



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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**Лабораторный практикум
по дисциплине
«ХИМИЯ И ЭЛЕКТРОРАДИОМАТЕРИАЛЫ »**

для студентов дневной и заочной форм обучения
по направлению 6.050901 — Радиотехника

Севастополь
2007

Методические указания «Лабораторный практикум по дисциплине «Химия и электрорадиоматериалы» для студентов дневной и заочной форм обучения по направлению 6.050901 — Радиотехника/ Сост. А.Н. Трушкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. — 82 с.

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

Методические указания написаны на основании программы дисциплины «Химия и электрорадиоматериалы». Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры радиотехники (протокол № 1 от 28 августа 2006 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

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

Ответственный за выпуск: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники 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	19
3. Лабораторная работа №3	
Исследование влияния химического состава, механической и термической обработок на магнитные свойства металлов и сплавов.....	34
4. Лабораторная работа №4	
Исследование влияния химического состава на электросопротивление металлов и сплавов.....	45
5. Лабораторная работа №5	
Исследование влияния химического состава и температуры на относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь диэлектриков	53
6. Лабораторная работа №6	
Исследование влияния химического состава и температуры на электрические свойства оксидных полупроводников.....	63
7. Лабораторная работа №7	
Исследование частотных характеристик диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков	71
Библиографический список.....	83

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 семь 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 отвечают на теоретические вопросы, объясняют принцип работы лабораторного макета, назначение органов управления приборов, входящих в лабораторный макет (получают допуск). Такой подход позволяет не только подготовить студентов к осознанному выполнению лабораторной работы, но и повысить их производительность труда.

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

На основании протокола каждый студент оформляет отчет, который имеет титульный лист установленного образца и содержит 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 используемой литературы.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Цель работы

Исследование микроструктур металлов и сплавов при различных режимах термообработки и механических воздействий

1.2. Теоретическая часть

1.2.1. Механические воздействия

Для получения заданных свойств обычно осуществляют механические воздействия на структуру металлов и сплавов в виде горячей, холодной прокатки в сочетании с термической обработкой. При этом получают текстурованную сталь, у которой кристаллы ориентированы таким образом, что ось их легкого намагничивания совпадает с направлением прокатки.

1.2.2. Термические воздействия

Процесс термической обработки изделий в общем цикле изготовления любой конструкции в значительной мере влияет на ее технические характеристики, улучшая износостойкость, усталостную прочность, механические и физико-механические свойства ее деталей. Поэтому считают, что качество любого изделия во многом зависит от уровня технологии термической обработки его узлов и деталей. При нагреве и охлаждении при определенных температурах происходят изменения внутреннего строения [1]. Способность металлов образовывать несколько типов кристаллических решеток называется полиморфизмом. Частный случай полиморфизма — аллотропия железа. Процесс перехода из одного типа кристаллического строения в другое называется аллотропическим превращением. Различные типы кристаллического строения называют аллотропической формой или модификациями. Модификации обозначаются буквами греческого алфавита: α — альфа; β — бета; γ — гамма; δ — дельта.

При температуре 1539°C железо из жидкого состояния переходит в твердое. В результате образуется δ -железо, имеющее решетку объемно-центрированного куба. При охлаждении до 1400°C δ -железо принимает аллотропическую форму γ -железа, а решетка объемно-центрированного куба перестраивается в решетку

гранецентрированного куба. Охлаждение с 910°C до 768°C вызывает переход γ -железа в β -железо с кристаллической решеткой объемно-центрированного куба.

При температуре ниже 768°C кристаллическая решетка уже не перестраивается, а только внутренне изменяется [2].

На рис. 1.1 показаны аллотропические превращения при охлаждении чистого железа.

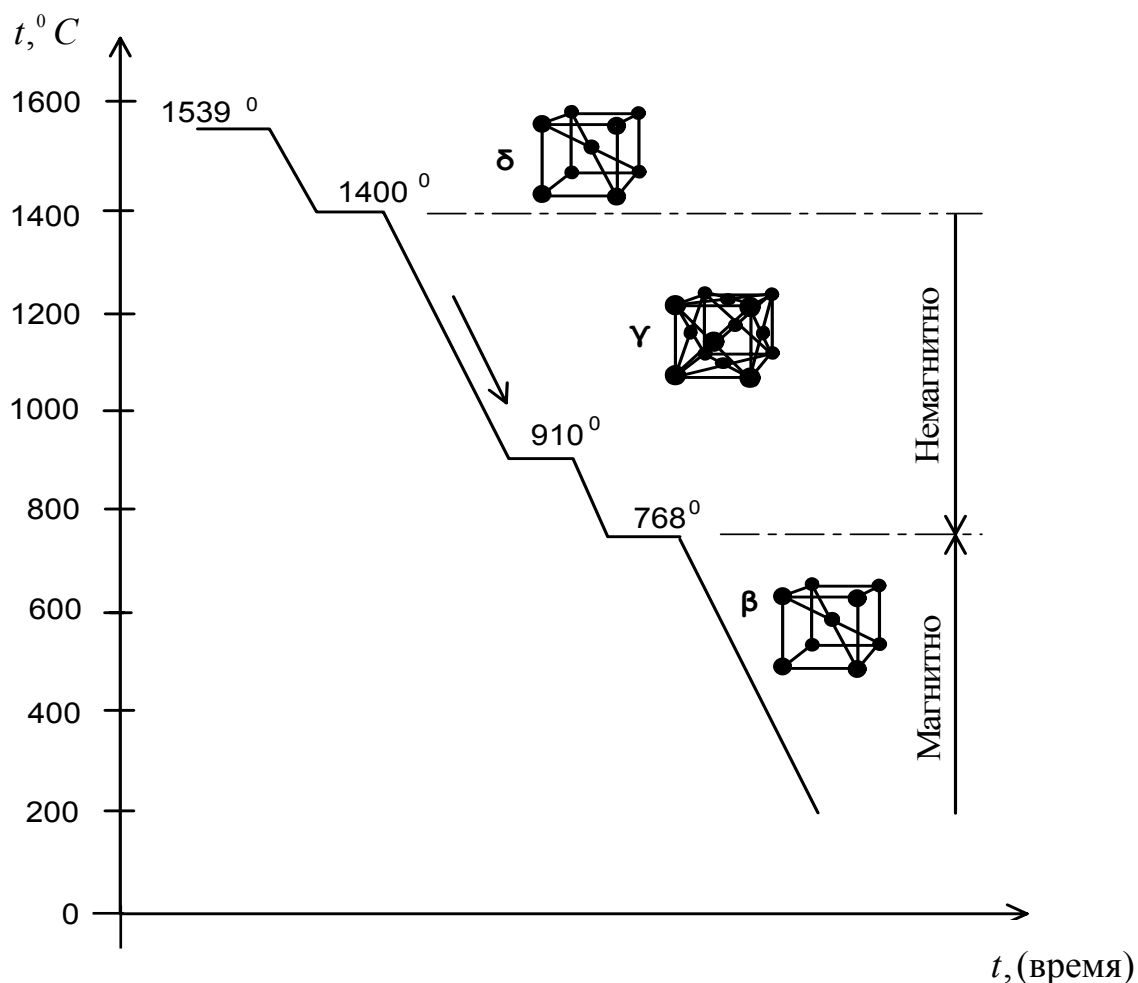


Рис. 1.1 — Схема аллотропических превращений чистого железа при охлаждении

Таким образом, самостоятельными кристаллическими решетками, т.е. аллотропическими формами, являются α - и γ -железо. Кроме железа, аллотропические превращения могут испытывать кобальт, олово, марганец и другие металлы. Температуры, при которых происходят эти внутренние изменения, или структурные превращения, называются критическими точками [3].

ФЕРРИТ (от латинского слова "феррум" — железо) представляет собой твердый раствор углерода в α -железе. При температуре 723°C в α -железе может содержаться до 0,02 % углерода, а при 20°C — лишь 0,006 % углерода. Феррит

обладает высокой пластичностью, низкими твердостью и прочностью и высокими магнитными свойствами, которые сохраняются до температуры точки Кюри (768°C). Под микроскопом феррит наблюдается в виде светлых зерен. Кристаллическая решетка феррита — кубическая объемно-центрированная.

ЦЕМЕНТИТ — это химическое соединение железа с углеродом, т.е. карбид железа. Цементит содержит 6,67 % углерода и до 210°C сохраняет магнитные свойства. Цементит обладает высокой твердостью ($HV\ 760\ldots800$) и повышенной хрупкостью. Под микроскопом в структуре стали и чугуна цементит наблюдается в виде игл и отдельных включений.

АУСТЕНИТ (по имени У. Роберта - Аустена — английского металлурга). Он не магнитен, отличается высокой пластичностью, значительными прочностью и вязкостью. Твердость аустенита $HV\ 170\ldots220$. Микроструктура аустенита представляет собой зерна в виде многогранников. Кристаллическая решетка — кубическая гранецентрированная.

ПЕРЛИТ — это механическая смесь кристаллов феррита и цементита. 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 частиц цементита. Перлит с наиболее мелкими частицами цементита обладает наивысшими механическими свойствами. Твердость пластинчатого перлита $HV\ 160\ldots250$, зернистого $HV\ 160\ldots220$.

ЛЕДЕБУРИТ представляет собой смесь, состоящую из кристалликов цементита и аустенита и образующуюся при кристаллизации жидкого сплава, содержащего 4,3 % углерода.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА — это процесс тепловой обработки металлических изделий, заключающийся в нагреве до заданной температуры, выдержке и охлаждении с различными скоростями [4].

ОТЖИГ ПОЛНЫЙ — это нагрев изделия до температуры выше верхней критической точки (на $20\ldots30^{\circ}\text{C}$) и выдержка при этой температуре с последующим медленным охлаждением. Применяется для размельчения структуры и улучшения механических свойств стали.

ОТЖИГ НЕПОЛНЫЙ — это нагрев изделия до температуры между верхней и нижней критическими точками и выдержка при этой температуре с последующим медленным охлаждением. Применяется главным образом для заэвтектоидных сталей с той же целью, что и полный отжиг.

НОРМАЛИЗАЦИЯ — это нагрев изделия до температуры выше верхней критической точки (на $30...50^{\circ}\text{C}$) выдержка при этой температуре и последующее охлаждение на спокойном воздухе. Применяется для размельчения структуры и повышения механических свойств низко- и среднеуглеродистых сталей и как подготовительная операция перед закалкой.

ЗАКАЛКА ПОЛНАЯ — нагрев изделия до температуры выше верхней критической точки (на $30...50^{\circ}\text{C}$), выдержка при этой температуре и последующее резкое охлаждение. Применяется для улучшения механических и физических свойств стали.

ЗАКАЛКА НЕПОЛНАЯ — отличается от полной закалки температурой нагрева, которая находится между верхней и нижней критическими точками. Применяется в основном для заэвтектоидных сталей.

ЗАКАЛКА ПОВЕРХНОСТНАЯ — это нагрев поверхностного слоя изделия до температуры закалки (посредством электрического тока, высокотемпературного пламени или другим способом) с последующим быстрым охлаждением. Обеспечивает получение высокой твердости в относительно тонком слое без изменения структуры и твердости в более глубоко расположенных слоях.

ОТПУСК — это нагрев и выдержка закаленной стали ниже критической точки. При отпуске происходит распад мартенсита с образованием цементита, что сопровождается изменением свойств стали и уменьшением остаточных напряжений. Охлаждение после отпуска производится на воздухе, если сталь не склонна к отпускной хрупкости, а ускоренное охлаждение (в воде или масле), если наблюдается такая склонность.

ОТПУСК НИЗКИЙ — это нагрев в интервале температур $150...250^{\circ}\text{C}$. Применяется для снятия внутренних напряжений и уменьшения хрупкости мартенсита.

ОТПУСК СРЕДНИЙ — это нагрев в интервале температур $350...475^{\circ}\text{C}$. Применяется обычно для придания упругих свойств материалу (пружинам, рессорам и др.).

ОТПУСК ВЫСОКИЙ — это нагрев в интервале температур $500...680^{\circ}\text{C}$. Применяется, как правило, для термоулучшения конструкционных сталей.

ТЕРМИЧЕСКОЕ УЛУЧШЕНИЕ — это термическая обработка стали, состоящая из закалки и высокого отпуска.

СТАРЕНИЕ — это нагрев и длительная выдержка деталей при повышенных температурах. Применяется для деталей и инструментов с целью упрочнения и стабилизации их размеров.

1.2.3. Термомеханические воздействия

Термомеханические воздействия обеспечивают упрочнение стали за счет совмещения деформаций при повышенных температурах с операциями термической обработки. В процессе термомеханической обработки сталь приобретает повышенную прочность по сравнению с обычной термической обработкой.

1.2.4. Материалы высокой проводимости

К материалам высокой проводимости, имеющим широкое промышленное применение, относится медь и ее сплавы: бронза; латуни; алюминий и его сплавы; низкоуглеродистая сталь.

1.2.4.1. Медь проводниковая

Медь — проводниковый материал промышленного назначения. По электропроводности медь ($\rho = 0,0178 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$) занимает второе место после серебра ($\rho = 0,016 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$). Промышленность выпускает медь нескольких марок. Техническая медь в отожженном состоянии (типа ММ) имеет крупнозернистую структуру с наличием двойников отжига. Двойникование это — симметричная переориентация областей кристаллической решетки. В поле микроскопа двойники видны в виде двойных параллельных отрезков на теле зерна. К недостаткам меди следует отнести малую механическую прочность, резкое снижение прочности при нагревании до температур $100\ldots 200^\circ\text{C}$. Кроме того, медь дорогой металл. Легирование меди оловом, кадмием, бериллием, цинком устраняет указанные недостатки меди с небольшой потерей электропроводности этих сплавов по отношению к стандартной меди. Влияние примесей на электропроводность γ меди показано на рис.1.2.

1.2.4.2. Латунь

Сплавы системы медь - цинк носят название двойных латуней, а латуни многокомпонентные или специальные, кроме цинка содержат добавки алюминия, никеля, железа, марганца, свинца и др. В приборостроении, в электротехнике латуни находят широкое применение. Двойные латуни, например, Л96 ($\rho = 0,031 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$) применяют для приготовления волноводов, контактных пластин и других токоведущих деталей [1].

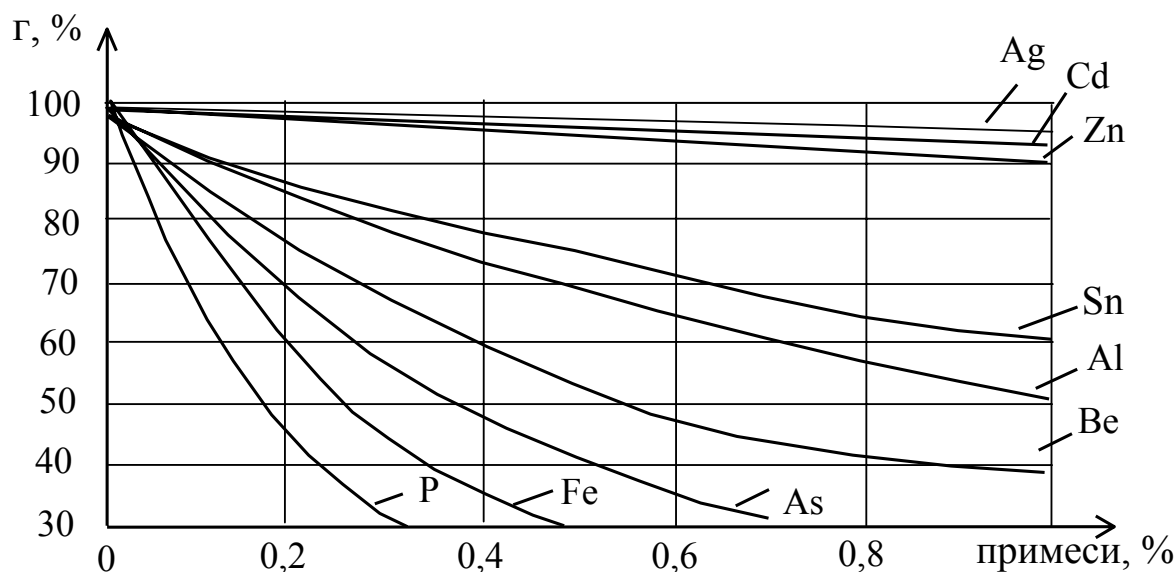


Рис. 1.2 — Влияние примесей на электропроводность меди

1.2.4.3. Бронза

Бронзами называют медные сплавы, не содержащие цинка, и сплавы, в которых содержание цинка не превышает содержания других, т.е. основных легирующих элементов (олова, алюминия, бериллия, железа, кремния, никеля, марганца и др.). В приборостроении и радиоэлектронике наибольшее распространение получили бериллиевая бронза Бр.Б2, кадмиевая Бр.Кд1, алюминиевая Бр.АМц 9-2.

Бериллиевая бронза Бр.Б2 обладают рядом свойств, делающим ее весьма ценным материалом в приборостроении: она имеет высокие пределы прочности, упругости, текучести, усталости, высокую циклическую прочность, твердость, износостойкость, коррозионную стойкость в пресной и морской воде, немагнитна и морозостойка. В состав бронзы Бр.Б2 входит 2% Be, 0,35% Ni, остальное Cu.

Кадмиевая бронза Бр.Кд1 обладает высокими электрическими свойствами ($\rho = 0,03 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) и высоким сопротивлением к стиранию. Нагрев Бр.Кд1 до 250°C не изменяет ее механических свойств. Применяется для токоведущих деталей, работающих на износ. Микроструктура кадмиевой бронзы — однородные зерна.

Алюминиевая бронза Бр.АМц 9-2 может применяться как для изготовления литых деталей, так и для деформируемых полуфабрикатов. Отличается высокой

пластичностью, хорошей обрабатываемостью давлением, коррозионно-стойкая в атмосферных условиях и морской воде [2].

1.2.4.4. Алюминий

Алюминий — металл с малым удельным весом, 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 99,99 % Al);

б) высокой чистоты, в который входят марки алюминия от А995 до А95 (от 99,99 до 99,999 % Al);

в) особой чистоты, включающий только одну марку А999 (не менее 99,999 % Al). Проводимость отожженного проводникового алюминия составляет 62 % от проводимости стандартной меди.

1.2.4.5. Сталь проводниковая

При небольших токовых нагрузках применяют стальные проводниковые изделия. Проводники изготавливают из сталей марок Сталь 10, Сталь 20, которые содержат 0,1 и 0,2 % углерода соответственно. Микроструктура таких сплавов после термообработки состоит из разноосных зерен твердого раствора углерода в железе, называемого перлитом. Удельное электросопротивление стали всегда выше, чем у чистого железа, так как примеси (рис.1.3), как правило, уменьшают электропроводность за счет искажения кристаллической решетки [3].

1.2.5. Материалы высокого сопротивления

Материалы высокого омического сопротивления ($\rho > 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) создают на основе металлов, образующих друг с другом твердые растворы. В зависимости от назначения к высокоомным сплавам предъявляют специальные требования: сплавы для образцовых сопротивлений должны иметь наименьшее значение термоэдс в паре с медью, реостатные - малый температурный коэффициент электросопротивления и т.п. Все сплавы этой группы имеют следующие общие свойства: обладают высоким удельным сопротивлением; малым температурным коэффициентом сопротивления, имеют, как правило, мелкокристаллическое строение.

1.2.5.1. Сплавы для эталонных сопротивлений

Сплавы названной группы — это медно-никелевые сплавы, манганины.

КОНСТАНТАН — это сплав, содержащий около 60% меди, 40% никеля, что соответствует минимуму ТКР при довольно высоком значении ρ в системе Cu - Ni. Название "константан" объясняется значительным постоянством ρ при изменении температуры (ТКР порядка $5...25 \cdot 10^{-6} K^{-1}$). Зависимость удельного электросопротивления и температурного коэффициента медно-никелевого сплава от процентного содержания примесей приведены на рис. 1.4.

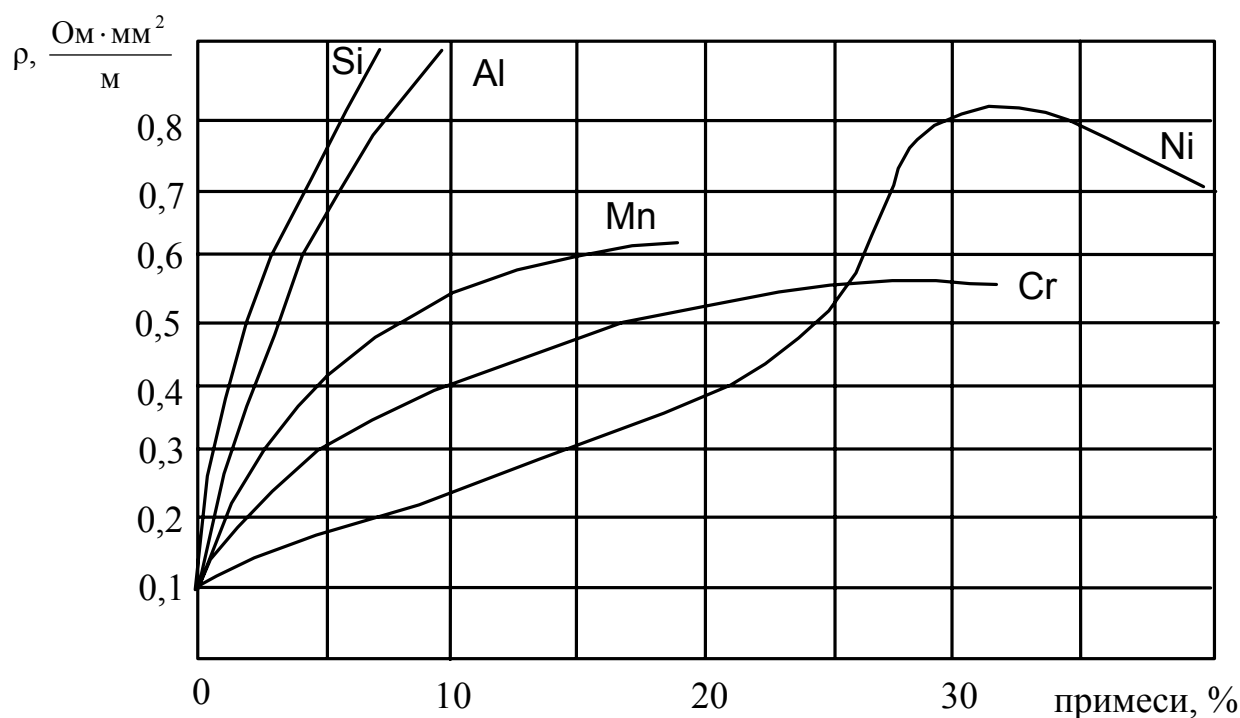


Рис. 1.3 — Зависимость удельного электросопротивления железа от содержания примесей

МАНГАНИН — это сплав, называемый так из-за наличия в нем марганца.

Примерный его состав: Cu — 85 %, Mn — 12 %, Ni — 3 %. Применяется для изготовления образцовых резисторов. Для получения малого значения ТКР стабильности манганиновую проволоку подвергают специальной термообработке (отжиг в вакууме при температуре порядка $550...600^{\circ}C$ с последующим медленным охлаждением) [3].

1.2.5.2. Сплавы высокого сопротивления на основе железа

К этой группе относятся сплавы никеля с хромом, а также более сложные сплавы с добавками железа, марганца, кремния, иногда молибдена, вольфрама и других элементов.

Высокая нагревостойкость элементов, изготовленных из таких сплавов, объясняется введением в их состав достаточно больших количеств указанных выше металлов, образующих при нагреве на воздухе практически сплошную оксидную пленку.

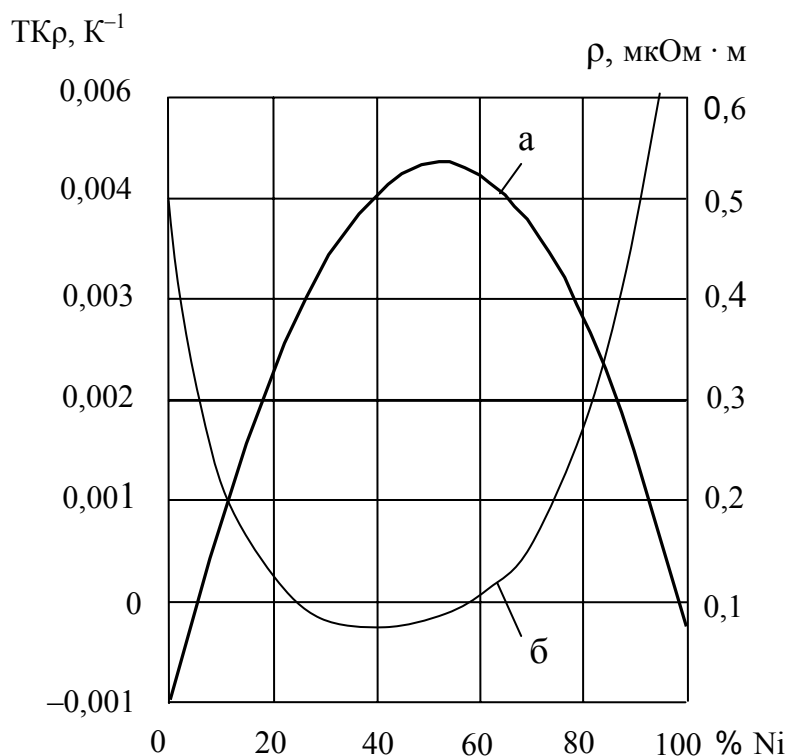


Рис. 1.4 — Зависимость ρ (а) и $TK\rho$ (б) железа от наличия примеси Ni

НИХРОМ — сплав системы Fe-Ni-Cr. Имеет структуру - твердого раствора хрома и железа в никеле. Нихромы весьма технологичны.

Их можно легко протягивать в сравнительно тонкую проволоку или ленту. Однако, как и в константане, в этих сплавах велико содержание дорогого и дефицитного компонента — никеля. Максимальная рабочая температура для марок Х15Н60, Х20Н80 составляет 1000...1100°C. Применяются в основном для нагревательных элементов.

ФЕХРАЛЬ, ХРОМАЛЬ — сплавы системы Fe-Cr-Al. Имеют структуру твердого раствора хрома и алюминия в железе. Менее технологичны, так как более тверды и хрупки. Из них получают проволоку и ленту с гораздо большим поперечным сечением, чем из нихромов. Поэтому эти сплавы используют для электронагревательных устройств большой мощности и промышленных печей. Максимальная рабочая температура для марок 1Х25Ю5, 0Х25Ю5 составляет

1000...1400°C. Хромоалюминиевые сплавы намного дешевле нихромов, так как хром и алюминий сравнительно дешевы и легко доступны [1].

1.2.5.3. Сплавы для термопар

КОПЕЛЬ — сплав системы Ni-Cu. Содержит 44 % никеля и 56 % меди.

АЛЮМЕЛЬ — сплав системы Ni-Al-Si-Mg. Содержит 95 % никеля, остальное алюминий, кремний, магний.

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

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

Термопары могут применяться для измерения следующих температур:

а) платинородий - платина — до 1600°C;

б) медь - константан и медь - копель — до 350°C;

в) железо - константан, железо - копель и хромель - копель — до 600°C;

г) хромель - алюмель — до 900...1000°C.

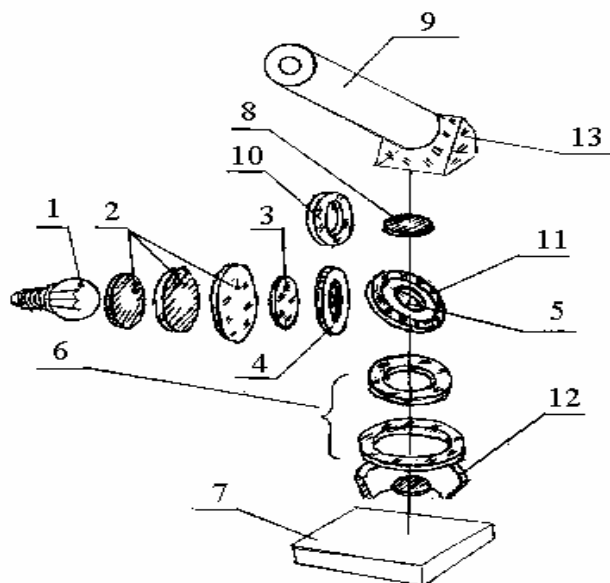
1.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из оптического микроскопа ММУ-1 (рис.1.5). Работа с микроскопом ММУ-1 основана на металлографическом методе анализа металлов и сплавов.

1.3.1. Оптическая схема микроскопа

Микроскоп работает следующим образом. Источник света 1 (лампочка накаливания) находится в фокусе двухлинзового коллектора 2. При работе в светлом поле за коллектором устанавливается осветительная линза 3 и диафрагма 4. 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. Объект (шлиф) находится в фокусе объектива, поэтому отраженные от него лучи идут в виде параллельного пучка и собираются линзой 3 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 конденсатор 12, который концентрирует пучок света на объекте. При таком освещении лучи света почти полностью отражаются от объекта и минуют объектив. В объектив попадут лишь те лучи, которые упадут на

отдельные неровности зеркально гладкого объекта на темном фоне.



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 конденсатор; 13 — призма окулярной насадки.

Рис. 1.5 — Оптическая схема микроскопа

1.3.2. Приготовление микрошлифов для исследования с помощью светового микроскопа

Изучение свойств металлов и сплавов производится на специально изготовленных образцах (микрошлифах), имеющих плоскую и отполированную поверхность. После полирования рабочую поверхность обрабатывают химическим реактивом в виде слабого раствора кислот, щелочей или солей в воде или спирте.

Для травления коррозионностойких сплавов используют крепкие растворы кислот. Поверхность шлифа под действием реактива травителя представляет собой многоэлектродный гальванический элемент, состоящий из большого числа микроскопических электродов. Структурные составляющие, которые имеют наиболее электроотрицательный потенциал, играют роль микроскопических анодов и растворяются, образуя впадины на поверхности шлифа, а структурные элементы, являющиеся катодами, 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. Поэтому интенсивнее идет растворение. При травлении реактив в первую очередь воздействует на границы зерна, которые в травленном шлифе станут углублением. Свет, попадая на них, будет рассеиваться, и в поле зрения микроскопа они будут казаться темными, а зерна светлыми. После травления шлиф промывают водой или спиртом и ставят на столик под световой микроскоп.

Видимая структура материала не всегда отражает специфические свойства (высокую проводимость сплава, высокую магнитную индукцию насыщения, высокую магнитную проницаемость и т.п.). В таких случаях структуру сплава исследуют другими методами: рентгеноструктурным; с помощью электронного микроскопа и др.

1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

1.4.1. Изучить по литературным источникам и методическим указаниям металлографический метод исследования металлов и сплавов.

1.4.2. Изучить по литературным источникам электрические свойства и структуру чистого металла высокой проводимости, сплава высокой проводимости, сплава высокого электросопротивления.

1.4.3. Сделать выводы о взаимосвязи свойств и структуры исследуемых материалов.

1.4.4. Ознакомиться с лабораторной установкой.

1.4.5. Подготовить к исследованиям микрошлифы исследуемых образцов путем обработки их рабочей поверхности спиртом.

1.4.6. Включить микроскоп, рассмотреть и зарисовать структуры исследуемых образцов.

1.4.7. Выключить микроскоп, исследуемые образцы уложить в контейнер.

1.5. Порядок оформления отчета

1.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

1.5.2. Сформулировать цель работы.

1.5.3. Изложить сущность физических явлений, определяющих свойства проводниковых материалов.

1.5.4. Изобразить оптическую схему микроскопа и описать принцип его работы.

1.5.5. Сформулировать выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

1.6. Содержание выводов

1.6.1. Анализ экспериментальных исследований, в которых должна быть указана взаимосвязь между изучаемыми микроструктурами, химическим составом, видом термообработки образцов, их электрическими и механическими свойствами.

1.6.2. Анализ достоинств и недостатков используемого метода и сравнение его с другими методами исследования микроструктур проводниковых материалов.

1.7. Порядок защиты отчета

1.7.1. Представить преподавателю оформленный отчет и протокол экспериментальных исследований.

1.7.2. Получить вопросы от преподавателя.

1.7.3. Сформулировать ответы на поставленные вопросы.

1.7.4. Получить задание на следующую лабораторную работу.

1.8. Контрольные вопросы

1.8.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

1.8.1.1. В чем сущность металлографического анализа?

1.8.1.2. Как приготовить микрошлиф металла и сплава?

1.8.1.3. Как отличить готовый шлиф от неготового?

1.8.1.4. Какие сплавы применяют для реостатных сопротивлений?

1.8.1.5. Какие металлы составляют основу жаростойких сплавов?

1.8.1.6. Какие бронзы применяют в радиоэлектронике?

1.8.1.7. Что такое твердый раствор?

1.8.1.8. Что такое полный отжиг?

1.8.1.9. Что такое закалка полная?

1.8.1.10. Что такое закалка неполная?

1.8.1.11. Что такое закалка поверхностная?

1.8.1.12. Что такое отпуск?

1.8.1.13. Что такое отпуск низкий?

1.8.1.14. Что такое отпуск средний?

1.8.1.15. Что такое отпуск высокий?

1.8.1.16. Что такое термическое улучшение?

1.8.1.17. Что такое старение?

1.8.1.18. В чем сущность термомеханического воздействия?

1.8.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1.8.2.1. Какие отличия в свойствах наблюдаются в материалах высокой проводимости и высокоомных?

1.8.2.2. Где применяются сплавы на основе меди и цинка?

1.8.2.3. Где применяется сплав, в который входят медь и константан?

1.8.2.4. Чем ограничивается область применения платинородия?

1.8.2.5. Где применяется сплав, в который входят медь и копель?

1.8.2.6. Где применяется сплав платинородий - платина?

1.8.2.7. Как влияет на электрические свойства проводниковых сталей термообработка?

1.8.2.8. Какие сплавы используют для электронагревательных устройств большой мощности и промышленных печей?

1.8.2.9. Какой химический состав имеют марки алюминия от А995 до А95?

1.8.2.10. Где применяется сплав, в который входят железо и константан?

1.8.2.11. В чем состоит особенность бронзы БР КД1?

1.8.2.12. Где применяется сплав, в который входят железо и копель?

1.8.2.13. Какой химический состав сплава «Манганин» и где он находит применение?

1.8.2.14. Где применяется сплав, в который входят хромель и копель?

1.8.2.15. Каковы свойства бронзы БР.Б2?

1.8.2.16. Где применяются сплавы «Хромель» и «Алюмель»?

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

2.1. Цель работы

Изучение основных химических и физических свойств магнитных материалов осциллографическим методом.

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. При выполнении этого требования можно получить наименьшие габариты и массу устройства;

3) при работе в переменных полях изделия из магнитомягкого материала должны иметь возможно меньшие потери, которые складываются из потерь на гистерезис, вихревые токи и магнитное последствие. Потери определяют рабочую температуру изделия. Снижение потерь обеспечивает повышение энергетического КПД, позволяет увеличить рабочую индукцию, что способствует уменьшению массы и габаритов устройства.

Существенными факторами являются также 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

тивление 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 компонентом.

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

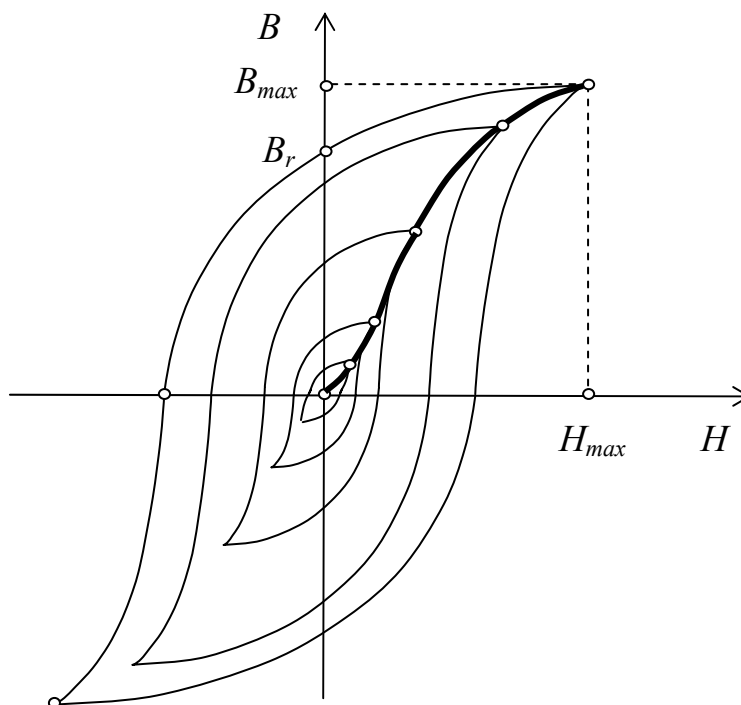


Рис. 2.1 — Динамические петли перемагничивания, полученные в переменном поле и динамическая кривая намагничивания

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 перемагничивание 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 перемагничивания может значительно отличаться по форме от статической. Ее вид зависит от формы, величины, амплитуды, частоты перемагничивающего 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 перемагничивания 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 перемагничивания (гистерезиса).

Применительно к динамической петле перемагничивания, строго говоря, это понятие отсутствует, так как с ростом амплитуды напряженности поля, превышающей напряженность технического насыщения в статическом режиме (H_{max}), предельная петля перемагничивания неуклонно увеличивается за счет возрастания потерь, вызванных повышением скорости перемагничивания сердечника. Поэтому следует говорить о динамической петле перемагничивания 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 толщины 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 7...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 [2] индукции следует, 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.

Из соотношения (2.1) выразим магнитную индукцию в магнитопроводе

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

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 $i_2(t)$ — ток 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]

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

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.

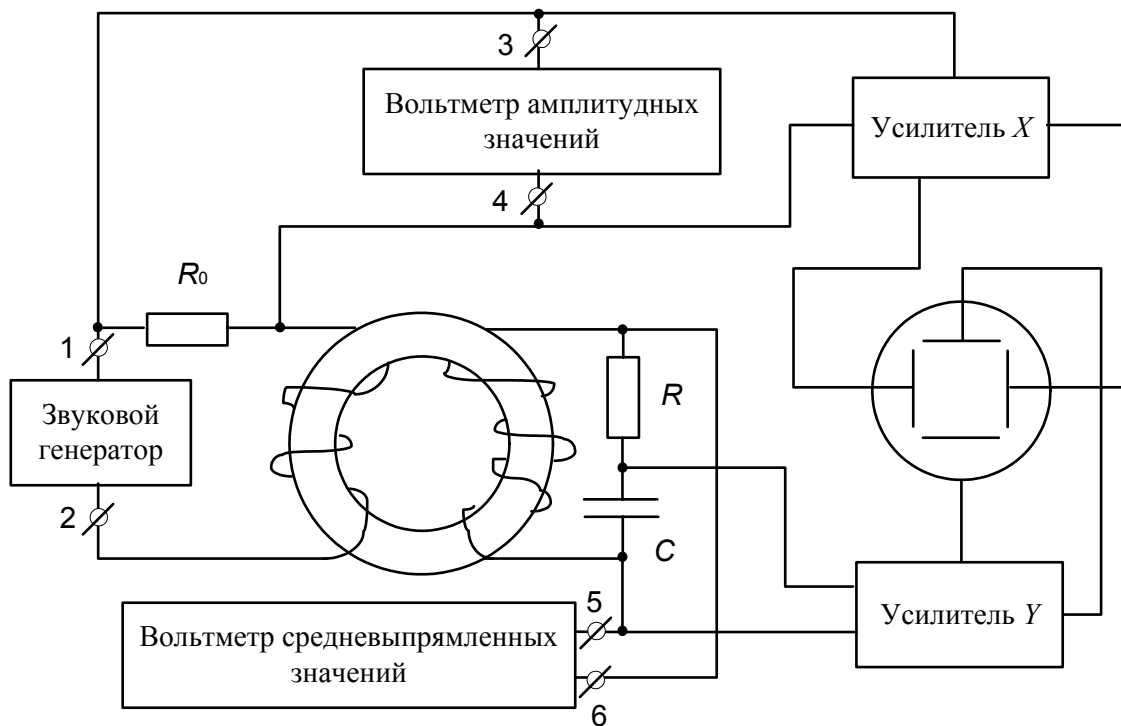


Рис. 2.2 — Схема установки для исследования материалов осциллографическим методом

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

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

Во вторичную обмотку стенда включен вольтметр средневыхрямленных значений. Поэтому

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

Откуда

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

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 средневыхрямленных 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 средневыхрямленных значений к клеммам «5» и «6».

2.4.1.3. Выбрать верхний предел частоты f_B перемещения 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 перемещения 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 перемещения. Для этого, поддерживая неизменными U_{R0max} и усиление по «X» и «Y» осциллографа, получить на экране петли перемещения 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 средневыпрямленных 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).

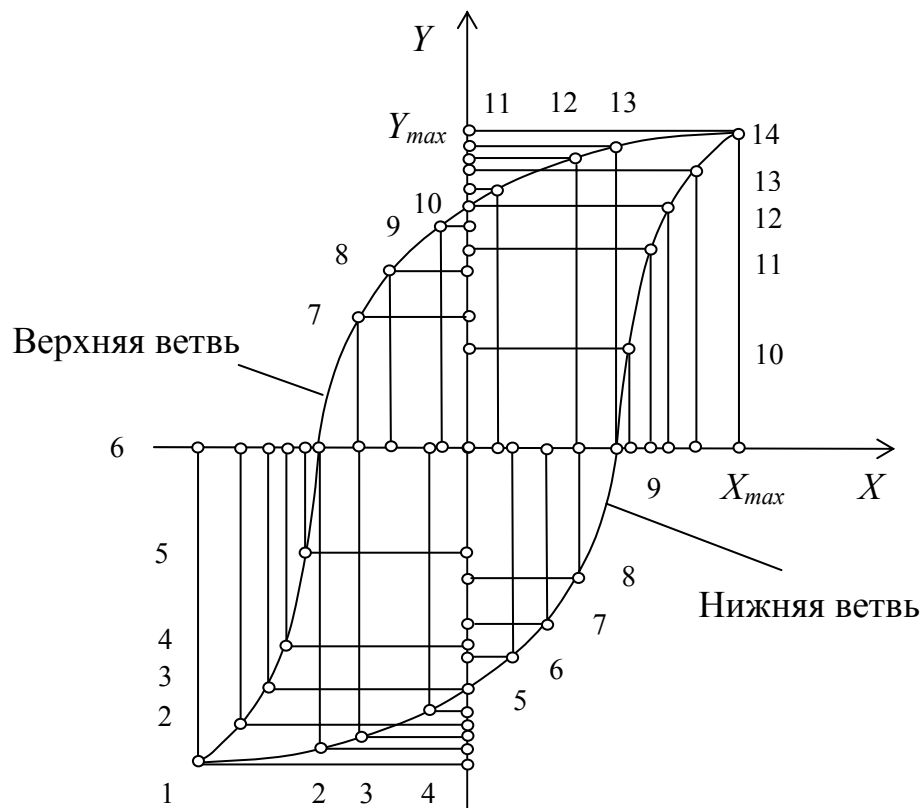


Рис. 2.3 — Пример расположения отсчетных точек на петле гистерезиса

2.4.1.11. Вычислить на нижней частоте по 14 точек B_k и H_k по формулам

$$B_k = m_B Y_k; H_k = m_H X_k.$$

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

Таблица 2.2 — Результаты определения координат Y_k и X_k точек петли гистерезиса для нижней частоты

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

Повторить аналогичные измерения на средней ($f_{\text{ср}}$) и верхней ($f_{\text{в}}$) 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 из-за погрешностей измерения ни одна из найденных точек не удовлетворяет этому уравнению, то можно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{14} H_k^7 = c_7; \sum_{k=1}^{14} H_k^8 = c_8; \sum_{k=1}^{14} B_k = c_9; \sum_{k=1}^{14} B_k H_k = c_{10}; \sum_{k=1}^{14} B_k H_k^2 = c_{11}; \sum_{k=1}^{14} B_k H_k^3 = c_{12}; \\ \sum_{k=1}^{14} B_k H_k^4 = c_{13}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

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

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

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 $c_1 \dots c_{13}$.

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

$$M3 := \begin{pmatrix} 14 & c1 & c2 & c3 & c4 \\ c1 & c2 & c3 & c4 & c5 \\ c2 & c3 & c4 & c5 & c6 \\ c3 & c4 & c5 & c6 & c7 \\ c4 & c5 & c6 & c7 & c8 \end{pmatrix}, \quad M4 := \begin{pmatrix} c9 \\ c10 \\ c11 \\ c12 \\ c13 \end{pmatrix}.$$

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

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

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

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

2.5.5. Описать основные метрологические характеристики приборов, входящих в лабораторный макет.

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

2.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения работы.

2.6. Содержание выводов

2.6.1. Анализ результатов теоретических исследований.

2.6.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.

2.6.3. Сравнительный анализ теоретического и экспериментального исследований, в котором должна быть указана взаимосвязь между изучаемыми материалами, химическим составом, видом термообработки образцов и их магнитными свойствами.

2.6.4. Объяснение причин расхождения результатов эксперимента с теорией.

2.7. Порядок защиты отчета

2.7.1 Представить преподавателю оформленный отчет и протокол экспериментальных исследований.

2.7.2 Получить вопросы от преподавателя.

2.7.3 Сформулировать ответы на поставленные вопросы.

2.7.4 Получить задание на следующую лабораторную работу.

2.8. Контрольные вопросы

2.8.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

2.8.1.1. Какие основные статические параметры характеризуют ферромагнитные материалы?

2.8.1.2. Чем вызывается отличия динамических характеристик ферромагнитных материалов от статических?

2.8.1.3. Какие основные динамические параметры характеризуют ферромагнитные материалы?

2.8.1.4. Как получить симметричные и предельные циклы гистерезиса?

2.8.1.5. Почему образцы при испытании имеют замкнутую форму?

2.8.1.6. Как вычислить напряженность магнитного поля в образце?

2.8.1.7. Каковы основные функциональные блоки измерительной установки?

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

2.8.1.9. Какие стали являются электротехническими?

2.8.1.10. Что такое ферриты?

2.8.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

2.8.2.1. Как произвести градуировку вертикальной и горизонтальной осей на

сетке осциллографа?

2.8.2.2. Как определяются магнитные потери в образце?

2.8.2.3. Как вычислить индукцию магнитного поля в образце?

2.8.2.4. Какие магнитные характеристики влияют на свойства магнитных материалов?

2.8.2.5. На какие группы подразделяются магнитные материалы, какими свойствами и характеристиками они отличаются?

2.8.2.6. Какие явления в цепи переменного тока вызывают потери в стали?

2.8.2.7. Какие существуют виды потерь?

2.8.2.8. Какие физические величины и характеристики материала влияют на величину потерь в стали?

2.8.2.9. Какие существуют возможности для уменьшения величины потерь?

2.8.2.10. Как классифицируются магнитные материалы по форме петли гистерезиса?

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 технически 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 6,5...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.

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°C); выдержки при этой температуре; охлаждения 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 точки $A_{or} = 723^{\circ}\text{C}$, 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. Свойства электротехнической стали значительно улучшаются в результате образования текстуры при её холодной прокатке и последующем отжиге.

Элементарная ячейка железокремнистого сплава представляет собой объемноцентрированный куб, для которого направлениями легкого намагничивания являются его ребра, а направлению самого трудного намагничивания соответствуют пространственные диагонали. При отсутствии текстуры имеет место хаотическое расположение кристаллов. Вследствие этого материал приобретает изотропные свойства.

При холодной прокатке получают преимущественную ориентацию кристаллов, которую называют текстурой прокатки. Однако деформация в холодном состоянии приводит к появлению больших внутренних напряжений и, следовательно, к росту H_c . Эти напряжения можно снять отжигом.

При нагреве холоднокатаной стали до температуры выше 800°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; промежуточный отжиг; холодную прокатку и окончательный отжиг при высокой температуре (1100-1500°C).

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, отпуски, отжига);

г) специальные мартенситные стали ЕХ, ЕХЗ, Е7В6 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 напряженность 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} .

Отношение

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

называется амплитудной магнитной проницаемостью ферромагнетика в переменном магнитном поле [1].

Магнитная постоянная

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Площадь петли гистерезиса определяет потери на перемагничивание и вих-

ревые 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 . Падение напряжения на известном сопротивлении Ток в цепи обмотки W_1 определяется при помощи амперметра А, а индуцируемая ЭДС в обмотке W_2 измеряется вольтметром В₂. 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]

$$B_{max} = \frac{E_{cp}}{4f W_2 S}, \quad (3.2)$$

где E_{cp} — средневывпрямленное значение ЭДС на вторичной обмотке; W_2 — число витков вторичной обмотки; f — частота тока, Гц; S — поперечное сечение образца, м².

Пропуская через намагничивающую цепь определенные значения тока, и измеряя при помощи вольтметра ЭДС во вторичной обмотке, можно по вышеприведенным формулам рассчитать максимальную напряженность магнитного поля и максимальную магнитную индукцию за период, построить кривую индукции, а также определить амплитудную магнитную проницаемость

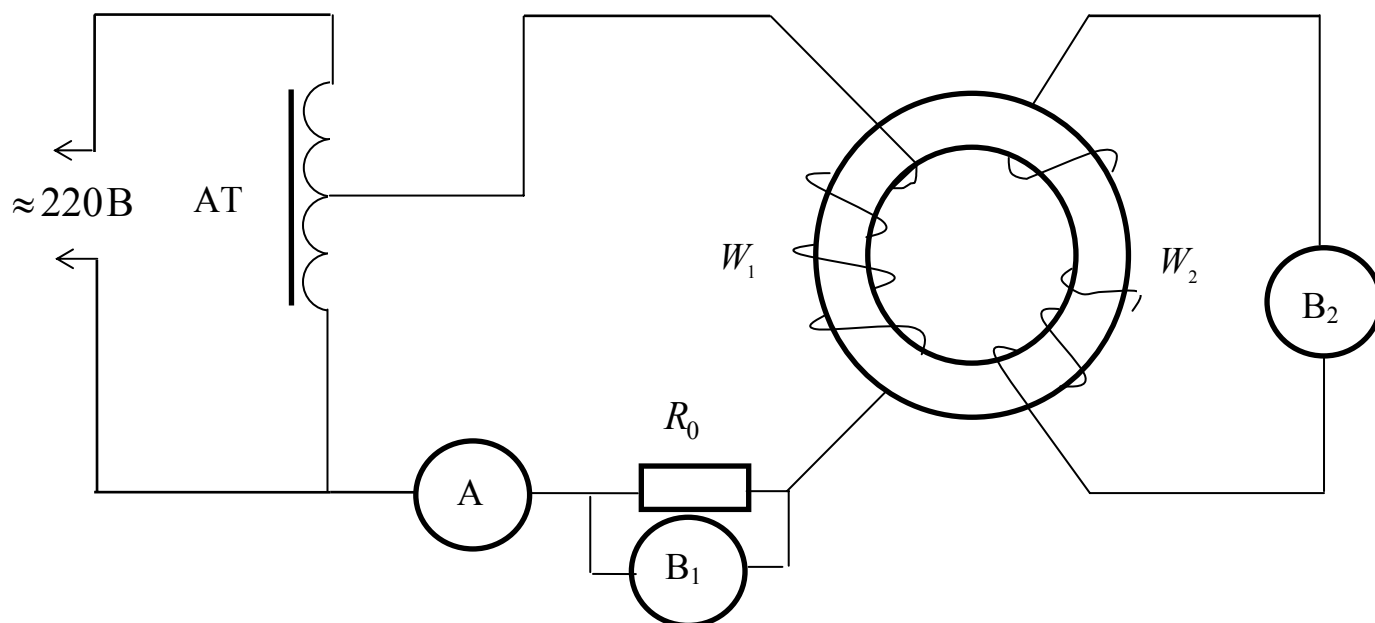


Рис. 3.1 — Схема установки для измерения кривой магнитной индукции методом амперметра - вольтметра

$$M = \frac{B_{max}}{M_0 H_{max}}. \quad (3.4)$$

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 3.1. В лабораторной работе измерение ведется при частоте 50 Гц. По измеренному вольтметром B_1 падению напряжения на известном сопротивлении R_0 определяется максимальное значение тока намагничивания за период

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

где — U_{R0max} , В — амплитудное значение напряжения, измеряемое вольтметром B_1 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 обратить внимание на то, что показания амперметра не входят в расчетные формулы, ибо максимальное за период значение тока определяется по показаниям вольтметра B_1 согласно фор-

муле (3.5).

Средневыпрямленное значение ЭДС $E_{\text{ср}}$ 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 расчетов

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.

3.4.1.3. Из всех изучаемых материалов выбрать магнитомягкий и магнитотвердый и обосновать их выбор.

3.4.1.4. Произвести расчет амплитудных значений напряжённости магнитного поля и магнитной индукции.

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 - 100 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 установить в положение "10 А".

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

3.4.2.7. Кабель милливольтметра "В4-1А" 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", вклю-

чить 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

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

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 для стали У9 (отж)

U_{max} , В	$E_{\text{ср}}$, В	I_{max} , А	H_{max} , А/м	B_{max} , Тл	μ

3.4.2.16. По заполненным таблицам для каждого образца построить графики

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

3.5. Порядок оформления отчета

3.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

3.5.2. Сформулировать цель работы.

3.5.3. Изложить сущность физических явлений, определяющих потери в магнитных материалах.

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

3.5.5. Описать основные метрологические характеристики приборов, входящих в лабораторный макет.

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

3.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

3.6. Содержание выводов

3.6.1. Анализ результатов теоретических исследований.

3.6.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.

3.6.3. Сравнительный анализ теоретического и экспериментального исследований, в котором должна быть указана взаимосвязь между изучаемыми материалами, химическим составом, видом термообработки исследуемых образцов и их свойствами.

3.6.4. Объяснение причин расхождения результатов эксперимента с теорией.

3.7. Порядок защиты отчета

3.7.1. Представить преподавателю оформленный отчет и протокол экспериментальных исследований.

3.7.2. Получить вопросы от преподавателя.

3.7.3. Сформулировать ответы на поставленные вопросы.

3.7.4. Получить задание на следующую лабораторную работу.

3.8. Контрольные вопросы

3.8.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

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

3.8.1.2. Какие параметры характеризуют материал при намагничивании переменным полем?

3.8.1.3. Какое влияние оказывают на магнитные свойства материалов углерод?

3.8.1.4. Какое влияние оказывает на магнитные свойства материалов кремний?

3.8.1.5. Как рассчитать при методе амперметра и вольтметра амплитуду напряженности магнитного поля?

3.8.1.6. Как рассчитать в примененном методе измерений амплитуду индукции магнитного поля?

3.8.1.7. Каково назначение основных функциональных блоков установки?

3.8.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

3.8.2.1. Почему испытываемые образцы используют в виде тонких листов?

3.8.2.2. Как отличают друг от друга кривые намагничивания магнитотвердых и магнитомягких материалов?

3.8.1.3. Как влияет закалка на величину магнитной проницаемости?

3.8.1.4. Как влияет отпуск на величину магнитной проницаемости?

3.8.1.5. Каковы пути улучшения магнитных свойств материалов?

3.8.2.6. Что такое статическая характеристика ферромагнетика?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

4.1. Цель работы

Изучение влияния химического состава, механической и термической обработки 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 столкновениями (при неупругом столкновении энергия электрона передается атому) с узлами кристаллической решетки определяется формулой [1]

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

где $\lambda_{\text{ср}}$ — средняя длина свободного пробега.

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

$$a = \frac{eE}{m}. \quad (4.2)$$

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

$$V_{cp} = \frac{eE\tau}{2m} = \frac{eE\lambda_{cp}}{2mV_T}. \quad (4.5)$$

Плотность тока, как известно, это количество электричества, проходящее через единичное сечение проводника за единицу времени. Она рассчитывается по формуле [2]

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

где N — концентрация электронов в проводнике.

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

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

где γ — удельная электрическая проводимость материала.

$$\gamma = \frac{e^2 N \lambda_{cp}}{2mV_T}.$$

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

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 повыше-

нию 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.

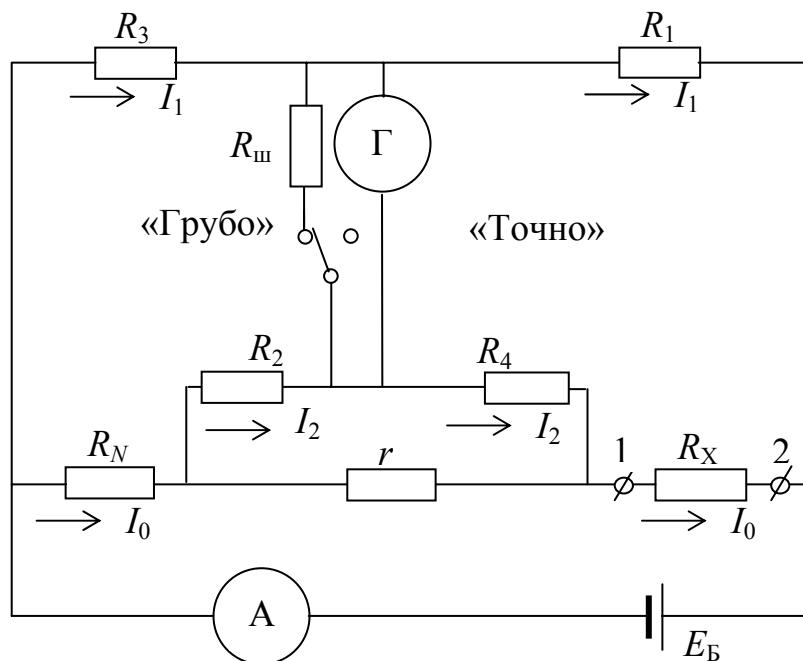
4.2.5. Мостовой метод измерения малых сопротивлений

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 со-

единительных 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 Γ присоединен к добавочной цепи, в которую введены два значительных по сравнению с X и N сопротивления R_2 и R_4 .



R_X — измеряемое малое сопротивление; R_N — образцовое малое сопротивление;
 r — сопротивление вспомогательного резистора (медной шины);
 $R_1 \dots R_4$ — сопротивления резисторов в плечах моста; гальванометра; Γ — гальванометр; $R_{ш}$ — сопротивление шунта гальванометра; «Грубо» — первая кнопка замыкания цепи гальванометра; «Точно» — вторая кнопка замыкания цепи гальванометра; A — амперметр постоянного тока; источник ЭДС.

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 течет одинаковый ток I_1 , через сопротивления R_2 и R_4 течет ток I_2 , а через сопротивления R_X и R_N течет 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

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

Резисторы $R_1 \dots R_4$ выбираем так, чтобы выполнялось условие $R_2/R_3 = R_4/R_1$.

Тогда из последней формулы получим $R_N/R_X = R_3/R_1$. Тогда величину измеряемого сопротивления R_X определяем по формуле

$$R_X = R_N \frac{R_1}{R_3}.$$

Зная площадь поперечного сечения и длину образца, сопротивление R_X можно определить по формуле

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

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 » — образцовое сопротивление;
- « R_1 » — переключатель сопротивления первого плеча моста;
- « R_3 » — штепсельный магазин второго плеча моста;
- «Грубо» — первая кнопка замыкания цепи гальванометра;
- «Точно» — вторая кнопка замыкания цепи гальванометра.

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

4.4. Порядок выполнения лабораторной работы

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

4.4.2. 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.

4.4.3. 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.

4.4.4. Построить график зависимости 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. Изложить сущность физических явлений, определяющих электросопротивление в проводниковых материалах.

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

Таблица 4.1 — Результаты измерений и расчета

№ п / п	Тип образца	Размеры образца		Результаты измерения электросопротивления образца, Ом	Результаты расчета удельного электросопротивление образца, Ом·м
		Длина, мм	Площадь поперечного сечения, м ²		
1	Сталь сырая				
2	Сталь закаленная				
3	Сталь легированная				
4	Сталь «отпуск 200»				
5	Сталь «отпуск 350»				
6	Сталь «отпуск 500»				
7	Сплав Cu-Ni				

4.5.5. Привести основные метрологические характеристики приборов, входящих в лабораторный макет.

4.5.6. Привести в таблице 4.1 результаты измерений и расчетов удельного электросопротивления исследуемых семи образцов.

4.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

4.6. Содержание выводов

4.6.1. Анализ результатов теоретических исследований.

4.6.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.

4.6.3. 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.

4.6.4. Объяснение причин расхождения результатов эксперимента с теорией.

4.7. Порядок защиты отчета

4.7.1. Представить преподавателю оформленный отчет и протокол экспериментальных исследований.

4.7.2. Получить вопросы от преподавателя.

4.7.3. Сформулировать ответы на поставленные вопросы.

4.7.4. Получить задание на следующую лабораторную работу.

4.8. Контрольные вопросы

4.8.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

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

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

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

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

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

4.8.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

4.8.2.1. Как исключить влияние термоэдс, возникающей в контактах?

4.8.2.2. Как вычислить величину измеряемого сопротивления при использовании схемы двойного моста?

4.8.2.3. Перечислить основные блоки измерительной установки и указать их функциональное назначение.

4.8.2.4. Как снять внутренние напряжения в металлах и сплавах?

5. 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]

$$\epsilon = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{вн}} - E_{\text{внутр}}},$$

где $E_{\text{вн}}$ — напряженность внешнего электрического поля; $E_{\text{внутр}}$ — напряженность внутреннего электрического поля.

Значение ϵ зависит от вида поляризации. Для полярных диэлектриков ϵ обычно больше, чем для неполярных и зависит от температуры, частоты приложенного напряжения и влажности. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости ϵ полярного диэлектрического материала фторопласт-3 от температуры приведена на рис 5.1.

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.

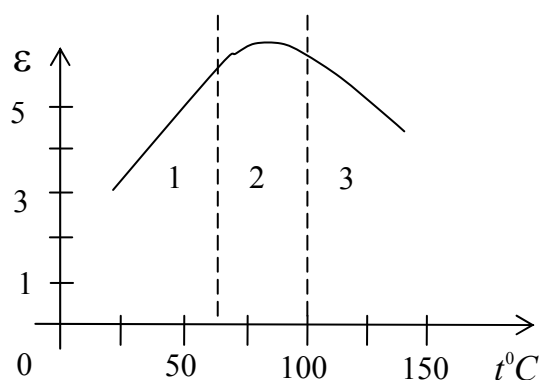


Рис. 5.1 — Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика $\text{tg}\delta$ для титаната бария Фторопласт-3

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

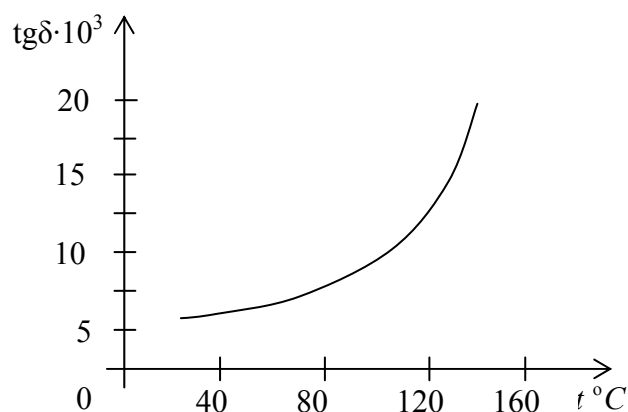


Рис. 5.2 — Температурная зависимость $\text{tg}\delta$ для щелочного стекла

Эти потери вызваны передвижением слабо связанных ионов и рассматриваются как потери, обусловленные электропроводностью. Они проявляются при температурах выше $50..100^\circ\text{C}$. 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 $\text{tg}\delta$. Введение тяжелых окислов уменьшает $\text{tg}\delta$. 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. 5.3 приведена зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры для титаносодержащей керамики.

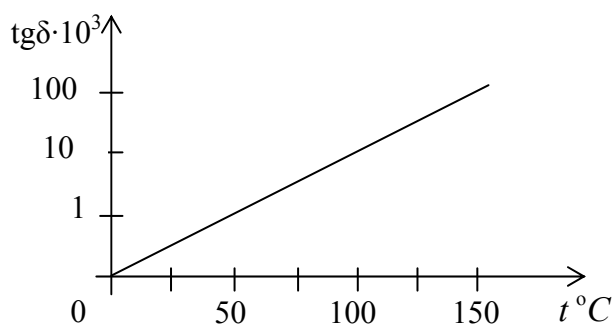


Рис. 5.3 — Температурная зависимость $\text{tg}\delta$ для титаносодержащей керамики

Диэлектрические характеристики слюды зависят от температуры. Примеси даже в небольших количествах резко ухудшают электрические свойства слюды. На рис. 5.4 приведена зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для мусковита.

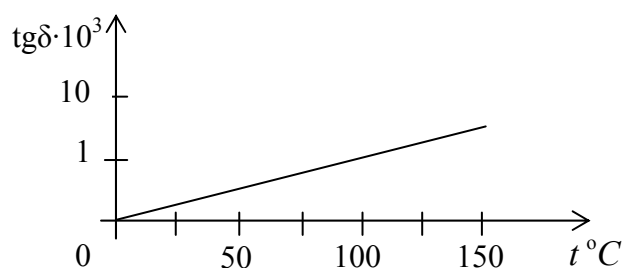


Рис. 5.4 — Температурная зависимость $\operatorname{tg}\delta$ для мусковита

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

На рис. 5.5 представлены зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для титаната бария.

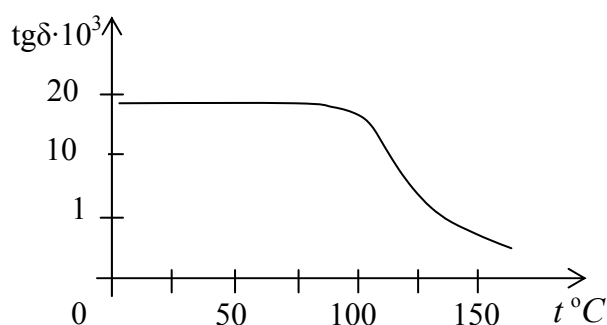


Рис. 5.5 — Температурная зависимость $\operatorname{tg}\delta$ для титаната бария

5.2.3. Описание метода измерения относительной 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 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная; S — площадь обкладки, м^2 ; d — толщина диэлектрика, м.

С достаточной для практики точностью можно допустить, что относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_{\text{в}} = 1$. 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

$$\epsilon = \frac{C_{\text{д}}}{C_{\text{в}}}, \quad (5.2)$$

где $C_{\text{д}}$ — емкость конденсатора с диэлектриком из исследуемого материала;
 $C_{\text{в}}$ — емкость конденсатора с диэлектриком из воздуха.

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, представленной на рис. 5.6.

При параллельной схеме замещения (рис.5.6) полная проводимость $\underline{Y}$, представляется в виде суммы активной g и реактивной jB проводимостей

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

Если характер реактивной проводимости емкостной, то $B = \omega C$, тогда

$$\underline{Y} = g + j\omega C,$$

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

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

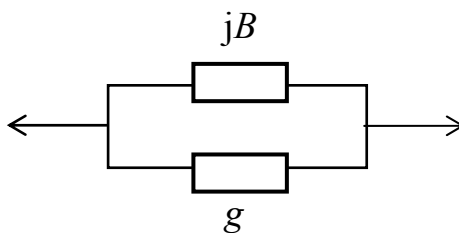


Рис. 5.6 — Схема замещения конденсатора

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

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. 5.7 приведена структурная схема лабораторной установки.

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.

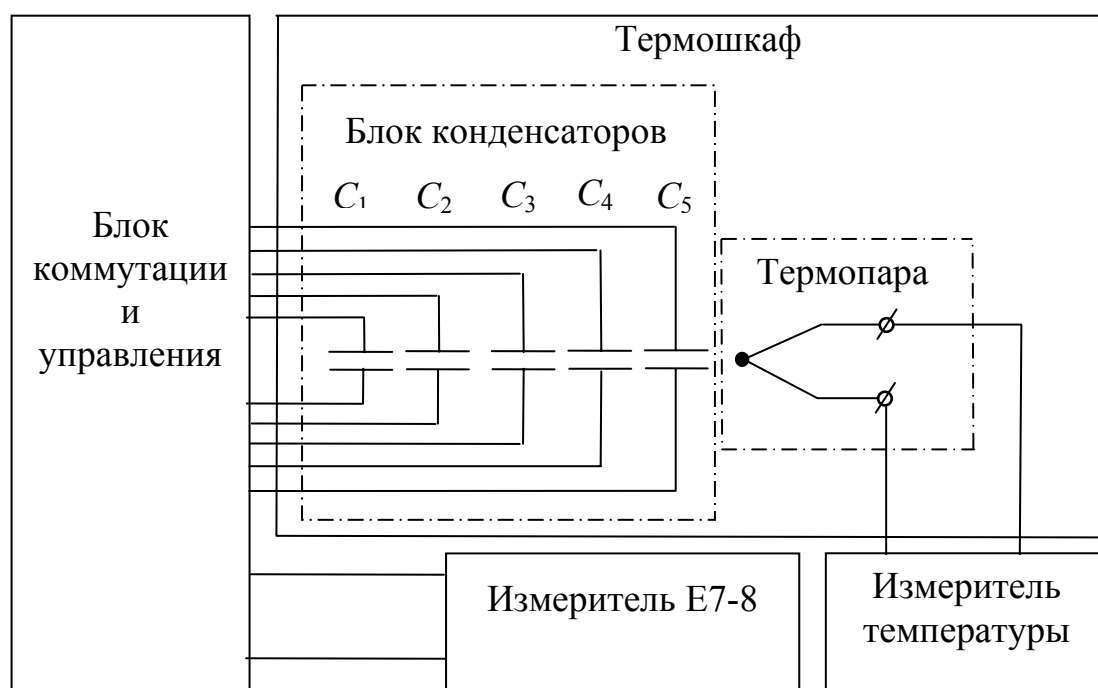


Рис. 5.7 — Структурная схема лабораторной установки на основе измерительного моста Е7-8

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-ЭДС в диапазоне температур от комнатной до 300°C. 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, техническим описанием, инструкцией по эксплуатации на прибор Е7-8 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_{di} и $\text{tg} \delta$ в диапазоне температур от 20°C до 100°C через каждые десять градусов. Результаты измерений поместить в таблицу 5.2.

Таблица 5.1 — Варианты исследуемых материалов, результаты измерений и расчетов

Исследуемый диэлектрик	Марка	Геометрические размеры конденсатора и его емкость для воздушного диэлектрика				
		Расстояние d , мм	Длина A , м	Ширина B , м	Площадь обкладок, S	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 заданном диапазоне температур по формуле (5.2). Результаты расчётов и измерений занести в таблицу 5.2.

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.

Таблица 5.2 — Результаты исследования температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь исследуемого диэлектрика

Температура, °C	C_d , пФ	$\epsilon = \frac{C_d}{C_b}$	tgд
20			
30			
40			
50			
60			
70			
80			
90			
100			

5.5. Порядок оформления отчета

5.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

5.5.2. Сформулировать цель работы.

5.5.3. Изложить сущность физических явлений, определяющих электросопротивление в проводниковых материалах.

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

5.5.5. Описать основные метрологические характеристики приборов, входящих в лабораторный макет.

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

5.5.7. 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, в котором должна быть указана взаимосвязь между химическим составом, технологией производства исследуемых образцов и температурными характеристиками ϵ и $\text{tg}\delta$.

5.6.4. Объяснение причин расхождения результатов эксперимента с теорией.

5.7. Порядок защиты отчета

5.7.1. Представить преподавателю оформленный отчет и протокол экспериментальных исследований.

5.7.2. Получить вопросы от преподавателя.

5.7.3. Сформулировать ответы на поставленные вопросы.

5.7.4. Получить задание на следующую лабораторную работу.

5.8. Контрольные вопросы

5.8.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

5.8.1.1. Как строится классификация диэлектриков по виду поляризации?

5.8.1.2. Какие существуют основные виды поляризации диэлектриков?

5.8.1.3. Какие наблюдаются различия в температурных характеристиках диэлектрической проницаемости твердых и газообразных диэлектриков?

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

5.8.1.5. Какие наблюдаются различия в температурных характеристиках диэлектрической проницаемости полярных и неполярных диэлектриков?

5.8.1.6. Какова область применения исследуемого материала?

5.8.1.7. Что такое влагопроницаемость диэлектриков ?

5.8.1.8. Что такое хрупкость диэлектриков ?

5.8.1.9. Что такое вязкость диэлектриков ?

5.8.1.10. Что такое твердость диэлектриков ?

5.8.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

5.8.2.1. Что такое нагревостойкость диэлектриков ?

5.8.2.2. Как строится классификация диэлектриков по нагревостойкости?

- 5.8.2.3. Что такое холодостойкость диэлектриков ?
- 5.8.2.4. Что такое теплопроводность диэлектриков?
- 5.8.2.5. Что такое температурный коэффициент линейного расширения материала?
- 5.8.2.6. Что такое электрическая прочность диэлектрика?
- 5.8.2.7. Какие внешние факторы влияют на электрическую прочность диэлектрика?
- 5.8.2.8. Как выглядят векторная диаграмма и эквивалентная схема диэлектрика с потерями для последовательной схемы замещения?
- 5.8.2.9. Как выглядят векторная диаграмма и эквивалентная схема диэлектрика с потерями для параллельной схемы замещения?
- 5.8.2.10. Какие виды потерь существуют в диэлектриках?

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

6.1. Цель работы

Исследование влияния температуры и химического состава на основные электрические свойства оксидных полупроводников

6.2. Теоретическая часть

6.2.1. Физические свойства терморезисторов

Терморезисторы — нелинейные резисторы, изготавливаемые из полупроводниковых материалов, имеющих большой температурный коэффициент удельного сопротивления (ТКС). У большинства терморезисторов ТКС отрицательный. Терморезисторы с положительным ТКС называют позисторами [1].

Как правило, терморезисторы изготавливают из порошков окислов металлов (так называемых валентных окисных полупроводников) прессованием дисков, шайб, пластин и т.д.

В качестве материалов терморезисторов используют окись - закись марганца, закись меди, окись кобальта и др.

Наиболее широкое распространение получили медно-марганцевые терморезисторы типа ММТ, кобальто-марганцевые [6].

Терморезисторы указанных групп используются, главным образом, для измерения и регулирования температуры, а также для термокомпенсации различных элементов электрических цепей, работающих в широком интервале температур.

Широко применяются измерительные терморезисторы типов ТД, ТС, ТШ, предназначенные для работы в качестве чувствительного элемента при измерениях мощности сверхвысокочастотных колебаний от долей микроватта до нескольких милливатт.

Для стабилизации напряжения в цепях переменного и постоянного токов предназначены терморезисторы ТП 2/0,5; ТП 2/2; ТП 6/2 (в обозначении данных резисторов число в числителе указывает номинальное напряжение в вольтах, а число в знаменателе — средний рабочий ток в миллиамперах).

В цепях автоматики в качестве регулируемых бесконтактных резисторов

применяются терморезисторы ТКП-20, ТКП-50А, ТКП-50Б, ТК-300, ТКП-450, СТ1-21, СТ3-21, СТ3-27.

Особым видом терморезисторов являются полупроводниковые болометры, используемые в качестве индикаторов лучистой энергии. Обозначения полупроводниковых болометров состоят из букв БKM и цифры, обозначающей порядковый номер прибора (БКМ-1, БKM-2 и т.д.).

Все указанные выше типы терморезисторов имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС), при котором с увеличением температуры их сопротивление резко уменьшается.

В последние годы освоен выпуск терморезисторов с положительным ТКС. Такие приборы получили название позисторов [2]. К ним относятся приборы типа СТ5-1, СТ6-1А, СТ6-1Б, СТ6-2Б, СТ6-3Б, СТ6-4Б, СТ6-5Б, СТ6-4В, СТ6-4Г и др.

Основными параметрами термисторов являются:

х о л о д н о е с о п р о т и в л е н и е, которое определяется при температуре 20°C (R_0);

т е м п е р а т у р н ы й к о э ф ф и ц и е н т сопротивления (ТКС), определённый при температуре 20°C ;

п о с т о я н н а я в р е м е н и (τ) в секундах, которая характеризует тепловую инерционность термистора и измеряется промежутком времени, на протяжении которого температура термистора, нагретого на 100°C выше окружающей среды, снизится на 63 %;

р а б о ч и й и н т е р в а л т е м п е р а т у р и максимально допустимая температура, при которой характеристики термистора остаются стабильными;

м а к с и м а л ь н о - д о п у с т и м а я м о щ н о с т ь рассеивания P_{max} , которая в виде тепла выделяется на термисторе и не вызывает необратимых изменений его параметров;

к о э ф ф и ц и е н т р а с с е и в а н и я (H), измеряемый в Вт/град, численно равный мощности, рассеянной на термисторе, нагретом на 1°C выше температуры окружающей среды;

к о э ф ф и ц и е н т э н е р г е т и ч е с к о й ч у в с т в и т е л ь н о с т и (G), численно равный мощности, которую необходимо рассеять на резисторе, чтобы изменить его сопротивление на 1%.

Величину G определяют по формуле

$$G = \frac{\Delta P}{\Delta R} \cdot 100\% . \quad (6.1)$$

Теплоёмкость термистора (C), Дж/град — величина, определяемая количеством тепла в Дж, необходимого для повышения температуры термистора на 1°C .

Температурная зависимость сопротивления является исходной характеристикой термистора. Этой зависимостью определяются основные характеристики термистора. На рис. 6.1 приведена зависимость сопротивления рабочего тела термисторов от температуры среды для термистора КМТ-1. Сопротивление терморезистора с отрицательным ТКС в рабочих интервалах температур изменяется по экспоненциальному закону [3].

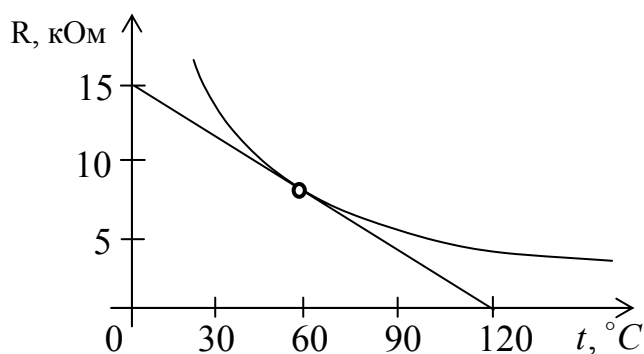


Рис. 6.1 — Зависимость сопротивления термистора КМТ-1 от температуры

Если известно сопротивление терморезистора при 20°C , то сопротивление терморезистора при другой температуре среды можно рассчитать по формуле

$$R_T = R_0^{B(T_0 - T)/(T_0 T)}, \quad (6.3)$$

где R_0 — величина сопротивления при $T_0 = 293^\circ\text{K}$; T — температура, при которой определяют величину сопротивления, K ; B — постоянная, характеризующая температурную чувствительность терморезистора и определяемая по справочнику, либо расчетом.

Постоянную B можно легко определить, измерив сопротивление терморезистора при двух значениях температуры T_0 и T .

$$B = \frac{\ln R_T}{\ln R_0} \frac{T_0 T}{(T_0 - T)}. \quad (6.4)$$

ТКС характеризует изменение сопротивления терморезистора под действием температуры и определяется следующим образом:

$$\text{ТКС} = \frac{\Delta R}{R \Delta T}, K^{-1}. \quad (6.5)$$

Например, для термистора КМТ – 1: ТКС=0,028, K^{-1} .

На рис. 6.2 приведена вольт-амперная характеристика термистора КМТ-1.

Дифференциальное сопротивление при работе терморезистора в качестве стабилитрона будет равно

$$R_{dif} = \frac{du}{di} . \quad (6.6)$$

6.2.1 Методика теоретического расчета параметров термисторов

6.2.1.1 По справочнику определить сопротивление термистора R_0 при нормальной температуре и коэффициент температурной чувствительности B .

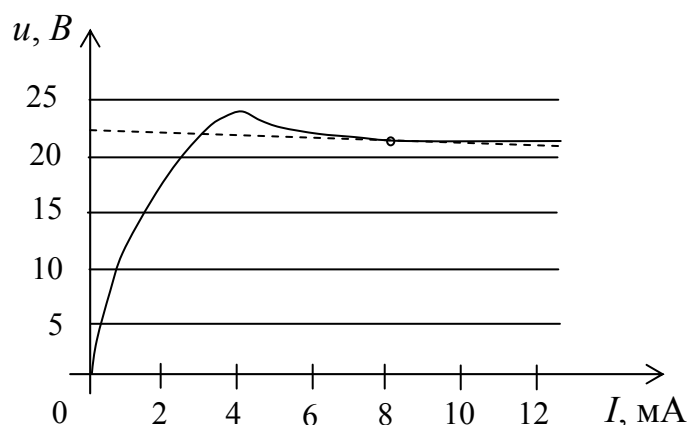


Рис. 6.2 — Вольт-амперная характеристика термистора КМТ-1

Например, для термистора КМТ - 1:

$$R_0 = 27 \text{ кОм}; \quad B = 3600 \text{ К}.$$

6.2.2. Рассчитать по формуле (6.3) для температуры $T = 100^\circ\text{C}$.

$$R_T = R_0 \exp \left[\frac{B(T_0 - T)}{T_0 T} \right] = 27 \cdot 10^3 \exp \frac{3600(293 - 393)}{293 \cdot 393} = 1325 \text{ Ом}.$$

6.2.3. Снять отсчет по кривой, приведенной на рис. 6.1, для заданной температуры.

6.2.4. Рассчитать температурный коэффициент сопротивления терморезистора по формуле (6.5) для найденного значения B и рабочей температуре 56°C .

6.2.5. Сравнить полученные результаты с отсчетом, снятым в пункте 6.2.3 и сделать выводы.

6.3. Описание лабораторного макета

Для снятия вольт-амперных характеристик исследуемых элементов используются генератор пилообразного напряжения и осциллограф. Структурная схема макета для исследования характеристик нелинейных элементов приведена на

рис. 6.3.

Напряжение с первого выхода генератора подается на вход «X» осциллографа для осуществления развертки луча. При этом обеспечивается отклонение луча по горизонтали пропорционально напряжению, падающему на исследуемом элементе. Со второго выхода генератора пилообразное напряжение подается на исследуемый элемент, последовательно с которым включен линейный резистор сопротивлением 1 Ом. Поэтому напряжение, снимаемое с этого резистора и подающееся на вход «Y» осциллографа, пропорционально току, протекающему

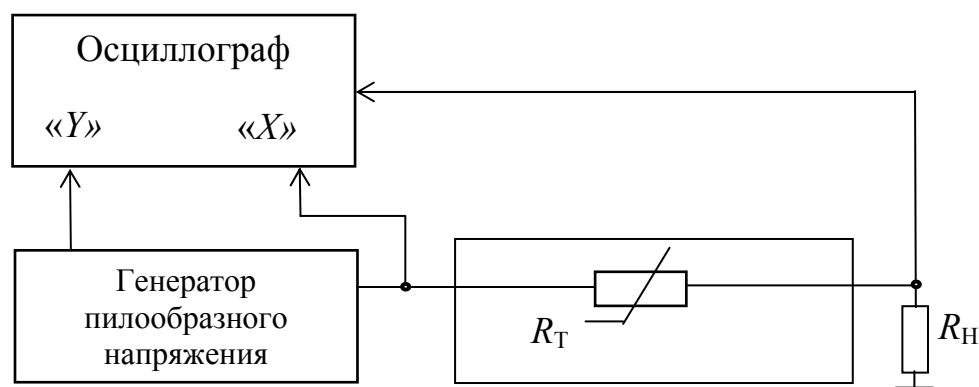


Рис. 6.3 — Структурная схема макета

через исследуемый нелинейный элемент. Таким образом, на экране осциллографа появляется зависимость тока, протекающего через исследуемый элемент, от приложенного к нему напряжения. Падением напряжения на измерительном резисторе, очевидно, можно пренебречь ввиду его малости.

Перед измерением следует провести калибровку, которая заключается в установке значений напряжений, подаваемых на осциллограф, в соответствии с градуировкой горизонтальной и вертикальной шкал экрана осциллографа. Тогда величины напряжений и соответствующих им токов можно отсчитывать по сетке на экране.

6.4. Порядок выполнения лабораторной работы

6.4.1. Изучить основные свойства полупроводниковых материалов и изделий на их основе в соответствии с индивидуальным заданием, приведенным в таблицах 6.1, 6.2. и 6.3.

Таблица 6.1 — Варианты исследуемых термосопротивлений

Вариант задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип термистора	KMT-1	KMT-4	MMT-1	MMT-4	CT1	CT3	CT-2	CT5	CT6

Таблица 6.2 — Варианты исследуемых варисторов

Вариант задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип варистора	CH2-2	CH1-3	CH1-6	CH1-7	CH1-10-33	CH1-10-27	CH1-10-22	CH1-10-18	CH1-10-15

Таблица 6.3 — Варианты исследуемых фоторезисторов

Вариант задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип фоторезистора	CF2-2	CF2-4	CF2-5	CF2-9	CF2-15	CF3-2	CF3-2	CF3-2A	CF3-2Б

6.4.2. Рассчитать R_T , B , ТКС термистора по методике, изложенной в пункте 2.2.

6.4.3. Снять зависимость сопротивления термистора от температуры.

6.4.4. Для заданной преподавателем температуры по экспериментальной кривой определить R_T , B , ТКС.

6.4.5. Снять вольт-амперные характеристики термисторов для нормальной и заданной температур.

6.4.6. Определить дифференциальное сопротивление термистора. Для этого провести на экспериментальной кривой через заданную рабочую точку касательную. По ее пересечению с осями определить ΔU и ΔI . Дифференциальное сопротивление определить по формуле

$$R_{dif} = \Delta U / \Delta I, \text{ кОм.}$$

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 электросопротивление в оксидных полупроводниковых материалах.

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

6.5.5. Описать основные метрологические характеристики приборов, входящих в лабораторный макет.

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. Содержание выводов

6.6.1. Анализ результатов теоретических исследований.

6.6.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.

6.6.3. Сравнительный анализ теоретического и экспериментального исследований, в котором должна быть указана взаимосвязь между химическим составом, технологией производства исследуемых образцов и их электрическими свойствами.

6.6.4. Объяснение причин расхождения результатов эксперимента с теорией.

6.7. Порядок защиты отчета

6.7.1. Представить преподавателю оформленный отчет и протокол экспериментальных исследований.

6.7.2. Получить вопросы от преподавателя.

6.7.3. Сформулировать ответы на поставленные вопросы.

6.7.4. Получить задание на следующую лабораторную работу.

6.8. Контрольные вопросы

6.8.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

6.8.1.1. На основе каких материалов изготавливают термисторы?

6.8.1.2. Из каких полупроводниковых материалов изготавливают позисторы?

6.8.1.3. При каких температурах определяется величина холодного сопротивления?

6.8.1.4. В чем особенность вольт-амперных характеристик термистора?

6.8.1.5. Какие параметры характеризуют термисторы?

6.8.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

6.8.2.1. Как выбрать рабочее напряжение термистора?

6.8.2.2. Какое значение имеет величина дифференциального сопротивления для оценки свойств термистора?

6.8.2.3. Какие основные области применения термисторов в радиотехнике?

6.8.2.5. Каковы перспективы улучшения свойств термисторов?

7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

7.1. Цель работы

- изучить основные свойства диэлектриков;
- изучить методы экспериментального исследования частотных характеристик диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь диэлектриков;
- систематизация, закрепление и углубление теоретических и практических знаний по изучаемому разделу.

7.2. Теоретическая часть

7.2.1. 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.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0}.$$

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 dp . Количественно интенсивность поляризации диэлектрика определяется поляризованностью P , равной отношению индуцированного электрического момента объема диэлектрика к этому объему, когда последний стремится к нулю

$$P = \frac{dp}{dV}.$$

Образование индуцированного электрического момента 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 под действием внешнего электрического поля.

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

$$\varepsilon \approx n^2,$$

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 под действием внешнего электрического поля.

Ионная поляризация при воздействии внешнего электрического поля осуществляются 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 внешнего 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 накопление их на границах раздела этих включений под действием внешнего электрического поля. Процессы установления и снятия миграционной поляризации сравнительно медленны и могут продолжаться секунды, минуты и даже часы. Поэтому миграционная поляризация обычно наблюдается при весьма низких частотах внешнего воздействия.

Изменение ε с изменением частоты называют дисперсией диэлектрической проницаемости.

Поскольку время установления электронной и ионной поляризаций весьма мало, то у диэлектриков, у которых присутствуют эти виды поляризаций, нет заметной частотной зависимости ε на частотах, используемых в радиотехнике.

Ионная и электронная поляризации претерпевают резонансную дисперсию, при которой ε вначале увеличивается, проходя через максимум, затем уменьшается.

Дисперсию, выраженную в монотонном снижении ε , называют релаксационной. Она характерна для дипольной и миграционной поляризации.

У полярных диэлектриков ε начинает снижаться уже в радиочастотном диапазоне, когда частота внешнего электрического поля приближается к частоте релаксации диэлектрика.

На рис. 7.1 приведена зависимость ε от частоты f для полярного полимера политрифторхлорэтилена 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.

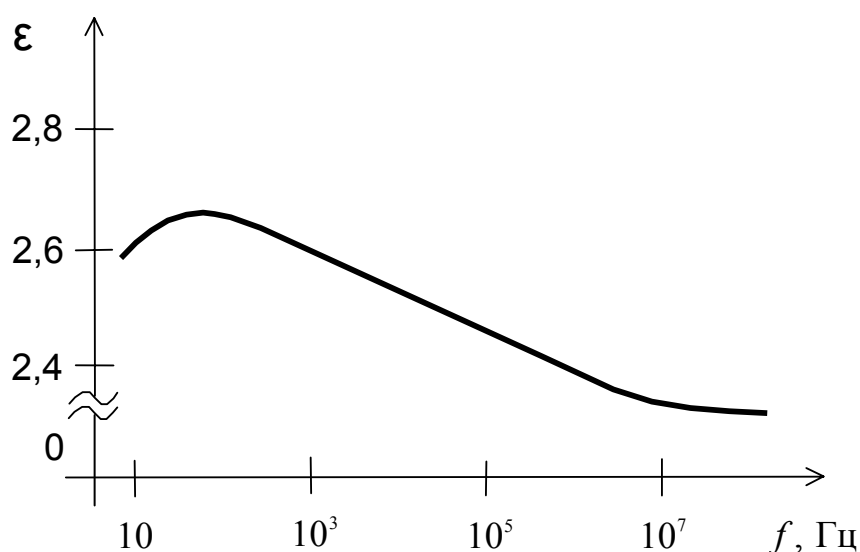


Рис. 7.1 — Зависимость диэлектрической проницаемости политрифторхлорэтилена от частоты

Плотность тока смещения

$$J_{\text{см}} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon E,$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Плотность тока проводимости

$$J_{\text{пр}} = \gamma_a E,$$

где γ_a — удельная активная проводимость диэлектрика на частоте ω .

Плотность общего тока J равна векторной сумме плотностей токов смещения и проводимости, как это изображено на векторной диаграмме на рис. 7.2. В идеальном диэлектрике (без потерь, при $\gamma_a = 0$), ток чисто реактивный и его плотность

$$J = J_{\text{см}} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon E.$$

При этом сдвиг по фазе между током и внешним электрическим полем равен 90° .

Однако у реальных диэлектриков, с γ_a , отличной от нуля, этот угол меньше 90° (угол φ на рис. 7.2). Для характеристики диэлектрических потерь в диэлектрике введен угол δ , ($\delta = 90^\circ - \varphi$), называемый углом диэлектрических потерь. Чем больше γ_a , тем больше угол δ , характеризующий степень отличия реального диэлектрика от идеального.

Тангенс этого угла

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

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

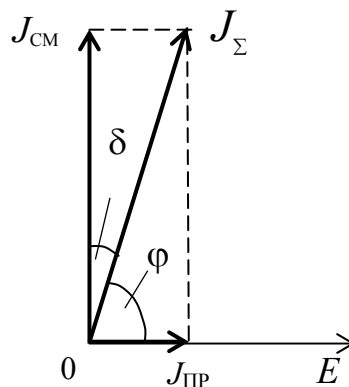


Рис. 7.2 — Векторная диаграмма плотностей тока в диэлектрике

На рис.7.3 приведена зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты f для полярного полимера — политрифторхлорэтилена при температуре 20°C .

7.2.2. Метод измерения частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков плоского конденсатора

В случае плоского конденсатора его емкость определяется соотношением

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (7.1)$$

где S — площадь обкладки; d — толщина диэлектрика.

С достаточной для практики точностью можно допустить, что относитель-

ная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_B = 1$.

Тогда, используя выражения (7.1), по размерам обкладок конденсатора и расстоянию между ними, можно рассчитать емкость конденсатора с воздушным диэлектриком, полагая $\epsilon = \epsilon_B = 1$. Емкость конденсатора с диэлектриком из исследуемого материала измеряется с помощью прибора Е 4- 5А.

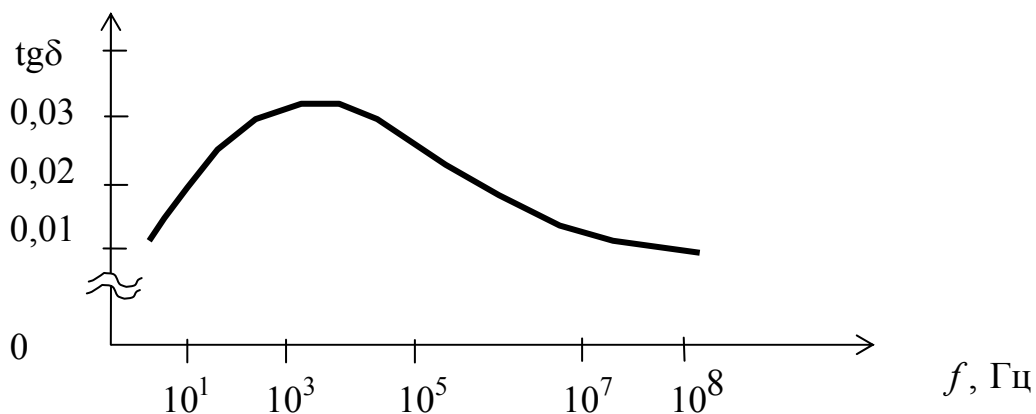


Рис. 7.3 — Зависимость тангенса угла потерь
политрифторхлорэтилена от частоты

Формула для расчета емкости C_d конденсатора с исследуемым диэлектриком при его параллельном подключении к конденсатору, постоянно включенному в контур имеет вид:

$$C_d = C_{\Sigma} - C_k, \quad (7.2)$$

где C_{Σ} — суммарная емкость контура; C_k — собственная емкость контура.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика вычисляется по формуле:

$$\epsilon = \frac{C_d}{C_B}, \quad (7.3)$$

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

7.2.3. Метод измерения частотных характеристик 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. 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 из-

менение ε в диапазоне частот можно выявить путем обработки измерений по следующей формуле

$$\varepsilon^* = \frac{C_i}{C_{fmin}} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{fmin}}, \quad (7.4)$$

где ε^* — нормированное значение диэлектрической проницаемости на частоте измерения; C_i — значение емкости конденсатора на частоте измерения; C_{fmin} — значение емкости конденсатора на минимальной частоте рабочего диапазона; ε_i — значение диэлектрической проницаемости на частоте измерения; ε_{min} — значение диэлектрической проницаемости на минимальной частоте рабочего диапазона.

Расчет $\text{tg}\delta$ проводится по формуле

$$\text{tg}\delta = \frac{C_k(Q_1 - Q_2)}{Q_1 Q_2 C_d}, \quad (7.5)$$

где C_k и C_d — в пикофарадах; Q_1 — добротность измерительного контура до подключения конденсатора с исследуемым диэлектриком; Q_2 — добротность измерительного контура после подключения конденсатора с исследуемым диэлектриком.

Значения Q_1 и Q_2 снимаются по стрелочному индикатору прибора Е 4- 5А.

7.3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки приведена на рис.7.4. На рис. 7.5 приведена структурная схема прибора Е4-5А. Генератор 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. Прибор позволяет непосредственно измерять эффективную добротность катушек индуктивности. Кроме того, путем косвенных измерений прибором Е4 - 5А можно измерять величину емкости и тангенса угла потерь диэлектрика внешнего конденсатора, а также индуктивность катушек индуктивности [7]. 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.

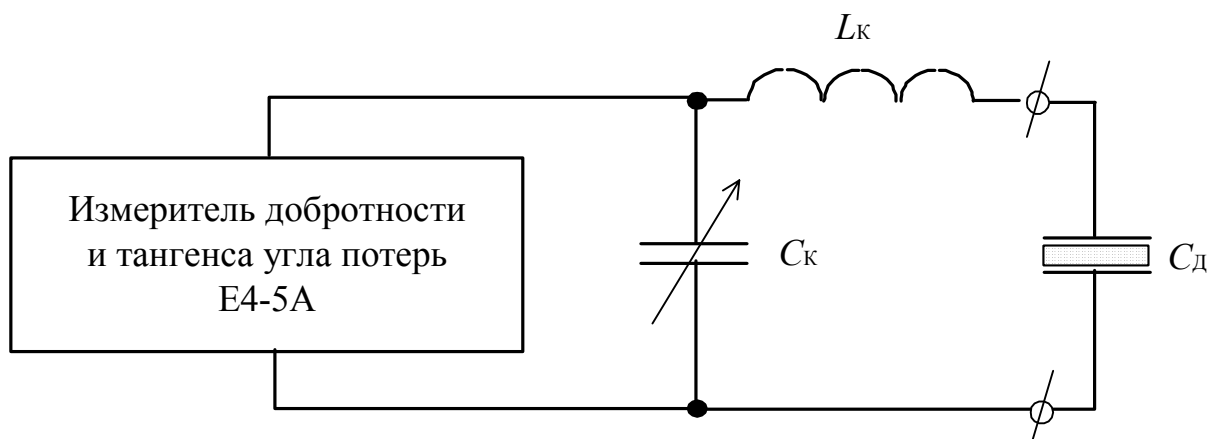


Рис. 7.4 — Схема лабораторного макета для исследования частотной зависимости ϵ и $\operatorname{tg} \delta$

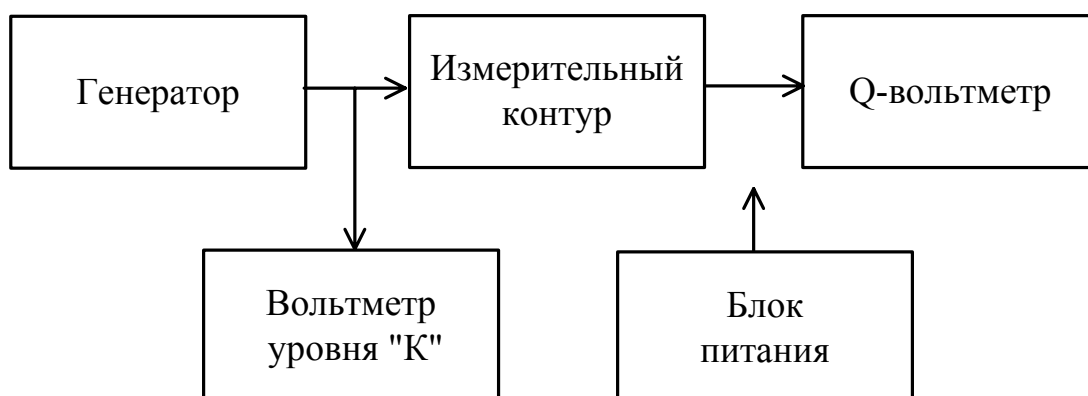


Рис. 7.5 — Структурная схема прибора E4 - 5A

7.4. Порядок выполнения лабораторной работы

7.4.1. Получить исходные данные индивидуальных заданий.

Каждый студент получает индивидуальное задание.

В таблице 7.1 приведены варианты индивидуальных заданий по исследованию плоского конденсатора. Вариант задания соответствует предпоследней цифре зачетной книжки.

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

В таблице 7.2 приведены варианты индивидуальных заданий по исследованию неплоского конденсатора. Вариант задания соответствует последней цифре зачетной книжки.

Таблица 7.1 — Варианты индивидуальных заданий по исследованию
плоского конденсатора

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

Таблица 7.2 — Варианты индивидуальных заданий по исследованию
неплоского конденсатора

Вариант задания	Тип конденсатора
1	К10-7В-100пФ
2	К10-78-220Пф
3	К77-1-100пФ
4	КД-1-270пФ
5	КСО-1-470пФ
6	СГМ-1-330пФ
7	КТК-1-150пФ
8	КТК-1-220пФ
9	КТ4-1-180пФ
0	КМ-6-П33-270 пФ

7.4.2. Порядок выполнения работы

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

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

7.4.2.3. К клеммам " L_x " прибора подключить соответствующую требуемому диапазону f образцовую катушку индуктивности.

7.4.2.4. Исследуемый конденсатор с емкостью C_d подключить к клеммам параллельно.

7.4.2.5. Контур прибора настроить в резонанс на минимальной частоте f_{min} и определить значения резонансной ёмкости $C_{\Sigma} = C_k + C_d$ и добротности Q_2 .

7.4.2.6. Исследуемый конденсатор с емкостью C_d отключить от прибора.

Контур вторично настроить в резонанс на ту же частоту путём изменения ёмкости измерительного конденсатора C_K и определить величину C_K по шкале, закрепленной на оси этого конденсатора. Снять по стрелочному индикатору показания добротности Q_1 измерительного контура.

Измерения на других частотах производить аналогично.

7.4.2.7. Результаты измерений занести в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 — Экспериментальные и расчетные данные
для плоского конденсатора

f , МГц	15	20	25	26	30	43	60	73	75	100	125	130	145
C_Σ , пФ													
C_K , 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.

7.4.2.8. Используя данные варианта индивидуального задания рассчитать по формуле (7.1) емкость конденсатора с воздушным диэлектриком C_B .

7.4.2.9. Используя результаты измерения емкости конденсатора контура (C_Σ , C_K), рассчитать емкость исследуемого конденсатора по формуле (7.2), и относительную диэлектрическую проницаемость ϵ диэлектрика по формуле (7.3).

7.4.2.10. По формуле (7.5) рассчитать тангенс угла потерь $\text{tg } \delta$ диэлектрика в исследуемом конденсаторе.

7.4.2.11. Результаты расчета на рекомендуемых частотах занести в таблицу 7.3.

7.4.2.12. Провести исследования свойств диэлектрика неплоского конденсатора по пунктам 7.4.2.1...7.4.2.12.

7.4.2.13. Результаты измерения занести в таблицу 7.4.

7.4.2.14. Рассчитать по формулам (7.4), (7.5) ϵ^* , $\text{tg } \delta$ и занести расчетные данные в таблицу 7.4.

7.4.2.14. Выключить прибор.

7.4.2.15. Построить графики частотных зависимостей $\epsilon = f(f)$, $\text{tg} \delta = f(f)$ для плоского конденсатора.

7.4.2.16. Построить графики частотных зависимостей $\epsilon^* = f(f)$, $\text{tg} \delta = f(f)$ для неплоского конденсатора.

Таблица 7.4 — Экспериментальные и расчетные данные
для неплоского конденсатора

f , МГц	15	20	25	26	30	43	60	73	75	100	125	130	145
$C1$, пФ													
$C2$, пФ													
$Q1$													
$Q2$													
ϵ^*													
$\text{tg} \delta$													

7.5. Порядок оформления отчета

7.5.1. Оформить титульный лист по установленному образцу.

7.5.2. Сформулировать цель работы.

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

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

7.5.5. Описать основные метрологические характеристики приборов, входящих в лабораторный макет.

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

7.5.7. Сформулировать выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

7.6. Содержание выводов

7.6.1. Анализ результатов теоретических исследований.

7.6.2. Анализ результатов экспериментальных исследований.

7.6.3. Сравнительный анализ теоретического и экспериментального исследований и объяснение причин расхождения результатов эксперимента с теорией.

7.7. Порядок защиты отчета

7.7.1. Представить преподавателю оформленный отчет и протокол экспериментальных исследований.

7.7.2. Получить вопросы от преподавателя.

7.7.3. Сформулировать в устной (письменной форме) ответы на поставленные вопросы.

7.7.4. Получить задание на следующую лабораторную работу.

7.8. Контрольные вопросы

7.8.1. Вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы

7.8.1.2. Как диэлектрики классифицируются по виду поляризации?

7.8.1.2. Как количественно определяется интенсивность поляризации?

7.8.1.3. Какие существуют виды поляризации диэлектриков?

7.8.1.4. От чего зависит диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков?

7.8.1.5. Как объяснить зависимость диэлектрической проницаемости полярных и неполярных диэлектриков от частоты?

7.8.1.6. Какие вы знаете основные свойства и области применения исследуемого материала?

7.8.1.7. Что такое диэлектрические потери в диэлектрике ?

7.8.1.8. Как выглядит векторная диаграмма и эквивалентная схема диэлектрика с потерями для последовательной схемы замещения?

7.8.1.9. Как выглядит векторная диаграмма и эквивалентная схема диэлектрика с потерями для параллельной схемы замещения?

7.8.1.10. Какие виды потерь существуют в диэлектриках ?

7.8.2. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

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

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

7.8.2.3. От чего зависит точность измерения добротности контура?

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

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

7.8.2.6. Как влияет на результат измерения емкости конденсатора с иссле-

дуемым диэлектриком рабочая частота измерителя Е4-5А?

7.8.2.7. Почему в некоторых точках рабочего диапазона частот измерителя Е4 - 5А невозможно добиться резонанса контура?

7.8.2.8. Чем определяется точность измерения емкости в данном измерителе?

7.8.2.9. Какие недостатки свойственны данному измерителю?

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

7.8.2.11. 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. шк., 1980. — 406 с.
2. Тареев Б.М. Электрорадиоматериалы/ Б.М. Тареев. — М.: Высш. шк, 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. Техническое описание и инструкция по эксплуатации на измеритель добротности Е4 - 5А.
6. Подлипенский В.С. Электромагнитная техника/ В.С. Подлипенский. — К.: Вища школа, 1984. — 224 с.
7. Лавриненко А.Н. Справочник по полупроводниковым приборам/ А.Н. Лавриненко. — М.: Высш. шк., 1987. — 470 с.

Заказ № _____ от « ____ » _____ 2007. Тираж _____ экз.