.6.2.2. От чего зависит точность установки рабочей частоты измерителя Е4-5А?

6.6.2.3. От чего зависит точность измерения добротности контура?

6.6.2.4. Почему вспомогательные индуктивности, используемые в лабораторной работе, экранированы?

6.6.2.5. Как повлияет на результат расчета емкости конденсатора с воздушным диэлектриком неточность измерения геометрических размеров обкладок этого конденсатора?

6.6.2.6. Как влияет на результат измерения емкости конденсатора с исследуемым диэлектриком рабочая частота измерителя Е4-5А?

6.6.2.7. Можно ли автоматизировать процесс измерения на основе данного макета?

6.6.2.8. Какие меры по технике безопасности должен соблюдать студент при работе с данным макетом?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пасынков В. Б. Материалы электронной техники / В. Б. Пасынков. — М.: Высш. школа, 1980. — 406 с.
2. Тареев Б.М. Электрорадиоматериалы/ Б.М. Тареев. — М.: Высш. школа, 1988. — 335 с.
3. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий. — Л: Энергия, 1987. — 352 с.
4. Филинов С.А. Справочник термиста / С.А. Филинов. — М.: Машиностроение, 1989. — 320 с.
5. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» / СевНТУ; сост. В.Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. — 20 с.

