

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

Практикум

Казань 2024

УДК 621.311

ББК 30.3

С 91

Структура и свойства материалов электроники: лабораторный практикум / Бунтин А.Е.– Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2024. – 197 с.

В лабораторном практикуме представлено 16 лабораторных работ по электротехническому материаловедению, посвященных исследованию свойств проводников, полупроводников, диэлектриков и магнитных материалов.

Лабораторный практикум предназначен для студентов, изучающих дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов», «структура и свойства материалов электроники» по программе бакалавриата направлений подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение – наука, изучающая причинно–следственную связь между строением и свойствами электротехнических материалов и закономерности их изменения под действием внешних факторов.

Целью настоящего лабораторного практикума является формирование у студентов современных знаний в области электротехнических материалов и навыков по их исследованию.

Задачами настоящего пособия являются:

– установление причинно–следственной связи между химическим составом, строением и свойствами электротехнических материалов – проводников, полупроводников, диэлектриков и магнитных материалов;

– установление физико-химических закономерностей изменения свойств электротехнических материалов под действием физических (температура, напряженность электрического поля и др.) факторов;

– дать представления о конкретных видах проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, их свойствах и областях применения как компонентов электроэнергетического и электротехнического оборудования.

Данное пособие призвано сформировать у студентов способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач.

В главе 1 рассматриваются физико-химические основы процессов, протекающих под действием внешних факторов (электромагнитного поля, температуры др.) в проводниковых и полупроводниковых материалах. Представлено шесть лабораторных работ по исследованию этих материалов.

В главе 2 приведены физико-химические основы процессов, протекающих под действием внешних факторов в диэлектрических материалах. Представлено шесть лабораторных работ по исследованию свойств диэлектриков.

В главе 3 представлены физико-химические основы процессов, протекающих в ферромагнитных материалах, и четыре лабораторные работы по этому классу материалов.

В пособии также приведены методики расчетов электростатического и электромагнитного полей некоторых электротехнических устройств с применением компьютерной программы «*Elcut*».

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ

ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Металлические части лабораторного комплекта могут, при повреждении основной изоляции, оказаться под опасным для жизни человека напряжением. В связи с чем **запрещается** самостоятельно **снимать** кожухи модулей комплекта и производить электромонтажные работы.

2. Подавать питание на комплект следует только после проверки правильности собранной схемы преподавателем или лаборантом.

3. При выполнении лабораторных работ **запрещается** производить какие-либо действия на комплекте без допуска к выполнению данной работы.

4. **Запрещается** подавать питание на комплект несоединенный с контуром рабочего заземления помещения лаборатории.

5. **Запрещается** подключать к комплекту оборудование непредусмотренное техническим описанием и методическими указаниями.

6. **Запрещается** производить какие-либо переключения на комплекте при включенном питании (кроме предусмотренных в методических указаниях к выполнению лабораторных работ).

ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА БЕЗОПАСНОСТЬ ОБУЧАЮЩИХСЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЮ СТЕНДА НЕСЕТ ЛИЦО ОТВЕТСТВЕННОЕ ЗА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ!

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Вход в лабораторию допускается только по разрешению преподавателя.

2. На первом занятии преподаватель выполняет следующие действия:

- делит группу на подгруппы по 3 - 4 человека;
- закрепляет каждую подгруппу за рабочим местом (столом) в лаборатории, которое не меняется в течение всего семестра;
- проводит инструктаж по технике безопасности;
- напоминает студентам о необходимости бережного отношения к лаборатории и о материальной ответственности каждого из них за сохранность оборудования и обстановки лаборатории.

В завершение инструктажа студенты расписываются в лабораторном журнале проведения инструктажа по технике безопасности.

3. При ознакомлении с рабочим местом следует проверить наличие приборов и соединительных проводников (в случае отсутствия какого-либо

комплектующего элемента типового комплекта необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу).

4. К проведению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие проверку подготовки к выполнению лабораторной работы в виде коллоквиума (теста).

5. Перед сборкой цепи надо обязательно проверить, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены.

6. Собрав электрическую (монтажную) схему, необходимо пригласить преподавателя для её проверки, и только после этого начинать выполнение работы.

7. Если во время проведения опыта замечены какие-либо неисправности оборудования, следует немедленно сообщить об этом преподавателю или техническому персоналу.

8. После выполнения измерений, полученные результаты предоставляются преподавателю и только после проверки им таблицы с экспериментальными данными электрическую схему можно разбирать. Перед разборкой схемы необходимо выключить источники питания.

9. По завершению занятий рабочее место приводится в порядок.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. К выполнению работы необходимо подготовиться до начала занятия в лаборатории. Кроме описания работы в данном учебном пособии, используйте рекомендованную литературу и конспект лекций. При подготовке полезно продумывать ответы на контрольные вопросы. К выполнению работы допускаются только подготовленные студенты.

2. При проведении эксперимента результаты измерений и расчетов записывайте четко и кратко в заранее подготовленные таблицы.

3. При обработке результатов измерений:

а) помните, что точность расчетов не может превышать точности результатов прямых измерений;

б) результаты измерений записывайте в виде доверительного интервала.

4. Отчеты по лабораторным работам оформляются согласно требованиям единого стандарта конструкторской документации (ЕСКД) и должны включать в себя следующие пункты:

– дату выполнения лабораторной работы, список студентов, выполнявших данную лабораторную работу;

– черновик с измерениями, выполненными в лаборатории, подписанный

преподавателем;

- название лабораторной работы и её цель;
- используемое оборудование;
- ход выполнения лабораторной работы;
- исходные данные (схемы, значения параметров, типы устройств и элементов),
- таблицы измерений и расчётных данных;
- краткие выводы по каждой работе, анализ полученных данных;
- обобщающий вывод по всей лабораторной работе - краткое заключение о результатах работы, согласующееся с ее целью.

Вывод включает в себя:

- а) основные численные результаты работы;
- б) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15 % обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента;
- в) анализ результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теоретическими;
 - сравнение полученных экспериментальных значений с табличными (с обязательными ссылками на источники информации);
 - сопоставление расхождений экспериментальных и табличных данных с точностью измерений;
 - список литературы.

К выполнению следующей лабораторной работы без сдачи отчета о предыдущей студент не допускается.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Перед началом лабораторной работы необходимо тщательно изучить её описание и подробно ознакомиться со схемой соединения лабораторного оборудования.

2. Начертить принципиальную схему лабораторной работы в тетради. Продумать, каким образом производить коммутацию между элементами схемы, разобраться в их назначении, уяснить работу схемы и ее элементов.

3. Вычертить монтажную схему с указанием мест подключения перемычек или составить таблицу соединений, согласно которой будет производиться коммутация элементов.

4. Сборку схемы производить только при отключенной питающей сети! После окончания сборки тщательно проверить правильность соединений.

Убедиться в отсутствии коротких замыканий в монтаже схемы и обратиться к преподавателю за разрешением на проведение лабораторной работы.

5. Приступая к работе, следует установить все тумблеры в нижнее положение, соответствующее их отключенному состоянию, рукоятки регуляторов - в минимальное положение.

6. При проведении работы необходимо следить за тем, чтобы величины измеряемых параметров не выходили за пределы диапазона измерения приборов.

1. ПРОВОДНИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКИ

Теоретическая часть

Все вещества по электрическим свойствам разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники. К проводникам относятся металлы, обладающие малым удельным сопротивлением – менее 10^{-6} Ом·м, Удельное сопротивление полупроводников обычно лежит в пределах $10^6 \dots 10^{14}$ Ом·м. Материалы, у которых величина удельного сопротивления больше 10^{14} Ом·м, считаются диэлектриками. Полупроводниками является ряд элементов III-VI групп таблицы элементов Д.И. Менделеева (В, Ge, Si, As, Те ...), а также большое число химических соединений (GaAs, GaP, ZnS, SiC ...). В зависимости от внешних условий (температуры, давления) одно и то же вещество может проявлять разные электрические свойства. Например, германий при температуре жидкого азота 77К – диэлектрик, при комнатной температуре - полупроводник, а в жидком виде – проводник.

Зонная теория даёт более обоснованную классификацию веществ. Согласно современной зонной теории твёрдых тел свободные электроны внутри твёрдого тела так же, как и в атомах, могут иметь только некоторые фиксированные значения энергии, т.е. энергия электронов квантуется. Разрешённые уровни энергии при объединении атомов в кристалл образуют совокупность близко расположенных уровней – «разрешённые» зоны, разделённые «запрещёнными» зонами. Каждая разрешённая зона сохраняет наименование уровней, из которых она образована, например, $1s$, $2s$, $2p$ и так далее.

Зона, образованная из энергетических уровней самых удалённых от ядра атома валентных электронов, называется валентной зоной. Это самая верхняя из зон, заселённых электронами при температуре $T = 0\text{K}$ ($- 273\text{ }^\circ\text{C}$). Следующая, «пустая» разрешённая энергетическая зона, называется в зоной проводимости. Энергетические зоны валентных электронов для металлов, диэлектриков и полупроводников и их заполнение при $T = 0\text{K}$ представлены на рис. 1.1. Клеточками обозначены занятые уровни энергии. Горизонтальные линии - свободные от электронов разрешённые уровни энергии.

Верхние разрешённые зоны разных веществ могут быть заполнены электронами частично или полностью, а также могут быть совершенно свободными от электронов.

Энергетическая зона считается заполненной, если все уровни зоны заняты электронами. Такими являются валентные зоны полупроводников и диэлектриков при абсолютном нуле температуры (рис. 1.1). При этом согласно принципу Паули, на одном энергетическом уровне может

находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины.

У металлов при $T = 0\text{K}$ валентная зона заполнена частично (рис. 1.1). Например, в кристалле щелочного металла натрия ${}_{11}\text{Na}$ в валентной зоне $3s$ электронами заполнена только половина уровней.

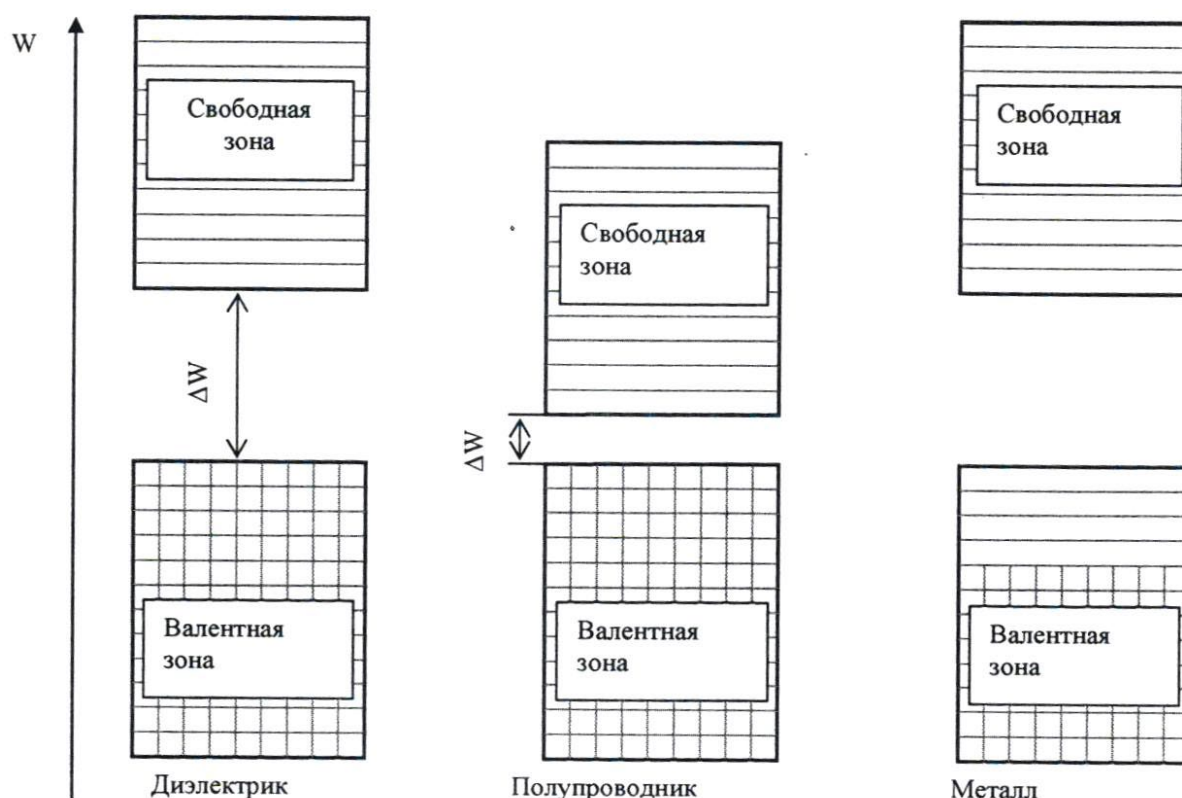


Рис. 1.1. Энергетические уровни различных типов материалов

Ширина запрещённой зоны между зоной проводимости и валентной зоной при абсолютном нуле температуры называется энергией активации ΔW (рис. 1.1). Энергия активации численно равна работе, которую необходимо совершить электрону при его переходе из валентной зоны в зону проводимости. Энергия активации измеряется в электрон-вольтах (эВ) и составляет у проводников $0 \dots 0,1$ эВ, у полупроводников $0,1 \dots 2$ эВ, у диэлектриков больше 4 эВ.

Чтобы в веществе при наложении электрического поля возник электрический ток, электроны должны начать двигаться направленно. Возникновение тока сопровождается увеличением энергии каждого электрона (к энергии теплового движения добавляется энергия направленного движения). В металлах электрон, получив за счет электрического поля

дополнительную энергию на пути свободного пробега, переходит на более высокий уровень энергии в валентной зоне. Освободившийся уровень занимает электрон, расположенный ниже на «энергетической лестнице» и т.д. - возникает электрический ток.

В диэлектриках и полупроводниках электрон не может взять энергию от поля, поскольку, приняв её, он должен занять более высокий уровень, который оказывается либо запрещённым, либо занятым. Поэтому при абсолютном нуле и полупроводники, и диэлектрики являются изоляторами, т.е. не пропускают электрический ток.

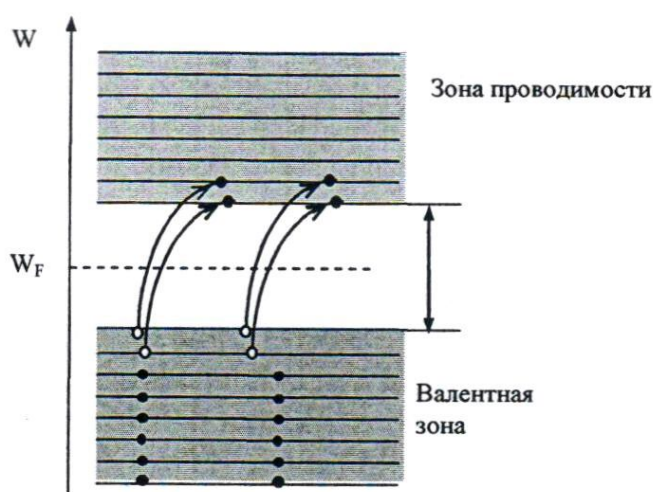


Рис. 1.2. Зоны энергетических уровней полупроводников

При повышении температуры энергия теплового движения электронов увеличивается (их средняя энергия теплового движения $\langle \epsilon \rangle = 1,5kT$), и уже при температурах порядка 100 К некоторые электроны в полупроводниках за счет этой энергии могут перейти с верхних уровней заполненной валентной зоны в зону проводимости (рис. 1.2). В диэлектриках вероятность такого перехода очень мала, так как у них ширина запрещённой зоны значительно больше, чем у полупроводников. Следовательно, в полупроводниках те валентные электроны, которые перешли в зону проводимости, получают возможность направленного движения под действием электрического поля – возникает электронная проводимость. В валентной зоне на верхних уровнях, где были электроны, перешедшие в зону проводимости, появляются свободные места - дырки, и оставшиеся в валентной зоне электроны тоже получают способность воспринимать энергию направленного движения от электрического поля - возникает дырочная проводимость.

В соответствии с распределением Больцмана концентрация n_e свободных электронов (перешедших в зону проводимости) меньше

концентрации n_0 электронов, оставшихся в валентной зоне, поскольку потенциальная энергия свободных электронов на ΔW больше потенциальной энергии электронов, связанных с атомом:

$$n_e = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{kT}} \quad (1.1)$$

где $e = 2,718$; T - абсолютная температура, К; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана, Дж/К

В рассмотренном нами полупроводнике концентрация подвижных дырок равна концентрации свободных электронов. Такой полупроводник называется электронно-дырочным, а его проводимость – собственной проводимостью. Собственной проводимостью обладают очень чистые элементы 4-й группы таблицы Менделеева (германий, кремний).

При наличии в германии или кремнии небольшого количества атомов примесей с другой валентностью баланс между концентрацией свободных электронов и дырок нарушается, и образуются полупроводники с преимущественным типом проводимости. Так, если примесью является элемент 5-й группы таблицы Менделеева (сурьма Sb , мышьяк As), то образуется избыток свободных электронов, и получается полупроводник с электронной проводимостью (n -типа). Если в качестве примеси присутствуют атомы 3-й группы (индий In , бор B), то образуется недостаток свободных электронов, и получается полупроводник с дырочной проводимостью (p -типа). Энергия активации примесных полупроводников значительно меньше ширины запрещённой зоны чистого полупроводника.

При отрыве электрона в атоме полупроводника образуется свободное место – дырка. Если теперь в полупроводнике создать электрическое поле, то дырка может переместиться в направлении силовых линий, если это свободное место займёт дрейфующий против поля электрон. Поэтому дырка подобна положительному заряду, равному по величине заряду электрона. Значит при затрате энергии ΔW образуются два свободных заряда, на создание одного носителя тока затрачивается половина энергии ΔW , и концентрация всех носителей тока будет определяться по формуле:

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (1.2)$$

От концентрации свободных зарядов зависит удельная проводимость σ ,

обратная удельному сопротивлению ρ :

$$\sigma = 1/\rho \quad (1.3)$$

Удельная проводимость металлов не зависит от напряженности электрического поля, значение которой может изменяться в довольно широких пределах, что полностью соответствует закону Ома (дифференциальная форма записи):

$$j = \sigma E \quad (1.4)$$

где j – плотность тока, А/м²; E – напряженность электрического поля, В/м.

Сопротивление проводника простейшим способом определяют, используя закон Ома для участка электрической цепи. Для этого нужно измерить вольтметром разность потенциалов U на концах проводника и амперметром силу тока I в проводнике и поделить одно на другое. Этот метод измерений (по току и напряжению) называют техническим. Однако при таком способе измерения вносятся систематические ошибки, величина которых зависит от сопротивлений измерительных приборов и величины измеряемых сопротивлений.

Действительно, при включении приборов по схеме на рис. 1.3 показания вольтметра соответствуют напряжению на сопротивлении ($U_V = U$), но показания амперметра соответствуют не току через сопротивление, а сумме токов через проводник и вольтметр:

$$I_A = I_V + I \quad (1.5)$$

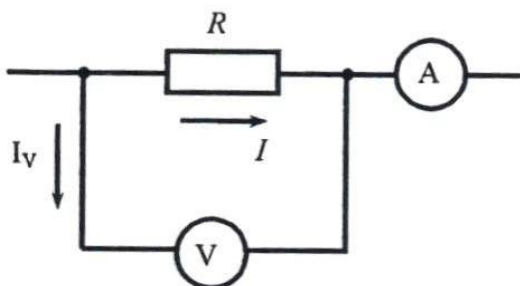


Рис. 1.3. Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

При включении по схеме на рис. 1.4 показания амперметра

соответствуют току через сопротивление ($I_A = I$), но вольтметр показывает не напряжение на сопротивлении, а суммарное напряжение на сопротивлении и амперметре:

$$U_v = IR + IR_A \quad (1.6)$$

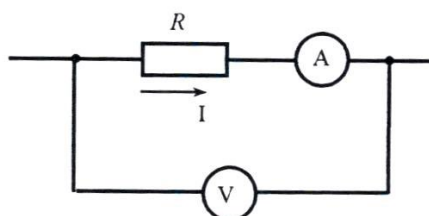


Рис. 1.4. Схема электрическая принципиальная измерения сопротивления вольтметром и амперметром

Из выражений (1.5) и (1.6) следует, что для уменьшения погрешностей, вносимых при подключении приборов, сопротивление амперметра должно быть малым, а сопротивление вольтметра - большим. Данный метод лежит в основе работы омметров. Прибор прикладывает известную разность потенциалов к измеряемому сопротивлению и измеряет протекающий ток.

Мостовой метод измерения сопротивления позволяет избавиться от ошибок, вносимых электроизмерительными приборами, так как здесь эти приборы используются не для измерения силы тока и напряжения, идущих в дальнейшие расчеты, а только в качестве чувствительных индикаторов, работающих либо в режиме постоянного показания, либо, чаще, в режиме отсутствия тока (нуль-метод).

Активное сопротивление зависит от формы и размеров проводника:

$$R = \int_0^l \rho \frac{dl}{S} \quad (1.11)$$

Для однородного проводника с поперечным сечением S и длиной l

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.12)$$

Удельное электрическое сопротивление $\rho = RS/l$ является характеристикой материала проводника.

Полагая электрическое поле внутри проводника однородным, выразим

напряжение U через напряжённость E и длину проводника:

$$U = El \quad (1.13)$$

Закон Ома в дифференциальной форме записи:

$$j = \sigma E \quad (1.14)$$

где $j = I/S$ - плотность тока в проводнике.

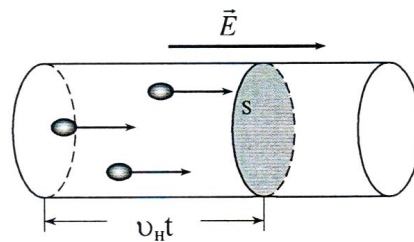


Рис. 1.5. Движение электронов через сечение проводника

С другой стороны, плотность тока может быть выражена через концентрацию n свободных зарядов и скорость v_H их направленного движения, которая определяется напряжённостью электрического поля внутри проводника.

Пусть каждый носитель имеет заряд e , тогда весь заряд q , перенесённый через поперечное сечение проводника за время t , будет равен Ne , где N - число зарядов, прошедших за это время сквозь выделенное сечение (рис. 1.5). Если средняя скорость направленного движения v_H , то за время t сечение S пересекут лишь те носители, которые находились не дальше, чем на расстоянии $v_H t$ от него. Число носителей N пропорционально их концентрации n и объёму S элемента проводника:

$$N = n v_H t S \quad (1.15)$$

Тогда перенесённый заряд определится по формуле:

$$q = eN = en v_H t S. \quad (1.16)$$

Сила тока в проводнике численно равна заряду, протекающему за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t} = en v_H S \quad (1.17)$$

Из определения плотности тока $j = I/S$ и уравнения (1.17) получим:

$$j = ne v_H \quad (1.18)$$

Из уравнений (1.14) и (1.18) следует, что средняя скорость направленного движения носителей тока прямо пропорциональна напряжённости электрического поля E :

$$v_H = \frac{\sigma E}{ne} = bE \quad (1.19)$$

Коэффициент пропорциональности $b = \frac{\sigma E}{ne}$ называют подвижностью носителей зарядов. Подвижность зависит от типа носителей (у электронов она существенно выше, чем у дырок) и от их взаимодействия с атомами вещества.

Приравнивая правые части формул (1.18) и (1.14) и подставляя v_H (1.19) получаем зависимость удельной проводимости от характеристик носителей тока:

$$\sigma = neb \quad (1.20)$$

где n - концентрация носителей, e - заряд электрона, b - подвижность носителей.

В металлах (проводниках) концентрация носителей не зависит от температуры, а в полупроводниках и диэлектриках она с ростом температуры быстро увеличивается - это основное отличие проводника от полупроводника и диэлектрика.

Подвижность носителей с ростом температуры уменьшается, так как электроны чаще сталкиваются с ионами кристаллической решётки, амплитуда колебаний которых растёт с увеличением температуры. При постоянстве n это ведёт к уменьшению проводимости, и сопротивление проводников слабо увеличивается при повышении температуры:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (1.21)$$

где t - температура в градусах; R_0 - сопротивление проводника при 0°C , α - температурный коэффициент удельного сопротивления (ТКС).

Коэффициент α называют температурным коэффициентом удельного сопротивления. Он показывает относительное изменение первоначального сопротивления при нагревании его на один градус:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} \quad (1.22)$$

Для металлов значение α достаточно велико ($4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$), а у большинства сплавов - значительно меньше.

Из формулы следует, что для определения температурного коэффициента удельного сопротивления металла необходимо знать сопротивление металла R_0 при 0°C и R_t при некоторой температуре $t^\circ \text{C}$. График зависимости сопротивления от температуры представлен на рис. 1.6.

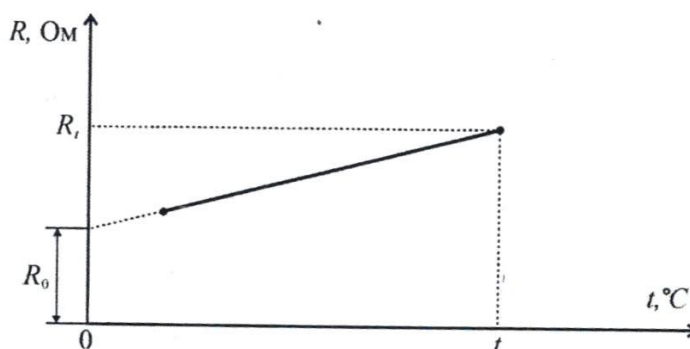


Рис. 1.6. График зависимости сопротивления от температуры

Согласно формуле (1.22) график имеет вид прямой линии, продолжение которой (экстраполяция) пересекает ось ординат в точке R_0 .

Для примесных полупроводников формулу зависимости сопротивления от температуры получаем следующим образом: используя формулы (1.3), (1.12) и (1.20) концентрация носителей $n = \frac{l_i}{nebR}$ подставляя выражение для n в формулу (1.2) и проведя несложные преобразования, окончательно зависимость сопротивления от температуры принимает следующий вид:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}} \quad (1.23)$$

причем эта зависимость экспоненциальная.

Прологарифмировав выражение (1.23) получим:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2kT} \cdot \frac{1}{T} \quad (1.24)$$

Зависимость $\ln R$ от $1/T$ является линейной, следовательно, и график зависимости $\ln R$ от обратной температуры $1/T$ будет представлять собой некоторую прямую, угловой коэффициент которой $\operatorname{tg} \alpha = \Delta W/2k$ пропорционален энергии активации. Следовательно, найдя из графика угловой коэффициент, можно вычислить энергию активации:

$$\Delta W = 2k \operatorname{tg} \alpha \quad (1.25)$$

где k - постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Полупроводниковые нелинейные резисторы - изделия электронной техники, основное свойство которых в отличие от линейных резисторов заключается в способности изменять свое электрическое сопротивление под действием управляющих факторов: температуры, напряжения, магнитного поля и др. Они имеют резко выраженную нелинейную вольтамперную характеристику и в зависимости от воздействующего фактора получили название терморезисторы, варисторы, магниторезисторы.

Терморезисторы (термисторы) - полупроводниковые резисторы с нелинейной вольтамперной характеристикой, основное свойство которых заключается в способности значительно изменять свое электрическое сопротивление при изменении их температуры.

Сопротивление термочувствительного элемента при нагревании может либо уменьшаться (терморезисторы с отрицательным ТКС), либо увеличиваться (терморезисторы с положительным ТКС - позисторы). Характер изменения сопротивления при этом аналогичен температурной зависимости удельного сопротивления полупроводникового материала, из которого изготовлен терморезистор.

Контактные явления и термо-ЭДС

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов. Это явление открыл итальянский физик А. Вольта в 1797 г. Согласно квантовой теории, основной причиной появления разности потенциалов на контакте является различная энергия Ферми у сопрягаемых металлов.

Пусть в изолированном состоянии электронный газ в металлах A и B характеризуется энергиями Ферми W_F^A и W_F^B отсчитываемыми от дна зоны

проводимости (рис. 1.7, а). Термодинамические работы выхода электронов равны соответственно κ_A и κ_B .

Кинетическая энергия электронов, находящихся на уровне Ферми, в различных металлах различна. Поэтому при контактировании материалов возникает более интенсивный переход электронов из области с большим значением энергии W_F в область, где энергия меньше, т. е. из металла B в металл A . Действительно, электроны стремятся занять состояние с минимальной энергией. Фактически переход электронов из металла B в металл A есть переход электронов в данной системе на более низкие энергетические уровни. В результате такого процесса металл B заряжается положительно, а металл A - отрицательно; между ними возникает разность потенциалов, препятствующая дальнейшему переходу носителей заряда. Равновесие наступит тогда, когда работа электрона по преодолению сил возникшего поля станет равной разности энергий электронов, переходящих через контакт (см. рис. 1.7, б):

$$eU = W_F^B - W_F^A$$

Таким образом, внутренняя контактная разность потенциалов определяется как разность энергий Ферми, отсчитываемых от дна зоны проводимости, для изолированных металлов A и B .

Наличие контактного поля обеспечивает равенство потоков электронов из одного металла в другой в состоянии равновесия. Так как скорости хаотического движения электронов весьма велики, равновесие устанавливается очень быстро - за время $\sim 10^{-16}$ с. В условиях установившегося равновесия уровень Ферми в обоих металлах должен быть одинаков: энергетические уровни в металле, зарядившемся отрицательно, поднимутся, а в металле, зарядившемся положительно, опустятся. Благодаря заряду областей выравнивание уровней может произойти при переходе небольшого количества электронов. Двойной электрический слой d , существующий в области контакта, очень тонок (порядка периода решетки) и не влияет на прохождение электрического тока через контакт. Так как энергия Ферми в металлах имеет значение порядка нескольких электрон-вольт, то контактная разность потенциалов между двумя металлами может составлять от десятых долей до нескольких вольт.

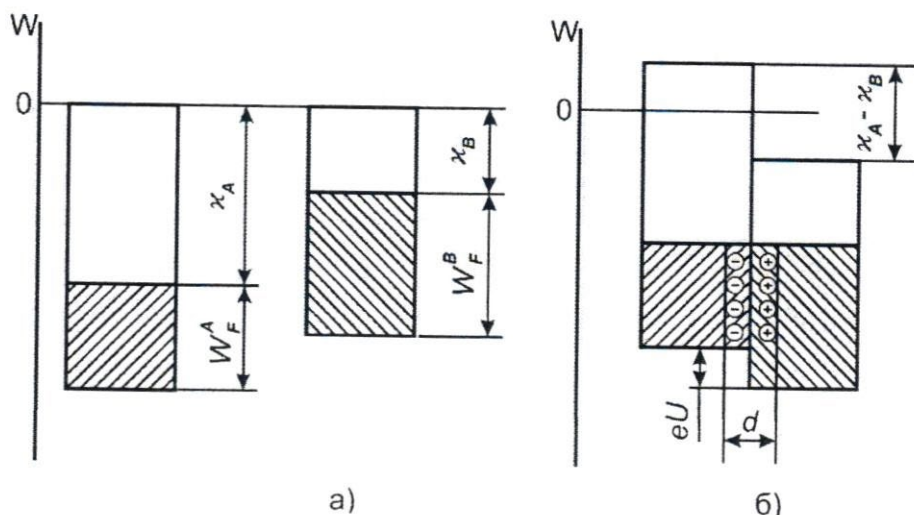


Рис. 1.7. Энергетические диаграммы: а) электронного газа в металлах A и B ; б) контакта металлов A и B

Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующих замкнутую цепь, называют термопарой (рис. 1.8).

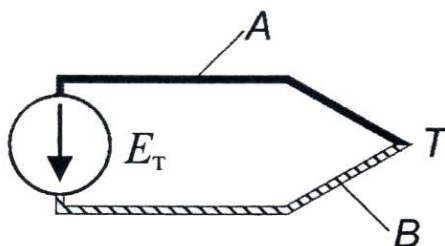


Рис. 1.8. Устройства термопары: A и B - проводники из различных металлов, T - спай.

При различной температуре контактов в замкнутой цепи возникает ток, называемый термоэлектрическим. Если цепь разорвать в произвольном месте, то на концах разомкнутой цепи появится разность потенциалов, называемая термоэлектродвижущей силой E_T ; По имени первооткрывателя это явление получило название эффекта Зеебека. Как показывает опыт, в относительно небольшом температурном интервале термо-ЭДС пропорциональна разности температур ($T_2 - T_1$) контактов (спаев):

$$E_T = \alpha_T(T_2 - T_1) \quad (1.26)$$

где α_T - относительная дифференциальная или удельная термо-ЭДС.

Значение α_T зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры. Термо-ЭДС в контуре складывается из трех составляющих. Первая из них обусловлена температурной зависимостью контактной разности потенциалов. В металлах с увеличением температуры уровень Ферми, хотя и слабо, но смещается вниз по энергетической шкале. Поэтому на холодном конце проводника он должен располагаться выше, чем на горячем. Следствием смещения уровня Ферми и является возникновение контактной составляющей термо-ЭДС.

Вторая составляющая термо-ЭДС обусловлена диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным. Средняя энергия электронов в металле, хотя и немного, но все же изменяется с температурой. Электроны, сосредоточенные на горячем конце, обладают несколько большей кинетической энергией и большей скоростью движения по сравнению с носителями холодного конца. Поэтому они в большем числе диффундируют в направлении температурного градиента, чем в обратном. Диффузионный поток, унося отрицательный заряд из горячего конца в холодный, создает между ними разность потенциалов.

Третья составляющая термо-ЭДС возникает в контуре вследствие увлечения электронов квантами тепловой энергии. Их поток также распространяется к холодному концу. Все составляющие термо-ЭДС определяются небольшой концентрацией электронов, расположенных на энергетических уровнях, близких к уровню Ферми, и отстоящих от него на величину порядка kT . Поэтому удельная термо-ЭДС для металлов оказывается очень небольшой. Квантовая теория дает следующее выражение для удельной термо-ЭДС одновалентных металлов:

$$\alpha_T \approx \pi^2 \frac{k}{e} \frac{kT}{W_F}$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана, Дж/К; $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ - заряд электрона, Кл.

При комнатной температуре отношение kT/W_F имеет значение порядка 10^{-3} . Поэтому α_T должна составлять несколько мкВ/К.

Существенно большее значение удельной термо-ЭДС можно получить при использовании металлических сплавов, которые имеют сложную зонную структуру.

Металлические термопары широко используются для точного измерения температуры. В процессе измерений необходимо стабилизировать температуру одного из спаев.

В реальных условиях полностью исключить перепады температуры практически невозможно. Поэтому в электрических цепях могут возникать паразитные термо-ЭДС. Для уменьшения их влияния в цепях электроизмерительных приборов следует подбирать контактирующие материалы с малыми значениями α_T .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Измерение удельного сопротивления проводников. Определение значения сопротивления проводников по результатам численного расчета электрического поля постоянных токов.

Цель работы: изучить методы измерения сопротивления проводников, измерить удельное сопротивление проводника, определение значения сопротивления проводников по результатам численного расчета электрического поля постоянных токов.

Оборудование: модуль «Измеритель RLC », модуль «Модуль питания и USB осциллограф», образцы исследуемых проводников, соединительные проводники с щупами, программа $ELCUT$.

Метод измерения

Косвенный метод измерения величины удельного сопротивления ρ (по результатам измерения сопротивления R проводника и геометрических размеров l и S проводника). Определение значения сопротивления проводников методом математического моделирования электрического поля постоянных токов.

Порядок выполнения лабораторной работы

Измерение удельного сопротивления проводников косвенным методом.

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Подать питание на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Подключить соединительные проводники с щупами к гнездам RLC -метра (рис. 1.9), включить RLC -метр, выбрать режим измерения сопротивления (кнопка $L/C/R$), о чем будет свидетельствовать символ « Ω » в нижнем правом углу дисплея. Один щуп зафиксировать в начале исследуемого проводника, другой щуп зафиксировать на расстоянии l от начала. Расстояние l изменять в диапазоне $0,1...0,5$ м шагом $0,1$ м, перемещая щуп вдоль натянутого проводника. Необходимо расположить проводник таким образом, чтобы он не

соприкасался сам с собой и другими металлическими предметами. Измеренное сопротивление R (с точностью до 3-х значащих цифр), длину участка l и диаметр проводника d занести в табл. 1.1.



Рис. 1.9. Измерение сопротивления проводника RLC -метром

3. Повторить измерения по п. 2 для других образцов проводников (по указанию преподавателя).

Таблица 1.1

№п.п.	Материал	l , м	d , мм	$R_{\text{изм}}$, Ом	$R_{\text{мм}}$, Ом
1					
2					
...					
5					

d , мм - диаметр проводника;

l , м - длина измеренного участка проводника;

$R_{\text{изм}}$, Ом - измеренное сопротивление участка проводника;

$R_{\text{мм}}$, Ом - сопротивление участка проводника определенное методом математического моделирования.

4. Для каждого исследуемого проводника построить график зависимости $R(l)$ используя данные табл. 1.1. При построении графика учесть, что прямая не будет проходить через точку $(0,0)$ так как RLC -метр и его щупы

имеют собственное сопротивление. Определить тангенс угла наклона графика $\operatorname{tg}\alpha$ как отношение приращения сопротивления к соответствующему приращению длины, значение занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Исследуемый проводник	$\operatorname{tg}\alpha$	d , мм	S , мм ²	ρ , Ом·м	γ , См/м
1					
2					
...					
n					

Площадь сечения измеряемого проводника:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

где d - диаметр исследуемого проводника (указан на ярлыке).

Из формулы (1.12) следует, что

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\rho}{S},$$

таким образом, удельное сопротивление проводника

$$\rho = \operatorname{tg}\alpha S,$$

а электропроводность

$$\gamma = 1/\rho.$$

Используя вышеприведенные формулы, рассчитать и занести в табл. 1.2 значения S , ρ и γ .

5. Используя данные табл. 1.2 сравнить полученные значения ρ со справочными, указать источник справочной информации.

6. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

Определение значения сопротивления медного проводника с заданными размерами методом математического моделирования.

7. Запустить программу «Elcut».

8. Создать задачу расчета электрического поля постоянных токов.

В строке меню выбрать пункты «Файл» → «Создать задачу...». В открывшемся окне «Создание задачи» ввести имя файла задачи и указать путь сохранения задачи. Нажать кнопку «далее».

В следующем окне «Создание задачи» (рис. 1.10) выбрать тип задачи - электрическое поле постоянных токов, единицы длины - миллиметры, класс модели - осесимметричная.

9. Построить геометрическую модель задачи.

Двойным щелчком левой кнопки мыши выбрать в окне задачи, находящейся в левой части главного окна «Elcut», пункт «геометрия: имя файла.mod» (рис. 1.11).

В открывшемся окне «Геометрическая модель» нарисовать участок проводника длиной l и радиусом r (по указанию преподавателя из табл. 1.1) как показано на рис. 1.12. Учесть, что в осесимметричной задаче задается половина геометрической фигуры вращения.

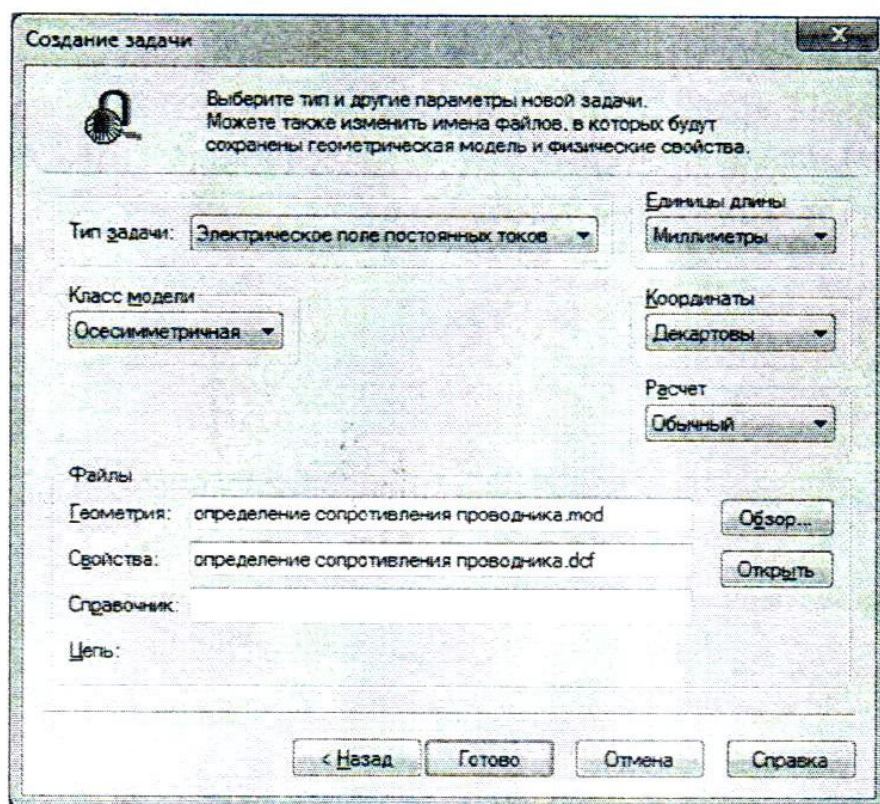


Рис. 1.10. Окно «Создание задачи»

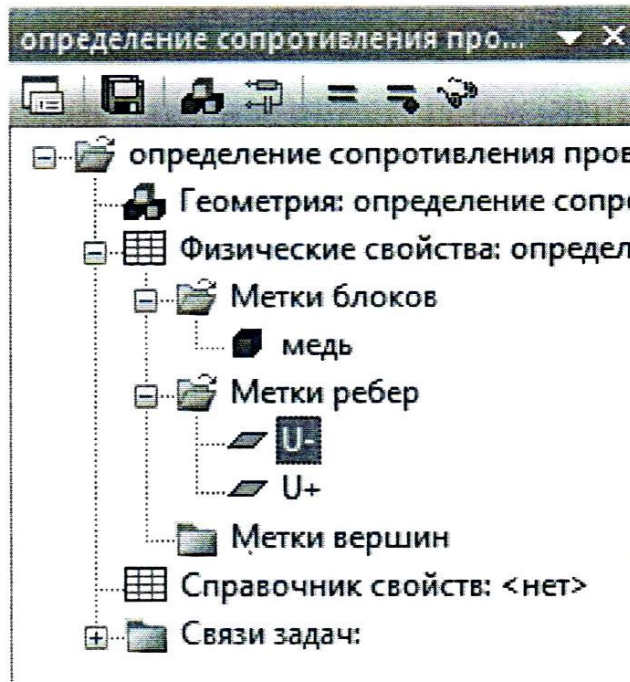


Рис. 1.11. Окно задачи

Создание и манипулирование геометрическими объектами приведено в руководстве пользователя «Elcut» (Глава 4. Описание геометрии задачи) и в справке программы «Elcut» → «Работа с геометрической моделью».

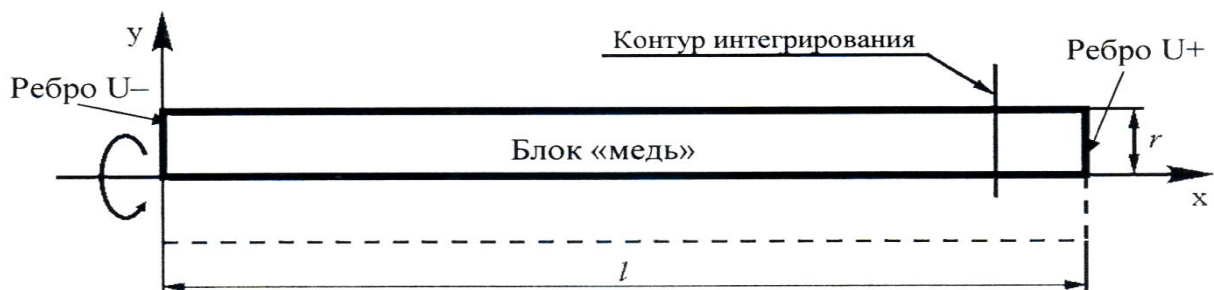


Рис. 1.12. Геометрическая модель проводника

10. Задать параметры задачи (задание свойств материалов и граничных условий).

В окне задачи (рис. 1.11) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «медь».

Открыть окно «Свойства метки блока – медь», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока

«медь». В открывшемся окне «Свойства метки блока - медь» (рис. 1.13) в числовом поле « $\gamma_z =$ » ввести значение удельной электропроводности меди γ , полученной экспериментально (табл. 1.2).

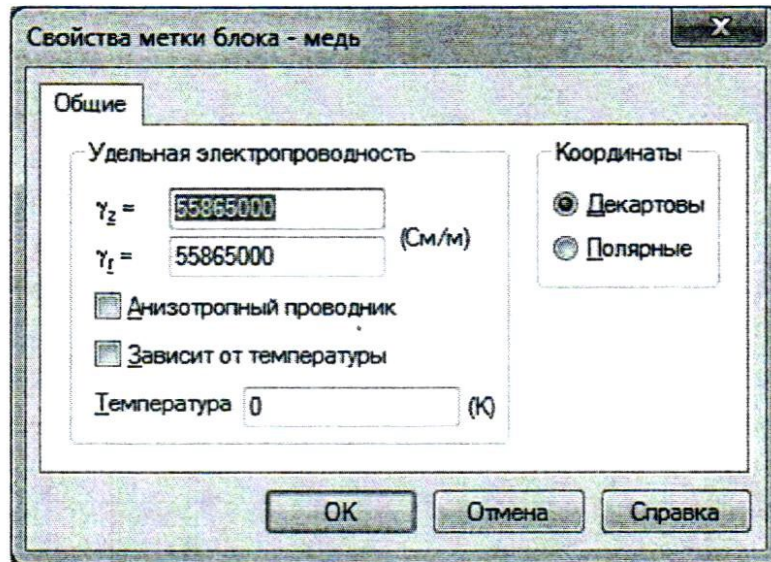


Рис. 1.13. Окно «Свойства метки блока»

В геометрической модели выбрать блок «медь» (рис. 1.12). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать Пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 1.14), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «медь».

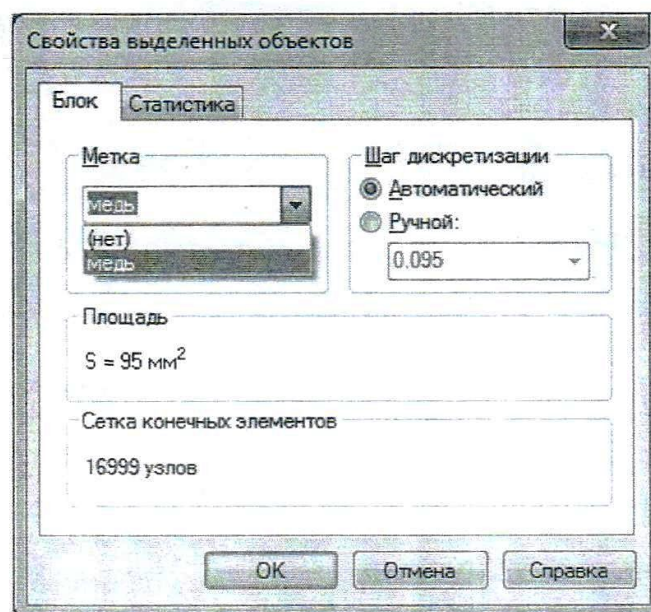


Рис. 1.14. Окно «Свойства выделенных объектов»

В окне задачи (рис. 1.11) выбрать пункт «Метки ребер». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке ребра «U+».

В окне задачи (рис. 1.11) выбрать пункт «Метки ребер». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке ребра «U-».

Открыть окно «Свойства метки ребра - U+», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра «U+». В открывшемся окне «Свойства метки ребра - U+» (рис. 1.15) включить флажок «Потенциал: $U = U_0$ » и в числовом поле « $U_0 =$ » ввести значение U_0 по указанию преподавателя.

Открыть окно «Свойства метки ребра - U-», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра «U-». В открывшемся окне «Свойства метки ребра - U-» включить флажок «потенциал: $U = U_0$ » и в числовом поле « $U_0 =$ » ввести значение U_0 по указанию преподавателя.

Задать граничные условия, для чего выбрать одно из граничных ребер, как показано на рис. 1.12. Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства» В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов», в выпадающем меню «Метка», выбрать метку «U+».

Выбрать противоположное граничное ребро, как показано на рис. 1.12. Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства» В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов», в выпадающем меню «Метка», выбрать метку «U-».

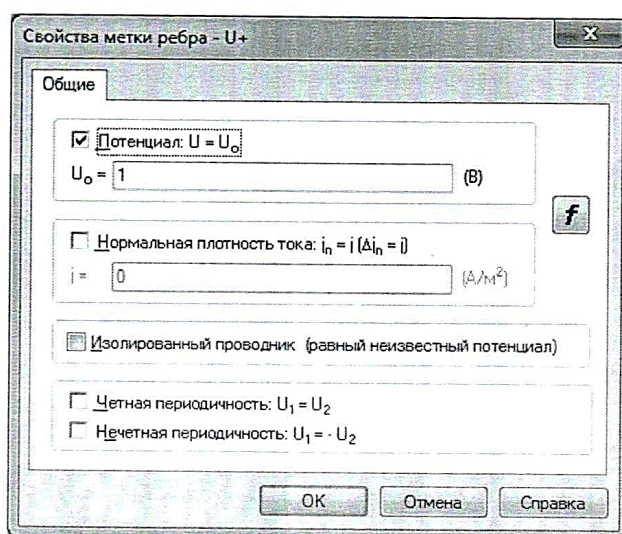


Рис. 1.15. Окно свойств метки ребра

Остальным ребрам, по умолчанию, присваивается однородное условие Неймана.

11. Решить задачу электрического поля постоянных токов.

На панели инструментов окна «Геометрическая модель» нажать кнопку «Построение сетки» (рис. 1.16).

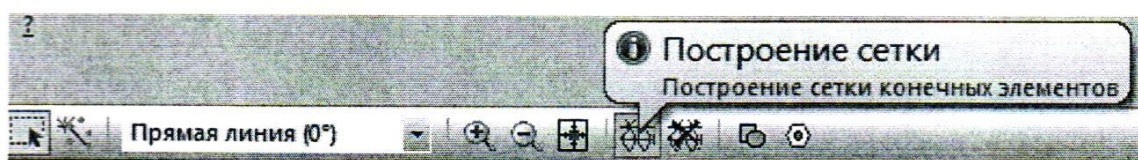


Рис. 1.16. Панель инструментов окна «Геометрическая модель»

После построения сетки конечных элементов в блоке «медь» геометрической модели, нажать кнопку «Решить» на панели инструментов окна задач (рис. 1.17) и подтвердить сохранение файлов решения.

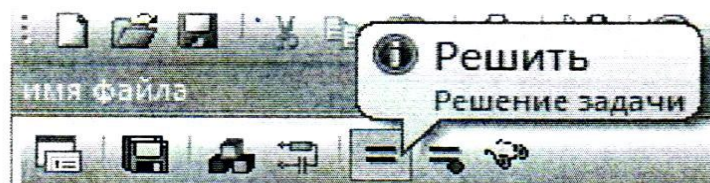


Рис. 1.17. Панель инструментов окна задач

12. Провести анализ результатов решения.

В открывшемся дополнительном окне «Результат расчета», которое представлено геометрией модели с изолиниями равного потенциала, задать контур интегрирования, как показано на рис. 1.12, нажав кнопку «Добавить к контуру» в заголовке окна «Результат расчета» (рис. 1.18).

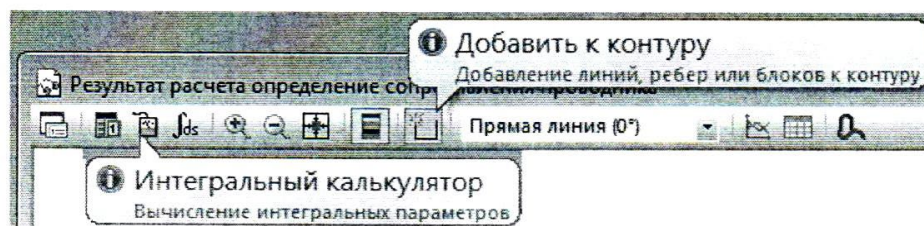


Рис. 1.18. Заголовок окна «Результат расчета»

Создание и манипулирование контурами приведено в руководства пользователя «*Elcut*» (Глава 8. Редактирование контуров) и в справке программы «*Elcut*» → «Работа с контуром».

Открыть окно «Калькулятор» (рис. 1.19) нажав кнопку «Интегральный калькулятор» в заголовке окна «Результат расчета» (рис. 1.18). В строке «Ток через поверхность» окна «Калькулятор» будет отображено значение суммарного тока I через поверхность, заданную контуром интегрирования.

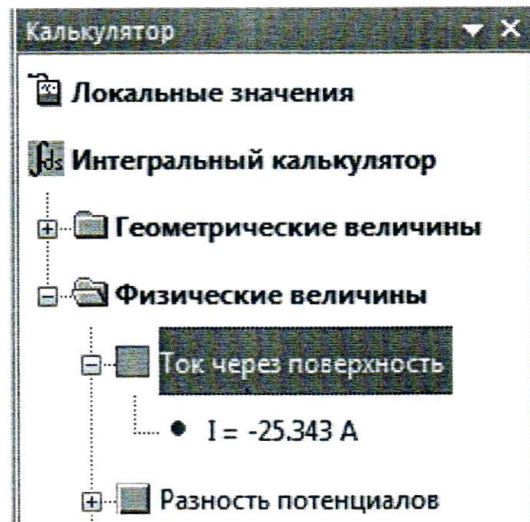


Рис. 1.19. Окно «Калькулятор»

Рассчитать значение сопротивления медного проводника по формуле:

$$R_{\text{ММ}} = \frac{\Delta U}{I},$$

где ΔU – разность потенциалов левого «U-» и правого ребер «U+», В; I – суммарный ток через поверхность заданную контуром интегрирования, А. Полученное значение сопротивления $R_{\text{ММ}}$ занести в соответствующую ячейку табл. 1.1.

13. Повторить работы по п.п. 8 – 12 для других образцов исследуемых проводников.

14. Сравнить значения сопротивлений $R_{\text{ММ}}$ проводников, полученных методом математического моделирования электрического поля постоянных токов, со значениями $R_{\text{изм}}$, полученными экспериментально (табл.1.1). Сделать вывод.

Более подробное описание работы с программой «*Elcut*» приведено в

руководстве пользователя «*Elcut*».

Контрольные вопросы

1. Опишите механизм проводимости электрического тока в металлах.
2. Как влияют геометрические размеры проводника на его сопротивление?
3. Приведите закон Ома для участка электрической цепи.
4. Назовите методы измерения сопротивления проводника.
5. Какой метод измерения сопротивления, из рассмотренных в теоретической части, является более точными?
6. Приведите формулу определения удельного сопротивления однородного проводника.
7. Укажите тип задачи математической физики, решаемой в лабораторной работе.
8. Приведите определение скалярного электрического потенциала.
9. Перечислите граничные условия, применяемые при решении задачи математической физики.
10. Какие параметры материалов задаются при решении задачи электрического поля постоянных токов?
11. Приведите картину электрического поля проводника с током.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Изучение температурной зависимости сопротивления проводников и резисторов

Цель работы: определение температурных коэффициентов сопротивления проводниковых материалов и резисторов.

Оборудование: модуль «Модуль питания и *USB* осциллограф», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Мультиметры», модуль «Измеритель *RLC*», минимодули «ТКС проводников» и «ТКС резисторов», соединительные проводники.

В данной лабораторной работе исследуется ТКС проводников (медь и вольфрам) и ТКС резисторов (проволочный и угольный).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы.

2. Согласно рис. 1.20 выполнить электрические соединения модулей. Монтаж схемы производить при отключенном питании. Ручку тумблера *SA2* перевести в нижнее положение.

Установить минимодуль «ТКС проводников» в соответствующие гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления / емкости» модуля «Магнитомягкие материалы». Подключить термопару *BKI* минимодуля к гнездам «*TEMP*» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

В качестве омметра *PRI* использовать *RLC*-метр в режиме измерения сопротивления.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и *USB* осциллограф». Включить мультиметр. Включить *RLC*-метр, выбрать режим измерения сопротивления (кнопка *LIC/R*).

4. Значения сопротивлений проводников *R1*, *R2* и комнатной температуры *T* занести в табл. 1.3. Переключения между проводниками с сопротивлениями *R1* и *R2* осуществляется тумблером *SA3*. Проводник с

сопротивлением $R1$ - медь (верхнее положение ручки тумблера $SA3$). Проводник с сопротивлением $R2$ - вольфрам (нижнее положение ручки тумблера $SA3$).

5. Включить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в верхнее положение).

Если показания температуры ($P1$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра 1). По окончании нагрева (установившаяся температура не изменяется в течение 5 минут более чем на 1...2 °С) занести в табл. 1.3 значения сопротивлений проводников $R1$, $R2$ и температуры T . Отключить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в нижнее положение).

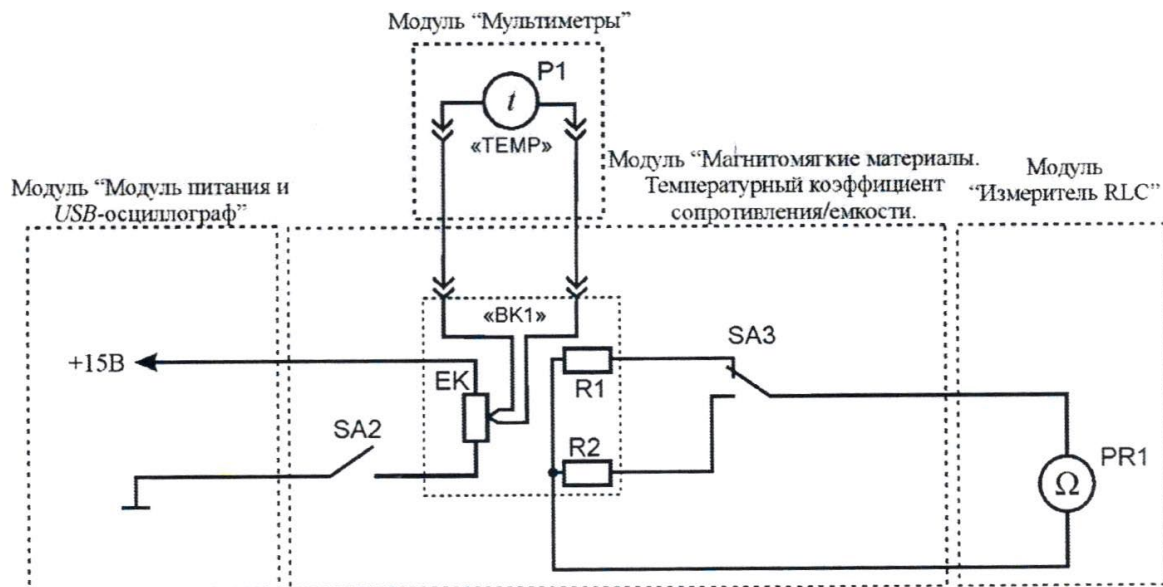


Рис. 1.20. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения ТКС проводников

Таблица 1.3

№	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Сопротивление проводника R, Ом		ТКС, $^\circ\text{C}^{-1}$	
		$R1$ (медь)	$R2$ (вольфрам)	Медь ($R1$)	Вольфрам ($R2$)
1					
2					

6. Используя данные табл. 1.3 построить график зависимости $R(T)$. Рассчитать ТКС проводников используя формулу (1.22), значения ТКС

занести в табл. 1.3.

7. Заменить минимодуль «ТКС проводников» на «ТКС резисторов». Подключить термопару минимодуля (гнезда ВК1) к гнездам «ТЕМР» мультиметра 1 при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

Значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и комнатной температуры T занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

№	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление резистора R , Ом		ТКС, K^{-1}	
		R_1 (проволочный)	R_2 (угольный)	Проволочный (R_1)	Угольный (R_2)
1					
2					

Переключение между резисторами R_1 и R_2 осуществляется тумблером SA_3 .

Резистор с сопротивлением R_1 - проволочный (верхнее положение ручки тумблера). Резистор с сопротивлением R_2 – угольный (нижнее положение ручки тумблера).

8. Включить нагрев (ручку тумблера SA_2 перевести в верхнее положение).

Если показания температуры (P_2) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «ТЕМР» мультиметра 1). По окончании нагрева (установившаяся температура не изменяется в течение 5 минут более чем на 1...2 $^\circ\text{C}$) занести в табл. 1.4 значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и температуры T . Отключить нагрев (ручку тумблера SA_2 перевести в нижнее положение).

9. Используя данные табл. 1.4 построить график зависимости $R(T)$. Рассчитать ТКС резисторов используя формулу (1.22), значения ТКС занести в табл. 1.4

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

11. Сравнить экспериментальные значения ТКС проводников и резисторов со справочными данными. Анализируя графики зависимости $R(T)$ проводников и резисторов сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие проводника от диэлектрика?
2. Приведите определение ТКС. Единицы его измерения.
3. Материалы с каким ТКС используются для изготовления резисторов?
4. Чем отличаются положительный и отрицательный ТКС.
5. Приведите формулу определения температурного коэффициента сопротивления.
6. Приведите погрешность мультиметра типа *MASTECH MY64* при измерении температуры.
7. Отличаются ли ТКС чистых атомарных металлов от ТКС металлов с примесями?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Контактные явления в проводниках и термоэлектродвижущая сила

Цель работы: изучить явления, возникающие при контакте двух проводников, измерить термо-ЭДС и определить относительную удельную термо-ЭДС исследуемой термопары.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Мультиметры», минимодуль «ТКС проводников», соединительные проводники.

Метод измерения

В данной лабораторной работе исследуется термопара типа *K* (алюмель–хромель).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 1.21 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании!** Ручку тумблера *SA2* перевести в нижнее положение.

Установить минимодуль «ТКС проводников» в гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления/емкости» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости».

Подключить термопару *BK1* минимодуля к гнездам «ТЕМР» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

Подключить термопару *BK2* минимодуля к гнездам «*VΩHz*» и «*COM*» мультиметра 2 (в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 200 мВ) при помощи соединительного кабеля с незащищенными штекерами 4,0 мм и незащищенными штекерами 2,0 мм.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или

лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

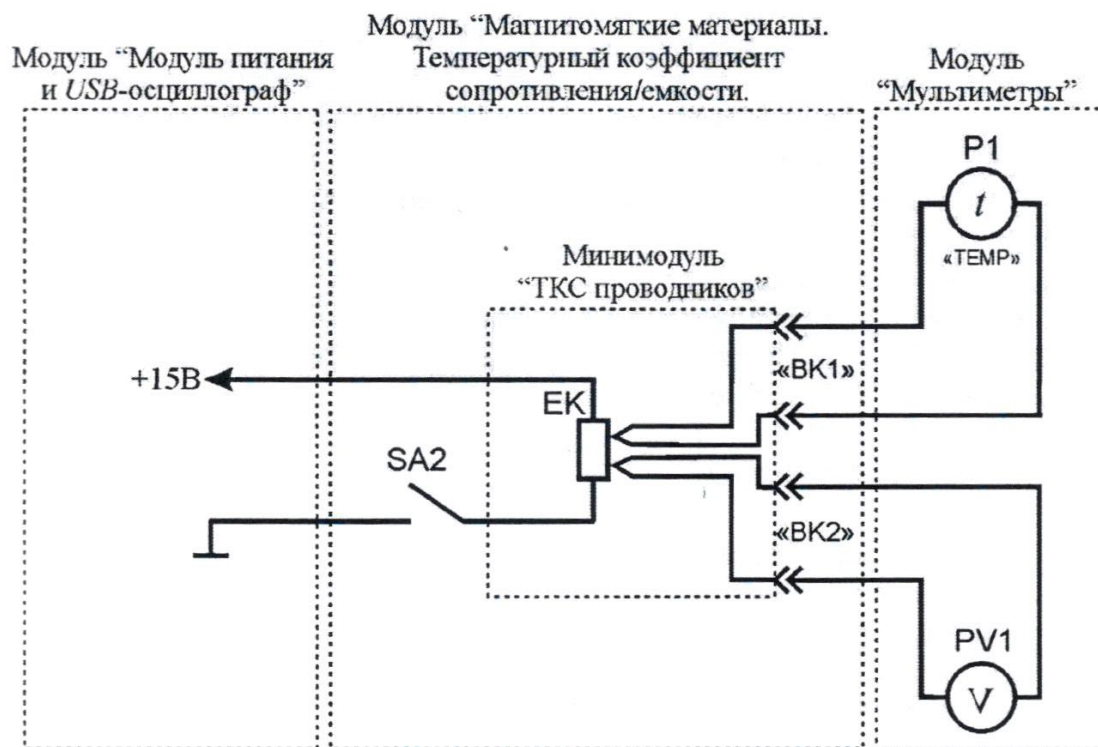


Рис. 1.21. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения термо-ЭДС

4. После включения мультиметров занести в табл. 1.5 значение температуры свободных концов t_c ($P1$). При проведении эксперимента комнатная температура не должна изменяться.

Таблица 1.5

№ п.п.	Температура свободных концов термопары t_c , °C	t_p , °C	$ E_T $, мВ	$t_p - t_c$, °C	α_T , мВ/°C
1					
2					
...					

5. Включить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в верхнее положение).

Если показания температуры ($P2$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «ТЕМР» мультиметра 1).

Провести измерения температуры рабочего спая t_p ($P1$) и термо-ЭДС $E_T(PV1)$ в диапазоне 30...100 °С с шагом 10 °С. Полученные значения E_T (по модулю) и t_p занести в табл. 1.5. Отключить нагрев (ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение).

6. Рассчитать разность температур рабочего спая и свободных концов термопары $t_p - t_c$, для каждого пункта табл. 1.5.

7. Построить график зависимости E_T ($t_p - t_c$). Определить удельную термо-ЭДС α_T как тангенс угла наклона графика. Тангенс угла наклона графика определять как отношение приращения ΔE_T термо-ЭДС к соответствующему приращению $\Delta(t_p - t_c)$ разности температур рабочего спая и свободных концов термопары. Значение удельной термо-ЭДС α_T занести в табл. 1.5.

8. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

9. Сравнить экспериментальные значения термо-ЭДС со справочной таблицей термо-ЭДС стандартных термопар. Сравнить экспериментальное значение удельной термо-ЭДС α_T со справочным.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение термо-ЭДС.
2. В чем состоит эффект Зеебека?
3. Объясните механизм возникновения термо-ЭДС.
4. От каких параметров зависит величина термо-ЭДС?
5. Приведите определение и формулу удельной термо-ЭДС.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Изучение температурной зависимости сопротивления полупроводников

Цель работы: изучить зависимость сопротивления полупроводниковых материалов от температуры.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Мультиметры», модуль «Измеритель RLC», минимодуль «ТКС полупроводников», соединительные проводники.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы.

2. Согласно рис. 1.22 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение.

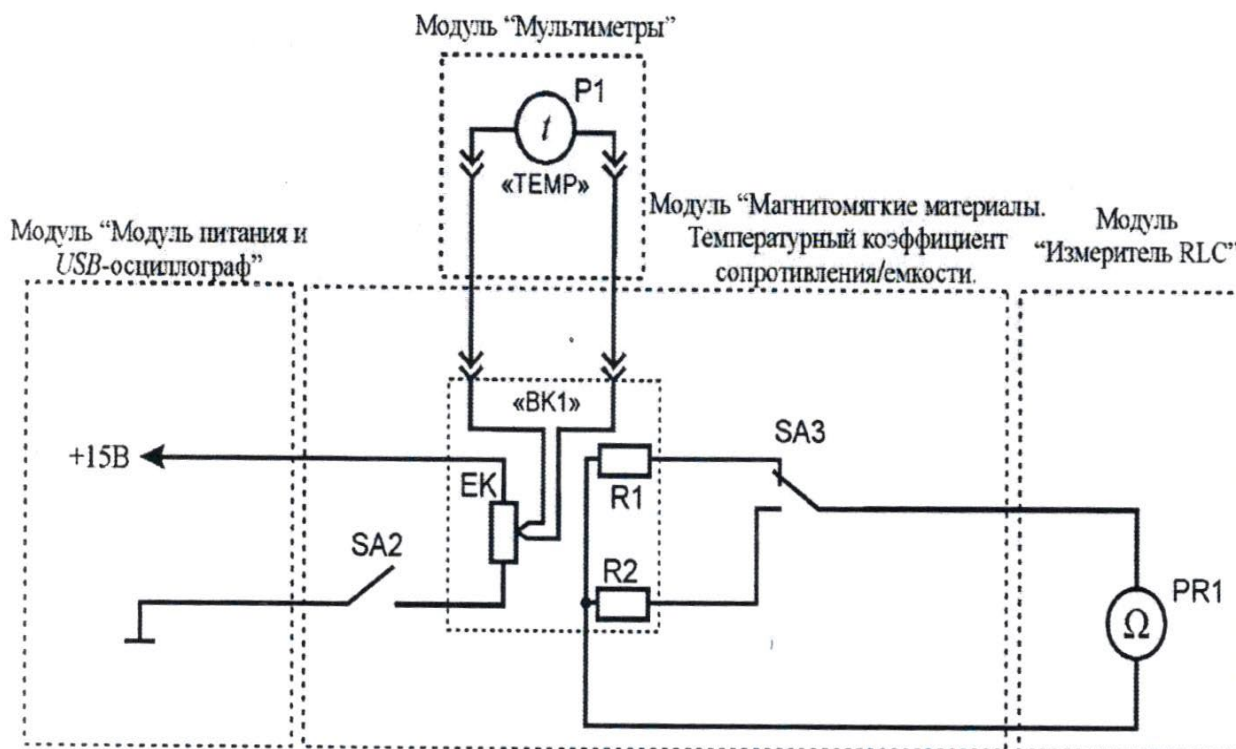


Рис. 1.22. Схема электрическая соединений типовой комплекта для измерения ТКС полупроводников

Установить минимодуль «ТКС полупроводников» в гнезда, расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления/емкости» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости». Подключить термопару $BK1$ минимодуля к гнездам «ТЕМП» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

В качестве омметра $PR1$ использовать RLC -метр в режиме измерения сопротивления.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр 1. Включить RLC -метр, выбрать режим измерения сопротивления (кнопка $L/C/R$).

4. Значения сопротивлений полупроводников $R1$, $R2$ ($PR1$) и комнатной температуры t ($P1$) занести в табл. 1.6. Переключения между полупроводниками с сопротивлениями $R1$ и $R2$ осуществляется тумблером $SA3$.

5. Включить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в верхнее положение).

Если показания температуры ($P1$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «ТЕМП» мультиметра 1).

Таблица 1.6

№	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Сопротивление полупроводника $R, \text{Ом}$		ТКС, K^{-1}	
		$R1$ (термистор)	$R2$ (позистор)	$R1$	$R2$
1					
2					
...					

Провести измерения температуры t ($P1$) и сопротивления полупроводников $R1$ и $R2$ ($P1$) при нагревании минимодуля в диапазоне $40...100\text{ }^\circ\text{C}$ с шагом $10\text{ }^\circ\text{C}$. Полученные значения занести в табл. 1.6. Отключить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в нижнее положение).

6. Используя данные табл. 1.6 построить графики зависимостей $R1(t)$, $R2(t)$. К точке на графике зависимостей $R1(t)$, $R2(t)$ (по указанию

преподавателя) провести касательную линию и в некотором температурном диапазоне рассчитать ТКС полупроводников как тангенс угла наклона графика. Тангенс угла наклона графика определять как отношение приращения сопротивления ΔR к соответствующему приращению температуры Δt .

7. Вычислить абсолютную температуру T , обратную температуру T^{-1} для каждого пункта табл. 1.6 используя формулы:

$$T = t + 273, T^{-1} = \frac{1}{T},$$

где t -температура, °C.

Полученные значения T и T^{-1} занести в табл. 1.7.

Рассчитать $\ln R1$ (расчет энергии активации ΔW производится только для термистора) для каждого пункта табл. 1.6, полученные значения занести в табл. 1. 7

Таблица 1.7

№	T, K	T^{-1}, K^{-1}	$\ln R1$	$\Delta W, \text{эВ}$
1				
2				
...				

8. Построить график зависимости $\ln R1(T^{-1})$. На графике провести прямую линию усредняющую экспериментальные точки графика. Рассчитать тангенс угла наклона прямой как отношение приращения $\Delta \ln R$ к соответствующему приращению ΔT^{-1} . Используя формулу (1.25) рассчитать значение энергии активации ΔW , значение занести в табл. 1. 7.

9. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

10. По графикам зависимости $R(T)$ полупроводников $R1$ и $R2$ определить тип полупроводника (термистор или позистор), сравнить экспериментальные значения ТКС полупроводников и значение энергии активации ΔW термистора со справочными данными. Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие полупроводника от проводника?
2. Приведите определение терморезистора.
3. Какие материалы используются для изготовления терморезисторов?
4. Приведите качественный характер зависимостей сопротивления от температуры терморезисторов с отрицательным и положительным ТКС.
6. Приведите формулу для определения температурного коэффициента сопротивления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Фотопроводимость

Цель работы: изучить явление фотопроводимости полупроводников, измерить сопротивление фоторезистора при различной освещенности.

Оборудование: модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Барьерный эффект. Фотопроводимость», модуль «Мультиметры», модуль «Функциональный генератор», соединительные проводники.

Теоретическая часть

Изменение электрической проводимости (удельного сопротивления) вещества под воздействием электромагнитного излучения называется *фотопроводимостью* (фоторезистивным эффектом).

При фотопроводимости первичным является процесс поглощения фотонов.

Фотопроводимость $\Delta\gamma$ равна разности проводимостей полупроводника на свету и в темноте:

$$\Delta\gamma = \gamma_c - \gamma_t = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p$$

где Δn и Δp - концентрации неравновесных носителей заряда, возникших вследствие оптической генерации; e - заряд электрона ($-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); μ_n и μ_p - подвижность электронов и дырок соответственно.

Скорость оптической генерации носителей заряда g_0 определяется интенсивностью падающего света и показателем поглощения:

$$g_0 = \eta_0 \cdot \alpha \cdot E \quad (1.29)$$

где η_0 - квантовый выход внутреннего фотоэффекта; α - показатель поглощения света; E - световой поток.

Квантовым выходом внутреннего фотоэффекта называют количество пар носителей заряда, приходящееся на один поглощенный квант. В фотоэлектрически активной области электромагнитного спектра квантовый выход чаще всего равен единице, то есть каждый фотон создает при возбуждении решетки одну пару носителей заряда.

Релаксация фотопроводимости. Изменение электрических свойств

полупроводников под влиянием электромагнитного излучения носит временный характер. После прекращения облучения проводимость возвращается к тому значению, которое она имела до облучения. Знание инерционности фотопроводимости различных полупроводниковых веществ важно при разработке, например, фоторезисторов, к которым предъявляются высокие требования в отношении их быстродействия.

Рассмотрим процессы, происходящие в полупроводнике при воздействии на него прямоугольного светового импульса (рис. 1.23). Убыль или накопление неравновесных носителей заряда определяется разностью скоростей генерации и рекомбинации носителей:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = g_0 - \frac{\Delta n}{\tau} \quad (1.30)$$

где τ - время жизни неравновесных носителей заряда.

Интегрируя (1.30) с начальным условием $\Delta n = 0$ при $t = 0$, найдем закон нарастания избыточной концентрации носителей заряда при включении освещения:

$$\Delta n = \Delta n_{ст}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1.31)$$

где $\Delta n_{ст} = \tau g_0$.

По такому же закону происходит и нарастание фотопроводимости:

$$\Delta \gamma = \Delta \gamma_{ст}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Спадание фотопроводимости описывается выражением:

$$\Delta \gamma = \Delta \gamma_{ст} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Таким образом, скорость нарастания и спада фотопроводимости находится в тесной связи со временем жизни неравновесных носителей заряда и представляет собой экспоненциальную функцию времени. Время релаксации определяется как время максимальной скорости нарастания τ_n или спада $\tau_{сп}$ фотопроводимости $\Delta \gamma$ (рис. 1.23).

Явление изменения фотопроводимости $\Delta \gamma$ при включении и выключении освещения называют релаксацией фотопроводимости.

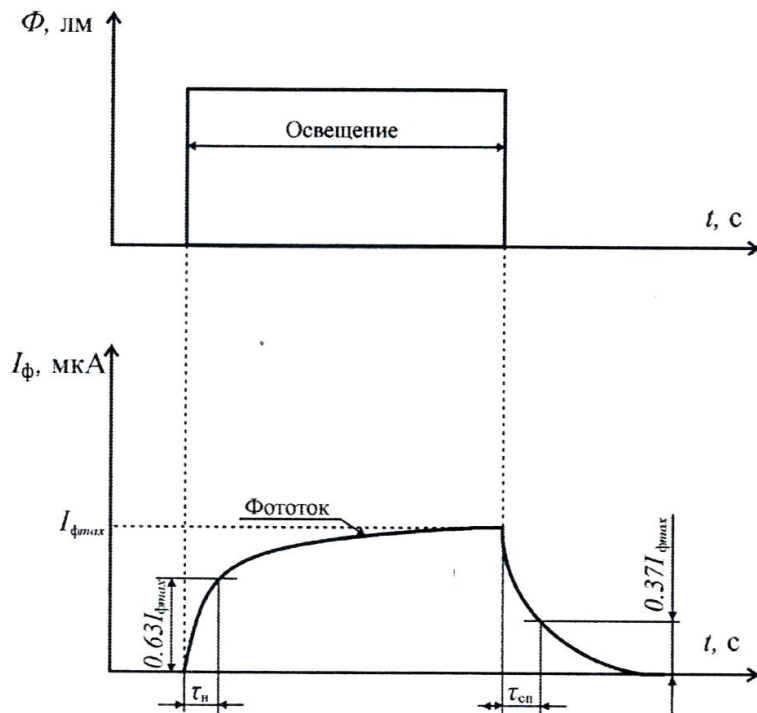


Рис. 1.23. График зависимости фототока полупроводника от времени при импульсном изменении интенсивности падающего на него света

Фоторезистор - полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от интенсивности и спектрального состава внешнего излучения. На рис. 1.24 показаны типовые вольт-амперные характеристики (ВАХ) фоторезистора для нескольких значений светового потока Φ .

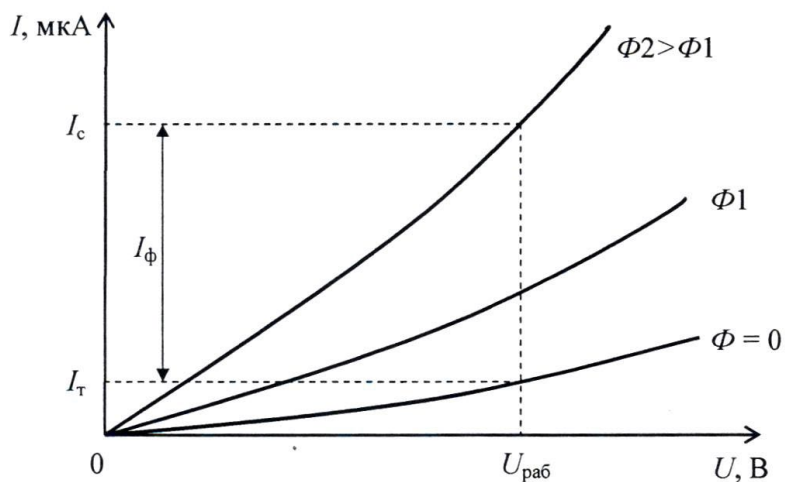


Рис. 1.24. ВАХ фоторезистора

При отсутствии внешнего светового потока ($\Phi = 0$) сопротивление фоторезистора велико и определяется собственной проводимостью полупроводникового материала. Ток, обусловленный собственной проводимостью, называется темновым I_T . Под действием светового потока сопротивление фоторезистора уменьшается. В этом случае ток называется световым I_C . Разность между световым и темновым токами составляет фототок I_F .

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 1.25 выполнить электрические соединения модулей для изучения фоторезистора. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

В качестве амперметра $PA1$ использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного тока с пределом 2 мА.

В качестве вольтметра $PV1$ - мультиметр 2 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

Установить максимальное значение светового потока Φ_1 светодиода, который пропорционален силе тока в цепи светодиода VD ($I_{VD} = 15$ мА). Для контроля тока светодиода I_{VD} использовать один из мультиметров в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

4. Увеличивая входное напряжение $U_{ВХ}$, от 0 до + 15 В с шагом 1,5 В (регулятором «0+15В») заносить значения тока $I_{RK}(PA1)$ и напряжения $U_{RK}(PV1)$ в табл. 1.8.

5. Повторить измерения по пункту 4 при значениях светового потока Φ_2 светодиода (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 7$ мА), Φ_3 светодиода (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 1$ мА), Φ_4 светодиода ($I_{VD} = 0$ мА) и отсутствия естественного фона освещенности $E = 0$. Для отсека естественного фона освещения необходимо затемнить фоторезистор RK (затемнить пластиковый корпус закрывающий фоторезистор со светодиодом).

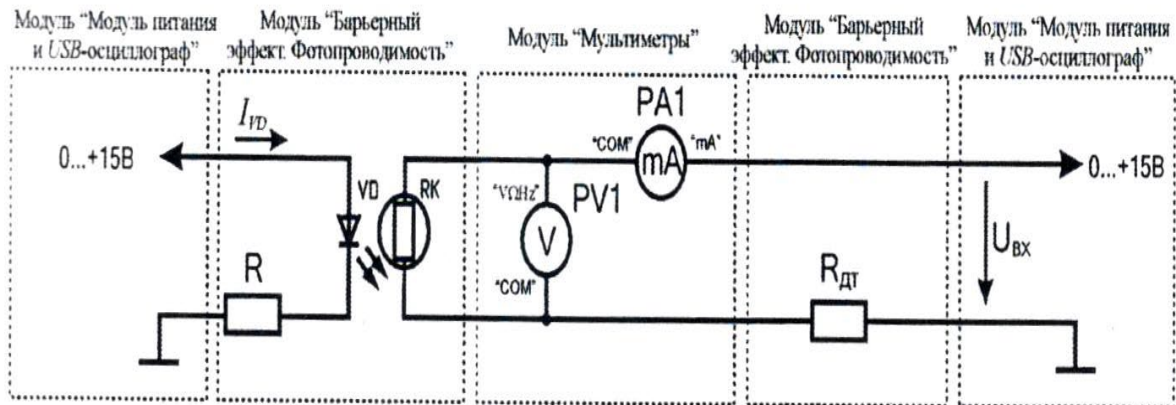


Рис. 1.25. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения зависимости проводимости фоторезистора от светового потока

6. Используя данные табл. 1.8 рассчитать сопротивления фоторезистора R_{RK} при различном световом потоке Φ для каждого значения входного напряжения U_{BX} по формуле $R_{RK} = U_{RK}/I_{RK}$, данные занести в табл. 1.8.

Таблица 1.8

$U_{BX}, \text{В}$		0	1,5	3	4,5	...	15
$I_{RK}, \text{мкА}$	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 \text{ мА})$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 \text{ мА})$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 \text{ мА})$						
	$\Phi 4 (I_{VD} = 0 \text{ мА}) \text{ и } E=0$						
$U_{RK}, \text{В}$	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 \text{ мА})$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 \text{ мА})$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 \text{ мА})$						
	$\Phi 4 (I_{VD} = 0 \text{ мА}) \text{ и } E=0$						
$R_{RK}, \text{Ом}$	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 \text{ мА})$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 \text{ мА})$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 \text{ мА})$						
	$\Phi 4 (I_{VD} = 0 \text{ мА}) \text{ и } E=0$						

7. Используя данные табл. 1.8 построить ВАХ $U_{RK}(I_{RK})$ для всех значений светового потока: $\Phi 1 (I_{VD} = 15 \text{ мА})$, $\Phi 2 (I_{VD} = 7 \text{ мА})$, $\Phi 3 (I_{VD} = 1 \text{ мА})$, $\Phi 4 (I_{VD} = 0 \text{ мА})$, отсутствие светового потока).

8. Провести анализ ВАХ, сделать вывод о характере зависимости фотопроводимости от светового потока Φ .

9. Согласно рис. 1.26 выполнить электрические соединения модулей для определения среднего времени жизни неравновесных носителей заряда τ . **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** $G1$ - функциональный генератор.

10. Установить прямоугольную форму выходного сигнала функционального генератора $G1$, амплитуду $U_m = 4$ В, частоту $f_{\text{вых}} = 20$ Гц. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф $DO\text{SC-DLA}$ ». Настроить развертку и масштаб каналов A и B осциллографа таким образом, чтобы импульс занимал не менее половины экрана. Включить синхронизацию канала A .

Сравнить полученную осциллограмму с рис. 1.23. Определить по осциллограмме время нарастания $\tau_{\text{нр}}$ и спада $\tau_{\text{сп}}$ фототока (среднее время жизни неравновесных носителей заряда). Время нарастания $\tau_{\text{нр}}$ - время с момента начала освещения, за которое фототок увеличится в e раз (достигнет величины $0,63$ от своего максимального значения). Время спада $\tau_{\text{сп}}$ - время с момента окончания освещения, за которое фототок уменьшится в e раз (составит $0,37$ от своего максимального значения).

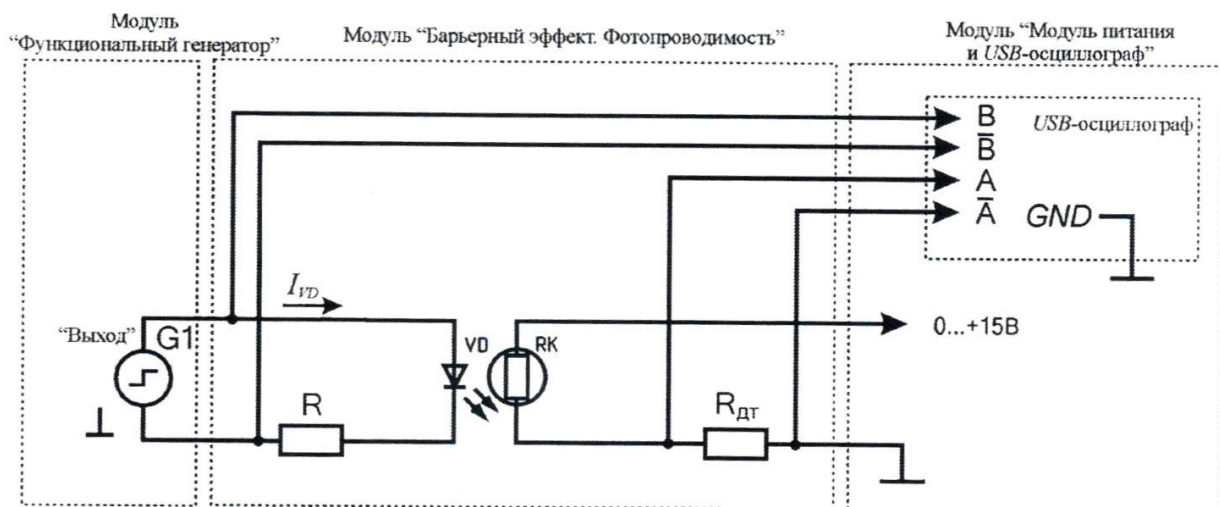


Рис. 1.26. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике

11. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

Контрольные вопросы

- 1.Опишите явление фотоэффекта.
- 2.Приведите определение фоторезистора.
- 3.Чем объясняется изменение фотопроводимости.
- 4.Какие параметры характеризуют быстродействие фоторезисторов?
- 5.Приведите параметры фоторезисторов.
- 6.Приведите примеры источников света, какой источник света используется в данной лабораторной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

Контактные явления в полупроводниках и барьерный фотоэффект

Цель работы: изучить явления, возникающие при контакте полупроводников, изучить работу фотодиода в фотогенераторном и фотодиодном режимах.

Оборудование: модуль «Модуль питания и *USB* осциллограф», модуль «Барьерный эффект. Фотопроводимость», модуль «Функциональный генератор», модуль «Мультиметры», соединительные проводники.

Теоретическая часть

Контакты полупроводника с металлом или с другим полупроводником обладают иногда выпрямляющими свойствами, т. е. значительно эффективнее пропускают ток в одном направлении, чем в обратном. Это происходит потому, что в приконтактной области изменяется концентрация или даже тип носителей заряда, т. е. образуется пространственный заряд, обеспечивающий контактную разность потенциалов, необходимую для выравнивания (в состоянии равновесия) уровней Ферми по обе стороны контакта.

В отличие от металлов, в полупроводниках эта область оказывается достаточно широкой, чтобы при малой концентрации носителей обеспечить нужный перепад потенциала. Если знак контактной разности потенциалов таков, что концентрация носителей в приконтактной области становится меньшей, чем в объёме полупроводника, то приконтактный слой определяет сопротивление всей системы. Внешняя разность потенциалов дополнительно уменьшает число носителей в приконтактной области, если она добавляется к контактной разности потенциалов или, наоборот, увеличивает их концентрацию, если знак её противоположен. Таким образом, сопротивление контакта для токов в прямом и обратном направлениях существенно различаются, что и обеспечивает выпрямляющие свойства контакта.

Такие контакты явились первыми полупроводниковыми приборами (выпрямители, детекторы), однако развитие полупроводниковой электроники началось лишь после того, как были созданы *p-n* переходы - контакты областей полупроводника с разным типом проводимости внутри единого полупроводникового кристалла. Контактная разность потенциалов в этом случае близка к ширине запрещенной зоны, так как уровень Ферми (уровень W_F на рис. 1.27) в *n*-области лежит вблизи дна зоны проводимости W_C , а в

p -области - вблизи валентной зоны W_V (рис. 1.27). Уменьшающая её внешняя разность потенциалов вызывает диффузионные потоки электронов в p -область и дырок в n -область (инжекцию неосновных носителей тока). В обратном направлении p - n переход практически не пропускает ток, т.к. оба типа носителей оттягиваются от области перехода. В полупроводниках с большой длиной диффузии, таких, как Ge и Si , инжектированные одним p - n переходом неравновесные носители могут достигать другого, близко расположенного p - n перехода существенно определяя ток через него. Возможно создание вблизи него неравновесных носителей каким-либо другим способом, например освещением. Первая из этих возможностей управления током p - n перехода (инжекция) является физической основой действия транзистора, а вторая (фотоэдс) - фотодиода и солнечных батарей.

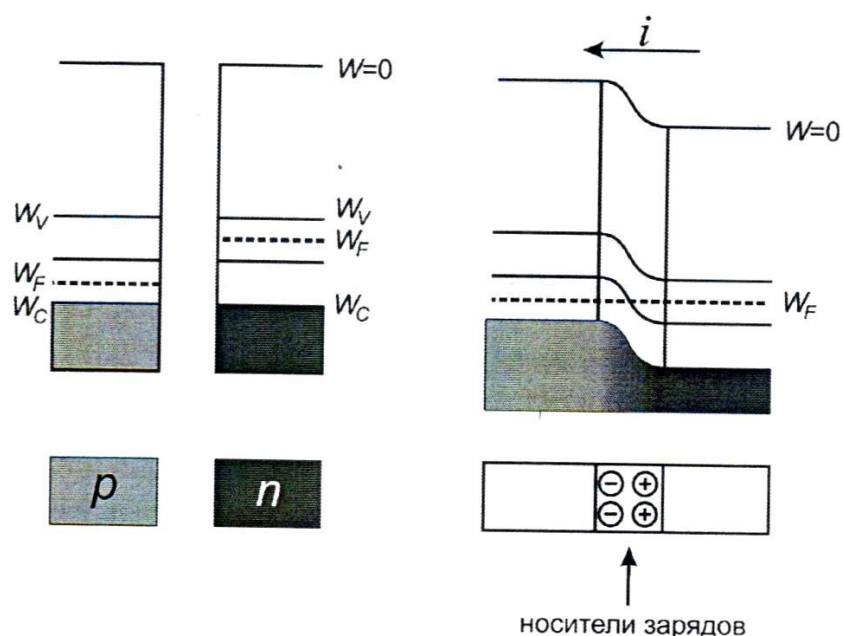


Рис. 1.27. Энергетические диаграммы полупроводниковых материалов n и p типа и полупроводникового перехода

На рис. 1.27 приведены зонные диаграммы, иллюстрирующие этапы формирования электронно-дырочного перехода.

Границу, где уровень Ферми пересекает середину запрещенной зоны, называют физическим p - n переходом.

Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с генерацией ЭДС при воздействии излучения на область p - n перехода, называются фотоэлементами. Фотоэлементы служат преобразователями световой энергии в электрическую. Разновидностью фотоэлементов являются солнечные

элементы, предназначенные для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. Совокупность электрически соединенных фотоэлементов называется солнечной батареей.

В фотодиодах на основе $p-n$ - переходов используется эффект разделения на границе электронно-дырочного перехода созданных световым излучением неосновных неравновесных носителей. На рис. 1.28 схематически изображен фотодиод и схема его включения.

Фотодиод может работать в фотогенераторном и фотодиодном режимах. В фотодиодном режиме (рис. 1.29, квадрант III) в цепь фотодиода включают внешний источник питания, обеспечивающий обратное смещение $p-n$ перехода. Если переход не освещен, то создается обратный темновой ток I_T . При освещении перехода к темновому току добавляется фототок I_Φ , значение которого не зависит от приложенного напряжения и пропорционально интенсивности светового потока Φ .

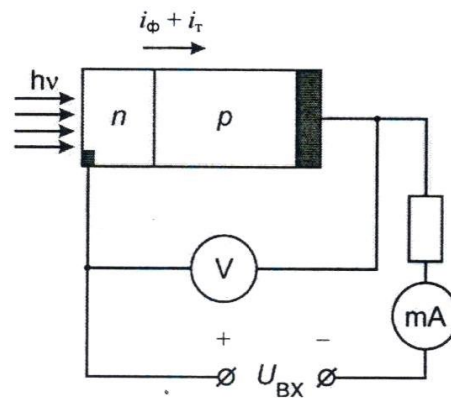


Рис. 1.28. Схематическое изображение фотодиода и схема его включения

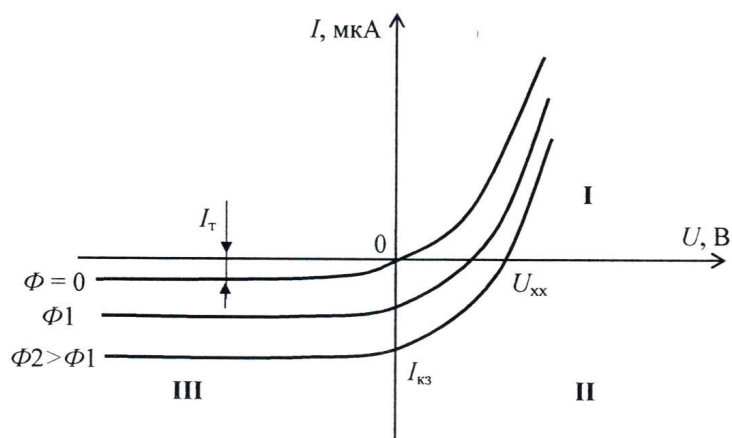


Рис. 1.29. Вольтамперные характеристики фотодиода при различных значениях светового потока

В фотогенераторном режиме фотодиод является источником фото-ЭДС (рис. 1.29, квадрант II), значение которой пропорционально интенсивности светового потока. Типовое значение фото-ЭДС $E = U_{xx}$ кремниевого фотодиода составляет 0,5...0,55 В, а значение тока короткого замыкания $I_{КЗ}$ при среднем солнечном освещении 20...25 мА/см².

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

Фотогенераторный режим работы.

2. Согласно рис. 1.30 выполнить электрические соединения модулей для изучения фотогенераторного режима работы. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

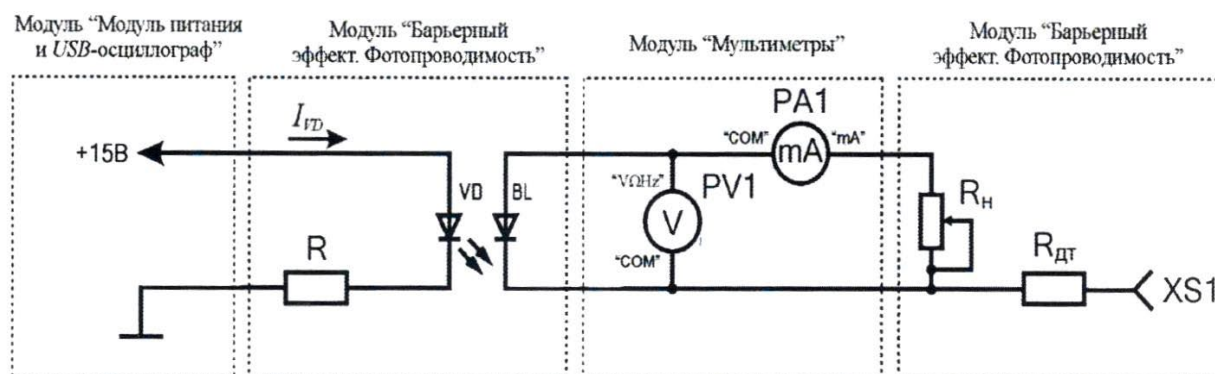


Рис. 1.30. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения фотогенераторного режима работы фотодиода

В качестве амперметра $PA1$ использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного тока с пределом 2 мА.

В качестве вольтметра $PV1$ использовать мультиметр 2 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 2В.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

Установить максимальное значение светового потока Φ_1 , который

пропорционален силе тока в цепи светодиода VD ($I_{VD} = 15$ мА). Для контроля тока светодиода I_{VD} использовать один из мультиметров в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

4. Изменяя сопротивление (положение рукоятки) резистора R_H заносить значения фототока I_Φ , ($PA1$) и фото-ЭДС U_Φ ($PV1$) в табл. 1.9.

Таблица 1.9

R_H		R_{H1}	R_{H2}	R_{H3}	R_{H4}	...	R_{H10}
$\Phi 1$ ($I_{VD} = 15$ мА)	I_Φ , мкА						
	U_Φ , В						

5. Повторить измерения по п. 4 при значениях светового потока $\Phi 2$ (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 7$ мА), значения фототока I_Φ ($PA1$) и фото-ЭДС U_Φ ($PV1$) в табл. 1.10.

Таблица 1.10

R_H		R_{H1}	R_{H2}	R_{H3}	R_{H4}	...	R_{H10}
$\Phi 1$ ($I_{VD} = 7$ мА)	I_Φ , мкА						
	U_Φ , В						

6. Повторить измерения по п. 4 при значениях светового потока $\Phi 3$ (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 1$ мА), значения фототока I_Φ ($PA1$) и фото-ЭДС U_Φ ($PV1$) в табл. 1.11.

Таблица 1.11

R_H		R_{H1}	R_{H2}	R_{H3}	R_{H4}	...	R_{H10}
$\Phi 1$ ($I_{VD} = 1$ мА)	I_Φ , мкА						
	U_Φ , В						

7. Используя данные табл. 1.9 - 1.11 построить ВАХ $I_\Phi(U_\Phi)$ для трех значений светового потока: $\Phi 1$ ($I_{VD} = 15$ мА), $\Phi 2$ ($I_{VD} = 7$ мА), $\Phi 3$ ($I_{VD} = 1$ мА).

8. Провести анализ ВАХ фотогенераторного режима работы, сделать вывод о характере зависимости фото-ЭДС от светового потока Φ . Определить напряжение холостого хода ($U_{ХХ}$) и ток короткого замыкания ($I_{КЗ}$).

Фотодиодный режим работы

9. Согласно рис. 1.31 выполнить электрические соединения модулей для изучения фотодиодного режима работы. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

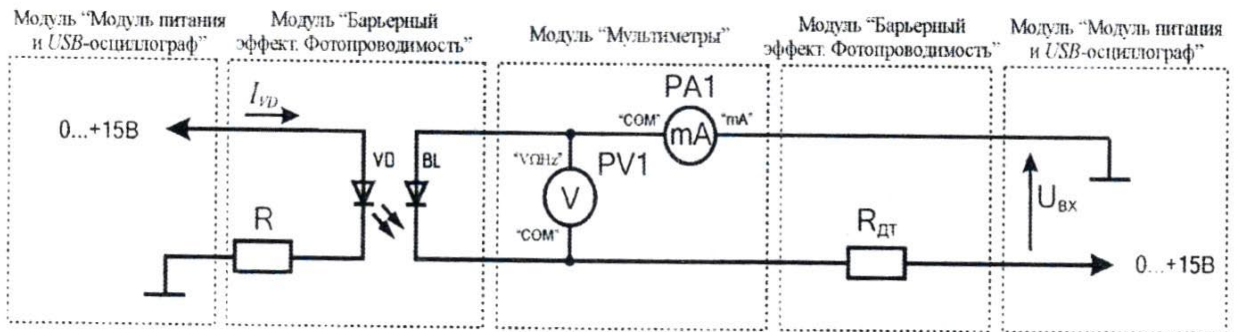


Рис. 1.31. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения фотодиодного режима работы фотодиода

В качестве амперметра $PA1$ использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного тока с пределом 2 мА.

В качестве вольтметра $PV1$ использовать мультиметр 2 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 2В. $R_{дт} = 10$ кОм.

10. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

Установить максимальное значение светового потока Φ_1 , который пропорционален силе тока в цепи светодиода VD ($I_{VD} = 15$ мА). Для контроля тока светодиода I_{VD} использовать один из мультиметров в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

11. Увеличивая входное напряжение $U_{вх}$ от 0 до 15 В с шагом 1,5 В (регулятором «0...+15В») заносить значения тока I_{BL} ($PA1$) и напряжения U_{BL} ($PV1$) в табл. 1.12.

12. Повторить измерения по п. 11 при значениях светового потока Φ_2 (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 7$ мА), Φ_3 (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 1$ мА).

Таблица 1.12

U_{BX}, B		0	-1,5	-3	-4,5	...	-15
$I_{BL}, \text{мкА}$	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 \text{ мА})$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 \text{ мА})$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 \text{ мА})$						
U_{BL}, B	$\Phi 1 (I_{VD} = 15 \text{ мА})$						
	$\Phi 2 (I_{VD} = 7 \text{ мА})$						
	$\Phi 3 (I_{VD} = 1 \text{ мА})$						

13. Используя данные табл. 1.12 построить ВАХ $I_{BL}(U_{BL})$ для трех значений светового потока: $\Phi 1 (I_{VD} = 15 \text{ мА})$, $\Phi 2 (I_{VD} = 7 \text{ мА})$, $\Phi 3 (I_{VD} = 1 \text{ мА})$.

14. Провести анализ ВАХ фотодиодного режима работы, сделать вывод о характере зависимости тока фотодиода I_{BL} от светового потока Φ .

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотодиода

15. Согласно рис. 1.32 выполнить электрические соединения модулей для изучения прямой ветви ВАХ фотодиода. Монтаж схемы производить при отключенном питании.

В качестве амперметра $PA1$ использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного тока с пределом 2 мА.

В качестве вольтметра $PV1$ использовать мультиметр 2 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 20 В. $R_{дт} = 10 \text{ кОм}$.

16. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

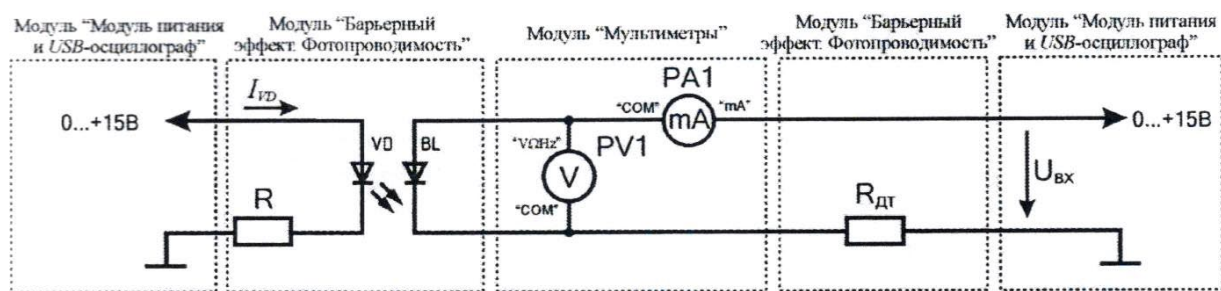


Рис. 1.32. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения прямой ветви ВАХ фотодиода

Установить максимальное значение светового потока $\Phi 1$, который пропорционален силе тока в цепи светодиода VD ($I_{VD} = 15$ мА). Для контроля тока светодиода I_{VD} использовать один из мультиметров в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

17. Увеличивая входное напряжение $U_{ВХ}$ от 0 до 15 В с шагом 1,5 В (регулятором «0...+15В») заносить значения тока I_{BL} ($PA1$) и напряжения U_{BL} ($PV1$) в табл. 1.13.

18. Повторить измерения по пункту 17 при значениях светового потока $\Phi 2$ (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 7$ мА), $\Phi 3$ (сила тока в цепи светодиода $I_{VD} = 1$ мА).

Таблица 1.13

$U_{ВХ}, В$		0	1,5	3	4,5	...	15
$I_{BL}, мкА$	$\Phi 1 (I_{VD}) = 15$ мА						
	$\Phi 2 (I_{VD}) = 7$ мА						
	$\Phi 3 (I_{VD}) = 1$ мА						
$U_{BL}, В$	$\Phi 1 (I_{VD}) = 15$ мА						
	$\Phi 2 (I_{VD}) = 7$ мА						
	$\Phi 3 (I_{VD}) = 1$ мА						

19. Используя данные табл. 1.13 построить ВАХ $I_{BL}(U_{BL})$ для трех значений светового потока: $\Phi 1$ ($I_{VD} = 15$ мА), $\Phi 2$ ($I_{VD} = 7$ мА), $\Phi 3$ ($I_{VD} = 1$ мА).

20. Провести анализ прямой ветви ВАХ фотодиода, сделать вывод о характере зависимости тока фотодиода I_{BL} от светового потока Φ .

Наблюдение ВАХ фотодиода

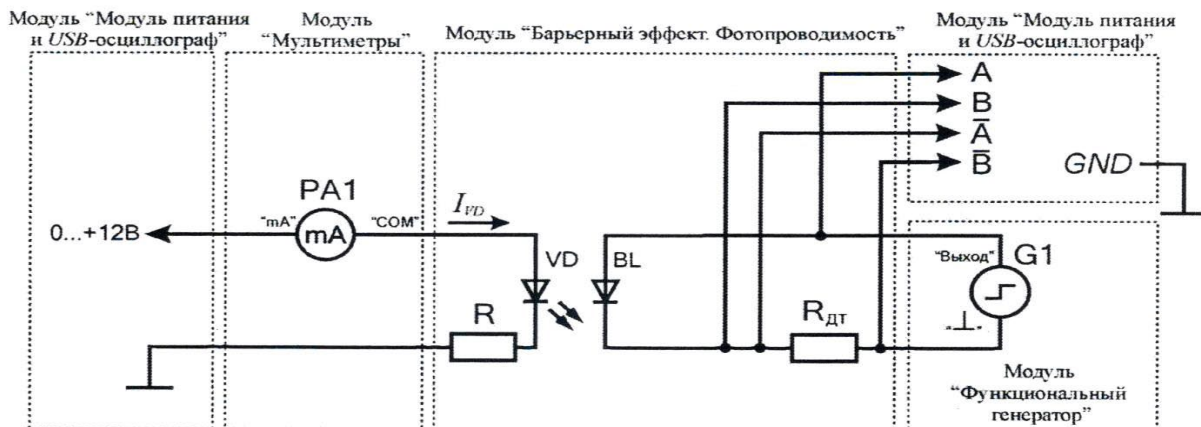


Рис. 1.33. Схема электрических соединений типового комплекта для наблюдения ВАХ фотодиода

21. Согласно рис. 1.33 выполнить электрические соединения модулей для наблюдения ВАХ фотодиода. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

В качестве амперметра $PA1$ использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметр в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА. $R_{дт} = 10$ кОм.

22. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр 1.

Установить треугольную форму выходного сигнала функционального генератора $G1$, максимальную амплитуду $U_m = 10$ В, частоту $f_{вых} = 10$ Гц. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф $DOSC-DLA$ ». Перейти в режим «XY». Задать размах шкалы напряжения каналов при помощи ручек настройки «крутилки» "Канал A/B (Вольт/экран)" 1 В/деление. Повернуть ручку «Время (с/дел)» (развертка) в положение 10 мс/дел. Установить максимальное сглаживание каналов А и В. Нажать на кнопку «цикл».

23. Установить максимальное значение светового потока $\Phi 1$, который пропорционален силе тока в цепи светодиода VD ($I_{VD} = 15$ мА). Для контроля тока светодиода I_{VD} использовать мультиметр $PA1$ в режиме измерения постоянного тока с пределом 20 мА.

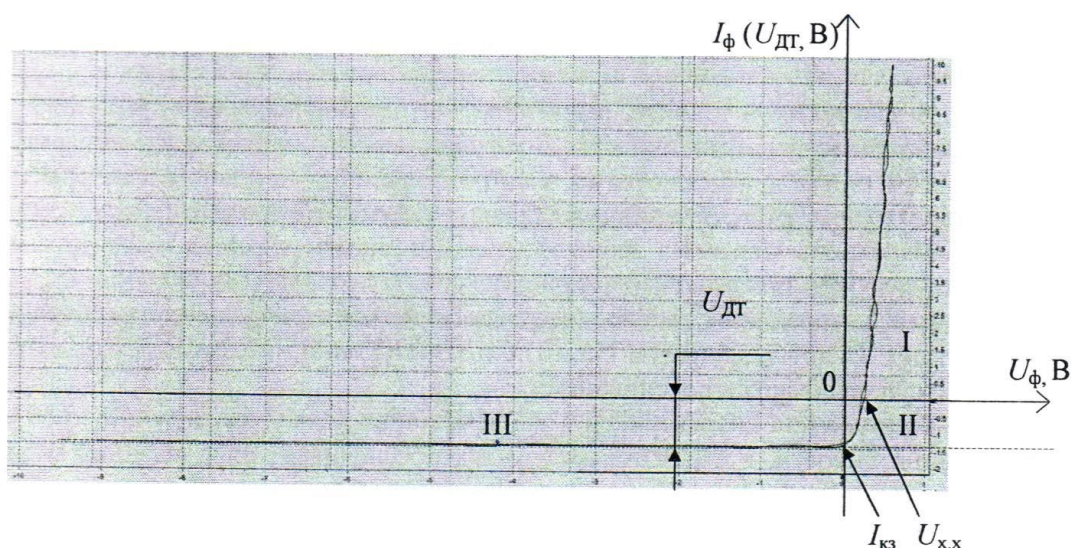


Рис. 1.34. Осциллограмма ВАХ фотодиода в различных режимах работы: I - прямая ветвь ВАХ фотодиода; II - фотогенераторный режим работы; III - фотодиодный режим работы

24. Качественно сравнить полученную осциллограмму с осциллограммой, представленной на рис. 1.34.

25. Изменяя световой поток Φ (регулируя силу тока в цепи светодиода I_{VD}), сравнить полученные осциллограммы с семейством характеристик представленных на рис. 1.29. Определить напряжение холостого хода $U_{ХХ}$ и рассчитать ток короткого замыкания $I_{кз} = U_{дт}/R_{дт}$. Провести анализ ВАХ фотодиода в различных режимах работы.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение и энергетические диаграммы $p-n$ перехода.
2. Приведите определение фото-ЭДС.
3. Какие материалы используются для изготовления фотодиодов?
4. Приведите основные параметры фотодиода.
5. Приведите ВАХ фотодиода в различных режимах.
6. Опишите особенности фотогенераторного и фотодиодного режимов.
7. Что такое темновой ток фотодиода?

2. Диэлектрики

В электронной технике, радиотехнике и приборостроении применяют множество различных диэлектриков. По функциям, выполняемым в аппаратуре и приборах, они подразделяются на электроизоляционные и конденсаторные материалы (пассивные диэлектрики) и управляемые материалы (активные диэлектрики).

Электроизоляционные материалы используют для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга элементы схемы или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами.

Применение диэлектриков в конденсаторах позволяет получать требуемые значения емкости, а в некоторых случаях обеспечивает определенный характер зависимости этой емкости от внешних факторов. Диэлектрик конденсатора может запасать, а потом отдавать в цепь электрическую энергию (емкостный накопитель). Иногда конденсатор используют для разделения цепей постоянного и переменного токов, для изменения угла фазового сдвига и т. д.

Некоторые диэлектрики применяют как для создания электрической изоляции, так и в качестве конденсаторных материалов (например, слюда, керамика, стекло, полистирольные и другие пленки). Тем не менее, требования к электроизоляционным и конденсаторным материалам существенно различаются. Если от электроизоляционного материала требуется невысокая относительная диэлектрическая проницаемость и большое удельное сопротивление, то диэлектрик конденсатора, наоборот, должен иметь повышенную ϵ и малое значение $\text{tg}\delta$. Роль диэлектрика в конденсаторе также нельзя считать активной, но конденсатор уже является функциональным элементом в электрической схеме.

Диэлектрические материалы являются основными видами электротехнических материалов и отличаются большим разнообразием (рис. 2.1).

Эти материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей энергооборудования. Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции как: воздух в линиях электропередач и электроаппаратах; нефтяные и искусственные масла в трансформаторах, кабелях и конденсаторах; твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий (ВЛ), конденсаторах, установочных изделиях и корпусах аппаратов и т.п. При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на

физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид и тип используемых электротехнических материалов. Кроме того, при конструировании даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот, или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля. Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала:

- механические: плотность и вес материала, прочность;
- теплофизические: теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и горючесть;
- электрофизические: диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность;
- физико-химические: химическая стойкость, влагопроницаемость и т.д.

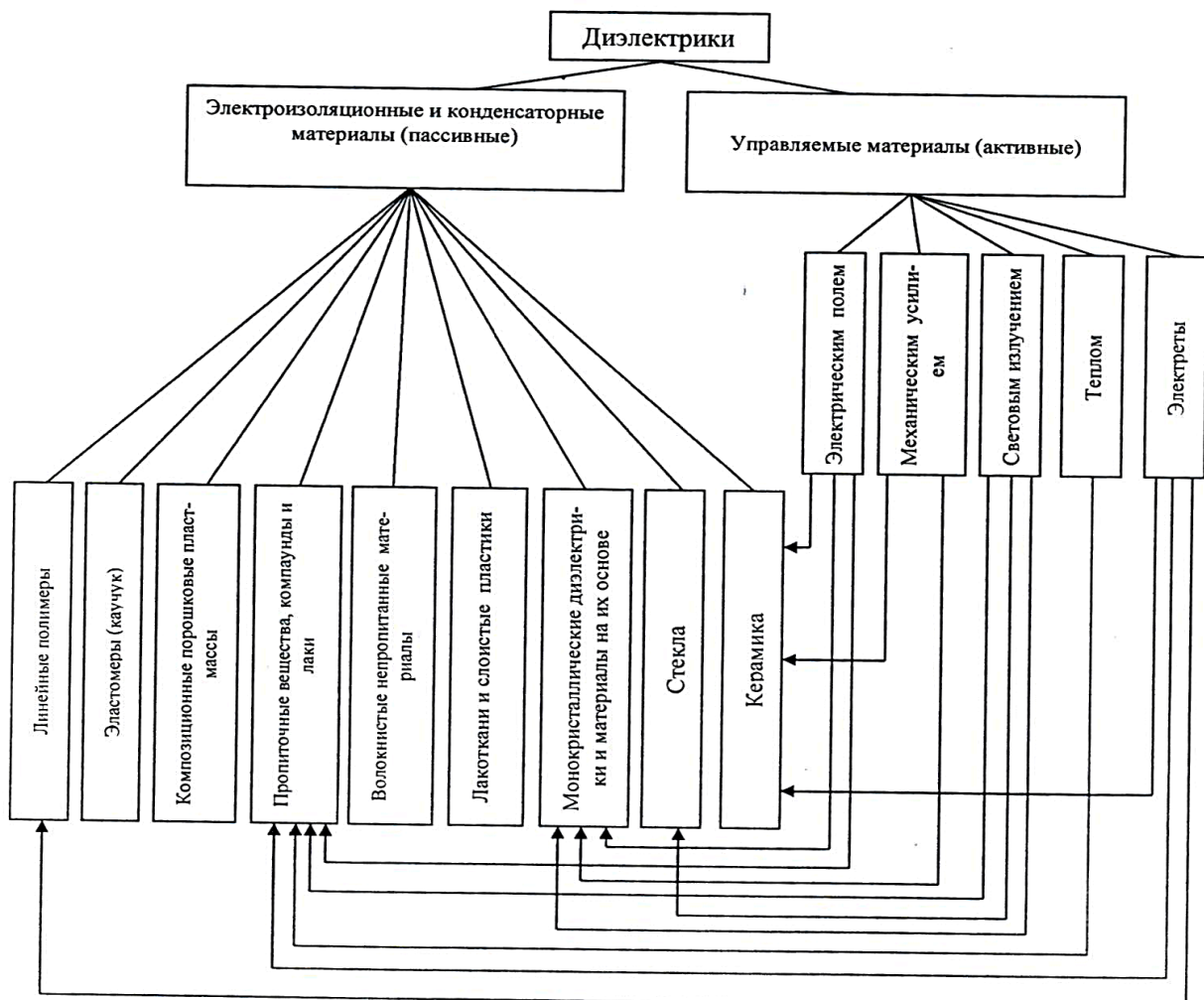


Рис. 2.1. Классификация диэлектриков

Зачастую все требования невозможно выполнить. Чтобы оценить значимость каждого из них и понять, какие требования, в каждом конкретном случае, являются главными, а какие второстепенными (ими можно пренебречь) необходимо ясное понимание всего комплекса процессов, происходящих при функционировании устройств.

Дипольный момент молекулы. Полярные и неполярные диэлектрики

Молекулы в зависимости от наличия в них асимметрии электрического поля делятся на полярные и неполярные. В полярных молекулах центры положения суммарных зарядов противоположных знаков не совпадают, поэтому такие молекулы обладают дипольным моментом, модуль которого равен

$$P_{Qx} = |Q| x$$

где Q - суммарный заряд любого знака, x - взаимное смещение "центров" суммарных зарядов.

Дипольный момент молекулы P_{Qx} является вектором, направленным от отрицательного заряда к положительному. Модуль дипольного момента P_{Qx} равен произведению расстояния между зарядами на модуль заряда.

В неполярных молекулах эти центры совпадают, поэтому их дипольный момент равен нулю. Молекулы веществ, состоящие из однотипных атомов (например, газы H_2 , O_2 , N_2 и др.) симметричны и поэтому неполярны. Молекулы веществ, состоящие из двух разнотипных атомов, всегда полярны. Если же разнотипных атомов в молекуле три и более, то молекула может быть, как полярной, так и неполярной. Например, молекула углекислого газа, состоящая из трёх разнотипных атомов ($CO_2 \rightarrow O-C-O$) симметрична и неполярна. Это остаётся справедливым и для молекулы ацетилена (C_2H_2). Молекулы H_2O и NH_3 имеют несимметричное строение, поэтому проявляют полярные свойства.

Особую группу материалов составляют вещества, молекулы которых имеют ионную связь ($NaCl$, KCl , KBr и др.). Их кристаллические решётки представляют собой систему знаков чередующихся узлов - ионов. В таких решётках нельзя выделить отдельную молекулу, а саму решётку следует рассматривать в виде двух подрешеток, вставленных друг в друга. Как известно, молекулы состоят из атомов, окруженных электронными оболочками. При этом электроны могут равномерно распределяться по

молекуле, а могут и концентрироваться на каких-либо атомах. В первом случае говорят, что молекула неполярная. Пример - молекула водорода или атом гелия.

Во втором случае в молекуле образуются области с положительным и отрицательным зарядами. Если в молекуле возможно выделить направление, вдоль которого с одной стороны располагаются положительные заряды, а с другой стороны - отрицательные, то такая молекула является полярной или дипольной.

В полярной молекуле под действием поля происходит ориентация диполя в направлении вектора напряженности. Диэлектрики, состоящие из полярных молекул, называют полярными диэлектриками. В этом случае в зависимости от значения дипольного момента молекулы и концентрации молекул поляризация может быть значительной.

В неполярной молекуле под воздействием электрического поля происходит смещение (деформация) электронных оболочек. В результате этой деформации возникает индуцированный дипольный момент молекулы, то есть молекула поляризуется. Поляризация за счет смещения электронов называется электронной. Возникающий дипольный момент невелик. Диэлектрики, состоящие из неполярных молекул, называются неполярными диэлектриками.

В некоторых твердых диэлектриках может существовать особый вид поляризации - спонтанная (самопроизвольная), или доменная поляризация. Она существует только в кристаллах, но далеко не во всех, в аморфных телах ее не бывает. В некоторых веществах самопроизвольно возникают поляризованные микроскопические области (домены). При этом происходит смещение положительно заряженных ионов решетки в одну сторону, а отрицательно заряженных ионов в другую сторону. Микрообласть со спонтанной поляризацией называется доменом, суммарный дипольный момент любого образца макроскопических размеров равен нулю, т.к. дипольные моменты доменов направлены в разные стороны. Если дипольные моменты доменов хаотически направлены в разные стороны, то такой диэлектрик называется сегнетоэлектриком.

Под действием электрического поля размеры доменов, направленных вдоль вектора поля увеличиваются, а противоположно направленные домены уменьшают свой размер. Кроме того, домены в диэлектрике поворачиваются в направлении электрического поля, как гигантские диполи. Только в отличие от диполей, где молекулы физически поворачиваются, в доменах перестраивается структура, так, что результирующий вектор поляризации каждого домена чуть-чуть смещается в направлении поля.

Поляризация и электропроводность диэлектриков

В любом веществе, помещённом в электрическом поле, составляющие его электрические заряды (электроны, атомные ядра) испытывают силы со стороны этого поля. В результате часть зарядов, называемых свободными, направленно перемещаются, образуя электрический ток. Остальные же заряды (связанные упругими силами взаимодействия) перераспределяются так, что центры тяжести положительных и отрицательных зарядов смещаются друг относительно друга. В этом случае говорят о поляризации вещества.

Способность материалов реагировать на внешнее электрическое поле образованием областей связанных зарядов называют *поляризуемостью*.

Диэлектриками могут быть также жидкости и газы. В обычных условиях все газы состоят в основном из нейтральных молекул и поэтому являются диэлектриками. При наличии источника энергии, достаточной для ионизации, атомы и молекулы распадаются на ионы, и газ, превращаясь в плазму, начинает проводить электрический ток.

Основным процессом, протекающим в диэлектрике под воздействием электрического поля, является поляризация, или возникновение областей связанных зарядов. Разная физическая природа связанных зарядов определяет существенные отличия процессов поляризации для различных веществ.

Поляризация вещества имеет три основных механизма, в основе которых лежат процессы деформации электронных оболочек атомов, смещения ионов в кристаллах и ориентация полярных молекул. Большинство материалов обладают двумя и более типами поляризации.

Наличие в диэлектрике незначительной концентрации свободных зарядов приводит к возникновению малого тока проводимости. Протекание токов проводимости сквозь толщу диэлектрика и по его поверхности сопровождается рассеянием энергии и выделением тепла.

Под действием переменного электрического поля в диэлектрике возникают дополнительные составляющие тока проводимости. Их появление обусловлено особенностью процессов поляризации в переменных полях (замедленная поляризация), наличием проводящих микровключений, ионизацией газовых включений, особенно на высоких частотах.

Для количественного описания электропроводности диэлектриков на постоянном токе используют понятие удельного сопротивления (поверхностного и объёмного). На переменном токе используют другие характеристики - тангенс угла диэлектрических потерь и связанный с ним

коэффициент диэлектрических потерь.

Основные типы поляризации диэлектриков

В соответствии с особенностями строения диэлектриков и существования различных видов связанных зарядов выделяют три основных типа поляризации:

- электронная (деформационная), обусловленная деформацией электронных оболочек неполярных молекул;
- ионная, заключающаяся в противоположном перемещении подрешёток кристаллической структуры под действием внешнего поля;
- дипольная (ориентационная), обусловленная пространственной ориентацией дипольных моментов и самих полярных молекул под действием сил поля.

Электронная и ионная поляризации происходят практически мгновенно и без рассеяния энергии, то есть упруго и без выделения тепла.

Электронная поляризация в той или иной степени характерна для любых диэлектриков. Эти два механизма поляризации (электронная и ионная) относятся к мгновенному типу поляризации.

Дипольная поляризация сопровождается частичной ориентацией молекул диэлектрика, находящихся в процессе хаотического теплового движения, под действием сил внешнего электрического поля. Этот тип поляризации сопровождается рассеянием энергии, выделением тепла и происходит замедленно. Дипольная поляризация относится к так называемому релаксационному типу, включающему в себя и другие виды поляризации (ионно-релаксационную и электронно-релаксационную).

Известны и другие типы поляризации - миграционная и спонтанная.

В полярных диэлектриках (например, твёрдый сероводород) группы атомов молекулы или радикалы представляют собой электрические диполи, которые в отсутствие электрического поля ориентированы хаотично, а под действием поля эти диполи ориентируются вдоль него. Такая ориентационная (дипольная) поляризация типична для полярных жидкостей и газов. Сходный механизм поляризации связан с перескоком под действием электрического поля отдельных ионов из одних возможных положений равновесия в решётке в другие. Особенно часто такой механизм поляризации наблюдается в веществах с водородной связью (например, у льда), где ионы водорода имеют несколько положений равновесия.

Так как процесс поляризации заключается в перераспределении связанных зарядов, размещённых на частицах определённой массы

(электроны, ионы и т.д.), то его результат зависит от скорости изменения напряженности внешнего поля. Поэтому многие электрические свойства диэлектриков проявляют зависимость в той или иной степени от частоты изменения электрического поля, в котором они находятся. Это явление называется дисперсией. В стационарном поле, напряжённость которого сохраняется во времени постоянной, процессы поляризации происходят под действием электростатических сил поля. В этом случае свойства диэлектрика описывают статическими значениями соответствующих электрических характеристик. Для описания свойств диэлектрика в переменных полях используют динамические Параметры и их зависимости от частоты.

Диэлектрическая проницаемость и электрические поля в диэлектриках

Каждая из заряженных обкладок плоского конденсатора создает вблизи поверхности электрическое поле, модуль напряженности которого выражается соотношением:

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

где σ - поверхностная площадь заряда на обкладках конденсатора.

Согласно принципу суперпозиции, напряженность \vec{E} поля, создаваемого обеими пластинами, равна сумме напряженностей \vec{E}^+ и \vec{E}^- полей каждой из обкладок:

$$\vec{E} = \vec{E}^+ + \vec{E}^-$$

Внутри конденсатора вектора \vec{E}^+ и \vec{E}^- параллельны; поэтому модуль напряженности суммарного поля равен:

$$E = 2E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Откуда поверхностная площадь заряда на обкладках конденсатора:

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E.$$

При увеличении напряжения на обкладках конденсатора заряд на каждой обкладке увеличивается до нового значения Q .

Суммарный, полный заряд в конденсаторе с диэлектриком

$$Q = Q_0 + Q_d = \varepsilon_r Q_0 \quad (2.1)$$

где ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость, Q_0 - электрический заряд, накопленный в конденсаторе с вакуумом, Q_d - дополнительный заряд.

Электрическая емкость конденсатора с вакуумом между обкладками

$$C_0 = Q_0 / U \quad (2.2)$$

Емкость C_0 называют геометрической емкостью конденсатора. Емкость конденсатора с диэлектриком между обкладками

$$C_x = Q / U. \quad (2.3)$$

Из формул (2.1), (2.2), (2.3) следует, что ε_r равна отношению емкости конденсатора с диэлектриком C_x к емкости того же конденсатора, где между обкладками вакуум C_0 :

$$\varepsilon_r = C_x / C_0 \quad (2.4)$$

Диэлектрическая проницаемость является важнейшим макроскопическим параметром диэлектрика, характеризующим процесс поляризации, и она может быть найдена по измеренной емкости конденсатора с диэлектриком.

Емкость плоского конденсатора в вакууме равна

$$C_0 = \varepsilon_0 S / d. \quad (2.5)$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная, S - площадь обкладок конденсатора, d - зазор между обкладками конденсатора.

Емкость плоского конденсатора с диэлектриком

$$C_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / d. \quad (2.6)$$

где ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость.

Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют мощность, поглощаемую диэлектриком под действием приложенного напряжения. Потери мощности вызываются электропроводностью и медленными поляризациями.

Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материале обнаруживается сквозной ток при постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации. Качество материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозного тока, возникают дополнительные причины, вызывающие потери в диэлектрике.

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

- диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- ионизационные диэлектрические потери;
- диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Физический смысл тангенса угла диэлектрических потерь становится ясным, если обратиться к векторной диаграмме, изображенной на рис. 2.2, б.

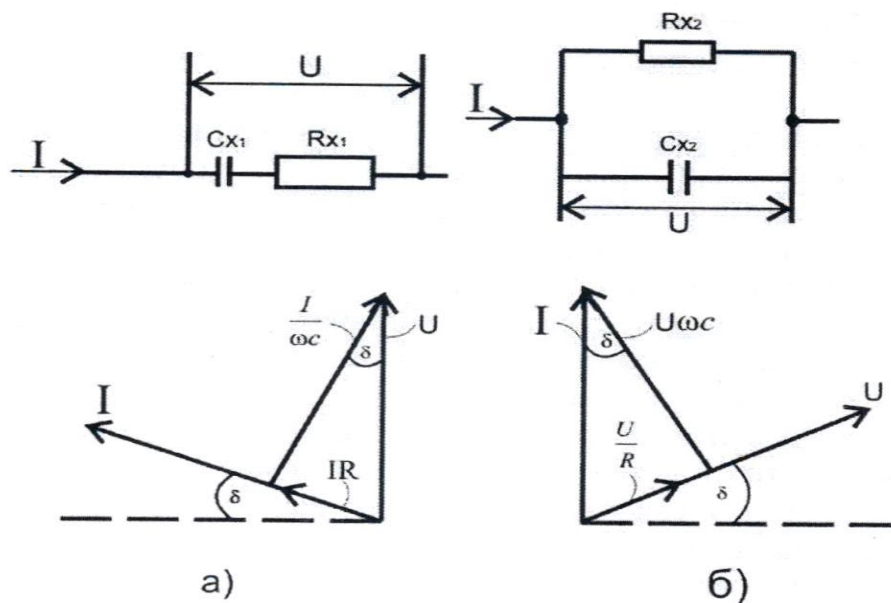


Рис. 2.2. Последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения реального

конденсатора и соответствующие векторные диаграммы.

Из этой диаграммы следует, что

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_p}$$

Таким образом, $\operatorname{tg}\delta$ - это отношение активной и реактивной составляющих тока, возникающих под действием переменного (синусоидального) напряжения, приложенного к образцу диэлектрика.

Так как оба элемента схемы замещения (R и C) находятся под одинаковым напряжением, то отношение мощностей этих элементов оказывается равным отношению токов, протекающих через них. Поэтому тангенс угла потерь показывает, какую часть от реактивной мощности составляет мощность активных потерь.

Величина обратная тангенсу диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ называется добротностью:

$$Q = 1/\operatorname{tg}\delta = \operatorname{ctg}\delta.$$

Для последовательной схемы:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega R_{x1} C_{x1}$$

для параллельной:

$$\operatorname{tg}\delta = 1/\omega R_{x2} C_{x2}$$

Физически *угол диэлектрических потерь* - угол, дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи. Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол диэлектрических потерь δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига и тем больше угол и его функция $\operatorname{tg}\delta$.

Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Даже если напряжение, приложенное к диэлектрику, недостаточно велико для того, чтобы за счет диэлектрических потерь мог произойти недопустимый перегрев, то и в этом случае большие диэлектрические потери могут принести существенный вред, увеличивая,

например, активное сопротивление колебательного контура, в котором использован данный диэлектрик, а, следовательно, и величину затухания.

Природа диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах различна в зависимости от агрегатного состояния вещества. Диэлектрические потери могут обуславливаться сквозным током или, как указывалось при рассмотрении явления поляризации, активными составляющими токов смещения.

В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь от сквозной электропроводности и потерь от замедленной поляризации, возникают диэлектрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, оксидов железа; они значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале.

При высоких напряжениях потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектрика», особенно интенсивно происходящей на высоких частотах.

Дальнейшее рассмотрение диэлектрических материалов будем проводить на примере конденсатора.

В любом реальном конденсаторе при работе его на переменном токе неизбежны потери в диэлектрике, обусловленные переменной поляризацией. Кроме того, конденсатор имеет ещё активную проводимость через изоляцию электродов, поэтому реальный конденсатор представляется эквивалентной схемой в виде идеальной ёмкости, последовательно или параллельно соединённой с активным сопротивлением (рис. 2.2).

Векторные диаграммы и схемы замещения для идеального диэлектрика и диэлектрика с потерями показаны на рис. 2.2.

Из векторной диаграммы видно, что тангенс угла потерь равен отношению активного и реактивного токов или отношению активной мощности P_A к реактивной P_C .

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{P_A}{P_C}$$

Сопоставление формул для последовательной и параллельной схем замещения показывает, что они дают взаимно противоположные зависимости параметров цепи конденсатора от частоты. Это объясняется тем, что ни одна из схем замещения не отражает полностью тех реальных процессов, которые имеют место в конденсаторах.

Последовательная схема и соответствующие ей формулы лучше отражают физические свойства реального конденсатора в области высоких частот (более 1 МГц), параллельная схема даёт более правильные результаты в области низких частот. В области средних частот обе схемы являются достаточно удовлетворительными.

У материалов, применяемых на повышенных частотах и при высоких напряжениях, $\text{tg}\delta$ лежит в пределах $10^{-3} \dots 10^{-4}$, для низкочастотных диэлектрических материалов - полярных диэлектриков значения $\text{tg}\delta$ обычно $10^{-1} \dots 10^{-2}$, для слабо-полярных - до 10^{-3} . Для хорошо осушенных газов, не содержащих влаги, значения могут достигать $10^{-5} \dots 10^{-8}$.

Для упрощения расчетов часто пользуются комплексными величинами. Комплексная диэлектрическая проницаемость записывается в виде

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

где действительная часть ε' имеет физический смысл относительной диэлектрической проницаемости, а ε'' характеризует потери

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \text{tg}\delta$$

и называется коэффициентом диэлектрических потерь.

Выбор в каждом конкретном случае той или иной эквивалентной схемы определяется значениями величин, подлежащих измерению. В некоторых случаях данная схема для удовлетворения условий равновесия нуждается в применении образцовых мер какого-либо необычного или неудобного номинального значения, например, очень больших или, наоборот, очень малых. Если объект измерения обладает малыми потерями, то при выборе параллельной эквивалентной схемы активное сопротивление составит несколько сотен килом, что явно неудобно. Последовательная схема в этом случае будет, несомненно, целесообразнее. Если же предполагается, что объект измерения обладает большими потерями, то используется параллельная эквивалентная схема.

Поэтому, выбирая какую-либо схему, необходимо предварительно оценить порядок входящих в неё величин и параметров: если потери малы, то используется последовательная эквивалентная схема, если велики - то параллельная.

Частотная зависимость потерь является важной характеристикой материала и определяется не только структурой материала, но и наличием и составом примесей. Как правило, потери имеют максимум при одной или

нескольких частотах, в зависимости от строения диэлектрика. Положение максимумов характеризуется собственными частотами установления поляризации. Они могут быть связаны с поворотом полярных молекул в жидком диэлектрике или с поворотом домена в сегнетоэлектрике.

При воздействии переменного напряжения, период которого много меньше времени установления соответствующей поляризации, диэлектрическая проницаемость и, соответственно, потери - малы. Поэтому в неполярных диэлектриках потери малы практически на всех частотах. Если период переменного напряжения близок к времени установления поляризации, то потери достигают максимального значения. Поясним это на примере дипольной поляризации.

При воздействии напряжения диполи начинают поворачиваться и ориентируются вдоль действия электрического поля примерно к моменту окончания первого полупериода напряжения. На следующем полупериоде они разворачиваются и ориентируются в новом направлении примерно к его окончанию.

Получается, что диполи непрерывно вращаются, а поскольку этот процесс происходит в вязкой среде, то энергия движения, поступающая из электрического поля, передается окружающим молекулам. В результате этого энергия, поступающая из источника, расходуется на нагревание диэлектрика. При воздействии переменного напряжения, период которого много больше времени установления соответствующей поляризации, диэлектрическая проницаемость, соответствующая этому виду максимальна и потери, связанные с этим малы.

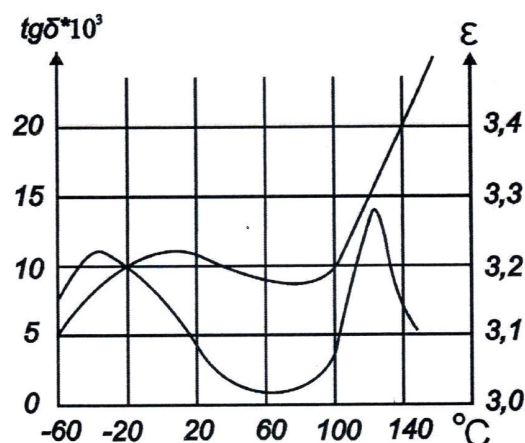


Рис. 2.3. Зависимость угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости полиэтилентерефталатной плёнки от температуры

Следует отметить, что влиянию температуры, частоты, влажности, напряженности поля подвержены не только диэлектрические потери, но и другие электрические характеристики диэлектриков: диэлектрическая проницаемость ϵ и проводимость γ (рис. 2.3).

Знание частотной зависимости $\text{tg}\delta$ необходимо для рационального выбора диэлектрика (или типа применяемого конденсатора), работающего при определённых напряжениях и частотах, определяющих уровень диэлектрических потерь, а значит и температуру материала, которая не должна превышать предельно допустимую.

Причиной такого влияния является зависимость характера движения связанных и свободных зарядов от указанных факторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Измерение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твёрдых диэлектриков

Цель работы: изучение свойств диэлектрических материалов. Определить относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь диэлектриков. Провести численный расчет электростатического поля и определить значение емкости, сравнить полученное значение с измеренным экспериментально.

Оборудование: модуль «Измеритель RLC », минимодули «Диэлектрическая проницаемость бумаги», «Диэлектрическая проницаемость полиэтилентерефталата», «Диэлектрическая проницаемость полипропилена», соединительные проводники, программа «Elcut».

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

В данной лабораторной работе производится измерение емкости $C_{изм}$ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ моделей конденсаторов, с различными типами диэлектриков, прямым методом - измерителем RLC . Производится численный расчет электростатического поля для определения значения электрического заряда или энергии электрического поля, которые будут использоваться для расчета емкости $C_{расч}$.

2. Подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф».

3. Подключить минимодуль «Диэлектрическая проницаемость бумаги» к измерителю RLC , как показано на рис. 2.4 (полярность подключения значения не имеет).

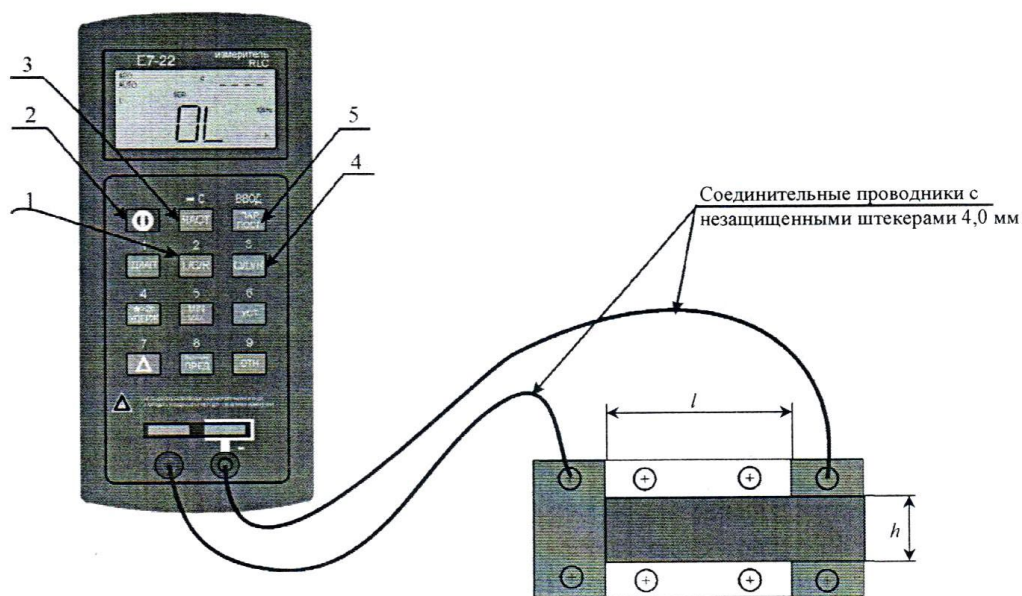


Рис. 2.4. Соединение измерителя RLC и минимодуля «Диэлектрическая проницаемость»: 1 - кнопка выбора режима измерения основного параметра (емкость, индуктивность, сопротивление); 2 - кнопка включения прибора; 3 - кнопка выбора частоты тест сигнала; 4 - кнопка выбора режима измерения дополнительного параметра (активное сопротивление, добротность, тангенс угла диэлектрических потерь); 5 - кнопка выбора схемы замещения; l - длина обкладки модели конденсатора; h - ширина обкладки модели конденсатора

Включить измеритель RLC , нажав кнопку « D », кнопкой « $L/C/R$ » выбрать режим измерения емкости, о чем будет свидетельствовать символ « F » - фарады в нижнем правом углу дисплея. Выбрать частоту тест сигнала 1 кГц нажатием кнопки "ЧАСТ", значение частоты тест сигнала отображается в правой части дисплея «1 kHz». Установить режим измерения тангенса угла диэлектрических потерь нажатием кнопкой « $Q/D/R$ », о чем будет свидетельствовать символ « D » в верхней части дисплея. Выбрать последовательную схему замещения (кнопка «ПАР / ПОСЛ»), при этом на дисплее RLC -метра отобразится « SER ».

Значение емкости отображается цифрами в центральной части дисплея, в правом нижнем углу расположена единица измерения: « μF » - $10^{-6}\Phi$; « nF » - $10^{-9}\Phi$; « pF » - $10^{-12}\Phi$.

В правой верхней части дисплея отображается значение тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$.

После установки показаний RLC метра занести значения емкости $C_{изм}$ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ в табл. 2.1.

4. Не выключая измеритель RLC повторить измерения по пункту 3 для минимодулей «Диэлектрическая проницаемость полиэтилентерефталата» и «Диэлектрическая проницаемость полипропилена». Результаты измерений заносить в табл. 2.1

Таблица 2.1

Вид диэлектрика	f , Гц	$tg\delta$	$C_{изм}$, Ф	$C_{расч}$, Ф	ε	d , м	S , м ²	h , м	l , м
Бумага									
Полиэтилентерефталат									
Полипропилен									

5. Рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость ε материалов, по формуле:

$$\varepsilon = \frac{C_{изм}d}{\varepsilon_0 S},$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ - диэлектрическая постоянная, Ф/м; $S = hl$ - площадь графитовых обкладок модели конденсатора, м²; d - толщина диэлектрика, м.

Значения относительной диэлектрической проницаемости ε для каждого материала занести в табл. 2.1.

6. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

Определение емкости минимодулей по результатам численного расчета электростатического поля с заданием относительной диэлектрической проницаемости полученной экспериментально.

7. Запустить программу «Elcut».

8. Создать задачу расчета электростатического поля.

В строке меню выбрать пункты «Файла» → «Создать задачу ... ». В открывшемся окне «Создание задачи» ввести имя файла задачи и указать путь сохранения задачи. Нажать кнопку «Далее».

В следующем окне «Создание задачи» (рис. 2.5) выбрать тип задачи - электростатическое поле, единицы длины - метры, класс модели - плоская, задать в числовом поле « L_z =>» длину геометрической модели плоского

конденсатора в направлении оси z (за плоскость экрана) $L_z = l$ (табл. 2.1).

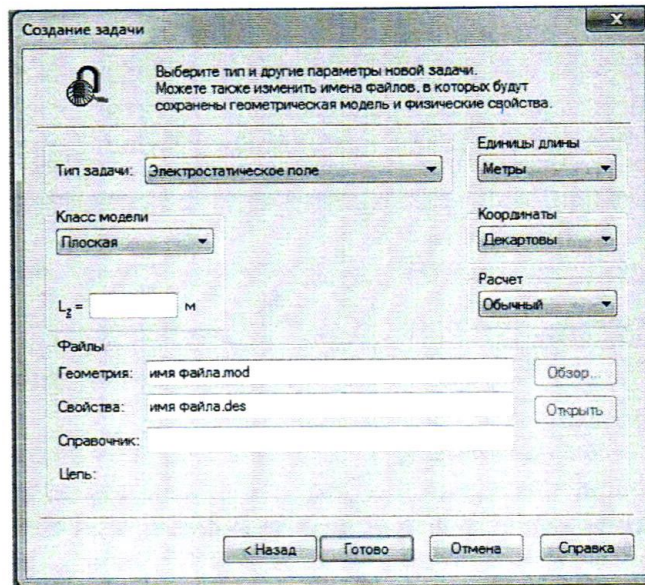


Рис. 2.5. Окно «Создания задачи»

9. Построить геометрическую модель задачи.

Двойным щелчком левой кнопки мыши выбрать в окне задачи, находящейся в левой части главного окна «Elcut», пункт «геометрия: имя файла.mod» (рис. 2.6).

В открывшемся окне «Геометрическая модель» нарисовать геометрическую модель плоского конденсатора с толщиной диэлектрика d и высотой обкладок h (по указанию преподавателя табл. 2.1), как показано на рис. 2. 7.

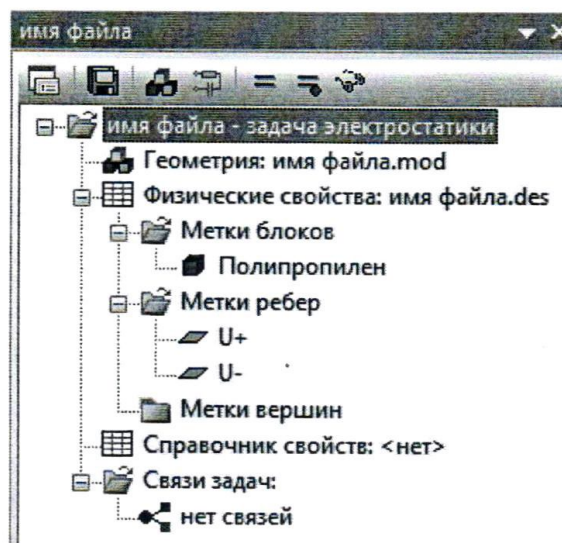


Рис. 2.6. Окно задачи

Создание и манипулирование геометрическими объектами приведено в руководстве пользователя «*Elcut*» (Глава 4. Описание геометрии задачи) и в справке программы «*Elcut*» → «Работа с геометрической моделью».



Рис. 2.7. Геометрическая модель плоского конденсатора

10. Задать параметры задачи (задание свойств материалов и граничных условий).

В окне задачи (рис. 2.6) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «Полипропилен».

Открыть окно «Свойства метки блока – Полипропилен», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «Полипропилен». В открывшемся окне «Свойства метки блока – Полипропилен» (рис. 2.8) ввести:

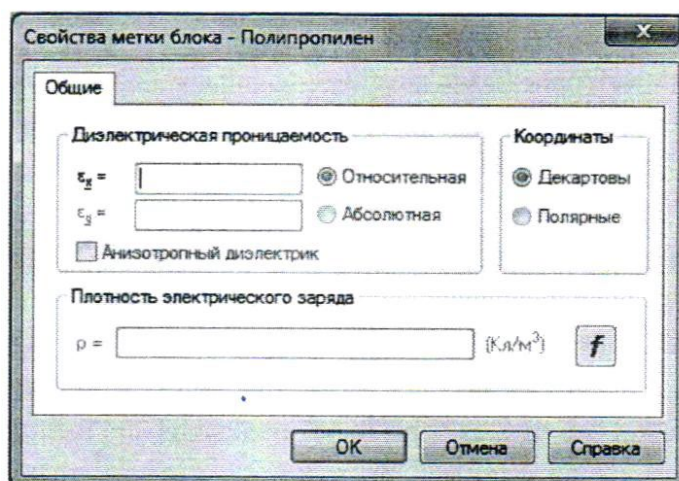


Рис. 2.8. Окно «Свойства метки блока»

- в числовом поле « ϵ_x » значение относительной диэлектрической проницаемости полипропилена ϵ , полученной экспериментально (табл. 2.1);
- выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии) параметра «Анизотропный материал».

В геометрической модели выбрать блок «Полипропилен» (рис. 2.9). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства».

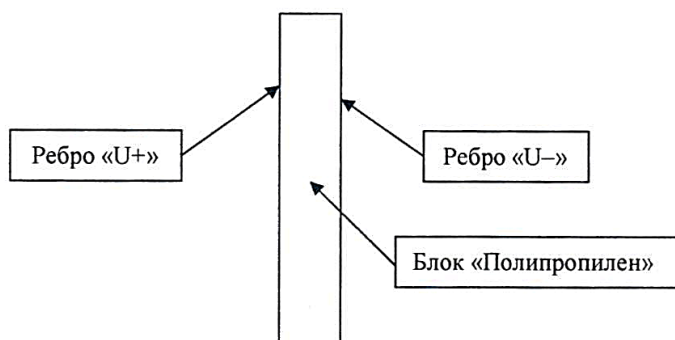


Рис. 2.9. Геометрическая модель диэлектрика с указанием названий блока и ребер

В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 2.10), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «Полипропилен».

В окне задачи (рис. 2.6) выбрать пункт «Метки ребер». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке ребра « $U+$ ». Аналогично создать метку ребра « $U-$ ».

Открыть окно «Свойства метки ребра – $U+$ », выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра « $U+$ ». В открывшемся окне «Свойства метки ребра – $U+$ » (рис. 2.11) включить флажок «Потенциал: $U = U_0$ » и в числовом поле « U_0 » ввести значение $U_0 = 10$.

Открыть окно «Свойства метки ребра – $U-$ », выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра « $U-$ ». В открывшемся окне «Свойства метки ребра – $U-$ » включить флажок «Потенциал: $U = U_0$ » и в числовом поле « U_0 » ввести значение $U_0 = 0$

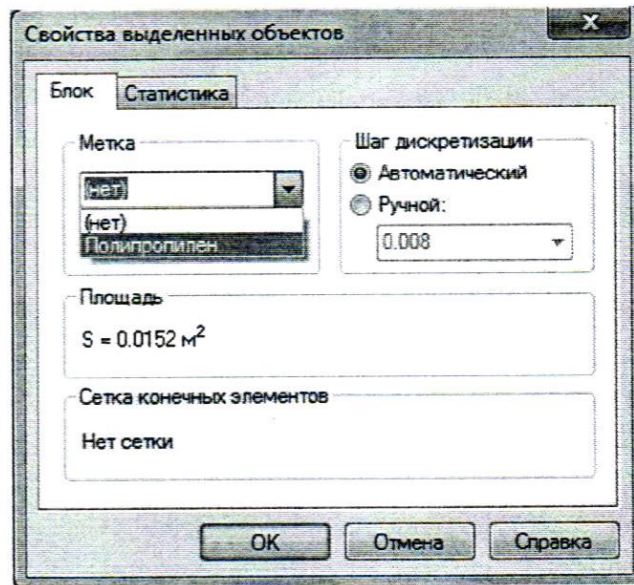


Рис. 2.10. Окно «Свойства выделенных объектов»

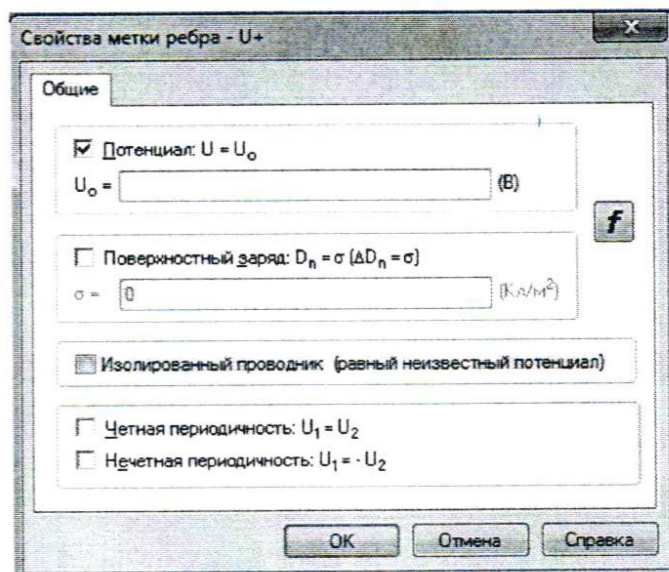


Рис. 2.11. Окно свойства метки ребра

Задать граничные условия, для чего выбрать одно из граничных ребер, как показано на рис. 2.9. Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов», в выпадающем меню «Метка», выбрать метку « $U+$ ». Аналогично присвоить метку « $U-$ » для противоположного ребра.

Остальным ребрам, по умолчанию, присваивается однородное условие Неймана.

11. Решить задачу электростатического поля.

На панели инструментов окна «Геометрическая модель» нажать кнопку «Построение сетки» (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Панель инструментов окна «Геометрическая модель»

После построения сетки конечных элементов в блоке «Полипропилен» геометрической модели, нажать кнопку «Решить» на панели инструментов окна задач (рис. 2.13), и подтвердить сохранение файлов решения.



Рис. 2.13. Панель инструментов окна задач

12. Провести анализ результатов решения.

В открывшемся дополнительном окне «Результат расчета», которое представлено геометрией модели с изолиниями равного потенциала, открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Добавить (Линия/Ребро/Блок)», далее крестообразным курсором выделить левую обкладку плоского конденсатора.

На панели инструментов окна «Результат расчета» нажать кнопку «Калькулятор» (рис. 2.14).

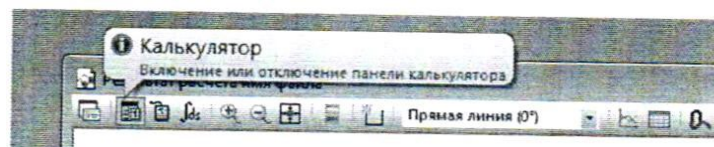


Рис. 2.14. Панель инструментов окна «Результат расчета»

В открывшемся окне «Калькулятор» (рис. 2.15) выбрать двойным

щелчком левой кнопки мыши строку «Мастер емкостей», после чего откроется информационная страница окна «Мастер вычисления емкостей». Нажать кнопку «Далее».

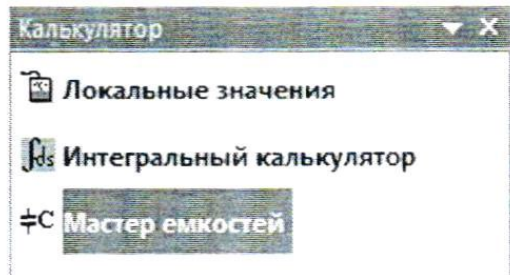


Рис. 2.15. Окно «Калькулятор»

В открывшейся странице «Электроды» окна «Мастер вычисления емкостей» выбрать из списка электроды « $U+$ » и « $U-$ », как показано на рис. 2.16. Нажать кнопку «Далее».

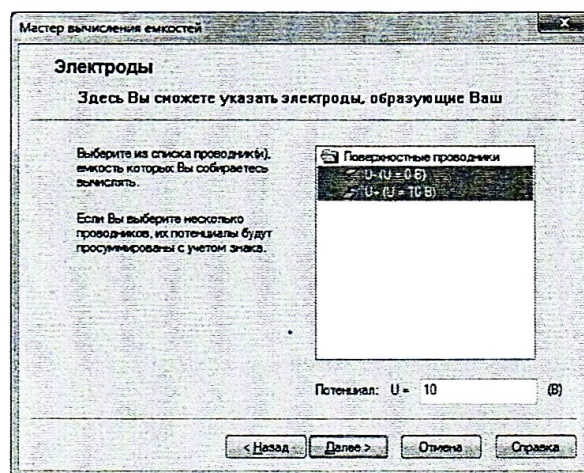


Рис. 2.16. Страница «Электроды» в окне «Мастер вычисления емкостей»

На следующей странице «Заряд» окна «Мастер вычисления емкостей» выбрать из списка контур интегрирования, после чего вычисленное значение заряда появится в числовом поле «Заряд: $Q \Rightarrow$ » (рис. 2.17).

Вычислить энергию электрического поля, нажав кнопку «Вычислить энергию», значение энергии электростатического поля появится в числовом поле «Энергия $W \Rightarrow$ » (рис. 2.17). Нажать кнопку «Далее».

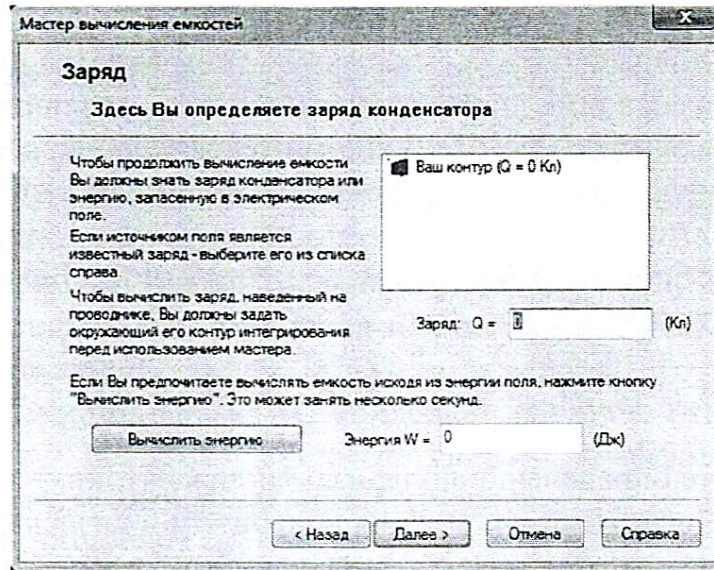


Рис. 2.17. Страница «Заряд» в окне «Мастер вычисления емкостей»

На следующей странице «Мастер емкостей завершен» окна «Мастер вычисления емкостей» (рис. 2.18) сравнить значения рассчитанных емкостей исходя из заряда и исходя из энергии, значения должны быть одинаковыми. Полученное значение емкости занести в табл. 2.1.

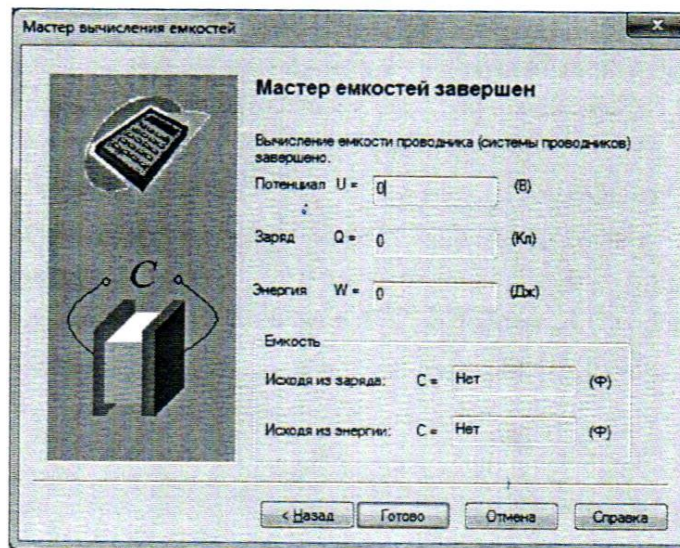


Рис. 2.18. Страница «Мастер емкостей завершен» в окне «Мастер вычисления емкостей»

13. Повторить работы по пунктам 1 – 6 для других видов диэлектриков.
14. Сравнить экспериментальные значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и тангенса угла диэлектрических потерь

$\operatorname{tg}\delta$ материалов со справочными.

15. Сравнить значения емкостей $C_{\text{расч}}$ плоских конденсаторов, полученных методом математического моделирования электростатического поля, со значениями $C_{\text{изм}}$ полученными экспериментально (табл. 2.1)

Используя данные табл. 2.1 построить гистограммы диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных типов диэлектриков, сравнить диэлектрики по величине тангенса угла диэлектрических потерь и относительной диэлектрической проницаемости. Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Более подробное описание работы с программой «*Elcut*» приведено в руководстве пользователя «*Elcut*».

Контрольные вопросы

1. Приведите определение поляризации диэлектрика.
2. Назовите основные механизмы поляризации диэлектрика.
3. Приведите определение относительной диэлектрической проницаемости материала.
4. Физическая природа диэлектрических потерь материалов.
5. Приведите определение тангенса угла диэлектрических потерь.
6. Перечислите основные виды диэлектрических потерь материалов по их особенностям и физической природе.
7. Приведите векторные диаграммы, соответствующие последовательной и параллельной схемам замещения конденсатора.
8. К чему могут привести высокие диэлектрические потери в конденсаторах и изоляционных материалах?
9. Приведите определение скалярного электрического потенциала.
10. Перечислите граничные условия, применяемые при решении задач математической физики.
11. Какие параметры материалов задаются при решении задачи электростатического поля?
12. Приведите картину электростатического поля плоского конденсатора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости диэлектрика от температуры

Цель работы: изучить зависимость тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости от температуры.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», минимодуль «ТКЕ конденсаторов», модуль «Измеритель RLC», модуль «Мультиметры», соединительные проводники.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы.

2. Согласно рис. 2.19 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Ручку тумблера SA2 перевести в нижнее положение.

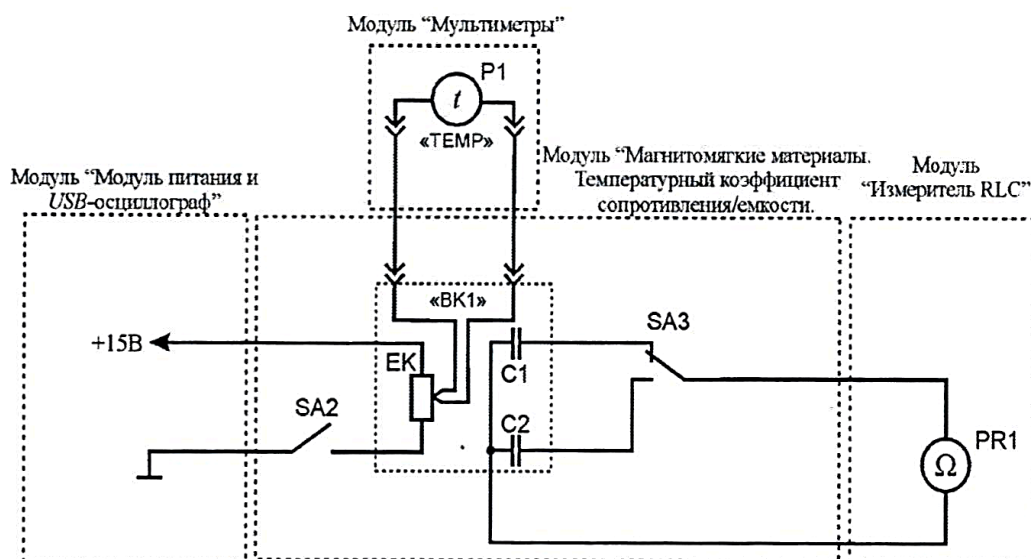


Рис. 2.19. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения зависимости диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь от температуры

Установить минимодуль «ТКС конденсаторов» в соответствующие гнезда расположенные в области «Температурный коэффициент сопротивления/емкости» модуля «Магнитомягкие материалы».

Подключить термопару $BK1$ минимодуля к гнездам «TEMP» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

В качестве измерителя емкости $P1$ использовать RLC -метр в режиме измерения емкости.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметр 1. Включить RLC -метр, выбрать режим измерения емкости (кнопка « $L/C/R$ »), выбрать последовательную схему замещения (кнопка «ПАР/ПОСЛ», на дисплее RLC -метра отобразится « SER ») установить частоту тест сигнала 1 kHz (кнопка «ЧАСТ»), установить режим измерения диэлектрических потерь (кнопка « $Q/D/R$ »).

4. Значения сопротивлений емкости $C1$, $C2$, тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и комнатной температуры T занести в табл. 2.2. Переключения между конденсаторами $C1$ и $C2$ осуществляется тумблером $SA3$. Конденсатор $C1$ - К10-176-М1500 (верхнее положение ручки тумблера). Конденсатор $C2$ - К10-47а-МП0 (нижнее положение ручки тумблера).

Таблица 2.2

№	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Емкость конденсатора C, nF		$\text{tg}\delta$	
		$C1$ (К10-176-М1500)	$C2$ (К10-47а-МП0)	$C1$	$C2$
1					
2					

5. Включить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в верхнее положение). Если показания температуры ($P2$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра 1). По окончании нагрева (установившаяся температура не изменяется в течение 5 минут более чем на $1 \dots 2\text{ }^\circ\text{C}$) занести в табл. 2.2 значения емкости конденсаторов $C1$, $C2$, тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ и температуры T . Отключить нагрев (ручку тумблера $SA2$ перевести в нижнее положение).

6. Используя данные табл. 2.2 построить графики зависимости $\text{tg}\delta$ (T)

для конденсаторов C_1 и C_2 . Так как диэлектрическая проницаемость пропорциональна емкости конденсатора $\varepsilon_r = C_x/C_0$, то зависимость диэлектрической проницаемости ε_r от температуры T будет иметь такой же вид как зависимость емкости конденсатора C_x от температуры T . Построить графики зависимости $C_x(T)$.

7. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту,

8. Анализируя графики зависимости $C(T)$ конденсаторов сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Приведите понятие диэлектрической проницаемости.
2. Приведите определение тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора.
3. Приведите определение добротности конденсатора.
4. Какие физические процессы обуславливают нагрев диэлектрика, ведущие к изменению его основных параметров?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь активных диэлектриков

Цель работы: определить тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическую проницаемость пьезоэлектрика.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Модуль питания и *USB* осциллограф», модуль «Прямой и обратный пьезоэффект. Наборное поле», модуль «Измеритель *RLC*», соединительные проводники.

Теоретическая часть

Активными называют диэлектрики, свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий и использовать эти воздействия для создания функциональных элементов электротехники и электроники. Активные диэлектрики позволяют осуществлять генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, запоминание или преобразование информации. По мере наращивания сложности электронной аппаратуры и перехода к функциональной электронике, роль и значение активных диэлектриков при решении важнейших научных и технических задач непрерывно возрастают.

К числу активных диэлектриков относят сегнето-, пьезо- и пироэлектрики; электро-, магнито- и акустооптические материалы; диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и др.

Свойствами активных диэлектриков могут обладать не только твердые, но также жидкие и даже газообразные вещества (например, активная среда газовых лазеров). По химическому составу это могут быть органические и неорганические материалы. По строению и свойствам они подразделяются на кристаллические и аморфные, полярные и неполярные диэлектрики. Ряд материалов проявляет свою активность лишь благодаря наличию в них спонтанной или устойчивой остаточной поляризации. Однако, поляризованное начальное состояние не является обязательным условием проявления активности материала при внешних воздействиях. Строгая классификация активных диэлектриков, охватывающая многие отличительные признаки этих материалов, оказывается весьма затруднительной. К тому же резкой границы между активными и пассивными диэлектриками не существует. Один и тот же материал в различных условиях

его эксплуатации может выполнять либо пассивные функции изолятора или конденсатора, либо активные функции управляющего или преобразующего элемента.

В зависимости от технического назначения существенно различны и требования к материалам. Так, одно из главных требований, предъявляемых к пассивным диэлектрикам, заключается в сохранении стабильности свойств при внешних воздействиях. В то же время требования к активному материалу совершенно противоположные: чем сильнее изменяются его свойства при внешних возмущениях, тем лучше может выполнять активный элемент функции управления энергией или преобразования поступающей информации.

В большинстве случаев активные диэлектрики классифицируют по роду физических эффектов, которые используются для управления свойствами материалов. Однако такая классификация, хотя и является вполне логичной и обоснованной, все же не позволяет четко разделить одну группу материалов от другой. Это связано с тем, что многие материалы проявляют высокую чувствительность по отношению к нескольким видам энергетических воздействий. Наибольшей универсальностью в этом плане характеризуются сегнетоэлектрики, которые сочетают в себе свойства пьезо- и пироэлектриков, электрооптических и нелинейно-оптических материалов. Они могут выступать и в качестве электретов. Вместе с тем, сегнетоэлектрики обладают рядом специфических, только им присущих свойств. Важнейшим из них является нелинейное изменение поляризованности при воздействии электрического поля. Это обстоятельство позволяет выделить сегнетоэлектрики в самостоятельную группу активных диэлектриков, аналогично и жидкие кристаллы, спецификой которых является анизотропия свойств и высокая структурная подвижность молекул, проявляющаяся во многих оптических эффектах, несвойственных другим веществам.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

В данной лабораторной работе производится измерение емкости C_x и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ конденсаторов прямым методом - измерителем RLC .

В качестве Р1 использовать измеритель RLC модуля «Измеритель RLC ».

2. Согласно рис. 2.20 выполнить электрические соединения модулей (полярность подключения значения не имеет). Монтаж схемы производить при отключенном питании. Подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф».

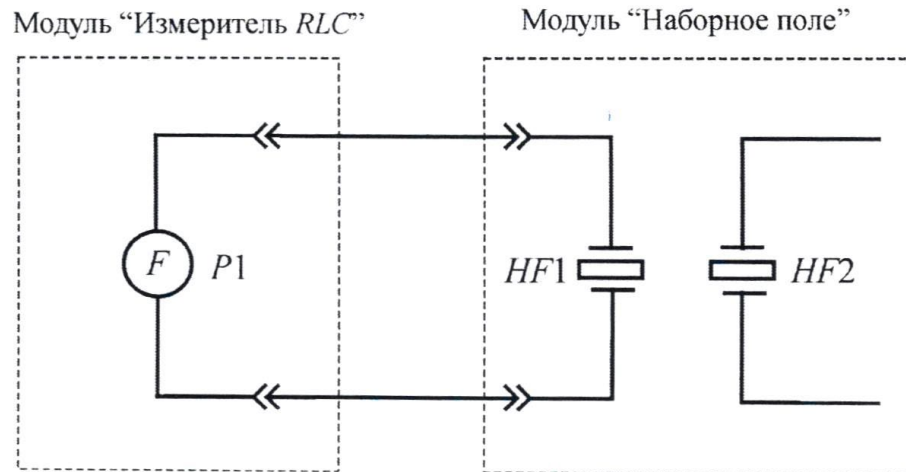


Рис. 2.20. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь пьезоэлектрика

3. Включить измеритель RLC (рис. 2.4), нажав кнопку « Φ », нажатием кнопки « $LICIR$ » установить режим измерения емкости, о чем будет свидетельствовать символ « F » – фарады в нижнем правом углу дисплея. Установить частоту тест сигнала 1 kHz нажатием кнопки «ЧАСТ», частота тест сигнала отображается в правой части дисплея « 1 kHz ». Установить режим измерения тангенса угла диэлектрических потерь нажатием кнопкой « $Q/D/R$ », о чем будет свидетельствовать символ « D » в верхней части дисплея. Выбрать последовательную схему замещения (кнопка «ПАР/ПОСЛ»), на дисплее RLC -метра отобразится « SER ».

Значение емкости отображается цифрами в центральной части дисплея, в правом нижнем углу расположена единица измерения: « μF » – $10^{-6}\Phi$; « nF » – $10^{-9}\Phi$; « pF » – $10^{-12}\Phi$.

В правой верхней части дисплея отображается тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$.

После установки показаний RLC метра занести значения емкости C , и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в табл. 2.3.

4. Не выключая измеритель RLC повторить измерения по пункту 3 для второго пьезоэлемента $HF2$. Результаты измерений занести в табл. 2.3

5. Рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость пьезоэлектрика ε , по формуле:

$$\varepsilon = C_x d / \varepsilon_0 S,$$

где $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ - диэлектрическая постоянная, Ф/м; $S = 1.96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $d = 170 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Значения относительной диэлектрической проницаемости ε для каждого пьезоэлемента занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

№ п/п	$\text{tg}\delta$	$C_x, \text{ мкФ}$	ε
<i>HF1</i>			
<i>HF2</i>			

6. Сравнить экспериментальные значения относительной диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ пьезоэлектрика со справочными.

7. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение поляризации
2. Назовите основные механизмы поляризации
3. Приведите определение относительной диэлектрической проницаемости.
4. Физическая природа диэлектрических потерь.
5. Приведите определение тангенса угла диэлектрических потерь.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Изучение прямого и обратного пьезоэффекта

Цель работы: Ознакомление со свойствами пьезоэлементов. Определить заряд, возникающий при прямом пьезоэффекте. Изучить явление обратного пьезоэффекта.

Оборудование: модуль «Измеритель RLC », модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Прямой и обратный пьезоэффект. Наборное поле», модуль «Функциональный генератор», соединительные проводники.

Теоретическая часть

Рассмотрим пьезоэлектрики.

Пьезоэлектрики – диэлектрики с сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом. Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. При обратном пьезоэффекте происходит изменение размеров диэлектрика под действием приложенного электрического поля.

Возникающий на каждой из поверхностей пьезоэлектрика электрический заряд изменяется по линейному закону под действием механических напряжений (рис. 2.21, а):

$$Q = dF \quad (2.7)$$

где Q – заряд; d – пьезомодуль; F – механическое усилие.

Таким образом, пьезомодуль d численно равен заряду, возникающему на поверхности пьезоэлектрика при приложении к нему механических усилий (рис. 2.21).

Значение пьезомодуля используемых в практике пьезоэлектриков составляет около 10^{10} Кл/Н.

Пьезоэлектрический эффект обратим. При обратном пьезоэлектрическом эффекте происходит изменение размеров диэлектрика $\Delta l/l$ в зависимости от напряженности электрического поля E по линейному закону (рис. 2.21, б)

$$\Delta l/l = dE \quad (2.8)$$

где d – пьезомодуль.

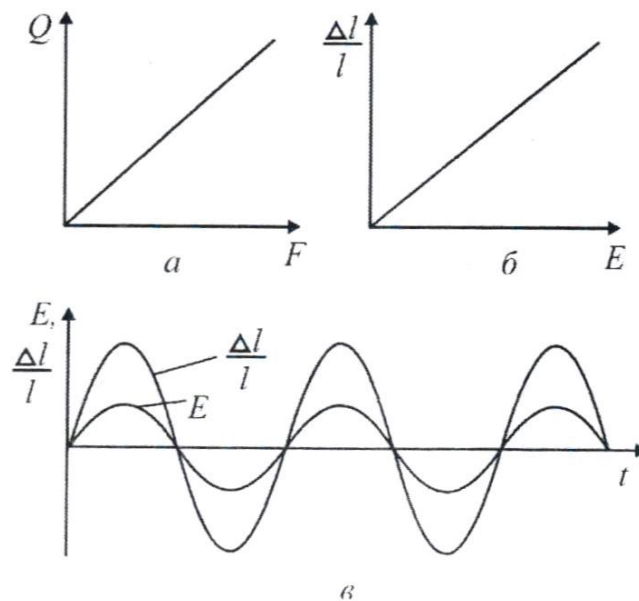


Рис. 2.21. Пьезоэлектрический эффект в диэлектриках

Таким образом, пьезомодуль d численно равен заряду, возникающему на поверхности пьезоэлектрика при приложении к нему механических усилий (рис. 2.21).

Значение пьезомодуля используемых в практике пьезоэлектриков составляет около 10^{10} Кл/Н.

В термодинамике доказывается, что пьезомодули d прямого и обратного пьезоэффектов для одного и того же материала равны между собой.

Деформация пьезоэлектрика зависит от направления электрического поля и меняет знак при изменении направления последнего. На рис. 2.21 в, показано, что при приложении к пьезоэлектрику синусоидального электрического поля у него возникают синусоидальные деформации той же частоты. Различают также *продольный* и *поперечный пьезоэлектрические эффекты*. Под первым понимают такой эффект, когда возникновение зарядов на противоположных гранях пластинки определяют в том же направлении, в котором были приложены механические усилия, а при обратном пьезоэлектрическом эффекте деформацию измеряют в направлении приложенного электрического поля. При поперечном пьезоэлектрическом эффекте возникающие заряды или деформации измеряют в направлении, перпендикулярном направлению механических усилий или электрического поля соответственно.

Следует иметь в виду, что уравнения (2.7) и (2.8) носят лишь качественный характер. Реальное описание пьезоэлектрического эффекта оказывается намного сложнее. Это обусловлено тем, что механическое напряжение является тензорной величиной, которая содержит в общем случае шесть независимых компонентов. Принципиальное отличие тензора напряжений от векторных характеристик состоит в том, что на противоположных гранях любого элементарного объема компоненты тензора имеют противоположное направление, тогда как составляющие (проекции) любого вектора во всех точках элементарного объема направлены одинаково.

Пьезомодуль, устанавливающий связь между вектором поляризации и механическим напряжением, по сравнению с последним является тензором более высокого (третьего) ранга. Он имеет 18 независимых компонентов.

Часть 1: Изучения прямого пьезоэффекта и расчёт пьезомодуля пьезоэлектрика.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

Для определения пьезомодуля d , используя формулу (2.7), необходимо измерить возникающий заряд Q при воздействии на пьезоэлектрик силы F .

При нажатии на кнопку (воздействие силы F) весь заряд, образовавшийся в пьезоэлектрике, переносится в конденсатор C (рис. 2.8). Измерив значение пикового напряжения $U_{\text{пик}}$ и зная ёмкость C , значение заряда Q определяется по формуле:

$$Q = CU_{\text{пик}}. \quad (2.9)$$

2. Согласно рис. 2.22 выполнить электрические соединения модулей для изучения прямого пьезоэффекта. Монтаж схемы производить при отключенном питании.

После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф».

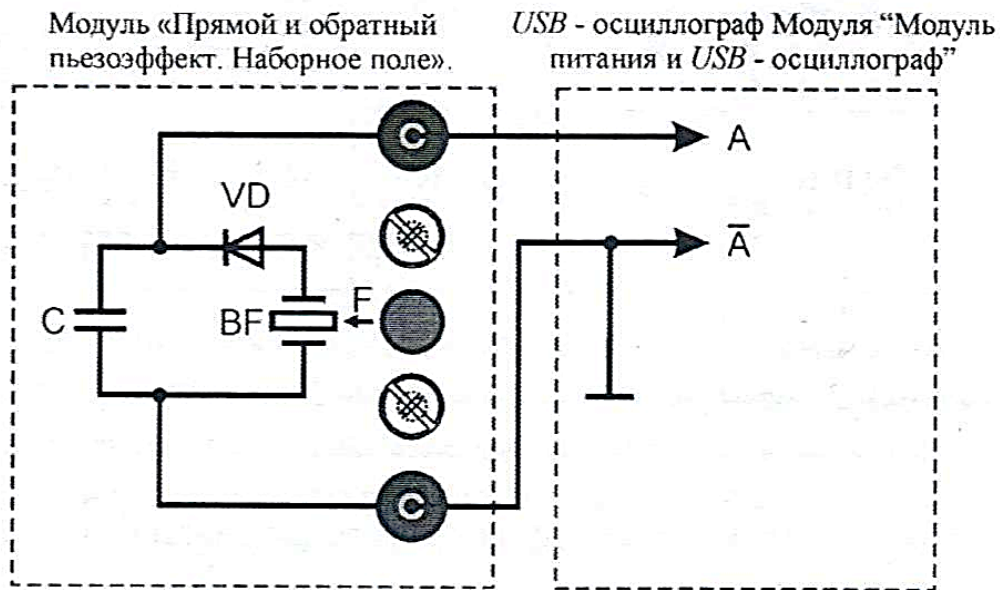


Рис. 2.22. Схема электрическая пикового детектора импульса напряжения пьезоэлемента.

3. Запустить программу «Цифровой осциллограф *DOSC-DLA*». Выбрать режим работы *USB*-осциллографа «Самописец». Задать размах шкалы напряжения канала *A* при помощи ручки настройки «крутилки» «Канал *A* (Вольт/дел)» 1 В/деление. Повернуть ручку «Время (с/дел)» (развертка) в крайне правое положение 2 мс/дел. Нажать кнопку «Запуск». Нажать до щелчка кнопку пьезоэлектрика, не менее 10 раз (воздействие силы *F*, рис. 2.8). Остановить запись данных нажав кнопку «Сброс». Прокрутить ползунок времени до появления импульса напряжения на осциллограмме. Сравнить полученную осциллограмму с осциллограммой, представленной на рис. 2.23, в случае наличия существенных помех выбрать другой импульс.

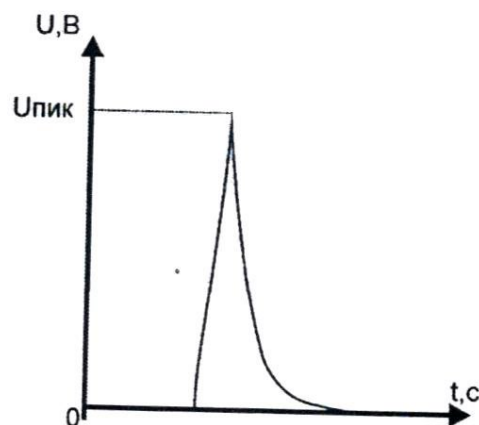


Рис. 2.23. Осциллограмма импульса напряжения

4. По полученной осциллограмме (рис. 2.23) определить значение пикового напряжения $U_{\text{пик}}$. Результат занести в табл. 2.4

5. Рассчитать значение заряда Q по формуле 2.9, полученное значение заряда Q занести в табл. 2.4. Рассчитать пьезомодуль, используя формулу 2.7 и значения табл. 2.4, полученное значение пьезомодуля d занести в табл. 2.4. Сила воздействия на диэлектрик $F = 2IH$, емкость конденсатора $C = 10$ нФ.

Таблица 2.4

№ п.п.	$U_{\text{пик}}, \text{В}$	$Q, \text{Кл}$	$d, \text{Кл/Н}$	$d_{\text{ср}}, \text{Кл/Н}$
1				
2				
...				
10				

Среднее значение пьезомодуля $d_{\text{ср}}$ рассчитывается по формуле:

$$d_{\text{ср}} = (\sum d_n) / n.$$

6. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

7. Сравнить полученное значение пьезомодуля $d_{\text{ср}}$ со справочным, сделать вывод. Указать источник справочной литературы.

Часть 2: Изучение обратного пьезоэффекта и определение резонансной частоты пьезоэлемента

Порядок выполнения лабораторной работы

8. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

9. Согласно рис. 2.24 выполнить электрические соединения модулей для изучения обратного пьезоэффекта. Монтаж схемы производить при отключенном питании.

10. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением

автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить «Функциональный генератор».

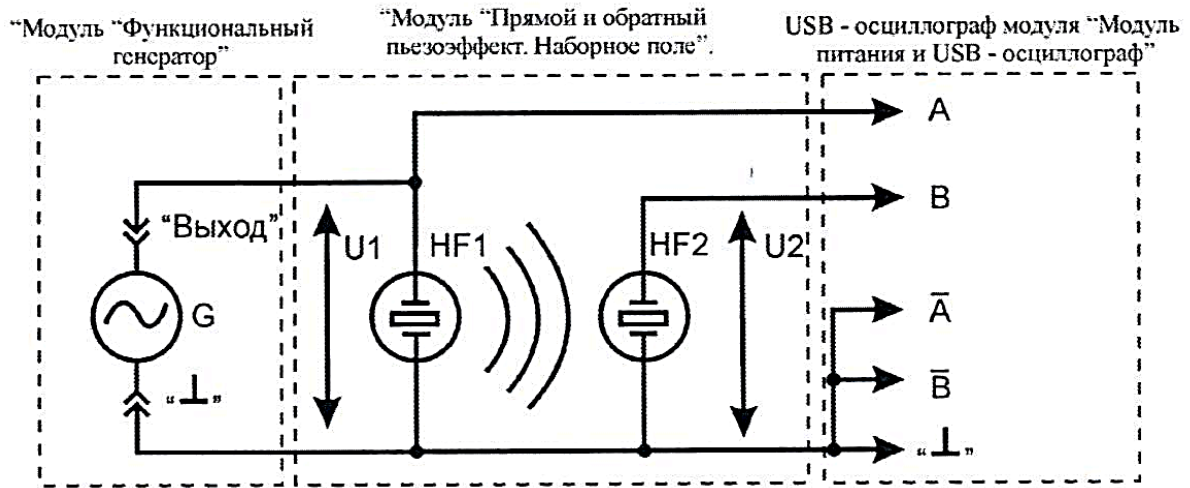


Рис. 2.24. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения обратного пьезоэффекта

11. Установить синусоидальную форму выходного сигнала функционального генератора G , частоту $f_{\text{вых}} = 50$ Гц. Изменяя амплитуду выходного сигнала генератора U_m в диапазоне $0 \dots 10$ В наблюдать изменение громкости звучания пьезоизлучателя $HF1$. Установить амплитуду выходного сигнала генератора $U_m = 8$ В. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф *DOSC-DLA*». Задать размах шкалы напряжения каналов при помощи ручек настройки «крутилки» «Канал А (Вольт/дел)» 1 В/экран, «Канал В (Вольт/дел)» 0,2 В/деление. Повернуть ручку «Время (с/дел)» (развертка) в крайне правое положение 0,5 мс/дел. Нажать на кнопку «цикл». Плавно увеличивая частоту $f_{\text{вых}}$ выходного сигнала функционального генератора G в диапазоне от 50 Гц до 4 кГц с шагом 100 Гц, заносить значения амплитуды U_2 для выбранной частоты $f_{\text{вых}}$. В момент резонанса резко возрастет громкость звука и амплитуда напряжения пьезоизлучателя $HF2$.

12. На основании данных табл. 2.5 построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) пьезоэлемента. По АЧХ определить резонансную частоту $f_{\text{рез}}$ (частота соответствующая максимальной амплитуде U_2).

13. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

Таблица 2.5

$f_{\text{вых}}, \text{Гц}$	$U_2, \text{В}$
50	
150	
250	
...	
4000	

14. Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие диэлектрические материалы называются активными?
2. Что собой представляют пьезоэлектрики, пироэлектрики и электреты?
3. Назовите области применения активных диэлектриков?
4. Приведите определение прямого и обратного пьезоэффекта. В каких диэлектриках наблюдаются эти явления?
6. Какие параметры характеризуют пьезоэлемент?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

Электрический пробой в диэлектриках. Определение электрической прочности воздуха и бумаги. Численный расчет электростатического поля, определение значения напряженности и максимальной плотности энергии поля

Цель работы: определение электрической прочности воздуха, зависимости электрической прочности воздуха от расстояния между электродами. Определение электрической прочности бумаги различной плотности и толщины, зависимости электрической прочности бумаги от плотности бумаги и толщины. Определение распределения напряженности электрического поля по результатам численного расчета электростатического поля.

Оборудование: набор минимодулей «Электрический пробой в воздухе», минимодуль «Электрический пробой бумажного диэлектрика», прибор «МЕГА-ОММЕТР Е6-32», защищенные соединительные проводники, входящие в комплект прибора «МЕГА-ОММЕТР Е6-32», программа «*Elcut*».

Теоретическая часть

Пробой - потеря электрической прочности под действием напряжённости электрического поля, может иметь место как в образцах различных диэлектриков и систем изоляции, так и в электроизоляционных системах любого электротехнического устройства, от мощных генераторов и высоковольтных трансформаторов до любого бытового прибора. Сочетание в системах изоляции материалов, разных по электрической прочности, может приводить к серьёзным осложнениям в эксплуатации самых разнообразных электротехнических устройств, особенно высокого напряжения, где изоляция работает в сильных электрических полях и может возникнуть её пробой.

Причины пробоя бывают различными, поэтому не существует единой универсальной теории пробоя. В любой изоляции пробой приводит к образованию в ней канала повышенной проводимости, достаточно высокой, чтобы произошло короткое замыкание в данном электротехническом устройстве, создающее аварийную ситуацию, по существу выводящую это устройство из строя. Однако в этом отношении пробой может проявлять себя в разных системах изоляции по-разному. В твёрдой изоляции, как правило,

канал пробоя сохраняет высокую проводимость после выключения, приведшего к пробую напряжения, явление протекает необратимо. В жидких и газообразных диэлектриках вследствие высокой подвижности частиц, электрическое сопротивление канала пробоя восстанавливается после снятия вызвавшего его напряжения, практически мгновенно.

Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$ и измеряется чаще всего в киловольтах. Электрическая прочность – характеристика диэлектрика, минимальная напряженность однородного электрического поля, при которой наступает электрический пробой. Электрическая прочность $E_{пр}$ определяется как отношение пробивного напряжения к толщине h диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр} = U_{пр}/h \quad (2.10)$$

Удобные для практических целей численные значения электрической прочности диэлектриков получаются, если пробивное напряжение выразить в киловольтах, а толщину диэлектрика – в миллиметрах. Тогда электрическая прочность будет в киловольтах на миллиметр. Для сохранения численных значений и перехода к единицам системы СИ используют единицу МВ/м:

$$1 \text{ МВ/м} = 1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м.}$$

Пробой газа обуславливается явлением ударной и фотонной ионизации. Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов. Одним из главнейших факторов, способствующих пробую жидкостей, является наличие в них посторонних примесей. Пробой твердых тел может вызываться как электрическими, так и тепловыми процессами.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле, что приводит к росту активного тока и дальнейшему увеличению нагрева диэлектрика вплоть до его термического разрушения.

При длительном действии напряжения пробой может быть вызван электрохимическими процессами, происходящими в диэлектрике под воздействием электрического поля.

Из изложенного следует, что пробой газов - явление чисто электрическое.

Поэтому все численные результаты экспериментов по пробую газов относятся к максимальным (амплитудным) значениям.

В данной лабораторной работе используется однородное электрическое поле между круглыми электродами. При повышении напряжения между электродами возникает явление электрического пробоя, искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность.

Характер зависимости электрической прочности воздуха от расстояния между электродами представлен на рис. 2.25.

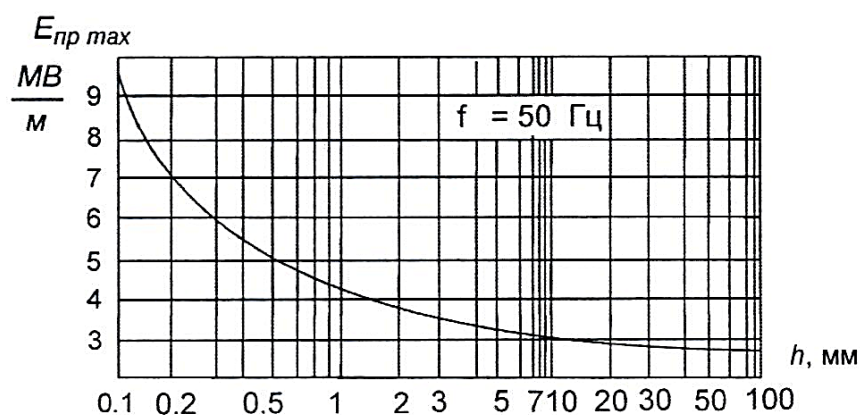


Рис. 2.25. Характер зависимости электрической прочности воздуха от расстояния между электродами

Пробой газа в неоднородном электрическом поле происходит при меньшем напряжении по сравнению с пробоем того же слоя газа в однородном электрическом поле. Вначале наступает неполное электрическое разрушение слоя газа у электрода с меньшим радиусом, так как у его поверхности наблюдаются наибольшие напряженности электрического поля. При повышении напряжения возникает разряд в виде короны. При дальнейшем повышении напряжения корона переходит в искровой разряд, а при достаточной мощности источника - в дуговой.

Электроизоляционные свойства бумаги, в первую очередь, характеризуются показателем ее электрической прочности, величиной диэлектрических потерь и удельным электрическим сопротивлением, а также числом токопроводящих включений на 1 м^2 бумаги.

Электрическая прочность бумаги определяется ее пробивным напряжением, т.е. напряжением, при котором происходит пробой диэлектрика с превращением его в проводник. Электрическая прочность бумаги характеризует способность противостоять пробую и выражается отношением пробивного напряжения к толщине бумаги в месте пробоя. Электрическая прочность снижается с увеличением толщины и влажности бумаги и

увеличивается с ростом плотности бумаги. Электрическая прочность бумаги, пропитанной полярными пропиточными массами, выше чем непропитанной.

Порядок выполнения лабораторной работы

Определение электрической прочности воздуха

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. В лабораторной работе рассматривается электрический пробой в диэлектриках. Расстояние между электродами указано на корпусе минимодулей. Минимодули подключаются к соответствующим гнездам мегаомметра соединительными проводниками с защищенными штекерами 4,0 мм из комплекта мегаомметра.

При использовании мегаомметра необходимо соблюдать особые меры предосторожности. На выводах прибора присутствует высокое напряжение до 2500 В. Во избежание поражения электрическим током во время работы минимодуль «Электрический пробой в воздухе» не следует держать в руках. Использовать мегаомметр разрешается только лицам имеющим допуск к работе с аппаратурой, функционирующей под напряжением выше 1000 В (лаборант, техник), в противном случае категорически запрещается выполнять данную лабораторную работу.

3. Согласно рис. 2.26 выполнить подключение мегаомметра $E6 - 32$ к электродам минимодуля «Электрический пробой в воздухе $h = 0,1$ мм» (соответствие гнезд и расстояние между электродами указаны на корпусе минимодуля). Монтаж схемы производить при отключенном питании мегаомметра $E6 - 32$.

4. Включить мегаомметр $E6-32$, нажав кнопку «D». Последовательно нажимая кнопку «РЕЖИМ» выбрать режим измерения напряжения пробоя разрядников, о чем будет свидетельствовать надпись « $U_{разр}$ » в нижнем левом углу дисплея мегаомметра.

Во избежание преждевременного выхода из строя минимодулей «Электрический пробой в воздухе» КАТЕГОРИЧЕСКИ запрещается проводить измерения и эксперименты в режиме измерения сопротивления изоляции с фиксированными испытательными напряжениями.

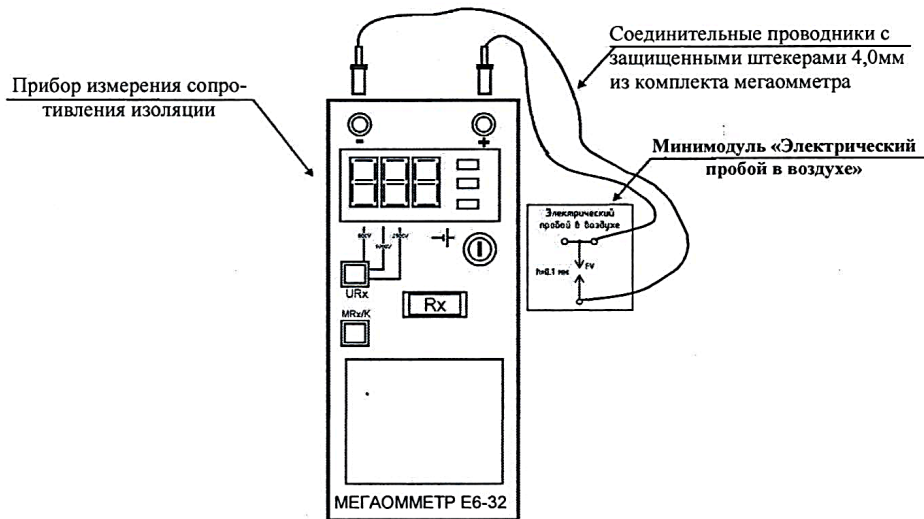


Рис. 2.26. Схема соединений мегаомметра $E6 - 32$ и минимодуля «Электрический пробой в воздухе»

Для начала измерения напряжения пробоя $U_{пр}$ нажать кнопку « R_x ». После нажатия кнопки « R_x » мегаомметр увеличивает напряжение на электродах до электрического пробоя. Значение увеличивающегося напряжения отображается в нижнем правом углу дисплея мегаомметра и зафиксировано после пробоя. Полученное значение напряжения пробоя $U_{пр}$ занести в соответствующие ячейки табл. 2.6.

Провести измерение напряжения пробоя $U_{пр}$ не менее 5 раз, результаты заносить в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Минимодуль	№ п.п.	$U_{пр}, В$	$U_{пр.ср}, В$	$E_{пр}, В/мм$	$E, В/м$	$w, Дж/м^3$
$h = 0,1 \text{ мм},$ $d = 8 \text{ мм}$	1					
	2					
	n					

4. Используя данные табл. 2.6 рассчитать среднее значение напряжения пробоя $U_{пр.ср}$ по формуле:

$$U_{пр.ср} = (\sum U_{пр})/n$$

где $U_{пр}$ – напряжение пробоя; n – количество измерений. Полученное

значение занести в соответствующую ячейку табл. 2.6.

6. Используя данные табл. 2.6 рассчитать электрическую прочность воздуха $E_{пр}$ по формуле:

$$E_{пр} = U_{пр.ср}/h,$$

где h – расстояние между электродами, мм. Полученное значение занести в соответствующую ячейку табл. 2.6.

7. Повторить работы по п. 4 – 6 для всех минимодулей «Электрический пробой в воздухе».

8. Используя данные таблицы 2.6 построить график зависимости электрической прочности $E_{пр}$ воздуха от расстояния между электродами h .

9. Сделать вывод о характере изменения электрической прочности воздуха при увеличении расстояния между электродами. Опишите явления, сопровождающие электрический пробой в газообразном диэлектрике.

Определение электрической прочности бумаги

10. Согласно рис. 2.27 выполнить подключение мегаомметра Е6-32 к электродам минимодуля «Электрический пробой бумажного диэлектрика». **Монтаж схемы производить при отключенном питании мегаомметра Е6-32.**

11. Установить в миниблок «Электрический пробой бумажного диэлектрика» подготовленную полоску бумаги плотностью 80 г/м². Далее по тексту в лабораторной работе плотность бумаги – это вес листа бумаги единичной площади и измеряется в г/м².

12. Включить мегаомметр Е6–32, нажав кнопку «D». Последовательно нажимая кнопку «РЕЖИМ» выбрать режим измерения напряжения пробоя разрядников, о чем будет свидетельствовать надпись « $U_{разр}$ » в нижнем левом углу дисплея мегаомметра.

Во избежание преждевременного выхода из строя минимодуля «Электрический пробой бумажного диэлектрика» КАТЕГОРИЧЕСКИ запрещается проводить измерения и эксперименты в режиме измерения сопротивления изоляции с фиксированными испытательными напряжениями.

Для начала измерения напряжения пробоя $U_{пр}$ нажать кнопку « R_x ». После нажатия кнопки « R_x » мегаомметр увеличивает напряжение на электродах до электрического пробоя. Значение увеличивающегося

напряжения отображается в нижнем правом углу дисплея мегаомметра и зафиксировается после пробоя.

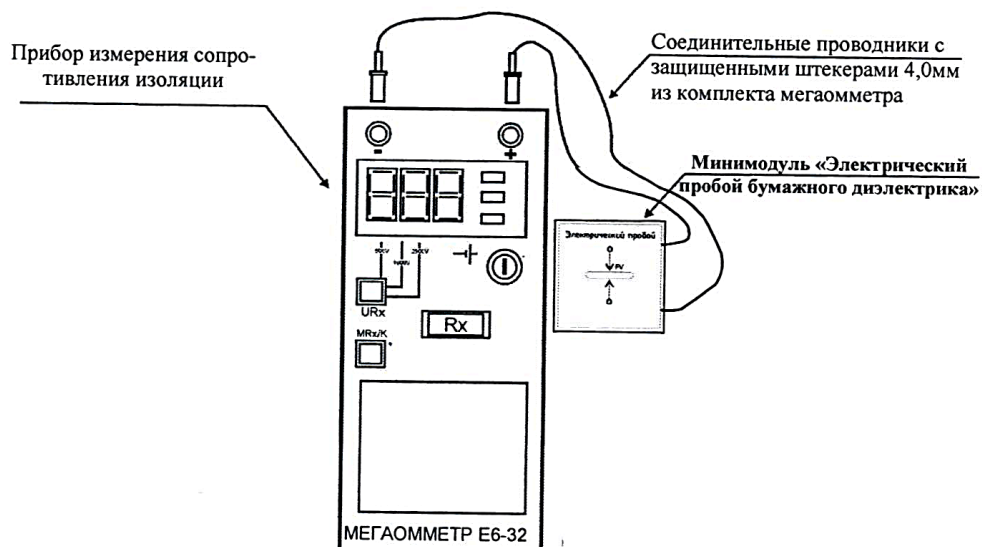


Рис. 2.27. Схема соединений мегаомметра *E6-32* и минимодуля «Электрический пробой бумажного диэлектрика»

Полученное значение напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ занести в соответствующие ячейки табл. 2.7. Провести измерение напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ не менее 5 раз, протягивая после каждого пробоя полоску бумаги между электродами на расстояние не менее 5 ... 10 мм, результаты заносить в табл. 2.7.

13. Используя данные табл. 2.7 рассчитать среднее значение напряжения пробоя $U_{\text{пр.ср}}$, по формуле:

$$U_{\text{пр.ср}} = (\sum U_{\text{пр}}) / n,$$

где $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя; n – количество измерений. Полученное значение занести в соответствующую ячейку табл. 2.7.

14. Используя данные табл. 2.7 рассчитать электрическую прочность $E_{\text{пр}}$ по формуле:

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр.ср}} / h_{\text{б}},$$

где h_b – толщина бумаги, мм.

Полученное значение занести в соответствующую ячейку табл. 2.7.

Таблица 2.7

Плотность бумаги, г/м ²	Толщина бумаги, мм	№ п.п.	$U_{пр}$, В	$U_{пр.ср}$, В	$E_{пр}$, В/мм
80	0,11	1			
		2			
		...			
		n			
120	0,14	1			
		2			
		...			
		n			
160	0,17	1			
		2			
		...			
		n			

13. Используя данные табл. 2.7 рассчитать среднее значение напряжения пробоя $U_{пр.ср}$, по формуле:

$$U_{пр.ср} = \sum U_{пр} / n,$$

где $U_{пр}$ – напряжение пробоя; n – количество измерений. Полученное значение занести в соответствующую ячейку табл. 2.7.

14. Используя данные табл. 2.7 рассчитать электрическую прочность $E_{пр}$ по формуле:

$$E_{пр} = U_{пр.ср} / h_b,$$

где h_b – толщина бумаги, мм.

Полученное значение занести в соответствующую ячейку табл. 2.7.

15. Установить в миниблок «Электрический пробой бумажного диэлектрика» подготовленную полоску бумаги плотностью 120 г/м². Повторить работы по п. 12 – 14.

16. Установить в миниблок «Электрический пробой бумажного

диэлектрика» подготовленную полосу бумаги плотностью 160 г/м². Повторить работы по п.12 – 14.

17. Используя данные таблицы 2.7 построить график зависимости электрической прочности $E_{пр}$ бумаги от плотности бумаги и график зависимости электрической прочности $E_{пр}$ бумаги от толщины бумаги.

18. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

19. Сделать вывод о характере изменения электрической прочности бумаги при увеличении плотности и толщины бумаги. Опишите явления, сопровождающие электрический пробой в твердом диэлектрике.

Определение значений напряженности и плотности энергии поля по результатам численного расчета электростатического поля

20. Запустить программу «Elcut».

21. Создать задачу расчета электростатического поля.

В строке меню выбрать пункты «Файл» → «Создать задачу ...». В открывшемся окне «Создание задачи» ввести имя файла задачи и указать путь сохранения задачи. Нажать кнопку «Далее».

В следующем окне «Создание задачи» (рис. 2.28) выбрать тип задачи – электростатическое поле, единицы длины – миллиметры, класс модели – осесимметричная.

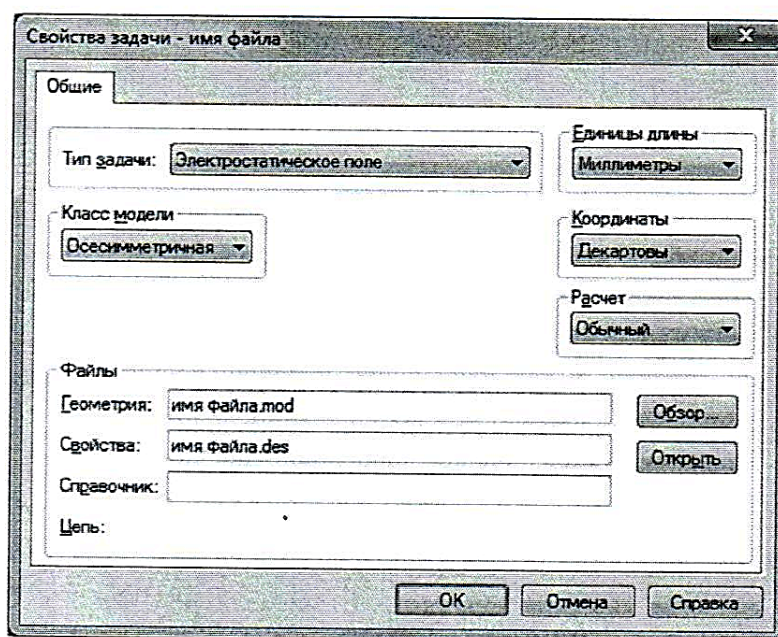


Рис. 2.28. Окно «Создания задачи»

22. Построить геометрическую модель задачи.

Двойным щелчком левой кнопки мыши выбрать в окне задачи, находящейся в левой части главного окна «*Elcut*», пункт «геометрия: имя файла.mod» (рис. 2.29).

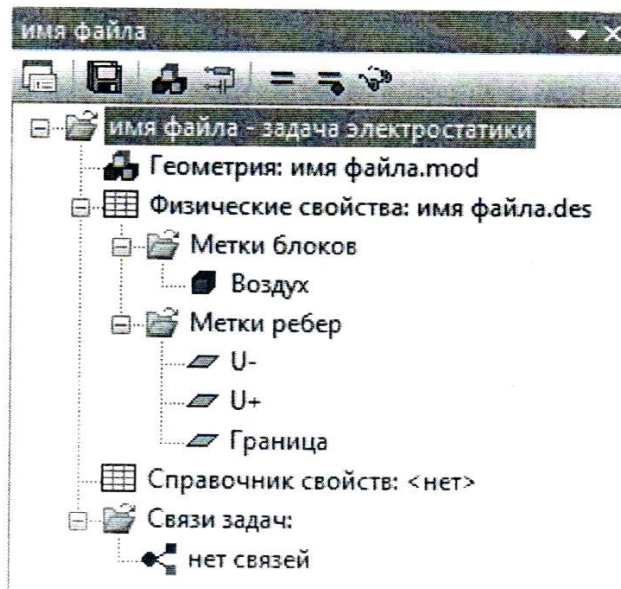


Рис. 2.29. Окно задачи

В открывшемся окне «Геометрическая модель» нарисовать геометрическую модель минимодуля «Электрический пробой в воздухе» с диаметром шариков d (табл. 2.6), как показано на рис. 2.30. Учтите, что в осесимметричной задаче задается половина геометрической фигуры вращения.

Создание и манипулирование геометрическими объектами приведено в руководстве пользователя «*Elcut*» (Глава 4. Описание геометрии задачи) и в справке программы «*Elcut*» → «Работа с геометрической моделью».

23. Задать параметры задачи (задание свойств материалов и граничных условий).

В окне задачи (рис. 2.29) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «Воздух».

Открыть окно «Свойства метки блока - Воздух», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «Воздух». В открывшемся окне «Свойства метки блока- Воздух» (рис. 2.31) ввести:

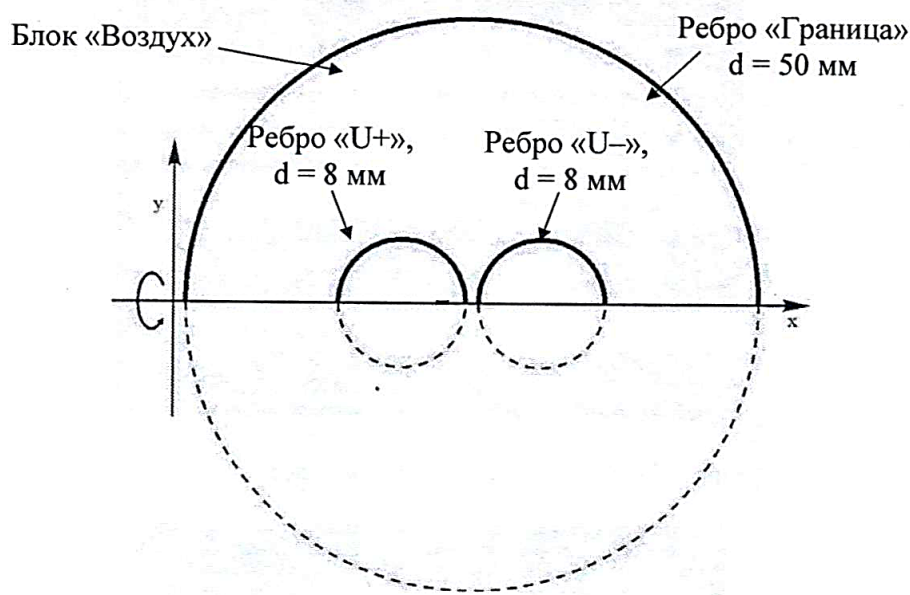


Рис. 2.30. Геометрическая модель минимодуля «Электрический пробой в воздухе»

– в числовом поле « ϵ_x » значение относительной диэлектрической проницаемости воздуха $\epsilon = 1$;

– выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии) параметра «Анизотропный материал».

В геометрической модели выбрать блок «Воздух» (рис. 2.30). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства».

В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 2.32), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «Воздух».

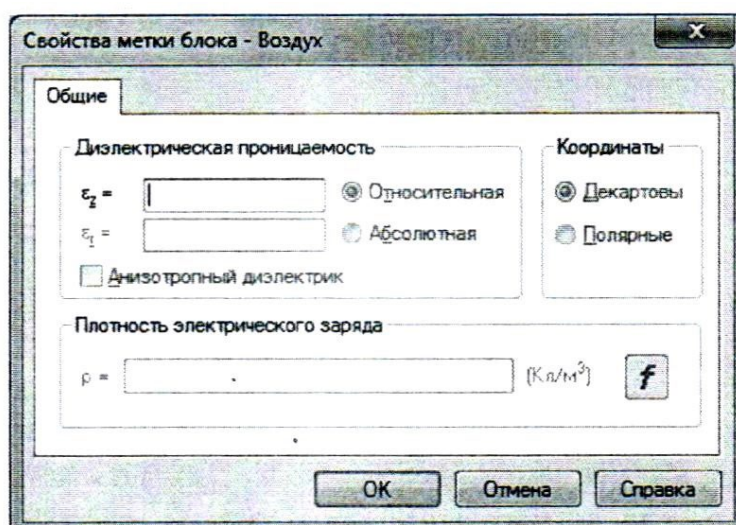


Рис. 2.31. Окно «Свойства метки блока»

В окне задачи (рис. 2.29) выбрать пункт «Метки ребер». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке ребра « U^+ ». Аналогично создать метку ребра « U^- » и метку ребра «Граница».

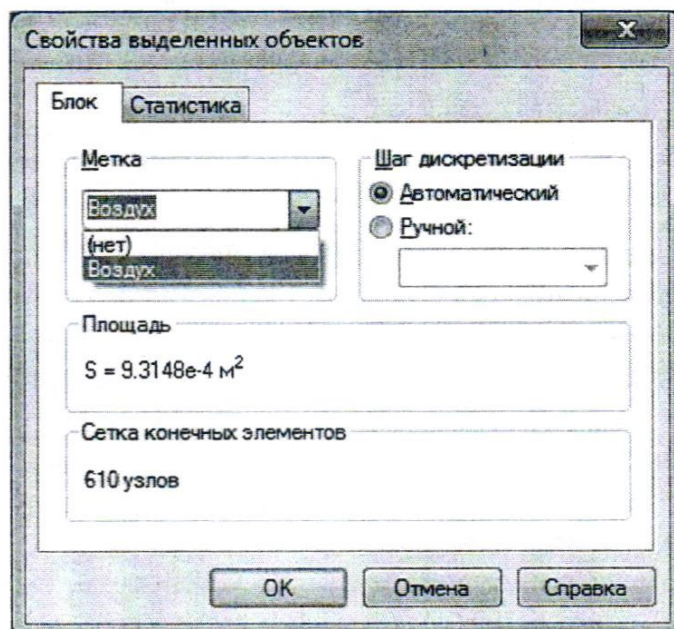


Рис. 2.32. Окно «Свойства выделенных объектов»

Открыть окно «Свойства метки ребра – U^+ », выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра « U^+ ». В открывшемся окне «Свойства метки ребра – U^+ » (рис. 2.33) включить флажок «Потенциал: $U = U_0$ » и в числовом поле « $U_0 =$ » ввести значение $U_0 = U_{\text{пр.ср}} / 2$ (по указанию преподавателя из табл. 2.6).

Открыть окно «Свойства метки ребра – U^- » выбрав, двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра « U^- ». В открывшемся окне «Свойства метки ребра – U^- » включить флажок «Потенциал: $U = U_0$ » и в числовом поле « $U_0 =$ » ввести значение $U_0 = U_{\text{пр.ср}} / 2$ (по указанию преподавателя из табл. 2.6).

Открыть окно «Свойства метки ребра – Граница» выбрав, двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра «Граница». В открывшемся окне «Свойства метки ребра – Граница» включить флажок «Потенциал: $U = U_0$ » и в числовом поле « $U_0 =$ » ввести значение $U_0 = 0$.

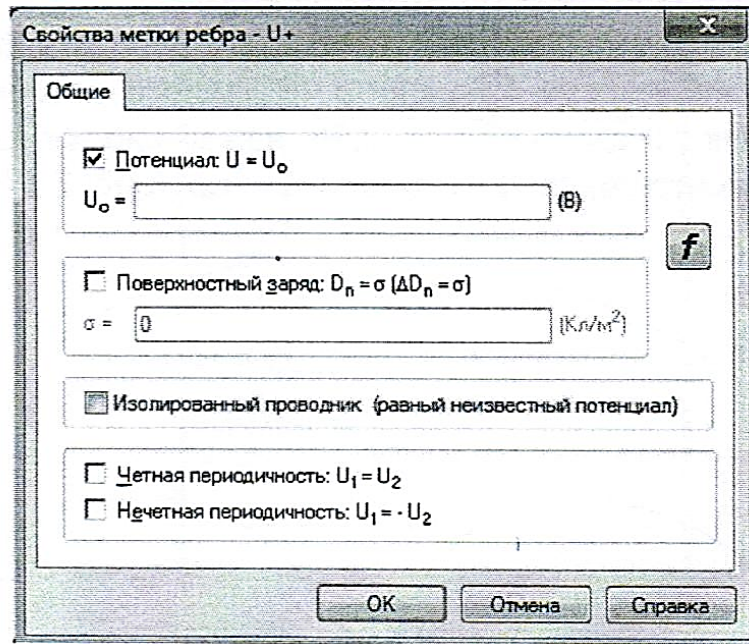


Рис. 2.33. Окно свойства метки ребра

В геометрической модели выбрать ребро « $U+$ » (рис. 2.30). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 2.32), в выпадающем меню «Метка», присвоить ребру метку ребра « $U+$ ». Аналогично присвоить ребрам « $U-$ » и «Граница» метки с соответствующими названиями.

24. Решить задачу электростатического поля.

На панели инструментов окна «Геометрическая модель» нажать кнопку «Построение сетки» (рис. 2.34).

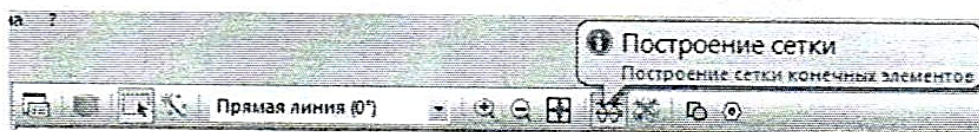


Рис. 2.34. Панель инструментов окна «Геометрическая модель»

После построения сетки конечных элементов в блоке «Воздух» геометрической модели, нажать кнопку «Решить» на панели инструментов окна задач (рис. 2.35), и подтвердить сохранение файлов решения.

25. Провести анализ результатов решения.

В открывшемся дополнительном окне «Результат расчета», которое представлено геометрией модели с изолиниями равного потенциала, задать

контур интегрирования как показано на рис. 2.36, нажав кнопку «Добавить к контуру» на панели инструментов окна «Результат расчета» (рис. 2.37).



Рис. 2.35. Панель инструментов окна задач

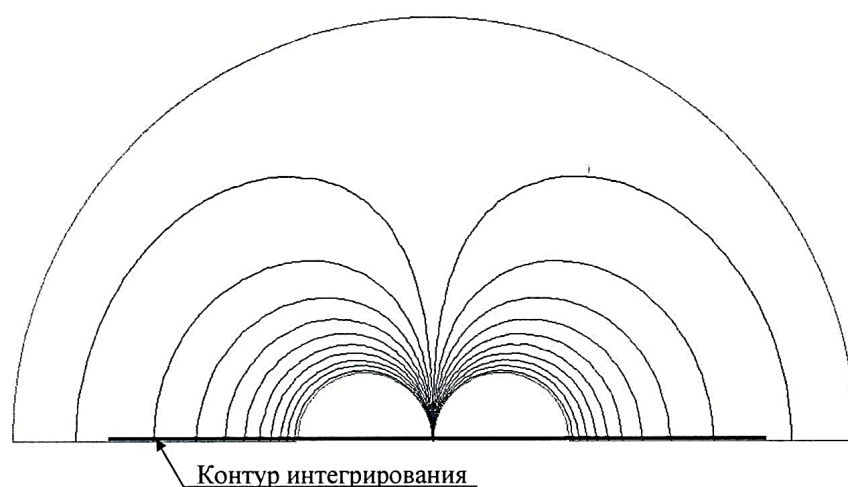


Рис. 2.36. Окно «Результат расчета» (картина электрического поля)

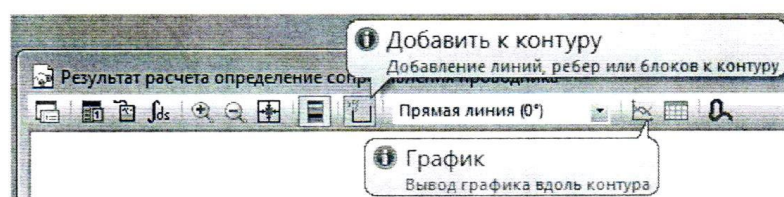


Рис. 2.37. Панель инструментов окна «Результат расчета»

Создание и манипулирование контурами приведено в руководстве пользователя «Elcut» (Глава 8. Редактирование контуров) и в справке программы «Elcut» → «Работа с контуром».

Открыть окно «График Результат расчета» нажав кнопку «График» на панели инструментов окна «Результат расчета» (рис. 2.37). Задать на графике отображение распределения вектора напряженности E электрического поля вдоль контура интегрирования, для чего в окне «Обозначение кривых

расчета» (в правой части окна «График Результат расчета») установить флажок соответствующий параметру «E» (рис. 2.38).

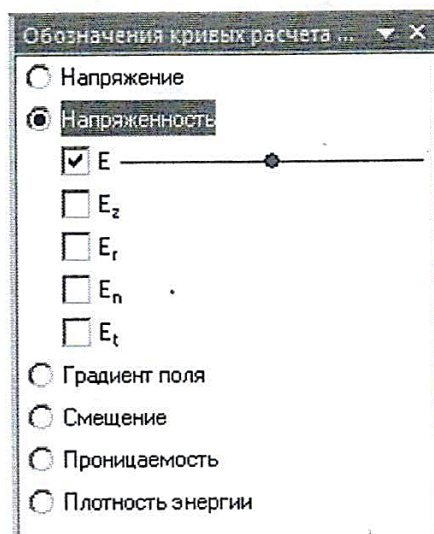


Рис. 2.38. Окно «Обозначение кривых расчета» с включенным переключателем «Напряженность»

Из графика распределения вектора напряженности E электрического поля вдоль контура интегрирования определить и занести в табл. 2.6 максимальное значение напряженности E .

Задать на графике отображение распределения плотности энергии w электрического поля вдоль контура интегрирования, для чего в окне «Обозначение кривых расчета» (в правой части окна «График Результат расчета») установить флажок соответствующий параметру «w» (рис. 2.39).

Из графика распределения плотности энергии w электрического поля вдоль контура интегрирования определить и занести в табл. 2.6 максимальное значение плотности энергии w .

26. Повторить работы по п. 21 – 25 для других минимодулей «Электрический пробой в воздухе».

27. Сравнить максимальные значения напряженности E , полученных методом математического моделирования электростатического поля, со значениями электрической прочности $E_{пр}$ (соответствующих модулей) полученными экспериментально (табл. 2.6). Сделать вывод.

Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

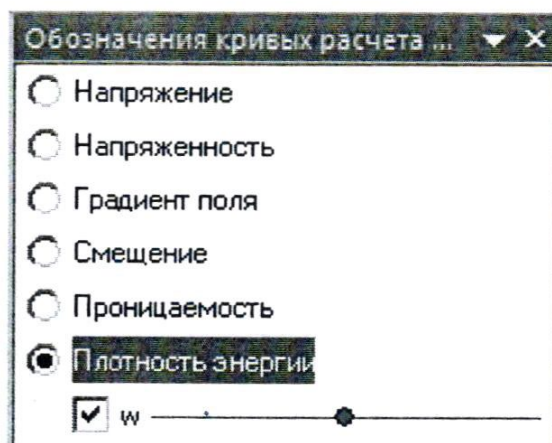


Рис. 2.39. Окно «Обозначение кривых расчета» с включенным переключателем «Плотность энергии»

Более подробное описание работы с программой «*Elcut*» приведено в руководстве пользователя «*Elcut*».

Контрольные вопросы

1. Приведите определение электрической прочности.
2. Опишите процесс возникновения электрического пробоя диэлектрика.
3. Какие физические явления сопровождают электрический пробой газообразного и твердого диэлектрика?
4. Какие параметры определяют электроизоляционные свойства бумаги?
5. Приведите формулу расчета электрической прочности диэлектрика.
6. Как влияет давление газа на его электрическую прочность?
7. Приведите зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами.
8. Опишите процесс возникновения электрического пробоя диэлектрика.
9. Какие физические явления сопровождают электрический пробой газообразного и твердого диэлектрика?
10. Какие параметры определяют электроизоляционные свойства бумаги?
11. Приведите формулу расчета электрической прочности диэлектрика.
12. Как влияет давление газа на его электрическую прочность?

13. Приведите зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами.
14. Приведите определение скалярного электрического потенциала.
15. Перечислите граничные условия, применяемые при решении задач математической физики.
16. Какие параметры материалов задаются при решении задачи электростатического поля?
17. Приведите картину электростатического поля двух точечных зарядов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

Определение общефизических характеристик электроизоляционных материалов

Цель работы:

1. Изучить основные общефизические характеристики диэлектриков.
2. Экспериментально определить температуру вспышки паров трансформаторного масла.
3. Экспериментально определить вязкость трансформаторного масла.

Оборудование:

Теоретическая часть

Тепловые свойства диэлектриков

В процессе эксплуатации диэлектрические материалы подвергаются кратковременному или длительному воздействию повышенной температуры. С повышением температуры электрические свойства диэлектрика всегда ухудшаются. Выше некоторой температуры начинают ухудшаться и прочностные свойства твердых диэлектриков.

Нагревостойкость материала – его способность без недопустимого ухудшения эксплуатационно-технических характеристик выдерживать кратковременное или длительное (в течение нескольких лет) воздействие высоких температур, а также термоудары.

Нагревостойкость твердых диэлектриков оценивают значением *максимальной рабочей температуры*, при которой начинается существенное ухудшение их электрических или механических свойств (уменьшение предела прочности, ударной вязкости, удельного сопротивления, электрической прочности, увеличение ϵ и $\operatorname{tg} \delta$).

Твердые электроизоляционные материалы, применяемые в электрических машинах и аппаратах, разделяют на *классы нагревостойкости* (табл. 2.8). Повышение максимальной рабочей температуры выше 250°C производится на интервал в 25°C с присвоением соответствующего класса.

При оценке нагревостойкости жидких диэлектриков, а также растворителей, применяемых в производстве электроизоляционных лаков и эмалей, используют следующие характеристики:

температура вспышки – минимальная температура жидкости, при которой смесь ее паров с воздухом воспламеняется от внешнего источника тепла – накаливаемой спирали, электрической искры и т. п.;

Таблица 2.8

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

№ п/п	Обозначение класса нагревостойкости	Температура нагревостойкости, °С	Группы электроизоляционных материалов, соответствующие данному классу нагревостойкости
1.	<i>У</i>	90	Материалы на основе целлюлозы и шелка – бумага, картон, пряжа, ткани, лента и т.п.
2.	<i>А</i>	105	Материалы класса <i>У</i> , пропитанные лаками или погруженные в масло (для защиты от кислорода воздуха), а также эфиры целлюлозы, полиамидные смолы (пленки), древеснослоистые пластики.
3.	<i>Е</i>	120	Пластмассы с органическим наполнителем и термореактивным связующим типа фенолформальдегидной смолы (гетинакс, текстолит), а также эпоксидные смолы без наполнителя.
4.	<i>В</i>	130	Щипаная слюда, асбест, стекловолокно в сочетании с органическими связующими.
5.	<i>Ф</i>	155	Те же материалы, что и в классе <i>В</i> , но в качестве связующего использованы органические вещества повышенной нагревостойкости: кремнийорганические, эпоксидные и др.
6.	<i>Н</i>	180	Материалы, где в качестве связующего применяется кремнийорганическая смола особо высокой нагревостойкости.
7.	200	200	Неорганические диэлектрики, например, слюда, кварц, асбест, бесщелочные стекла, оксид алюминия, для склеивания или пропитки которых не используют органические вещества. Из органических веществ к этим классам относятся политетрафторэтилен и полиимиды.
8.	220	220	
9.	250	250	

температура воспламенения – минимальная температура, при которой происходит воспламенение жидкости от внешнего источника тепла;

температура самовоспламенения – минимальная температура жидкости, при которой происходит ее самопроизвольное воспламенение.

Для трансформаторного масла температура вспышки должна составлять не менее 135 °С, температура воспламенения – 165 °С, температура самовоспламенения – 350–400 °С.

Холодостойкость – способность материала выдерживать воздействие низких температур (от –70 до + 60 °С) без недопустимого ухудшения эксплуатационно-технических характеристик.

При низких температурах электрические свойства изоляции улучшаются, однако ухудшаются механические свойства – материалы становятся хрупкими, легко разрушаются при вибрациях.

Теплопроводность – процесс переноса теплоты от более нагретых частей материала к менее нагретым, приводящий к выравниванию его температуры.

Теплопроводность материалов характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , входящим в уравнение Фурье:

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} dS \cdot dt, \text{ Вт/м} \cdot \text{град}, \quad (2.11)$$

где Q – теплота, переданная через площадку dS за время dt при градиенте температуры dT/dx .

Чем выше λ , тем более стоек диэлектрик к тепловому пробую.

Тепловое расширение – оценивают температурным коэффициентом линейного расширения:

$$\text{TK}_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}, \text{ K}^{-1}. \quad (2.12)$$

Чем меньше TK_l тем, как правило, выше нагревостойкость материала (табл. 2.9).

Стойкость к термоударам – способность материала выдерживать многократное резкое изменение температуры без недопустимого ухудшения свойств.

Таблица 2.9

Нагревостойкость некоторых материалов

Материал	$TK_l \cdot 10^6, K^{-1}$	Максимальная рабочая температура, °С
Полиэтилен	100–145	80–90
Политетрафторэтилен	100	270
Силикатное стекло	9,2	800–1000
Фарфор	3,5	1200

Функции жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики в электрических машинах и аппаратах выполняют следующие функции:

- *электроизоляционная* – пропитывают твердую пористую изоляцию в трансформаторах, кабелях и конденсаторах, увеличивая ее электрическую прочность; заполняют пустоты между витками обмоток электрических аппаратов, повышая электрическую прочность межвитковой изоляции;
- *охлаждающая* – отводят тепло от обмоток и магнитопроводов электрических аппаратов, выделяющееся в процессе их работы;
- *дугогасящая* – способствуют гашению электрической дуги в жидкостных коммутационных аппаратах.

Трансформаторное масло применяется также для заливки маслonaполненных вводов некоторых типов реакторов, реостатов и других электрических аппаратов.

Нефтяные электроизоляционные масла

Трансформаторное масло. *Трансформаторное масло* (ТМ) – очищенная фракция нефти (соляровое масло) с температурой кипения 300–400 °С.

Технологический процесс производства ТМ включает:

- фракционную перегонку нефти под вакуумом с получением бензина, лигроина, керосина, солярового масла, мазута, гудрона и других фракций;
- рафинирование солярового масла (очистка от нафтеновых кислот, смол, сернистых соединений, ненасыщенных соединений) путем обработки серной кислотой в количестве 12–15 % от массы данного масла; нейтрализация остаточных кислот щелочью (NaOH);
- промывку водой и сушку продувкой воздухом;
- адсорбционную очистку селикагелем или цеолитом от смол и кислот.

Состав ТМ:

- парафины (C_nH_{2n+2}) – 10–15 %;
- нафтены (циклопарафины – C_nH_{2n}) – 60–70%, например, C_3H_6 ;
- ароматические углеводороды (бензол, нафталин, антрацен и др.) – 1–2 %;
- асфальтосмолистые вещества, сернистые и азотистые соединения – < 2%;
- антиокислительные присадки (антиоксиданты), например, «ионол» – 0,2–0,5 %.

Физико-химические свойства:

ТМ – слабополярный диэлектрик, имеет низкие значения ϵ и $\text{tg}\delta$, высокие значения ρ_v и $E_{\text{пр}}$, биоразлагаемый, нетоксичный, не разрушает озоновый слой атмосферы, плотность – 0,8–0,9 г/см³, вязкость в 1,5 раза выше вязкости воды (табл. 2.10).

Таблица 2.10

Физические и электрические характеристики
трансформаторного масла МН-2

Кинематическая вязкость при 20 °С, м ² /с	28·10 ⁶
Температура вспышки, °С	135
Температура застывания, °С	- 45
Электрическая прочность, $E_{\text{пр}}$, кВ/мм	18 – 20
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$, при частоте 50 Гц и температуре 100°С	0,003
Удельное объемное сопротивление, ρ_v , при 20 °С, Ом·м	10 ¹² – 10 ¹³
Диэлектрическая проницаемость, ϵ	2,1 – 2,4
Плотность, ρ , кг/м ³	900

Достоинства: высокий комплекс диэлектрических и физико-механических свойств, относительно низкая стоимость, восстанавливает электрическую прочность после пробоя.

Недостатки: повышенная пожароопасность ввиду низкой температуры вспышки. Пожарная опасность масла оценивается по температуре вспышки паров трансформаторного масла, которая должна быть не ниже + 135°С. Установлено, что трансформаторное масло возгорается при температуре, превышающей температуру вспышки его паров не менее чем на 30°С. Таким образом, по температуре вспышки паров масла можно судить и о температуре его возгорания. Поэтому, помимо того, что вспышка паров трансформаторного масла - явление само по себе крайне нежелательное, так

как может повлечь за собой взрыв маслонаполненного аппарата, оно является также предшественником еще более крупной аварии, заключающейся в возгорании масла.

Через год эксплуатации ТМ подвергают *очистке* от воды и механических примесей путем отстоя, центрифугирования или фильтрования. Через 4–5 лет эксплуатации ТМ подвергают *регенерации* путем обработки кислотами, щелочами и абсорбентами.

Способы продления срока службы:

– герметизация или заполнение электротехнического оборудования инертными газами, например, азотом, с целью исключения окисления ТМ кислородом воздуха;

– циркуляция ТМ через термосифонные фильтры;

– введение в состав ТМ антиоксидантов.

Конденсаторные масла. Применяют для пропитки бумажной изоляции конденсаторов. Изготавливают из ТМ путем глубокой очистки. Имеют меньшие по сравнению с ТМ диэлектрические потери ($\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-4}$).

Кабельные масла. Применяют для пропитки бумажной изоляции электрических кабелей. По сравнению с ТМ имеют более высокие значения вязкости и $t_{\text{всп}}$ и меньший $\operatorname{tg} \delta$.

Вязкость жидких диэлектриков

Для жидких диэлектриков важной характеристикой является вязкость. Она определяет интенсивность конвективного теплообмена в электрических аппаратах.

Вязкость (внутреннее трение) – свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению слоев вещества относительно друг друга.

Вязкость жидкостей характеризуют следующими параметрами.

Коэффициент динамической вязкости, или коэффициент внутреннего трения, η (Па · с) – это коэффициент пропорциональности в формуле Стокса:

$$f = \eta \frac{dV}{dx} dS, \quad (2.13)$$

где f – сила трения между слоями жидкости площадью dS при градиенте скорости слоев в направлении перпендикулярном вектору скорости dV/dx .

Коэффициент кинематической вязкости:

$$v = \frac{\eta}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (2.14)$$

где ρ – плотность жидкости.

Вязкость всех веществ, не претерпевающих при нагреве химических изменений, сильно уменьшается с повышением температуры.

Вязкость жидких веществ определяют специальными приборами – *вискозиметрами*. По своему устройству вискозиметры делятся на капиллярные, универсальные, ротационные, ультразвуковые, вибрационные и электромагнитные. В данной работе применяется капиллярный вискозиметр ВЗ–4.

Порядок выполнения лабораторной работы

Определение температуры вспышки трансформаторного масла

Описание лабораторной установки

Для определения температуры вспышки трансформаторного масла применяется аппарат автоматический лабораторный АТВ–21. Аппарат является испытательным оборудованием настольного типа для определения температуры вспышки в закрытом тигле в соответствии с ГОСТ 6356. Диапазон измеряемой температуры вспышки – от + 12 до + 370 °С

Общий вид аппарата АТВ–21 представлен на рис. 2.40.

Конструктивно аппарат включает в себя электронный блок (1), блок управления (2) с разъемом RS–232 и технологический блок (10). Блоки расположены на основании (7), установленном на регулируемых по высоте ножках (6). Включается аппарат тумблером «Сеть» (5).

В электронном блоке расположены плата управления и блок питания аппарата.

В технологическом блоке (10) располагаются:

- механизм подъема тигля;
- механизм привода мешалки;
- запальное устройство;
- датчик температуры;
- датчик вспышки;
- столик для установки тигля (8).

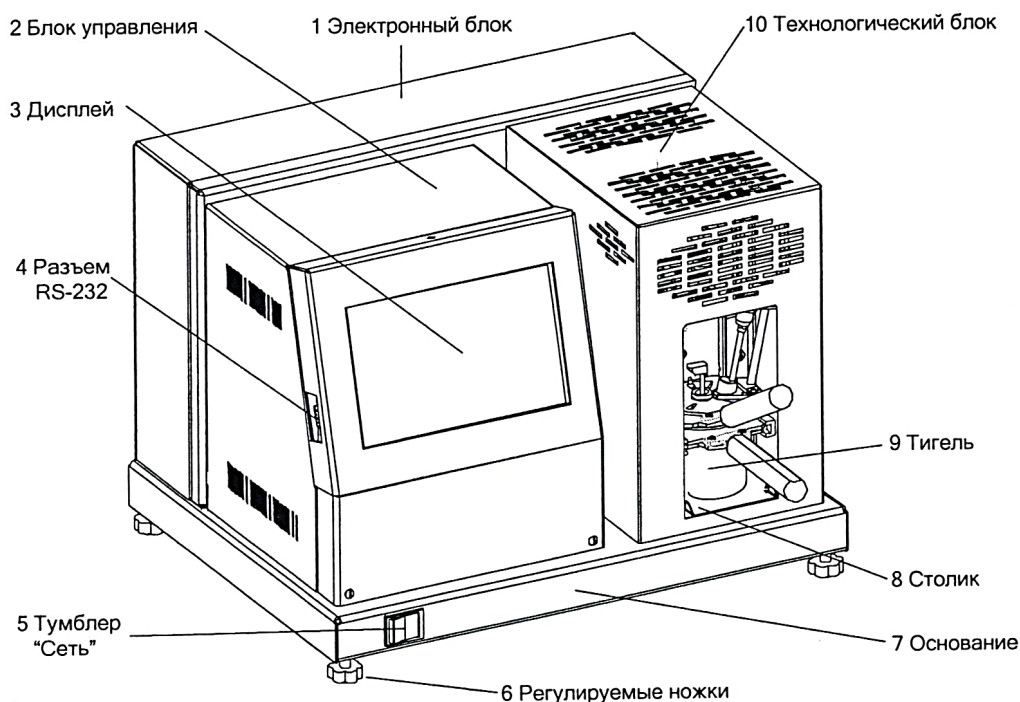


Рис.2.40. Устройство аппарата АТВ-21

Для проведения испытания тигель, заполненный продуктом, с закрытой крышкой устанавливают на столик (8) (см. рис. 2.40) и вставляется по направляющим до упора в аппарат.

Для запуска испытания достаточно задать метод испытания и предполагаемую температуру вспышки. Имеется возможность указания наименования продукта и фамилии пользователя.

После нажатия кнопки «Испытание» выполняется подъем тигля по направляющим в рабочее положение. При этом в тигель автоматически устанавливается датчик температуры, и подключаются контакты электрического нагревателя, расположенного внутри тигля. Включается провод мешалки и выполняется перемешивание продукта.

Во время проведения испытания на вспышку перемешивание прекращается, заслонка тигля открывается, запальное устройство и датчик вспышки опускаются в тигель и находятся в нижнем положении в течение определенного времени. Затем производится подъем запального устройства и датчика вспышки с одновременным закрыванием заслонки тигля.

В момент появления вспышки испытуемого продукта производится фиксация температуры, мешалка останавливается и на дисплее отображается температура вспышки, скорректированная с учетом поправки на атмосферное давление.

Во время испытания на дисплее выводятся текущие условия испытания, показания датчика температуры образца, скорости нагрева и атмосферного давления. При необходимости можно переключиться в режим просмотра графика скорости нагрева образца.

В памяти аппарата сохраняется до 100 результатов испытаний и до 100 графиков испытаний.

Проведение испытания по ГОСТ 6356

1. Подключить аппарат к сети, включить аппарат тумблером «Сеть» (5) (см. рис. 2.40).

2. После включения питания, на экране аппарата появляется информация о загрузке операционной системы. Затем на дисплей выводится «Окно заставки» (рис. 2.41):

**АО Башкирское специализированное конструкторское бюро
НЕФТЕХИМАВТОМАТИКА**

**ЛинтелЛ® АТВ-21-02
Аппарат автоматический для
определения температуры вспышки
в закрытом тигле**

Рис. 2.41. Окно заставки

3. Переход в режим подготовки к испытанию выполняется либо по двойному нажатию на экран дисплея, либо автоматически, по истечении некоторого времени.

При этом на дисплее отобразится информация, приведенная на рис. 2.42.

4. Залить масло в тигель аппарата.

Залив пробы масла производится в тигель до риски, нанесенной на внутреннюю поверхность тигля. Залив необходимо производить таким образом, чтобы внутренняя поверхность тигля выше риски оставалась сухой. Закрывать тигель крышкой и проконтролировать положение заслонки крышки: прилегание к поверхности крышки и перекрытие окон (крайнее положение заслонки в направлении часовой стрелки относительно оси крышки). Температуры тигля и продукта должны быть, как минимум, на 17 °С ниже предполагаемой температуры вспышки.

Ожидание	11.08.2016 13:32:32
Температура продукта, °С:	23
Атмосферное давление, мм.рт.ст.:	756
Метод испытания:	ГОСТ 6356
Продукт:	ТС-1
t предполагаемая, °С:	45
Пользователь:	Петров Н.И.
Меню »	Результаты »
	Испытание »

Рис. 2.42. Окно ожидания для испытания по ГОСТ 6356

5. Установить тигель в аппарат:

- взять тигель за ручку и осторожно, не взбалтывая, горизонтально установить его на рабочий столик аппарата;
- осторожно продвинуть тигель по направляющим до упора, при этом боковые фиксаторы должны защелкнуться и удерживать его в этом положении.

Запрещается устанавливать в аппарат пустой тигель или с продуктом, заполненным ниже риски.

6. Выбрать метод испытания «ГОСТ 6356», см. ПРИЛОЖЕНИЕ П3.

7. Выбрать наименование испытуемого продукта, если необходимо ввести новый продукт, см. ПРИЛОЖЕНИЕ П4.

8. Задать предполагаемую температуру вспышки (см. ПРИЛОЖЕНИЕ 1). Предполагаемая температура должна находиться в диапазоне от 12 до 370 °С.

9. Выбрать пользователя из списка. Если необходимо ввести нового пользователя, см. ПРИЛОЖЕНИЕ П5.

10. После выполнения всех подготовительных операций нажать кнопку «Испытание». После нажатия кнопки «Испытание» произойдет автоматический подъем тигля, включится мешалка в ускоренном режиме (240 об/мин) и течение 60 с будет выполнено предварительное перемешивание образца для установления температурного баланса.

11. Затем аппарат производит нагрев пробы. Мешалка переключается на скорость вращения 120 об/мин. Если кнопка-флажок «Выполнить подогрев» находится в установленном состоянии (✓) (см. п.3.) будет выполнен предварительный подогрев продукта. При проведении испытания продукт

сначала нагревается с повышенной скоростью. Далее, за 50 – 60 градусов до предполагаемой температуры вспышки, скорость нагрева изменяется в соответствии с выбранным методом.

12. При достижении температуры на 17°C ниже предполагаемой температуры вспышки, аппарат начинает производить испытания на вспышку через каждый 1°C при температуре образца до 104°C и через каждые 2°C при температуре образца свыше 104°C , поддерживая нагрев пробы со скоростью $(5,5 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

13. В момент проведения испытания происходит следующее:

- прекращается перемешивание;
- на запальное устройство подается искра;
- приводится в действие механизм, открывающий заслонку и опускающий запальное устройство в тигель в течение 0,5 с;
- выдержка запального устройства в тигле в течение 1 с;
- выключение искры, подъем запального устройства, закрытие заслонки, включение перемешивания.

15. За температуру вспышки принимается скорректированное показание цифрового измерителя температуры, в момент четкого появления первого пламени над поверхностью продукта внутри тигля, с учетом поправки на атмосферное давление, округленное с точностью до 1°C .

16. После фиксации температуры вспышки испытание завершается. Аппарат автоматически переходит в режим просмотра результата (см. п. 3.6). При этом звучит мелодия, сигнализирующая об окончании испытания. Для выхода из режима просмотра результата необходимо нажать кнопку «Закреть».

19 Нажатие кнопки «Стоп» во время испытания переводит аппарат в режим ожидания.

20. Если показания измерителя температуры превысили 395°C , либо температура продукта стала выше предполагаемой температуры вспышки на 25°C , процесс испытания останавливается, при этом аппарат подает прерывистый звуковой сигнал и на дисплее выдается сообщение об ошибке. В этом случае необходимо нажать кнопку «Стоп».

При остановке испытания нагрев отключается.

Отображение информации в режиме испытания

1. После нажатия в режиме подготовки к испытанию кнопки «Испытание», на экране отобразится информация, приведенная на рис. 2.43.

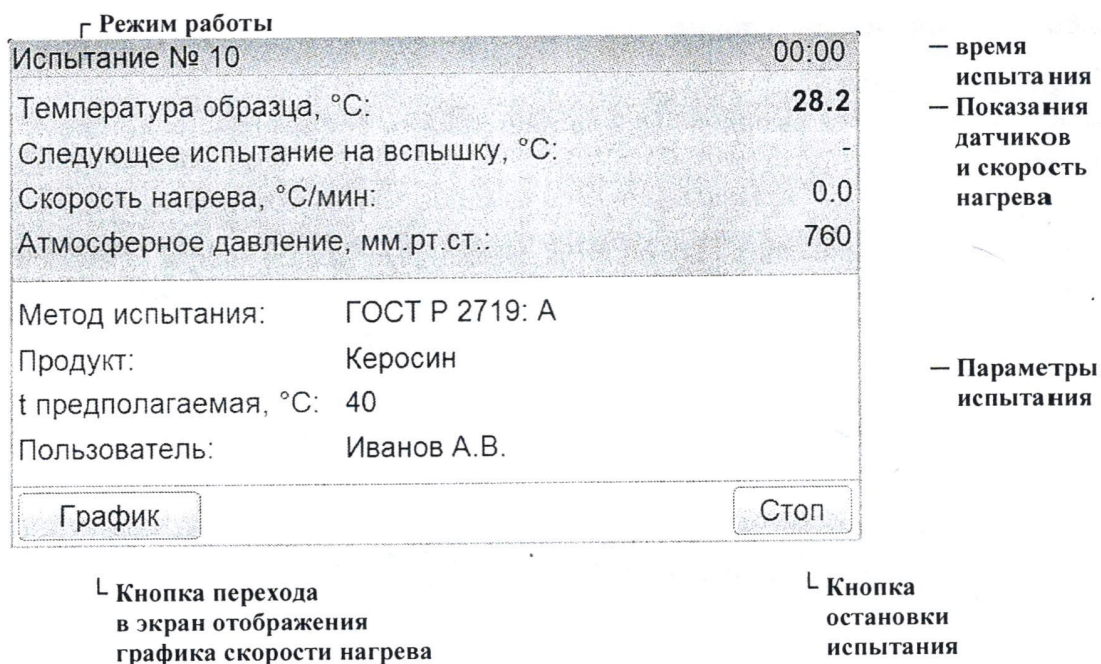


Рис.2.43. Окно испытания

- В этом окне отображаются условия испытания, а также:
 - текущее значение температуры образца;
 - скорость нагрева образца (выводится после предварительного перемешивания);
 - атмосферное давление.
- Если в режиме проведения испытания нажать кнопку «График», на экране отобразится информация, приведенная на рис. 2.44.



Рис.2.44. Окно графика испытания

В окне отображаются:

- график скорости нагрева продукта (°С/мин);

- линии диапазона допустимой скорости нагрева.

Возврат к экрану испытания происходит при нажатии кнопки «Испытание».

Обработка и анализ результатов испытания

1. Для просмотра полного списка результатов необходимо нажать кнопку «*Результаты*» в режиме подготовки к испытанию. На экране отобразится информация, приведенная на рис. 2.45.

№	Метод	Продукт	t пр., °C	t всп., °C	Завершено
1	ГОСТ 6356	ТС-1	45	-	17.03.2016 18:43
2	ГОСТ 6356	ТС-1	35	-	21.03.2016 14:05
3	ГОСТ 6356	ТС-1	45	45	21.03.2016 16:20
4	ГОСТ 6356	ТС-1	45	45	21.03.2016 16:20
5	ISO 2719: A	Керосин	35	45	21.03.2016 16:21
6	ISO 2719: A	ДТ	150	-	21.03.2016 16:22
7	ISO 2719: A	Керосин	35	-	21.03.2016 16:23
8	ISO 2719: A	Керосин	35	-	21.03.2016 16:23

Просмотр Выбор Среднее: - Заккрыть

Рис.2.45. Окно журнала результатов

Таблица содержит следующие столбцы:

- Номер испытания;
- Метод испытания;
- Наименование продукта;
- Предполагаемая температура вспышки, °C;
- Температура вспышки, скорректированная на атмосферное давление, °C;
- Дата и время завершения испытания.

2. Перемещение списка осуществляется при помощи вертикальной полосы прокрутки (справа). Для подробного просмотра результата необходимо выбрать нужный из списка и нажать кнопку «Просмотр».

При этом откроется окно результата (см. п. 5).

3. При просмотре результата имеется возможность выполнять расчет среднего значения температуры вспышки. Для получения среднего значения необходимо выбрать от двух до девяти результатов, отмечая их нажатием кнопки «Выбор», расположенной в нижней части экрана. Отмеченные записи просвечиваются зеленым фоном поля «№». После второго нажатия в нижней части экрана появляется информация о среднем значении (см. рис. 2.46).

№	Метод	Продукт	t пр., °C	t всп., °C	Завершено
1	ГОСТ 6356	ТС-1	45	-	17.03.2016 18:43
2	ГОСТ 6356	ТС-1	35	-	21.03.2016 14:05
3	ГОСТ 6356	ТС-1	45	45	21.03.2016 16:20
4	ГОСТ 6356	ТС-1	45	45	21.03.2016 16:20
5	ISO 2719: A	Керосин	35	45	21.03.2016 16:21
6	ISO 2719: A	ДТ	150	-	21.03.2016 16:22
7	ISO 2719: A	Керосин	35	-	21.03.2016 16:23
8	ISO 2719: A	Керосин	35	-	21.03.2016 16:23

Просмотр Выбор Среднее из 2 определений: 45 °C Закрывать

Рис.2.46. Журнал результатов

4. Для снятия отметок необходимо повторно выбрать отмеченную запись и нажать кнопку «Выбор». Для выхода из журнала результатов испытаний необходимо нажать кнопку «Закрывать».

5. Режим просмотра результата открывается автоматически после фиксации температуры вспышки в режиме испытания (для последнего результата), либо при нажатии в режиме просмотра журнала испытаний кнопки «Просмотр» (для выбранного результата). При этом на экране отобразится информация, приведенная на рис. 2.47.

На экране отображаются:

- метод испытания;
- наименование продукта;
- предполагаемая температура вспышки, °C;
- температура вспышки, °C;
- атмосферное давление, мм рт. ст.;
- дата и время завершения испытания;

– имя пользователя.

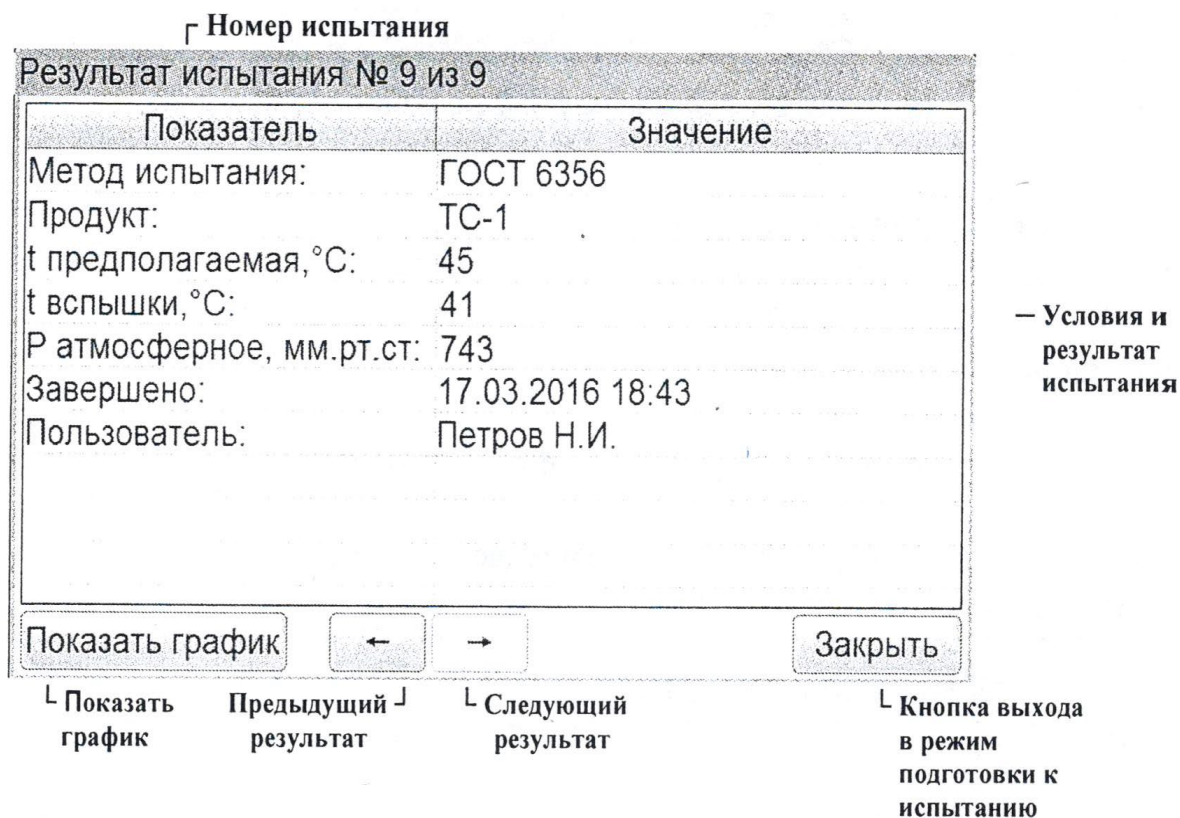


Рис.2.47. Окно просмотра результата испытания

6. Переход к просмотру следующего (предыдущего) испытания осуществляется при помощи кнопок «→» и «←». Для закрытия окна результата испытаний необходимо нажать кнопку «Закреть».

7. Для просмотра графика испытания необходимо нажать кнопку «Показать график». На экране отобразится информация, приведенная на рис. 2.48.

На графике отображаются:

- график скорости нагрева продукта от температуры;
- линии диапазона допустимой скорости нагрева.

Переход к просмотру следующего (предыдущего) испытания осуществляется при помощи кнопок «→» и «←».



Рис.2.48. Окно графика результата испытания

8. Для просмотра графика в диапазоне от первого до последнего поджога, необходимо нажать кнопку «Зона поджига» (см. рис. 2.49).



Рис.2.49. Окно графика зоны поджига

9. Для вывода полного графика необходимо нажать кнопку «Весь график». Для просмотра результата испытания необходимо нажать кнопку

«Скрыть график». Для закрытия окна графика результата испытаний необходимо нажать кнопку «Закрыть».

Завершение работы

1. Выключить аппарат тумблером «Сеть». Отключить аппарат от сети (см. рис. 2.40).

Определение вязкости трансформаторного масла

Описание лабораторной установки

Определение вязкости трансформаторного масла осуществляется на приборе "Вискозиметр ВЗ-4".

Прибор "Вискозиметр ВЗ-4" (рис. 2.50) предназначен для быстрого определения условной вязкости (относительного времени истечения) ньютоновских или приближающихся к ним жидкостей в соответствии со стандартом ГОСТ 9070-75.

Вискозиметр представляет собой резервуар, имеющий форму воронки с тремя сменными соплами. Резервуар снабжен затвором в виде конического стержня (на рисунке не показан) и установлен на штативе.

Принцип действия вискозиметра основан на определении времени истечения определенного объема испытуемой жидкости через отверстие сопла. Соединение сопла и резервуара должно быть герметичным.



Рис. 2.50. Вискозиметр ВЗ – 4

Порядок и методика проведения лабораторной работы

Сущность определения вязкости жидкости вискозиметром ВЗ–4 сводится к следующему: в резервуар вискозиметра при закрытом затворе заливают 50 мл дистиллированной воды при температуре 20°C, затем поднимают затвор и через калиброванное отверстие в дне резервуара вода выливается, при этом измеряют время ее истечения τ_B . Полученную величину называют *постоянной прибора или водяным числом вискозиметра*.

При тех же условиях определяют время истечения испытуемой жидкости $\tau_{ж}$. Далее вычисляют *условную вязкость (ВУ)*.

Условная вязкость ВУ равна отношению времени истечения испытуемой жидкости $\tau_{ж}$ ко времени истечения такого же объема воды при 20 °С τ_B :

$$ВУ = \tau_{ж}/\tau_B, \text{ (условные градусы)}. \quad (2.15)$$

Кинематическую вязкость рассчитывают по эмпирической формуле:

$$v = (ВУ/0,135) \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2.16)$$

Динамическая вязкость исследуемой жидкости η вычисляется по формуле:

$$\eta = v \cdot \rho, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (2.17)$$

где v – кинематическая вязкость, м²/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Данные измерений и расчетов заносят в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Вязкостные параметры трансформаторного масла

Наименование материала	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_{ж}, \text{ с}$	$\tau_B, \text{ с}$	ВУ	$v, \text{ м}^2/\text{с}$	$\eta, \text{ Па} \cdot \text{с}$
Трансформаторное масло						

Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Теоретические положения.

Раздел должен содержать определения тепловых свойства диэлектриков, включая табл. 2.8, виды нефтяных электроизоляционных масел, описание их свойств и областей применения; методы определения температуры вспышки и вязкости трансформаторного масла.

3. Практическая часть.

Раздел должен содержать необходимые расчеты и результаты проведенных экспериментов в виде графиков и таблиц.

4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какая величина называется температурой вспышки паров трансформаторного масла?
2. Как регламентируется скорость повышения температуры при проведении опыта по определению температуры вспышки паров трансформаторного масла, его увлажненность и почему?
3. Назовите классы нагревостойкости.
4. Как определяется вязкость жидких диэлектриков?
5. Что такое динамическая, кинематическая и условная вязкость?
6. Как связана вязкость с электропроводностью диэлектриков?
7. Какие методы определения вязкости вы знаете?

3. Магнитные материалы

Основные типы магнитного состояния вещества. Все вещества в природе считаются магнетиками, так как они обладают определенными магнитными свойствами и соответствующим образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. В течение длительного времени магнетики классифицировали по внешним признакам, прежде всего по их магнитной восприимчивости $\chi = I/H$, где I – намагниченность (интенсивность намагничивания); H – напряженность магнитного поля.

В зависимости от значения χ , характера ее зависимости от H и температуры выделили следующие основные типы магнетиков (магнитных явлений): *диамагнетики* (диамагнетизм), *парамагнетики* (парамагнетизм), *ферромагнетики* (ферромагнетизм). Затем установили, что кроме указанных трех групп следует выделять еще две: *антиферромагнетики* (антиферромагнетизм) и *ферримагнетики* (ферримагнетизм). Однако при этом формальный классификационный признак χ оказывается несостоятельным. Дело в том, что магнитные свойства вещества, представляющего собой сложную динамическую систему атомов, состоящую из большого числа ядер и электронов, определяются внутри- и межатомными взаимодействиями элементарных носителей магнетизма: частиц, диполей, квадруполь и т.д. Только изучение видов связей и значений энергии взаимодействий между микроносителями магнетизма позволяет объяснить различные типы магнитного состояния вещества.

Диамагнитный эффект является результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи и проявляется в том, что возникает магнитный момент, направленный в сторону, обратную внешнему полю. Следовательно, диамагнитная восприимчивость отрицательна; по значению она весьма мала ($\chi \ll 10^{-5}$) и в большинстве случаев не зависит от температуры и напряженности поля. Диамагнетизм существует во всех веществах, независимо от структуры их атомов и видов связи, т.е. в жидком, твердом и газообразном состояниях. Однако в «чистом виде» он проявляется только в тех веществах (диамагнетиках), в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов. Для веществ, в которых собственный суммарный магнитный момент атомных образований не равен нулю, на диамагнетизм накладывается значительно больший его по значению некомпенсированный момент электронов. В этом случае наблюдаются другие типы магнитного состояния, подавляющие диамагнетизм.

Парамагнитный эффект возникает в веществах с наличием

некомпенсированных магнитных моментов и отсутствием магнитного атомного порядка. Это проявляется в том, что в отсутствие внешнего поля векторы магнитных моментов под действием тепловой энергии располагаются равновероятно, в результате чего магнитный момент парамагнетика равен нулю. Под действием внешнего поля возникает направление преимущественной ориентации магнитных моментов, совпадающее с направлением поля, т. е. появляется положительная намагниченность ($\chi > 0$). Для большинства парамагнетиков χ сильно зависит от температуры.

Ферромагнитный эффект состоит в том, что при температуре не выше точки Кюри (особой для каждого ферромагнетика) даже в отсутствие внешнего магнитного поля энергетически выгодно существование *ферромагнитного атомного порядка*. Этому порядку соответствует параллельное расположение спинов. Следовательно, даже в отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнетик находится в состоянии технического насыщения (*самопроизвольного или спонтанного намагничивания*). Магнитная восприимчивость у ферромагнетиков имеет очень большое положительное значение и существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнитный эффект характеризуется наличием антиферромагнитного атомного порядка, заключающегося в том, что в отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты одинаковых соседних атомов или ионов вследствие взаимодействия ориентированы антипараллельно, так что результирующий магнитный момент равен нулю. При воздействии внешнего поля магнитные моменты стремятся установиться вдоль него, и антиферромагнетик обладает малой положительной χ , значение которой зависит от температуры.

Ферримагнитный эффект представляет собой некомпенсированный антиферромагнетизм (*ферримагнитный атомный порядок*).

При температуре выше точки Кюри у ферромагнетиков и точки Нееля у антиферромагнетиков и ферримагнетиков атомный магнитный порядок разрушается, и вещества переходят в парамагнитное состояние.

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

К сильномагнитным веществам относятся не только чистые ферромагнитные элементы, но и ряд металлических и интерметаллических

сплавов, твердых растворов, полупроводниковых и диэлектрических соединений. Магнитный порядок в этих разнообразных типах веществ обусловлен наличием в их химическом составе компонентов из числа переходных элементов и *обменным взаимодействием* между элементарными носителями магнетизма, энергия которого превышает среднюю энергию теплового движения. Типы обменных взаимодействий и механизм их действия зависят от строения вещества, параметров его микроструктуры, природы химической связи. Так, для металлов и их сплавов, у которых магнитный момент обусловлен не полностью застроенным третьим слоем электронной оболочки, имеет место прямое обменное взаимодействие за счет перекрытия электронов, принадлежащих соседним атомам в решетке, поскольку расстояние между атомами в данной решетке мало. В веществах, атомы которых расположены на значительном расстоянии друг от друга, прямое обменное взаимодействие мало и возникают различные виды косвенных взаимодействий. Например, у редкоземельных металлов имеет место косвенный обмен через электроны проводимости. Для ряда кристаллических химических соединений, у которых магнитоактивные носители атомных магнитных моментов разделены между собой магнитонейтральными ионами, осуществляется косвенное обменное взаимодействие между магнитными ионами через возбужденные немагнитные промежуточные ионы.

Для электротехники особое место среди магнитных материалов занимают ферромагнетики, они используются для производства трансформаторов, дросселей, постоянных магнитов.

Общие сведения о ферромагнетизме

К ферромагнетикам относятся: железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, а также некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. При относительно низких температурах ферромагнитами являются некоторые редкоземельные элементы (гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий и тулий).

Все ферромагнетики характеризуются:

- кристаллическим строением;
- большим положительным значением магнитной восприимчивости (магнитной проницаемости): а также существенной и нелинейной ее зависимостью от напряженности поля и температуры;
- способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых полях;

– гистерезисом зависимости магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния («магнитной предыстории»);

– точкой Кюри, т.е. температурой, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства.

Кривые намагничивания. Магнитные свойства ферромагнетиков характеризуются зависимостями магнитной индукции B или намагниченности I от напряженности поля H и потерь на перемагничивание P от индукции и частоты.

Магнитные свойства материала зависят не только от напряженности поля, температуры, наличия или отсутствия механических напряжений и т.д., но и от предшествующего магнитного состояния.

Во многих случаях для получения кривых намагничивания в качестве исходного принимают размагниченное состояние образца, при котором в отсутствие внешнего поля индукция равна нулю и нет преимущественного направления намагничивания доменов, т.е. их магнитные моменты расположены статистически равномерно.

Наилучшее размагничивание возможно при нагреве материала выше точки Кюри и последующего охлаждения при отсутствии внешнего поля, однако в технике этот способ применяют редко в связи с неудобствами его практического осуществления. Чаще всего образец размагничивают, воздействуя на него переменным полем с убывающей до нуля амплитудой, используя для этой цели специальные устройства или измерительную схему.

Максимальная напряженность размагничивающего поля, необходимая для полного размагничивания, различна у разных групп материалов и должна в несколько раз превышать значение коэрцитивной силы (H_c).

При намагничивании предварительно размагниченного образца различают следующие типы зависимостей:

1) *начальную (нулевую) кривую намагничивания*, которую получают при монотонном увеличении H ;

2) *безгистерезисную (идеальную) кривую намагничивания*, получаемую при одновременном действии постоянного поля и переменного поля с убывающей до нуля амплитудой (кривая a на рис. 3.1).

3) *основную (коммутационную) кривую намагничивания*, представляющую собой геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса, получающихся при циклическом перемагничивании (кривая b на рис. 3.1).

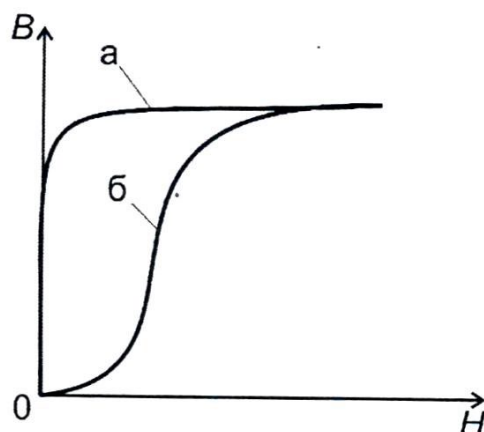


Рис. 3.1. Кривые намагничивания

Основная кривая намагничивания является важнейшей характеристикой магнитных материалов, отвечает требованиям хорошей воспроизводимости и широко используется для характеристики намагничивания материалов в постоянных полях.

На основной кривой намагничивания принято различать три участка: начальный, соответствующий нижнему колену кривой, участок быстрого возрастания индукции (намагниченности) и участок насыщения (выше верхнего колена кривой).

Петля гистерезиса. При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует петлю гистерезиса (рис. 3.2).

Если намагничивание происходит так, как показано стрелками на рис. 3.2, а, то при однократном прохождении петли точки A и A' , соответствующие одной и той же напряженности поля H_A , не совпадают, что объясняется различной для этих точек магнитной историей.

Для получения более определенной симметричной (установившейся) петли (рис. 3.2, б) при измерениях в цепях постоянного тока производят так называемую магнитную подготовку, которая состоит в многократном (5 – 10 раз) коммутировании тока в намагничивающей обмотке после установления его значения.

Форма петли для данного материала зависит от значения поля. Для слабых полей она имеет вид эллипсов, с увеличением поля у нее начинают вытягиваться «носики», соответствующие точкам A_1 и A_2 (рис. 3.2, б). Петлю гистерезиса, полученную при условии насыщения, называют предельной. В справочниках обычно приводятся симметричные предельные петли гистерезиса.

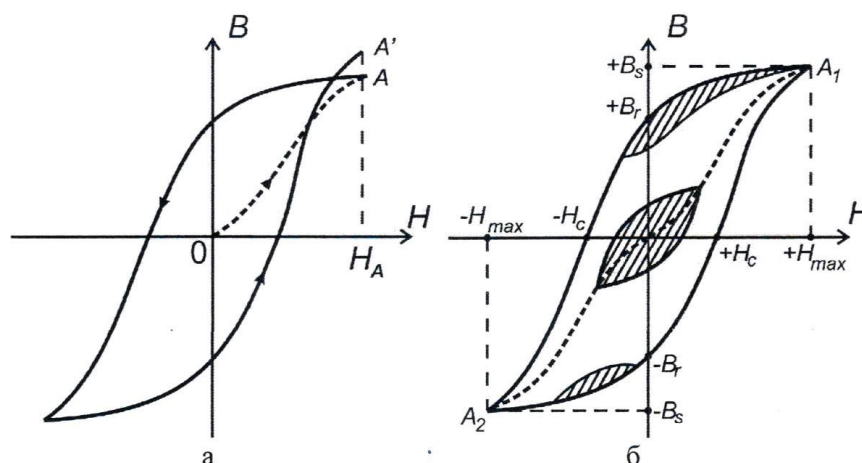


Рис. 3.2. Петля гистерезиса при циклическом перемагничивании ферромагнетика

Основными характеристиками петли гистерезиса являются *остаточная индукция* B_r , *коэрцитивная сила* H_c , *индукция насыщения* B_s и площадь петли, характеризующая *потери на гистерезис* P за один цикл перемагничивания.

Остаточной индукцией B_r , называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля.

Коэрцитивная сила H_c – это размагничивающее поле, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу, для того чтобы индукция в нем стала равной нулю.

Потери на гистерезис, отнесенные к единице объема вещества (удельные потери),

$$P_r = \oint H dB \quad (3.1)$$

При перемагничивании материала с частотой f (Гц) потери на гистерезис

$$P_r = (f \cdot \oint H dB) / \rho, \quad (3.2)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3 .

Кроме петли гистерезиса, вершины которой соответствуют основной кривой намагничивания, во многих случаях рассматривают так называемые частные петли гистерезиса, у которых вершины не лежат на основной кривой.

Примеры частных петель приведены на рис. 3.2, б (заштрихованные области). Особое значение имеют частные петли возврата, получающиеся при уменьшении размагничивающего поля.

Магнитная проницаемость. Различают абсолютную $\mu_a = B/H$ и относительную $\mu_r = B/\mu_0 H$ магнитные проницаемости.

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

Наиболее часто используют понятия нормальной магнитной проницаемости μ , начальной $\mu_{\text{нач.}}$, максимальной $\mu_{\text{макс}}$ и дифференциальной $\mu_{\text{диф}}$.

Для точки A (рис. 3.3) магнитная проницаемость μ_A определяется как тангенс угла наклона секущей OA к оси абсцисс, т. е.

$$\mu_A = \operatorname{tg} \alpha_A = B_A / \mu_0 H_A. \quad (3.3)$$

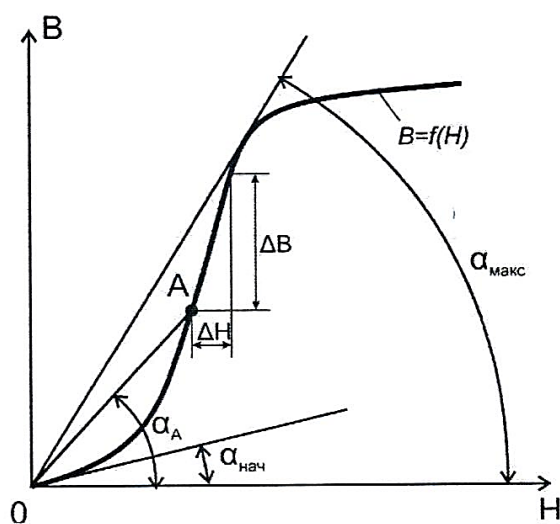


Рис. 3.3. Основные участки кривой намагничивания

Начальная и максимальная магнитные проницаемости определяются как частные случаи нормальной проницаемости, т. е. наклон касательной на начальном участке кривой $B = f(H)$ характеризует начальную проницаемость, а наклон прямой, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальной проницаемости.

$$\mu_{\text{нач}} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{нач}} \quad (3.4)$$

$$\mu_{\text{макс}} = \text{tg}\alpha_{\text{макс}} = B_{\text{макс}}/\mu_0 H_{\text{макс}} \quad (3.5)$$

Дифференциальную проницаемость $\mu_{\text{диф}}$ определяют как производную от магнитной индукции по напряженности магнитного поля для любой точки кривой намагничивания, т. е. она представляет собой тангенс угла между осью абсцисс и касательной к кривой намагничивания в этой точке:

$$\mu_{\text{диф}} = dB/\mu_0 dH \quad (3.6)$$

Понятие $\mu_{\text{диф}}$ чаще всего используют при анализе вопросов, связанных с одновременным действием на магнитный материал постоянного и переменного магнитных полей.

Магнитотвердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов. При этом используется магнитная энергия, возникающая между полюсами магнита. Следовательно, магнитные цепи с постоянными магнитами должны быть разомкнутыми, т. е. иметь полезный (рабочий) воздушный зазор. Поток в зазоре возникает после намагничивания материала при кратковременном помещении его в сильное магнитное поле.

Большое значение для материалов, применяемых в постоянных магнитах, имеет *размагничивающий* участок петли гистерезиса - ее часть, расположенная во втором квадранте (рис. 3.4).

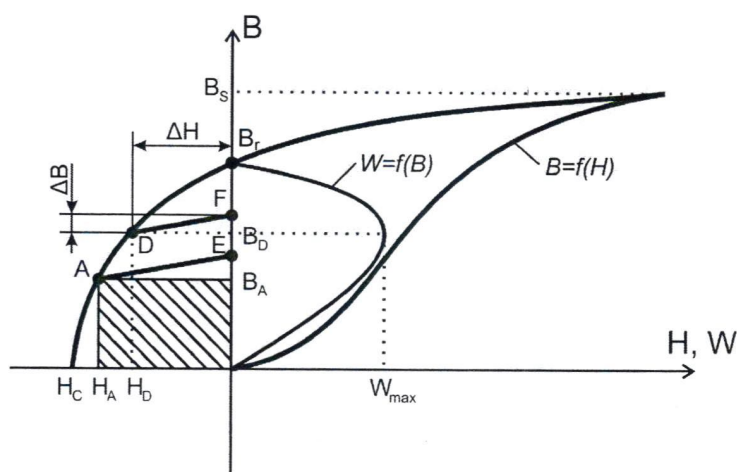


Рис. 3.4. Графики кривых, характеризующих магнитные свойства магнитотвердых материалов

На рис. 3.4 приведены кривые, характеризующие магнитные свойства магнитотвердых материалов. После снятия внешнего поля магнитные

свойства материала характеризуются кривой размагничивания – участком гистерезисной петли, расположенным во втором квадранте. Положение рабочей точки A на этой кривой определяется конфигурацией магнитной цепи системы с постоянным магнитом. Индукцию B_A называют кажущейся остаточной индукцией или остаточной индукцией в замкнутой цепи.

Удельная магнитная энергия во внешнем пространстве

$$W_A = \frac{B_A H_A}{2} = [\text{Дж/м}^3]. \quad (3.7)$$

При изменении конфигурации магнитной цепи, например, величины воздушного зазора, меняется положение рабочей точки на кривой размагничивания. Если цепь замкнута, то индукция будет наибольшей, равной остаточной индукции B_r материала. Но так как воздушный зазор, где может быть использована энергия магнита, при этом отсутствует ($H=0$), то $W=0$. Второму предельному значению, при котором энергия также равна нулю, соответствует $H = H_c$; $B = 0$.

Из рис. 3.4 видно, что точке D соответствует наибольшее значение удельной магнитной энергии $W_{\text{макс}}$. Этот параметр является важнейшим при оценке качества магнитотвердого материала.

В процессе эксплуатации магнита положение рабочей точки не остается постоянным. Изменение магнитного состояния происходит при этом по кривым возврата, представляющим собой частные петли гистерезиса, одна из вершин которых лежит на кривой размагничивания. Кривые возврата являются весьма узкими, поэтому их обычно заменяют прямыми возврата (на рис. 3.4 прямые AE и DF). Ход прямой возврата оценивается коэффициентом возврата

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H}, \quad (3.8)$$

где ΔB - изменение индукции, соответствующее изменению поля ΔH (рис. 3.4). Чем меньше коэффициент возврата, тем меньше изменения кажущейся остаточной индукции в результате смещения положения рабочей точки. Значит, коэффициент возврата определяет в некоторой степени стабильность магнитной цепи.

По преобладающему технологическому признаку (с учетом химического состава) магниты подразделяют на:

– стали, закаливаемые на мартенсит - углеродистые стали, легированные хромом, вольфрамом, кобальтом с относительно невысокими

магнитными свойствами;

– дисперсионно твердеющие сплавы, подвергающиеся холодной или горячей механической обработке давлением с несколько более лучшими магнитными свойствами, чем у сталей, закаливаемых на мартенсит;

– диффузионно твердеющие сплавы на основе системы железо - никель - алюминий с добавками кобальта, меди, титана, ниобия и пр.;

– прессованные магниты из порошков на основе мелкодисперсных порошков железа и сплава железо – кобальт с однодоменными размерами частиц преимущественно с анизотропией формы;

– сплавы с применением благородных металлов типа платина – кобальт, платина – железо, серебро – марганец – алюминий и пр. с высокими значениями коэрцитивной силы;

– интерметаллическое соединение марганец – висмут;

– магнитотвердые ферриты бария, стронция и кобальта с высокой коэрцитивной силой и сравнительно небольшой остаточной магнитной индукцией;

– сплавы металлов группы железа с редкоземельными металлами, изготавливаемые методами порошковой металлургии, с рекордными значениями всех основных магнитных свойств;

– композиционные магнитотвердые материалы, изготавливаемые на основе порошков магнитотвердых материалов и полимерной связки.

Линия размагничивания магнитотвердых материалов на основе редкоземельных металлов близка к прямой.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

Основная кривая намагничивания ферромагнетика

Цель работы: изучение свойств ферромагнетика при помощи основной кривой намагничивания $B(H)$ и зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu_r(H)$.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри», соединительные проводники.

Методика измерений

В данной работе для получения основной кривой намагничивания $B(H)$ используется методика, заключающаяся в следующем: на кольце из ферромагнитного материала расположены две обмотки (рис. 3.5). Первичная обмотка ω_1 намагничивающая, а вторичная ω_2 предназначена для измерения наводимой ЭДС.

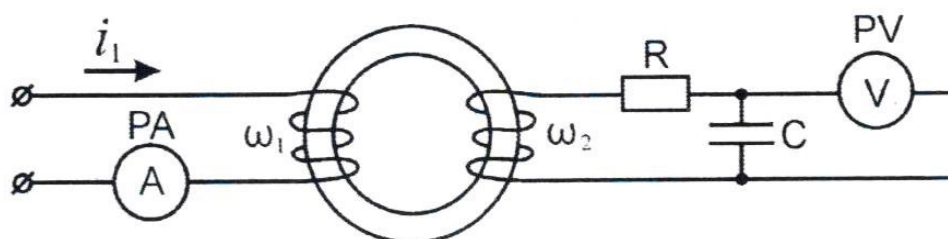


Рис. 3.5. Схема электрическая функциональная установки для получения основной кривой намагничивания

Напряженность магнитного поля, которое создается в кольцевом сердечнике при протекании по первичной обмотке тока i_1 , рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{i_1 \cdot \omega_1}{l_{cp}}, \quad (3.9)$$

где ω_1 - число витков первичной обмотки; l_{cp} – длина средней линии сердечника; i_1 - действующее значение тока в обмотке ω_1 ; значения ω_1 и l_{cp} указаны на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри».

ЭДС, наводимая во вторичной обмотке, является производной от потокосцепления по времени:

$$E = \frac{d\Psi}{dt}, \quad (3.10)$$

где Ψ - потокосцепление в сердечнике. Потокосцепление Ψ определяется выражением:

$$\Psi = \omega_2 \cdot \Phi \quad (3.11)$$

где ω_2 - число витков во вторичной обмотке; Φ - магнитный поток в сердечнике. Магнитный поток в сердечнике Φ зависит от индукции магнитного поля и геометрических размеров сердечника:

$$\Phi = B \cdot S_M, \quad (3.12)$$

где B – индукция магнитного поля; S_M – эффективная площадь сечения магнитопровода.

В цепь вторичной обмотки введен интегратор – RC -звено с постоянной времени $\tau = RC$, напряжение на выходе которого пропорционально индукции в сердечнике.

Путем математических преобразований вышеуказанных выражений получаем:

$$B = \frac{U_2 \cdot R \cdot C}{\omega_2 S_M}, \quad (3.13)$$

где U_2 - напряжение на вторичной обмотке ω_2 .

Значения ω_2 и S указаны на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри».

Для упрощения расчетов объединим постоянные параметры в коэффициент k_B :

$$B = k_B \cdot U_2, \quad (3.14)$$

$$k_B = \frac{R \cdot C}{\omega_2 \cdot S_M}. \quad (3.15)$$

Зная значение магнитной индукции B и напряженность магнитного поля H , магнитная проницаемость:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (3.16)$$

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

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 3.6 выполнить электрические соединения модулей. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Для отсечения постоянной составляющей переменного тока в цепь первичной обмотки включен конденсатор $C1$.

Установить минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри» в соответствующие гнезда расположенные в области «Магнитомягкие материалы» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости».

В качестве амперметра PA использовать мультиметр 1 в режиме измерения переменного тока 200 мА.

В качестве вольтметра PV использовать мультиметр 2 в режиме измерения переменного напряжения с пределом 20 В.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф». Включить мультиметры 1 и 2.

Включить функциональный генератор. Установить прямоугольную форму выходного сигнала с частотой $f = 250$ Гц.

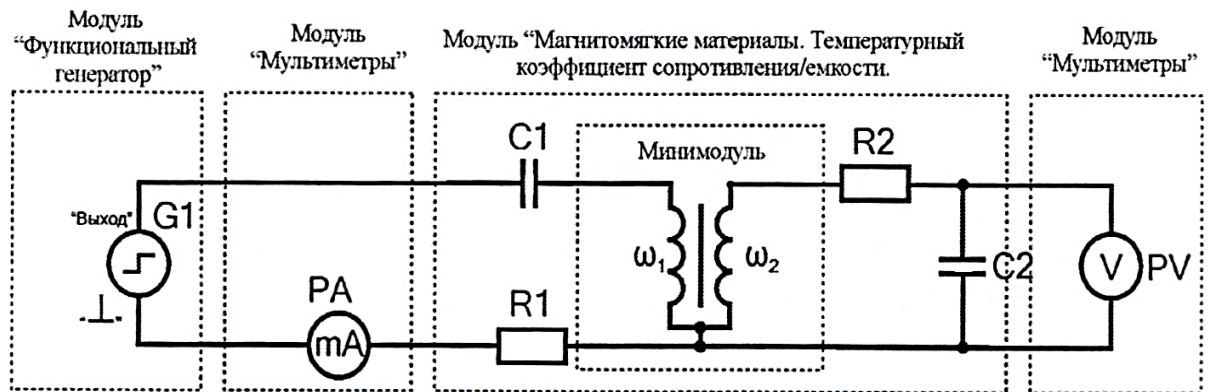


Рис. 3.6. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения основной кривой намагничивания: $R1 = 24 \text{ Ом}$, $R2 = 5,1 \text{ кОм}$, $C2 = 0,33 \text{ мкФ}$, $C1 = 50 \text{ мкФ}$

4. Изменяя силу тока $I (PA)$ в цепи первичной обмотки ω_1 при помощи кнопок «Амплитуда» модуля «Функциональный генератор» в диапазоне $0 \dots 100 \text{ мА}$ (с шагом 10 мА), заносить значения значения напряжения $U (PV)$ и тока $I (PA)$ в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$H, \text{ А/м}$	$B, \text{ Тл}$	μ_r
$0 \cdot 10^{-3}$				
$10 \cdot 10^{-3}$				
$20 \cdot 10^{-3}$				
...				
$100 \cdot 10^{-3}$				

5. Используя данные табл. 3.1 рассчитать значения H , B и μ_r , для каждого пункта по формулам:

$$H = \frac{I \cdot \omega_1}{l_{cp}},$$

$$B = \frac{UR2C2}{\omega_2 S_M},$$

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $l_{\text{ср}}$, S_M , ω_1 , ω_2 указаны на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри» ($l_{\text{ср}}$ и S_M указаны на корпусе минимодуля в мм и мм², которые при расчете необходимо перевести в м и м² соответственно). Полученные значения занести в табл. 3.1.

6. Построить графики зависимостей магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B(H)$ (основная кривая намагничивания ферромагнетика) и относительной магнитной проницаемости сердечника от напряженности магнитного поля $\mu_r(H)$.

7. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

8. Анализируя основную кривую намагничивания и зависимость $\mu_r(H)$ определить индукцию насыщения B_S (при максимальной напряженности магнитного поля H), начальную $\mu_{\text{нач}}$ и максимальную μ_{max} относительные магнитные проницаемости.

Контрольные вопросы

1. Приведите основные виды кривых намагничивания магнитомягких материалов.
2. Приведите определение магнитной проницаемости и её основные виды.
3. Приведите основные точки и участки кривой намагничивания.
4. Почему в области магнитного насыщения ферромагнетика индукция не возрастет с увеличением напряженности магнитного поля?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

Изучение свойств ферромагнетика при помощи петли гистерезиса

Цель работы: определение параметров петли магнитного гистерезиса, изучение семейства частных петель, определение удельной энергии перемагничивания ферромагнетика.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления / емкости», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», модуль «Мультиметры», минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри», соединительные проводники.

Методика измерений

Согласно методике измерения магнитной индукции и напряженности поля описанного в лабораторной работе №13 имеем:

$$H = k_H U_x \quad (3.17)$$

$$B = k_B U_y, \quad (3.18)$$

где U_x, U_y - значения напряжений на осциллограмме петли гистерезиса;

$k_B = \frac{R_2 C_2}{\omega_2 S_M}$ – масштабный коэффициент индукции магнитного поля;

$k_H = \frac{\omega_1}{R l_{cp}}$ – масштабный коэффициент напряженности магнитного поля.

Удельные потери энергии на перемагничивание магнитного материала:

$$P_{уд} = \frac{f}{\rho} \oint B \cdot dH,$$

где f – частота перемагничивания; ρ – плотность материала (указана на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри»).

Подставив значения индукции (3.18) и напряженности (3.17) магнитного поля получим:

$$P_{уд} = \frac{f}{\rho} k_H k_B \oint U_y dU_x = \frac{f}{\rho} k_H k_B S_{\Pi} \quad (3.19)$$

где $S_{\Pi} = \oint U_y \cdot U_x$ – площадь петли гистерезиса. Расчет площади петли гистерезиса приведен ниже.

Расчет площади петли гистерезиса

Определим площадь петли гистерезиса методом трапеций.

Разобьем половину петли (положительные значения U_y) на n участков (рис. 3.7), площадь каждого участка определяется как разность площадей прямоугольных трапеций образованных верхней и нижней кривой петли. На рис. 3.7 петля разбита на 7 участков.

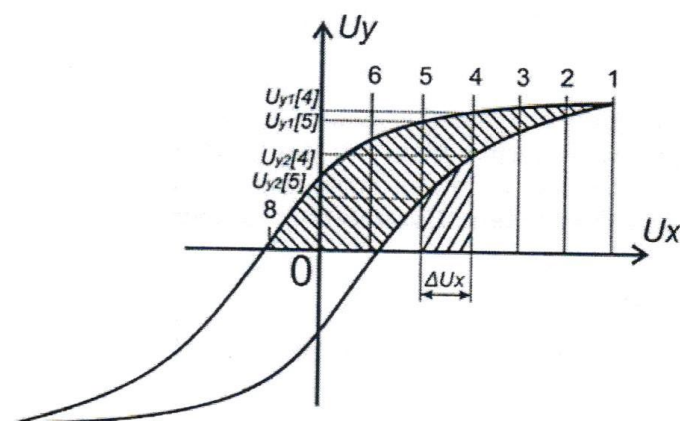


Рис. 3.7. Расчет площади петли гистерезиса

Площадь всей петли будет равна удвоенной сумме площадей всех участков. Таким образом, получаем, что площадь петли равна:

$$S_{\Pi} = \Delta U_x \sum_{i=1}^n (U_{y1}[i] + U_{y1}[i-1] - (U_{y2}[i] + U_{y2}[i-1])),$$

где: ΔU_x - шаг разбиения; n - количество элементов (для расчетов достаточно 5 – 10 элементов); U_{y1} - значение напряжения, отсекаемое линией на верхней кривой петли; U_{y2} - значение напряжения, отсекаемое линией на нижней кривой петли.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск

осуществляется путем тестирования.

Часть 1. Определение параметров петли магнитного гистерезиса и вычисление удельной энергии перемагничивания

2. Согласно рис. 3.8 выполнить электрические соединения модулей для изучения свойств ферромагнетика с помощью петли гистерезиса. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.**

Установить минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри» в соответствующие гнезда расположенные в области «Магнитомягкие материалы» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости».

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB-осциллограф». Включить модуль «Функциональный генератор».

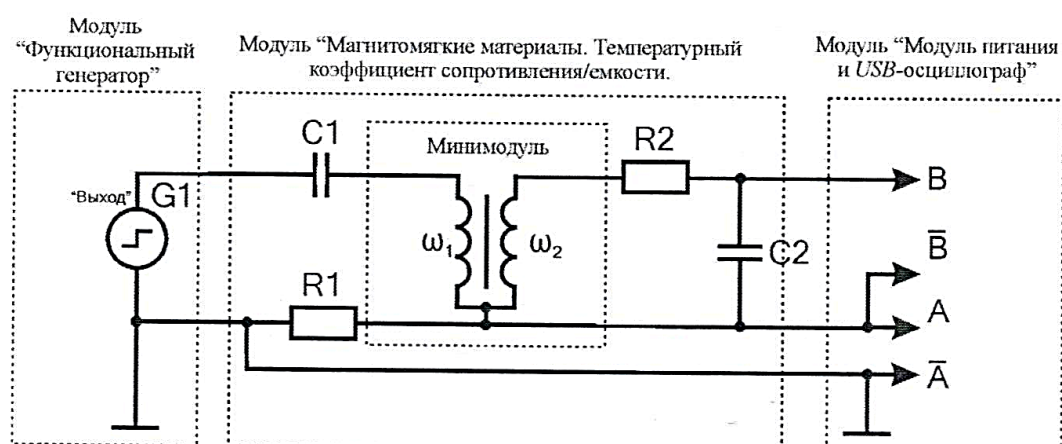


Рис. 3.8. Схема электрическая соединений типового комплекта для изучения петли гистерезиса: $R1 = 24 \text{ Ом}$, $R2 = 5,1 \text{ кОм}$, $C2 = 0,33 \text{ мкФ}$, $C1 = 50 \text{ мкФ}$

Установить прямоугольную форму выходного сигнала функционального генератора G , частоту $f_{\text{вых}} = 250 \text{ Гц}$. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф *DOSC-DLA*». Перейти в режим «XY». Задать размах шкалы напряжения каналов при помощи ручек настройки «крутилки» «Канал A/B (Вольт/экран)» $0,2 \text{ В/деление}$. Повернуть ручку «Время (с/дел)» (развертка) в положение $0,5 \text{ мс/дел}$. Нажать на кнопку «цикл». Увеличивая ток I в первичной обмотке с помощью кнопок увеличения и уменьшения амплитуды функционального генератора, получить

изображение предельной петли гистерезиса, при которой рост тока не приводит к увеличению площади петли гистерезиса.

3. Измерить координаты (напряжения) точек петли, которые соответствуют положительной и отрицательной значениям коэрцитивной силы $+H_c$ и $-H_c$, остаточной индукции $+B_r$ и $-B_r$ индукции насыщения $+B_s$ и $-B_s$ (рис. 3.9). Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

к _В	к _Н	Координаты (напряжения) точек петли, В			Основные характеристики петли
		$U_{x+}(H_c) =$	$U_{x-}(H_c) =$	$U_{xcр}(H_c) =$	
		$U_{y+}(B_r) =$	$U_{y-}(B_r) =$	$U_{ycр}(B_r) =$	$H_c =$
		$U_{y+}(B_s) =$	$U_{y-}(B_s) =$	$U_{ycр}(B_s) =$	$B_r =$
					$B_s =$

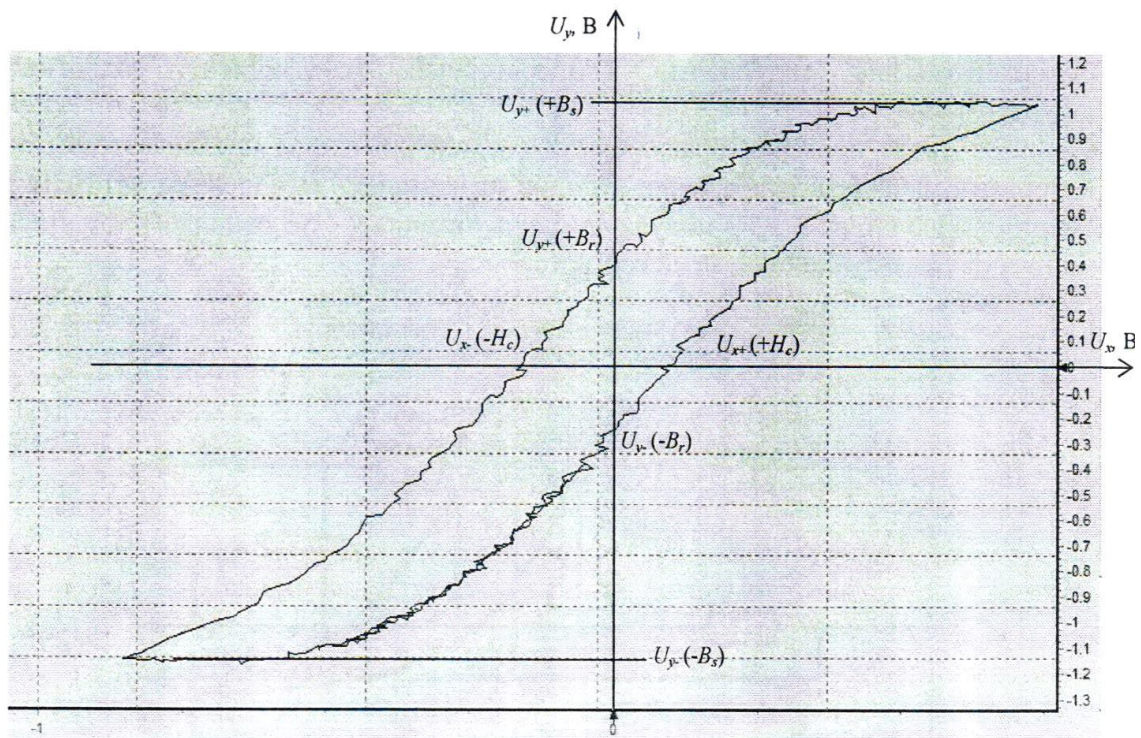


Рис. 3.9. Соответствие точек петли гистерезиса значениям коэрцитивной силы $+H_c$ и $-H_c$, остаточной индукции $+B_r$ и $-B_r$ и индукции насыщения $+B_s$ и $-B_s$

4. Используя данные табл. 3.2 рассчитать средние значения напряжений $U_{xcр}(H_c)$, $U_{ycр}(B_r)$, $U_{ycр}(B_s)$, как среднее арифметическое положительных и

отрицательных координат $U_{cp} = (U_+ + |U_-|)/2$, полученные значения занести в табл. 3.2.

Рассчитать масштабные коэффициенты k_B и k_H по формулам:

$$k_B = \frac{R2C2}{\omega_2 S_M}, \quad k_H = \frac{\omega_1}{Rl_{cp}},$$

где l_{cp} , S_M , ω_1 , ω_2 указаны на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри» (l_{cp} , S_M приведены на корпусе минимодуля в [мм] и [мм²], которые при расчете необходимо перевести в [м] и [м²] соответственно). Полученные значения занести в табл. 3.2.

Рассчитать значения коэрцитивной силы H_c остаточной индукции B_r и индукции насыщения B_s по формулам:

$$H_c = k_H U_{xcp}(H_c), \quad B_r = k_B U_{ycp}(B_r), \quad B_s = k_B U_{ycp}(B_s),$$

полученные значения занести в табл. 3.2.

5. Согласно разделу «Расчет площади петли гистерезиса» приведенному в данной лабораторной работе рассчитать площадь петли $S_{п}$.

Рассчитать удельную энергию перемагничивания ферромагнетика по формуле:

$$P_{уд} = k_H k_B f S_{п} / \rho.$$

6. Сравнить полученные значения коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r индукции насыщения B_s и удельной энергии перемагничивания ферромагнетика $P_{уд}$ (тип ферромагнетика приведен на корпусе минимодуля) со справочными, сделать вывод. Указать источник справочной литературы.

Часть 2. Снятие семейства частных петель гистерезиса и построение основной кривой намагничивания

7. Уменьшить силу тока до нуля кнопкой уменьшения амплитуды модуля «Функциональный генератор». При этом площадь петли гистерезиса сократится до размеров точки.

Для снятия семейства частных петель намагничивания следует:

– увеличивать силу тока намагничивания кнопкой увеличения амплитуды модуля «Функциональный генератор», шаг увеличения выбирать

таким образом, чтобы снять 3...5 частных петель, до достижения предельной;

– для сохранения осциллограммы частных петель необходимо остановить циклическое измерения *USB*–осциллографа нажав кнопку «Сброс», в меню «Файл» выбрать пункт «Сохранить как растровый рисунок», ввести имя сохраняемого файла, нажать кнопку «OK».

8. Изменяя силу тока намагничивания кнопкой увеличения амплитуды модуля «Функциональный генератор», заносить значения напряжений U_x , U_y координат вершин петли гистерезиса на осциллограмме (рис. 3.10) в табл. 3.3.

Таблица 3.3

U_x , В	U_y , В	B , Тл	H , А/м

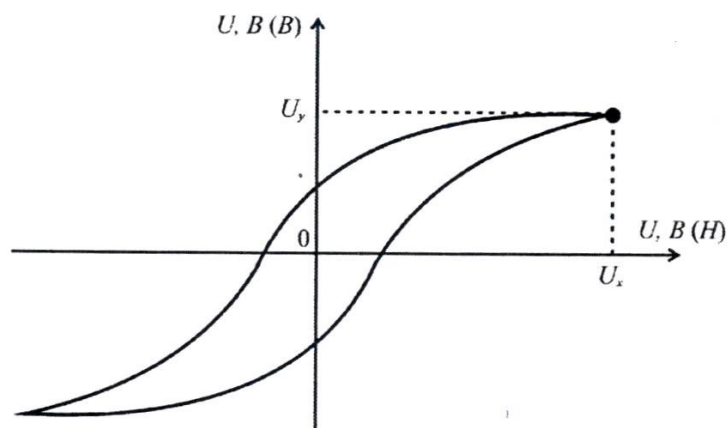


Рис. 3.10. Координаты вершин петли гистерезиса

Используя данные табл. 3.3 рассчитать значения H , B для каждого пункта табл. 3.3 по формулам:

$$H = k_H U_x, \quad B = k_B U_y.$$

Полученные значения занести в табл. 3.3.

9. Используя данные табл. 3.3 построить основную кривую намагничивания $B(H)$.

10. После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

11. Сравнить основную кривую намагничивания $B(H)$ с основной кривой намагничивания, полученной в лабораторной работе № 13. Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры ферромагнетика определяются по предельной петле гистерезиса?

2. Как определить удельные потери на перемагничивание ферромагнетика?

3. Как изменяются удельные потери с увеличением частоты перемагничивания ферромагнетика?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

Определение точки Кюри

Цель работы: наблюдение изменения петли гистерезиса в процессе перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние, построение зависимости магнитной индукции от температуры, определение температуры Кюри.

Оборудование: модуль «Функциональный генератор», модуль «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости», модуль «Мультиметры», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри», соединительные проводники.

Методика измерений

Точка Кюри – это температура T_c , выше которой намагниченность каждого домена ферромагнетика равна нулю вследствие разориентирующего теплового движения молекул. При температуре выше точки Кюри вещество переходит в парамагнитное состояние.

По мере уменьшения температуры ниже T_c намагниченность ферромагнетика J возрастает, так как магнитные моменты его атомов в пределах каждого домена стремятся выстроиться параллельно друг другу. При достаточно низких температурах магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль внешнего магнитного поля: наступает магнитное насыщение, при котором намагниченность вещества J_s максимальна. Ее величина (магнитный момент единицы объема образца) равна сумме магнитных моментов атомов:

$$J_s = n\mu_m, \quad (3.20)$$

где n - концентрация молекул ферромагнетика; μ_m - магнитный момент одного атома.

Полное насыщение, для которого справедлива формула (3.20), возможно только при $T = 0\text{K}$. Соответствующая этой температуре величина $J_s(0)$ находится из связи магнитной индукции \vec{B} с намагниченностью

вещества \vec{J} :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}), \quad (3.21)$$

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

Согласно выражению (3.21) намагниченность насыщения при $T = 0\text{К}$

$$J_s(0) = B_s(0)/\mu_0 - H_s(0) \cong B_s(0)/\mu_0 \quad (3.22)$$

где $H_s(0) \ll B_s(0)/\mu_0$, а индекс «s» означает, что величины относятся к состоянию насыщения ферромагнетика.

Методика определения величин индукции B и напряженности H магнитного поля в сердечнике магнитопровода приведена в лабораторной работе № 13.

Для построения зависимости индукции насыщения B_s от температуры ферромагнетика T измеряют координату B_s вершины петли гистерезиса при нагревании образца. По мере роста температуры ордината B_s петли уменьшается, а напряженность поля H остается постоянной. При этом площадь петли $S_{\text{г}}$ гистерезиса уменьшается и по достижении температуры Кюри вырождается в прямую линию. В лабораторной работе изучают зависимость $B_s(T)$.

Участок кривой (1 – N) проводят по полученным в ходе эксперимента точкам (рис. 3.11). При этом ось температуры на графике начинается при $T = 0\text{К}$. Для определения $B_s(0)$ из точки «1» продолжают зависимость $B_s(T)$ до пересечения с осью $B_s(T = 0\text{К})$ двумя линиями: проводят нормаль к оси B и касательную к кривой на начальном участке. Точки пересечения этих линий с осью B_s дают интервал ΔB_s , внутри которого лежит искомая величина:

$$B_s(0) = B_{s1} + \Delta B_s/2 \quad (3.23)$$

Используя найденные значения $B_s(0)$, по формуле (3.22) рассчитывается намагниченность J при насыщении, затем используя соотношение (3.20) рассчитывается магнитный момент μ_m одной молекулы ферромагнетика. В данной работе ферромагнитный образец выполнен из сплава $Mn-Zn$, для которого концентрация атомов $n = 1,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Из графика зависимости $B_s(T)$ определяем температуру точки Кюри T_c данного ферромагнетика. Если последняя экспериментальная точка (N)

близка к оси температур, то при нагревании была достигнута температура точки Кюри, при этом точка пересечения опытной кривой с осью T (где $B_S = 0$) дает значение T_C .

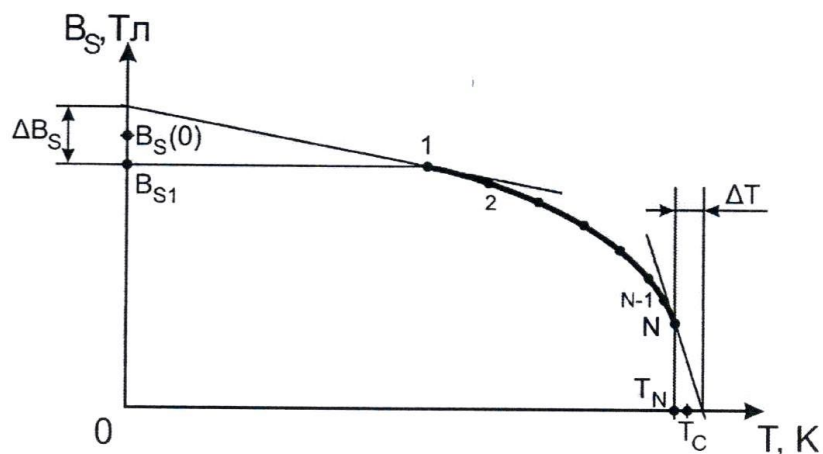


Рис. 3.11. График зависимости магнитной индукции материала от его температуры

Иначе находят точку Кюри путем экстраполяции опытной зависимости до значения $B_S = 0$ (рис. 3.11). Для чего, из точки (N) продолжают зависимость $B_S(T)$ до пересечения с осью T ($B_S = 0$ Тл) двумя линиями: проводят нормаль к оси T и касательную к кривой на конечном участке. Точки пересечения этих линий с осью T дают интервал ΔT , внутри которого лежит искомая величина — значение температуры точки Кюри T_C :

$$T_C = T_N + \Delta T/2 \quad (3.26)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 3.12 выполнить электрические соединения модулей для определения точки Кюри и магнитного момента атома ферромагнетика. **Монтаж схемы производить при отключенном питании.** Ручку тумблера SA1 перевести в нижнее положение.

Установить минимодуль «Ферромагнетик. Точка Кюри» в

соответствующие гнезда расположенные в области «Магнитомягкие материалы» модуля «Магнитомягкие материалы. Температурный коэффициент сопротивления/емкости». Подключить термопару *ВК* минимодуля к гнездам «ТЕМР» мультиметра 1 (в режиме измерения температуры «°C») при помощи кабеля соединения термопары минимодуля с мультиметром.

3. После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и *USB* осциллограф». Включить мультиметр 1. Включить модуль «Функциональный генератор».

Установить прямоугольную форму выходного сигнала функционального генератора *G*, частоту $f_{\text{вых}} = 250$ Гц. Запустить на компьютере программу «Цифровой осциллограф *DOSC-DLA*». Перейти в режим «*XV*». Задать размах шкалы напряжения каналов при помощи ручек настройки «крутилки» «Канал *A/B* (Вольт/деление)» 0,2 В/деление. Повернуть ручку «Время (с/дел)» (развертка) в положение 0,5 мс/дел. Нажать на кнопку «цикл». Увеличивая ток намагничивания *I* в первичной обмотке с помощью кнопок увеличения и уменьшения амплитуды функционального генератора получить изображение предельной петли гистерезиса, при которой рост тока не приводит к увеличению площади петли гистерезиса.

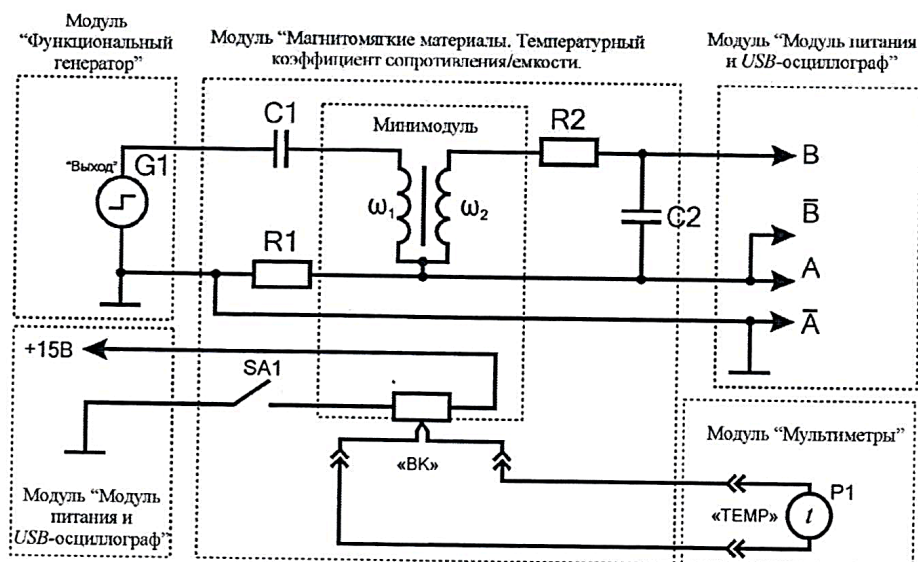


Рис. 3.12. Схема электрическая соединений типового комплекта для измерения точки Кюри ферромагнетика: $R1 = 24$ Ом, $R2 = 5,1$ кОм, $C2 = 0,33$ мкФ, $C1 = 50$ мкФ

При необходимости установить режим сглаживания каналов A и B , если это не изменит форму сигнала (в меню «Аналоговые сигналы» пункты «Сглаживание канала A » и «Сглаживание канала B »).

4. Значения температуры t , положительной U_+ и отрицательной U_- ординат вершин (рис. 3.13) петли гистерезиса (соответствуют величине индукции насыщения $\pm B_s$) занести в табл. 3.4

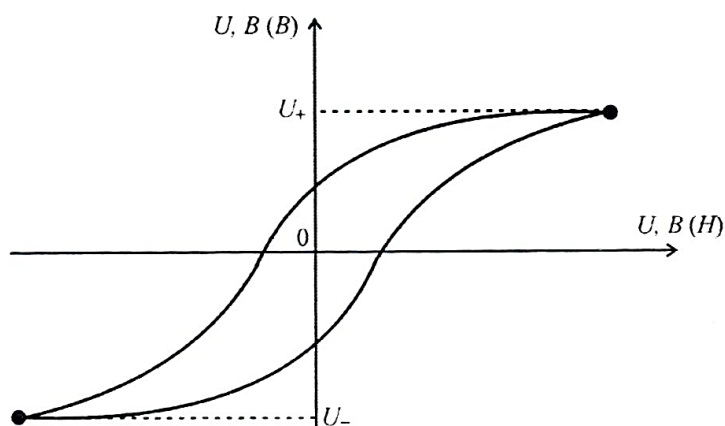


Рис. 3.13. Координаты вершин петли гистерезиса

Таблица 3.4

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	U_+, B	U_-, B	$U_{\text{ср}}, \text{B}$	$B_s, \text{Tл}$
20					
30					
...					
120					

5. Включить нагрев (ручку тумблера $SA1$ перевести в верхнее положение).

Если показания температуры ($P2$) уменьшаются, то следует изменить полярность подключения термопары (перевернуть разъем в гнездах «TEMP» мультиметра).

По мере нагревания образца каждые $10\text{ }^\circ\text{C}$, а после $100\text{ }^\circ\text{C}$ - каждые $5\text{ }^\circ\text{C}$, проводить измерения положительной U_+ и отрицательной U_- ординат вершин петли гистерезиса и температуры t , полученные значения заносить в табл. 3.4.

При проведении эксперимента необходимо поддерживать предельную

форму петли гистерезиса (так как с изменением температуры происходит уменьшение индукции насыщения B_S), для чего необходимо уменьшать амплитуду выходного сигнала кнопками увеличения и уменьшения амплитуды модуля «Функциональный генератор» при повышении температуры.

6. Измерения продолжать до окончания нагрева (установившаяся температура не изменяется в течение 5 минут более чем на 1 ... 2 °С).

7. Для каждой строки табл. 3.4 рассчитать средние значения напряжений U_+ и U_- :

$$U_{\text{ср}} = (U_+ + |U_-|)/2$$

полученные значения занести в табл. 3.4.

Для каждой строки табл. 3.4 рассчитать значения индукции насыщения B_S по формуле:

$$B_S = \frac{R2C2}{\omega_2 S_M} U_{\text{ср}}$$

где $R2 = 5,1$ кОм, $C2=0,33$ мкФ, S_M - указана на корпусе минимодуля «Ферромагнетик. Точка Кюри» (S_M приведена на корпусе минимодуля в [мм²], которые при расчете необходимо перевести в [м²] соответственно). Полученные значения занести в табл. 3.4.

Рассчитать температуру точки T по формуле $T = 273 + t$, полученные значения занести в табл. 3.4.

8.Используя данные табл. 3.4 построить график зависимости $B_S(T)$.

9.Согласно методике измерений, изложенной в данной лабораторной работе, определить значение температуры точки Кюри T_C , определить индукцию образца $B_S(0)$ при температуре 0К, рассчитать магнитный момент одного атома μ_m .

10.После оформления отчета и проверки результатов преподавателем необходимо разобрать схему, предоставить комплект в полном составе и исправности преподавателю или лаборанту.

11. Сравнить полученные значения температуры точки Кюри T_C и магнитный момент атома μ_m ферромагнетика со справочными (тип ферромагнетика приведен на корпусе минимодуля), сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение температуры точки Кюри.
2. Приведите определение парамагнитного состояния вещества.
3. Как изменяется намагниченность ферромагнетика при приближении к температуре точки Кюри?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

Изучение магнитотвердых материалов. Численный расчет магнитостатического поля, определение значения магнитной индукции

Цель работы: исследование кривой размагничивания магнитотвердых материалов, определение удельной энергии постоянного магнита, определение распределения магнитной индукции по результатам численного расчета магнитостатического поля.

Оборудование: модуль «Магнитотвердые материалы», модуль «Мультиметры», модуль «Модуль питания и USB осциллограф», датчик Холла, соединительные проводники, программа ELCUT.

Метод измерения

Основными свойствами магнитотвердых материалов являются коэффициент возврата μ_{Δ} и удельная магнитная энергия W_A .

Коэффициент возврата определяется как тангенс угла наклона прямой возврата:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H}, \quad (3.27)$$

где ΔB – изменение магнитной индукции на прямом участке линии возврата; ΔH – соответствующее изменение напряженности магнитного поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Измерение индукции магнитного поля производится датчиком на основе эффекта Холла.

Эффект Холла – появление в проводнике (или в полупроводнике) с плотностью тока \vec{j} , помещенном в магнитное поле \vec{B} , напряжения U в направлении, перпендикулярном векторам \vec{j} и \vec{B} . Эффект открыт в 1879 г. американским физиком Э. Г. Холлом, который экспериментально установил следующую зависимость для напряжения:

$$U_x = R IB/d, \quad (3.28)$$

где R – коэффициент пропорциональности (коэффициент Холла), его величина и знак зависят от химического состава проводника, от температуры

и заряда носителей тока; I – сила тока в образце; B – индукция магнитного поля; d – толщина образца.

Формулу (3.28) запишем в виде:

$$B = k \cdot U_x \quad (3.29)$$

где $k = \frac{R \cdot I}{d}$.

Индикатор индукции магнитного поля, входящий в состав лабораторного стенда, настроен таким образом, что $k = 1$, то есть напряжение 1 В на выходе индикатора соответствует индукции магнитного поля 1 Тл.

Закон полного тока для магнитной цепи с постоянным магнитом:

$$H_M h_M = H_\delta \delta, \quad (3.30)$$

где H_M – напряженность магнитного поля создаваемого постоянным магнитом; h_M – высота магнита; H_δ – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре; δ – величина воздушного зазора.

Индукция магнитного поля в воздушном зазоре определяется по формуле:

$$B_\delta = \mu_0 \cdot H_\delta \quad (3.31)$$

Подставив из формулы (3.30) значение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре H_δ и выразив H_M , получим:

$$B_\delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0 \cdot h_M}, \quad (3.32)$$

Для лабораторной установки: $\delta_1 = 3$ мм; $\delta_2 = 5$ мм; $h_M = 1$ мм.

Удельную магнитную энергию постоянного магнита найдем как площадь под кривой размагничивания, и так как она представляет собой прямоугольный треугольник со сторонами B_A и H_C , то удельная магнитная энергия будет равна:

$$W_A = \frac{B_A H_C}{2}. \quad (3.33)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

Исследование кривой размагничивания магнитотвердых материалов, определение удельной энергии постоянного магнита

1. Изучить теоретический материал, достаточный для выполнения лабораторной работы. Ответить на контрольные вопросы и получить у преподавателя допуск к проведению лабораторной работы, либо допуск осуществляется путем тестирования.

2. Согласно рис. 3.14 выполнить электрические соединения индикатора индукции магнитного поля. Монтаж схемы производить при отключенном питании.

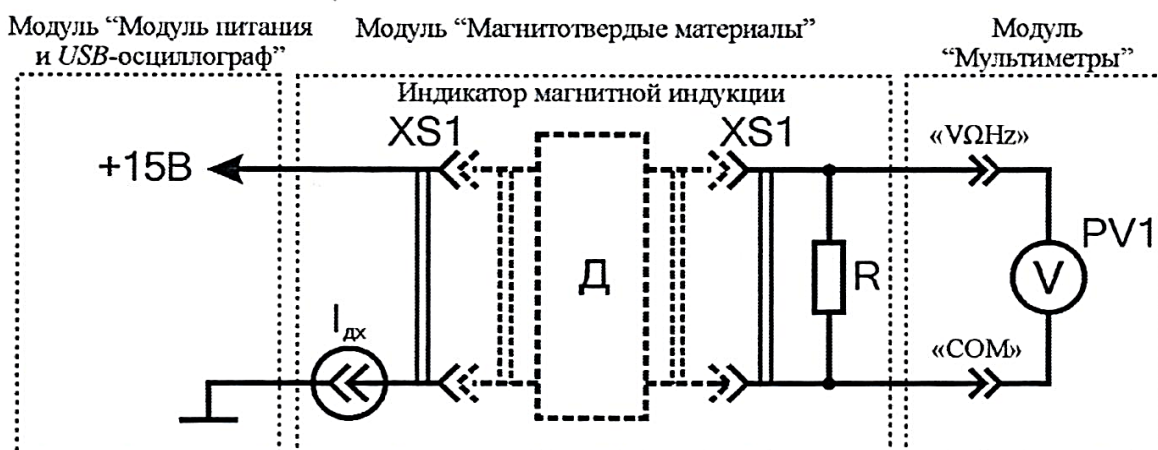


Рис. 3.14. Схема электрическая соединений индикатора индукции магнитного поля

В качестве вольтметра $PV1$ использовать мультиметр 1 модуля «Мультиметры» в режиме измерения постоянного напряжения с пределом 2 В. Подключить датчик Холла к разьему $XS1$ модуля «Магнитотвердые материалы». Индикатор индукции магнитного поля, входящий в состав лабораторного стенда, настроен таким образом, что напряжение 1 В на выходе индикатора соответствует индукции магнитного поля 1 Тл.

После проверки правильности соединений схемы преподавателем или лаборантом, подать напряжение питания на комплект включением автоматического выключателя и УЗО модуля «Модуль питания и USB осциллограф».

При подключении питания к индикатору индукции необходимо соблюдать полярность! «VΩHz»

3. На лицевой панели модуля "Магнитотвердые материалы"

расположены два постоянных магнита разной полярности, выполненных из сплава редкоземельных металлов типа NdFeB (рис.3.15).

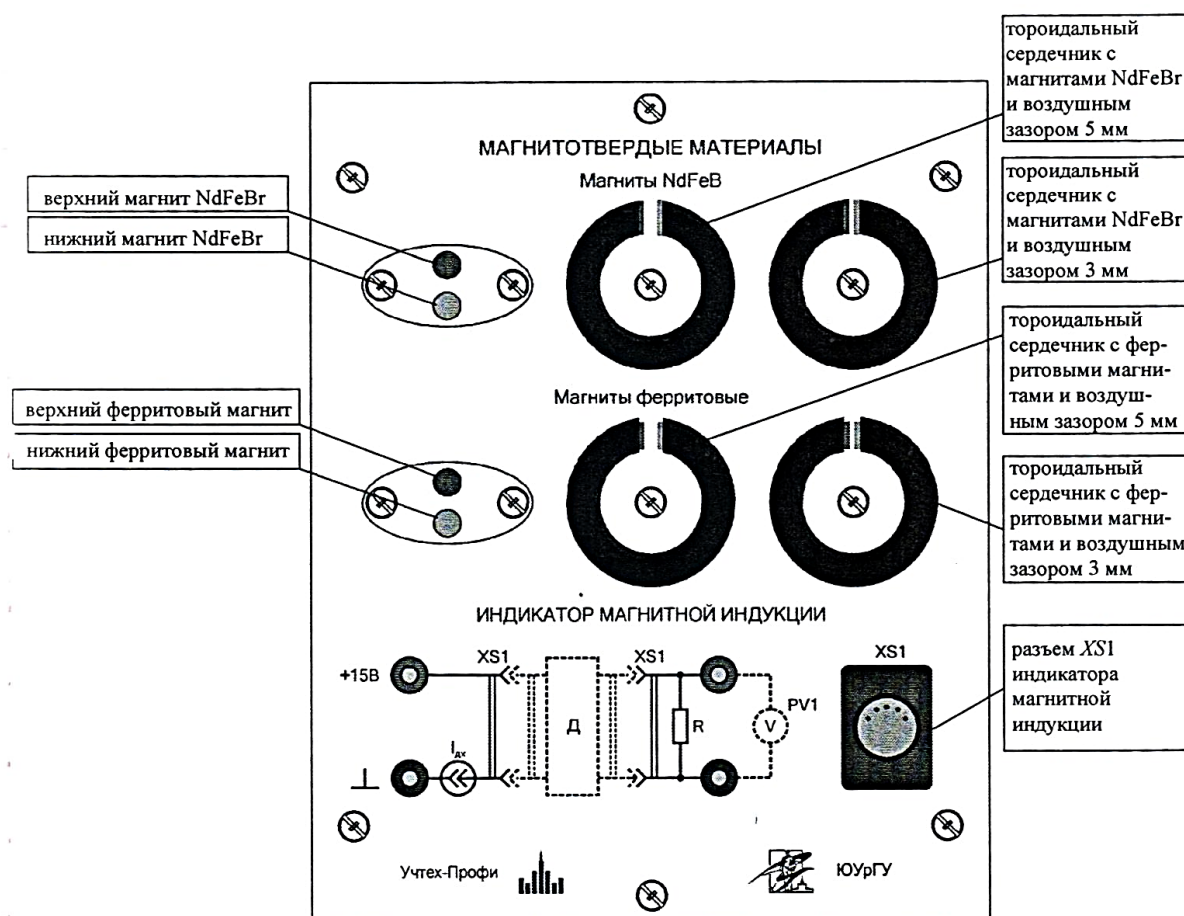


Рис. 3.15. Внешний вид лицевой панели лабораторного модуля «Магнитотвердые материалы»

4. Плавно приближая и отводя датчик Холла (не переворачивая) от магнита, наблюдать изменение напряжения Холла U_x ($PV1$), значение напряжения Холла и расстояние от поверхности магнита заносить в табл. 3.5. Измерения напряжения Холла U_{x1} и U_{x2} провести для двух магнитов (верхнего и нижнего, рис. 3.15) из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr. Отключить питание комплекта.

Используя данные табл. 3.5 и формулу (3.29) рассчитать и занести в соответствующие ячейки табл. 3.5 значения магнитной индукции $B1$ и $B2$ для двух образцов магнитов.

5. Построить графики зависимости магнитной индукции B от расстояния d до поверхности магнитов.

Таблица 3.5

Тип магнитов	Расстояние от поверхности d , мм	U_{x1} , мВ	U_{x2} , мВ	$B1$, Тл	$B2$, Тл
NdFeBr	0				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
Ферритовые	0				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

6. Повторить работы по п. 4, 5 для ферритовых магнитов.

7. На лицевой панели модуля "Магнитотвердые материалы" расположены два тороидальных магнитопровода с воздушным зазором 3 мм и 5 мм, содержащие в магнитной цепи постоянные магниты, выполненные из сплава редкоземельных металлов типа NdFeB (рис. 3.15).

Поместить датчик Холла в воздушный зазор тороидального сердечника с магнитами, выполненными из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr, величина воздушного зазора $\delta = 3$ мм. Перемещая датчик Холла в пределах воздушного зазора, найти положение с максимальной индукцией магнитного поля (максимальные показания $PV1$), занести значение напряжения датчика Холла U_{x1} ($PV1$) в соответствующие ячейки табл. 3.6.

Перевернуть датчик Холла и поместить в воздушный зазор тороидального сердечника с магнитами, выполненными из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr, величина воздушного зазора $\delta = 3$ мм. Перемещая датчик Холла в пределах воздушного зазора найти положение с максимальной индукцией магнитного поля (максимальные показания $PV1$), занести значение напряжения датчика Холла U_{x2} ($PV1$) в соответствующие ячейки табл. 3.6.

8. Повторить работы по п. 7 при помещении датчика Холла в воздушный зазор тороидального сердечника с магнитами, выполненными из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr, величина воздушного зазора δ

= 5 мм.

9. Рассчитать средние значения напряжения Холла для воздушных зазоров 3 мм и 5 мм по формуле: $U_{x \text{ ср}} = (|U_{x1}| + |U_{x2}|)/2$. Полученные значения занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Тип и марка магнитов	Воздушный зазор	U_x , В		B_δ , Тл	H_M , кА/м	B_A , Тл	H_{CB} , кА/м	W_A , кДж/м ³	μ_r
		U_{x1}	U_{x2}						
NdFeBr (N38)	$\delta = 3$ мм	U_{x1}							
		U_{x2}							
		$U_{x \text{ ср}}$							
	$\delta = 5$ мм	U_{x1}							
		U_{x2}							
		$U_{x \text{ ср}}$							
Ферритовые (У30)	$\delta = 3$ мм	U_{x1}							
		U_{x2}							
		$U_{x \text{ ср}}$							
	$\delta = 5$ мм	U_{x1}							
		U_{x2}							
		$U_{x \text{ ср}}$							

10. Повторить работы по п. 7 – 9 при помещении датчика Холла в воздушные зазоры тороидальных сердечников с ферритовыми магнитами.

11. По формулам (3.29) и (3.32) рассчитать и занести в табл. 3.6 значение магнитной индукции B_δ (при расчете, в качестве напряжения Холла U_x использовать значение $U_{x \text{ ср}}$) и напряженность поля H_M в воздушных зазорах.

12. Используя данные табл. 3.6 на график зависимости $B(H)$ нанести точки, соответствующие магнитной индукции B_δ и напряженности H_M в воздушных зазорах тороидальных сердечников соответственно, как показано на рис. 3.16. Так как линия размагничивания ферритовых и выполненных из сплава редкоземельных металлов близка к прямой, провести прямую линию через полученные точки до пересечения с осями, как показано на рис. 3.16.

13. Из графиков $B(H)$ определить кажущуюся остаточную индукцию B_A и коэрцитивную силу H_{CB} . Рассчитать удельную энергию магнита W_A по

формуле (3.33). Полученные значения занести в соответствующие ячейки табл. 3.6.

Используя данные табл. 3.6 рассчитать относительную магнитную проницаемость магнитов из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr и ферритовых магнитов по формуле:

$$\mu_r = \frac{B_A}{\mu_0 \cdot H_{CB}},$$

где B_A - кажущаяся остаточная индукция, Тл; H_{CB} - коэрцитивная сила по индукции, кА/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная постоянная, Гн/м. Полученные значения μ_r занести в соответствующие ячейки табл. 3.6.

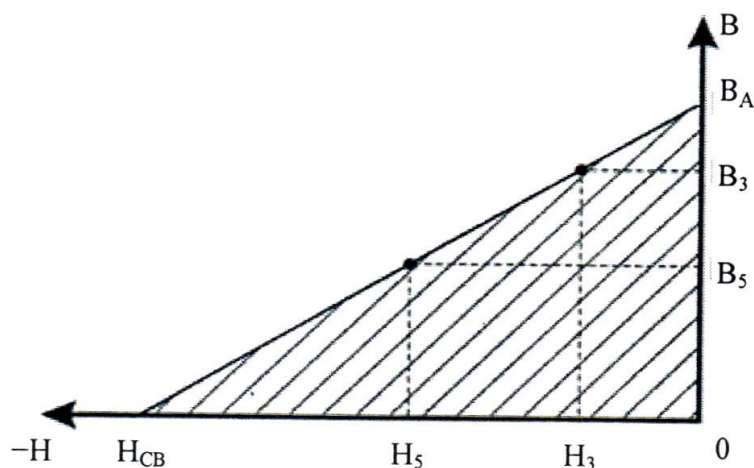


Рис. 3.16. Линия размагничивания магнитотвердого материала: B_3 – индукция магнитного поля в воздушном зазоре 3 мм; B_5 – индукция магнитного поля в воздушном зазоре 5 мм; H_3 – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре 3 мм; H_5 – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре 5 мм; B_A – кажущаяся остаточная индукция; H_{CB} – коэрцитивная сила по индукции

Сравнить экспериментальные значения B_A , H_{CB} , W_A , μ_r магнитов из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr со значениями ферритовых магнитов, сделать вывод. Сравнить экспериментальные значения B_A , H_{CB} , W_A , μ_r магнитов из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr и значения B_A , H_{CB} , W_A , μ_r ферритовых магнитов со справочными данными, сделать вывод.

Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Определение распределения магнитной индукции двух постоянных магнитов по результатам численного расчета магнитостатического поля

14. Провести измерения размеров системы двух магнитов из сплавов редкоземельных металлов типа NdFeBr, полученные размеры занести в табл. 3.7, высота магнитов $h = 3$ мм.

Таблица 3.7

Геометрия системы магнитов NdFeBr		
Диаметр магнитов d , мм	Высота магнитов h , мм	Расстояние между магнитами l , мм
	3	

15. Запустить программу «Elcut».

16. Создать задачу расчета магнитостатического поля.

В строке меню выбрать пункты «Файл» → «Создать задачу ...». В открывшемся окне «Создание задачи» ввести имя файла задачи и указать путь сохранения задачи. Нажать кнопку «Далее».

С небольшой долей погрешности, в геометрической модели, возможно принять в качестве формы магнитов квадрат со сторонами равными d (табл. 3.7).

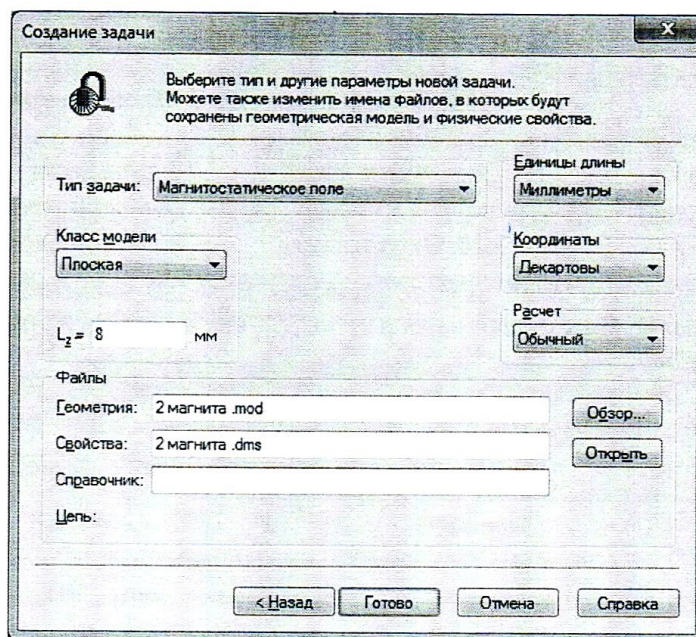


Рис. 3.17. Окно «Создание задачи»

В следующем окне «Создание задачи» (рис. 3.17) выбрать тип задачи – магнитостатическое поле, единицы длины – миллиметры, класс модели – плоская, задать в числовом поле « L_z ; =>» длину геометрической модели магнита в направлении оси z (за плоскость– экрана) $L_z = d$ (табл. 3.7).

17. Построить геометрическую модель задачи.

Двойным щелчком левой кнопки мыши выбрать в окне задачи, находящейся в левой части главного окна «*Elcut*», пункт «геометрия: имя файла.mod» (рис. 3.18).

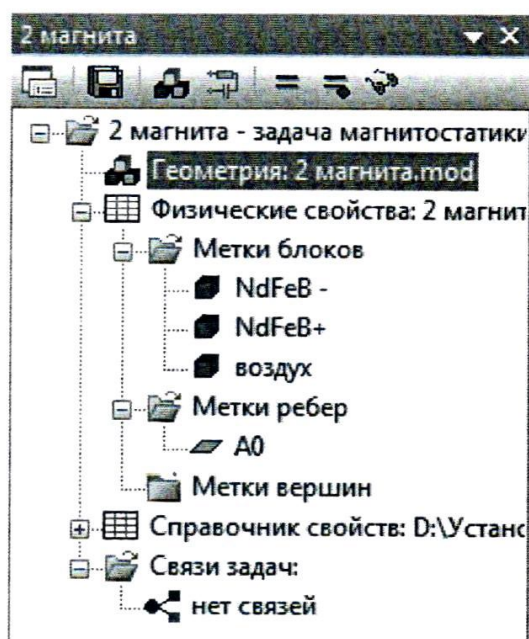


Рис. 3.18. Окно задачи

В открывшемся окне «Геометрическая модель» нарисовать систему двух магнитов с размерами, указанными в табл. 3.7, как показано на рис. 3.19.

Создание и манипулирование геометрическими объектами приведено в руководстве пользователя «*Elcut*» (Глава 4. Описание геометрии задачи) и в справке программы «*Elcut*» → «Работа с геометрической моделью».

18. Задать параметры задачи (задание свойств материалов и граничных условий).

В окне задачи (рис. 3.18) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «NdFeBr+».

Открыть окно «Свойства метки блока – NdFeBr+», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «NdFeBr+». В открывшемся окне «Свойства метки блока – NdFeBr+» (рис.

3.20), для магнитов из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr (марка магнитов N38):

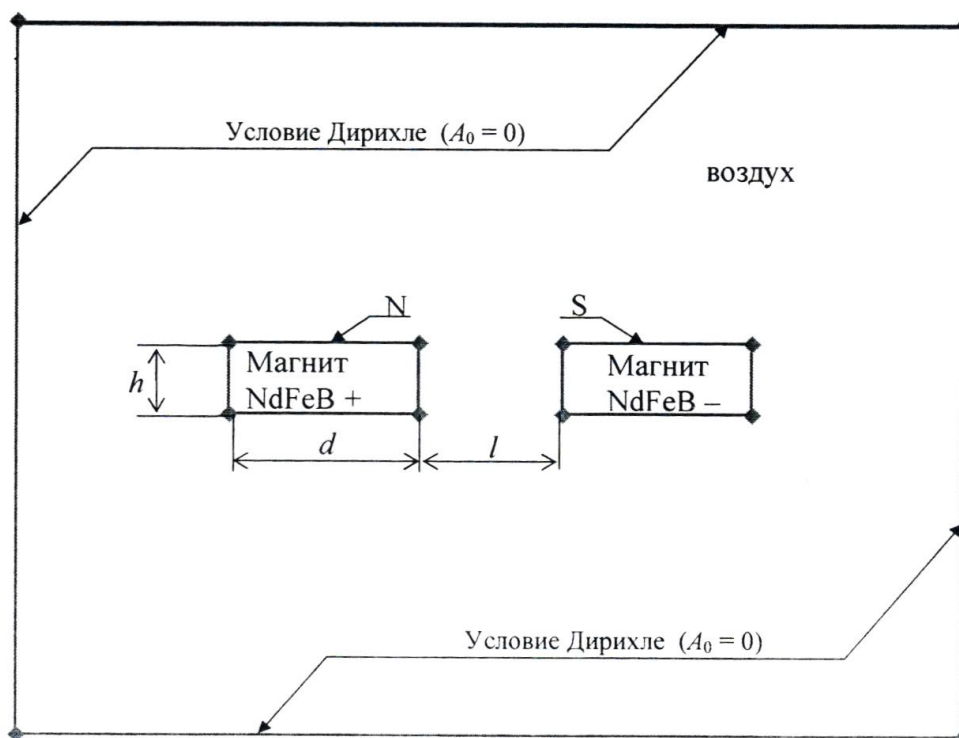


Рис. 3. 19. Геометрическая модель двух магнитов

- выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии) параметров «Нелинейный материал» и «Анизотропный материал»;
- в числовом поле « $\mu_x =$ » ввести значение относительной магнитной проницаемости μ_r (табл. 3.6);
- в числовом поле «Величина:» ввести значение коэрцитивной силы по индукции H_{CB} (табл. 3.6);
- в числовом поле «Направление:» ввести значение направления (в градусах) вектора коэрцитивной силы «90».

В окне задачи (рис. 3.18) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «NdFeBr».

Открыть окно «Свойства метки блока – «NdFeBr»», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «NdFeBr». В открывшемся окне «Свойства метки блока – «NdFeBr»» (рис. 3.20), для магнитов из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr (марка магнитов N38), ввести:

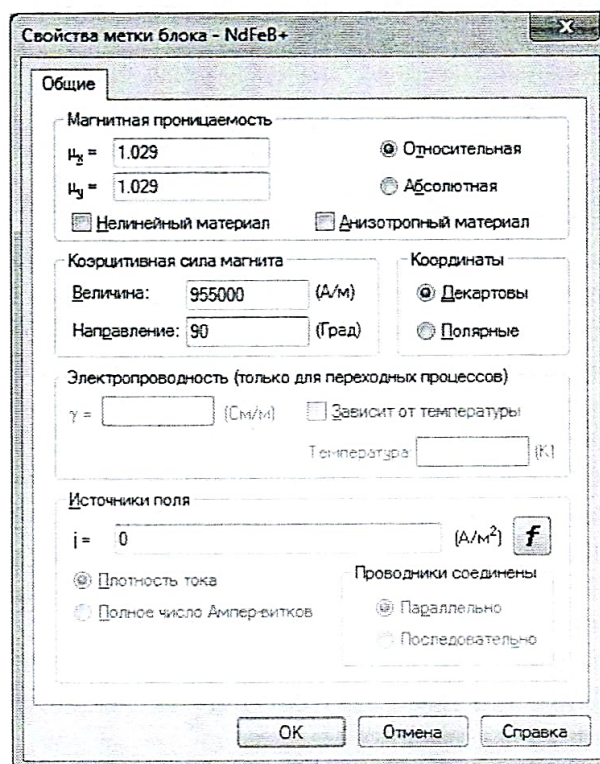


Рис. 3.20. Окно «Свойства метки блока»

- выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии) параметров «Нелинейный материал» и «Анизотропный материал»;
- в числовом поле « $\mu_x =$ » ввести значение относительной магнитной проницаемости μ , (табл. 3.6);
- в числовом поле «Величина:» ввести значение коэрцитивной силы по индукции H_{CB} (табл. 3.6);
- в числовом поле «Направление:» ввести значение направления (в градусах) вектора коэрцитивной силы «– 90».

В окне задачи (рис. 3.18) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором, выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «воздух».

Открыть окно «Свойства метки блока – воздух», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «воздух». В открывшемся окне «Свойства метки блока – воздух» (рис. 3.20) ввести:

- выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии) параметров «Нелинейный материал» и «Анизотропный материал»;
- в числовом поле « $\mu_x =$ » ввести значение относительной магнитной проницаемости $\mu = 1$.

В геометрической модели выбрать блок «Магнит NdFeBr+» (рис. 3.19). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 3.21), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «NdFeBr+».

В геометрической модели выбрать блок «Магнит NdFeBr-» (рис. 3.19). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 3.21), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «NdFeBr-».

В геометрической модели выбрать блок «воздух» (рис. 3.19). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 3.21), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «воздух».

В окне задачи (рис. 3.18) выбрать пункт «Метки ребер». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке ребра «A0».

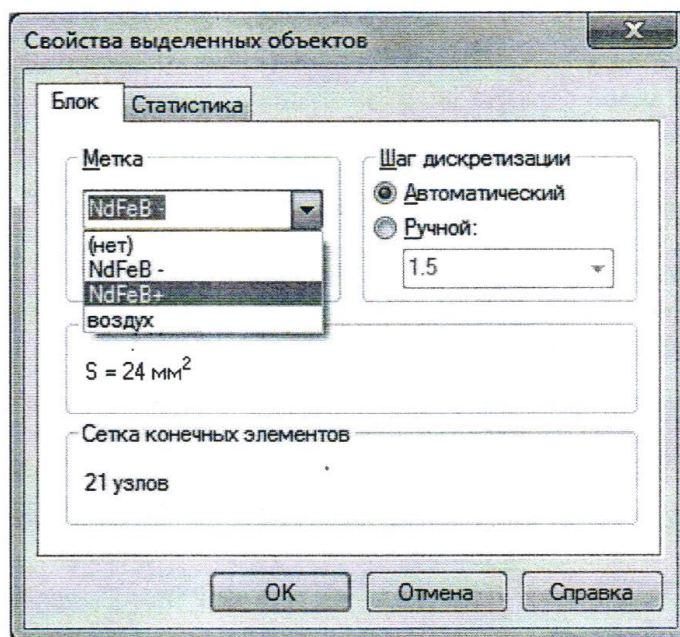


Рис. 3.21. Окно «Свойства выделенных объектов»

Открыть окно «Свойства метки ребра – A0», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра «A0». В открывшемся окне «Свойства метки ребра – A0» (рис. 3.22) включить флажок «Магнитный потенциал: $A = A_0$ » и в числовом поле « $A_0 =$ » ввести значение $A_0 = 0$.

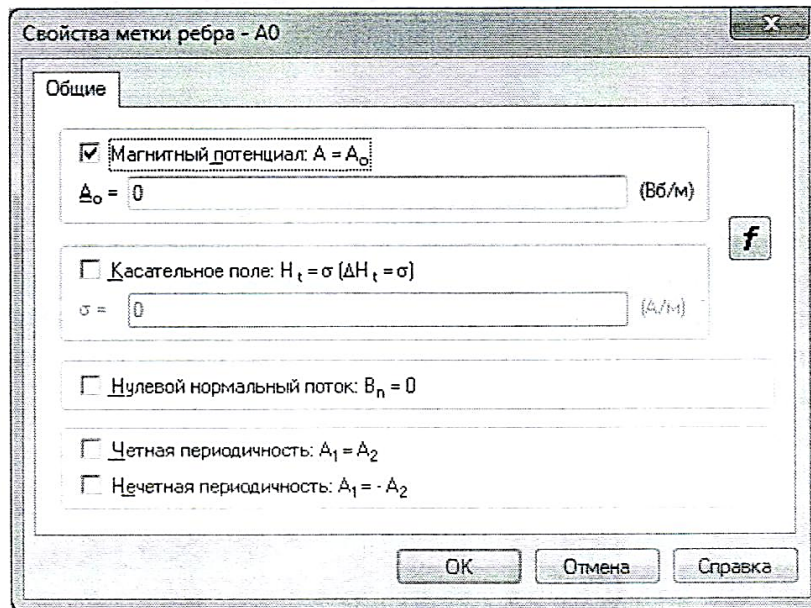


Рис. 3.22. Окно «Свойства метки ребра»

Задать граничные условия, для чего последовательно выделить и выбрать четыре граничных ребра блока «воздух», как показано на рис. 3.19. Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов», в выпадающем меню «Метка», выбрать метку «A0».

Остальным ребрам (внутри блока «воздух»), по умолчанию, присваивается однородное условие Неймана.

19. Решить задачу магнитостатического поля.

На панели инструментов окна «Геометрическая модель» нажать кнопку «Построение сетки» (рис. 3.23).



Рис. 3.23. Панель инструментов окна «Геометрическая модель»

После построения сетки конечных элементов, в блоках «воздух», «Магнит NdFeBr+» и «Магнит NdFeBr-» геометрической модели, нажать кнопку «Решить» на панели инструментов окна задач (рис. 3.24) и

подтвердить сохранение файлов решения.

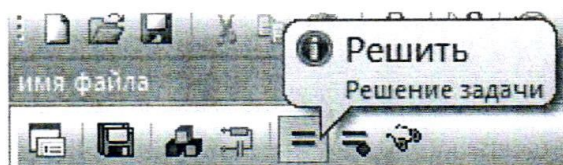


Рис. 3.24. Панель инструментов окна задач

20. Провести анализ результатов решения.

В открывшемся дополнительном окне «Результат расчета», которое представлено геометрией модели с магнитными силовыми изолиниями, задать контур интегрирования на определенном расстоянии от магнитов (по указанию преподавателя), как показано на рис. 3.25, нажав кнопку «Добавить к контуру» на панели инструментов окна «Результат расчета» (рис. 3.26).

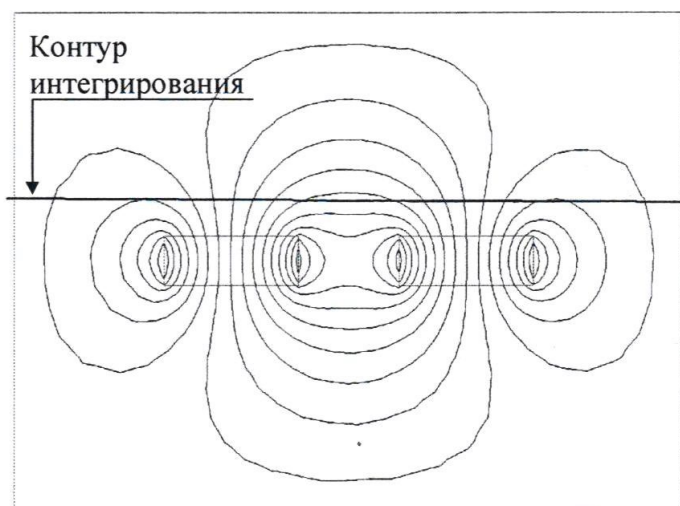


Рис. 3.25. Окно «Результат расчета» (картина магнитного поля)

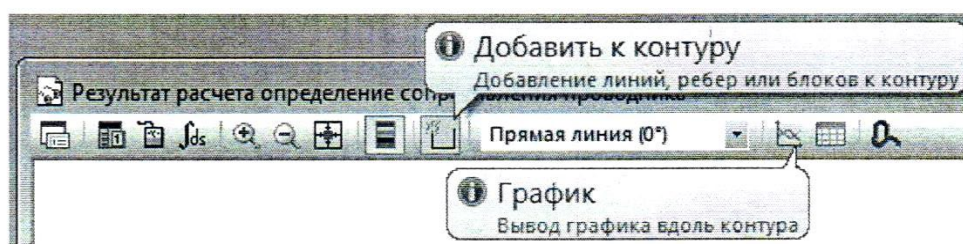


Рис. 3.26. Панель инструментов окна «Результат расчета»

Создание и манипулирование контурами приведено в руководстве пользователя «*Elcut*» (Глава 8. Редактирование контуров) и в справке программы «*Elcut*» → «Работа с контуром».

Открыть окно «График Результат расчета» нажав кнопку «График» в заголовке окна «Результат расчета» (рис. 3.26). Включить на графике отображение проекции вектора магнитной индукции на ось «у», для чего в окне «Обозначение кривых расчета» (в правой части окна «График Результат расчета») установить флажок соответствующий параметру « B_y » (рис. 3.27).



Рис. 3.27. Окно «Обозначение кривых расчета»

По полученному графику распределения индукции вдоль контура интегрирования (рис. 3.28) определить значение индукции $B_{расч}$ в различных точках поля.

21. Повторить работы по п. 14 – 20 для системы ферритовых магнитов (марка магнитов Y30). Сравнить графики зависимости магнитной индукции B от расстояния d до поверхности магнитов, полученные по результатам численного расчета магнитостатического поля (рис. 3.28) с экспериментальными графиками по п. 5. Сделать вывод.

Определение значения магнитной индукции в воздушном зазоре тороидального сердечника по результатам численного расчета магнитостатического поля

22. Провести измерения размеров тороидальных сердечников с магнитами из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr, и воздушными

зазорами 3 мм и 5 мм, полученные размеры занести в табл. 3.8.

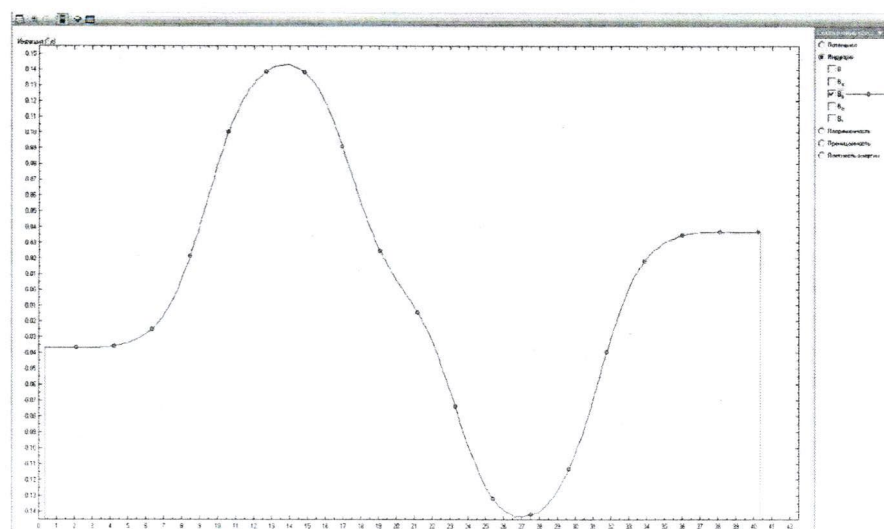


Рис. 3.28. Окно «График Результат расчета» (распределение магнитной индукции)

Таблица 3.8

Тороидальный сердечник с магнитами NdFeBr и воздушным зазором 3 мм			Тороидальный сердечник с магнитами NdFeBr и воздушным зазором 5 мм		
Внутренний диаметр тороидального сердечника $d1$, мм	Внешний диаметр тороидального сердечника $d2$, мм	Высота магнита, h , мм	Внутренний диаметр тороидального сердечника $d1$, мм	Внешний диаметр тороидального сердечника $d2$, мм	Высота магнита, h , мм

23. Запустить программу «Elcut».

24. Создать задачу расчета магнитостатического поля.

В строке меню выбрать пункты «Файл → «Создать задачу ...». В открывшемся окне «Создание задачи» ввести имя файла задачи и указать путь сохранения задачи. Нажать кнопку «Далее».

В следующем окне «Создание задачи» (рис. 3.29) выбрать тип задачи - магнитостатическое поле, единицы длины – миллиметры, класс модели – плоская, задать в числовом поле « $Lz \Rightarrow$ » длину геометрической модели магнита в направлении оси z (за плоскость экрана) $Lz = 10$ мм.

25. Построить геометрическую модель задачи.

Двойным щелчком левой кнопки мыши выбрать в окне задачи, находящейся в левой части главного окна «*Elcut*», пункт «геометрия: имя файла.mod» (рис. 3.30).

В открывшемся окне «Геометрическая модель» нарисовать тороидальный сердечник с магнитами NdFeBr и воздушным зазором 3 мм, с размерами указанными в табл. 3.8, как показано на рис. 3.31. Создание и манипулирование геометрическими объектами приведено в руководства пользователя «*Elcut*» (Глава 4. Описание геометрии задачи) и в справке программы «*Elcut*» → «Работа с геометрической моделью».

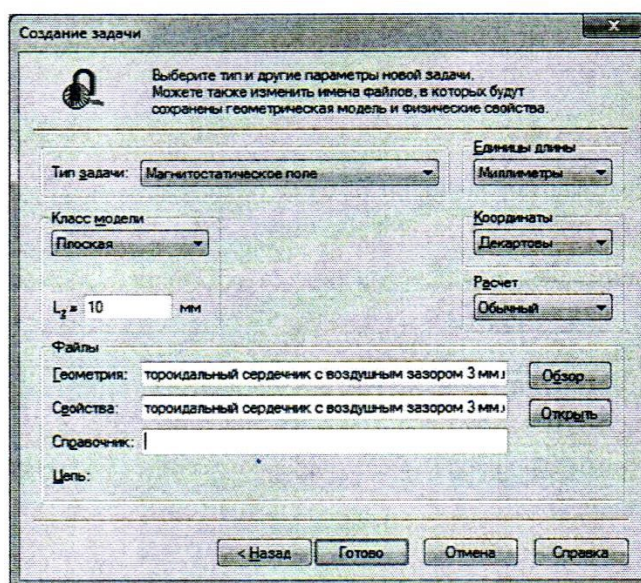


Рис. 3.29. Окно «Создание задачи»

26. Задать параметры задачи (задание свойств материалов и граничных условий).

В окне задачи (рис. 3.30) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «NdFeBr0».

Открыть окно «Свойства метки блока – NdFeBr0», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «NdFeBr0». В открывшемся окне «Свойства метки блока - NdFeBr0» (рис. 3.32), для магниов из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr (марка магнитов N38):

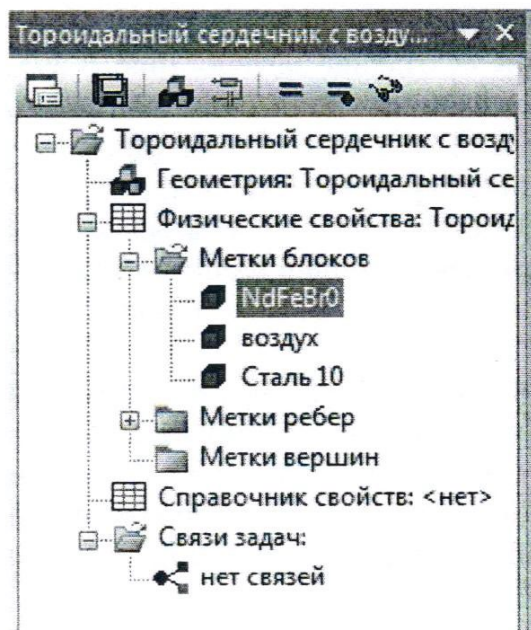


Рис. 3.30. Окно задачи

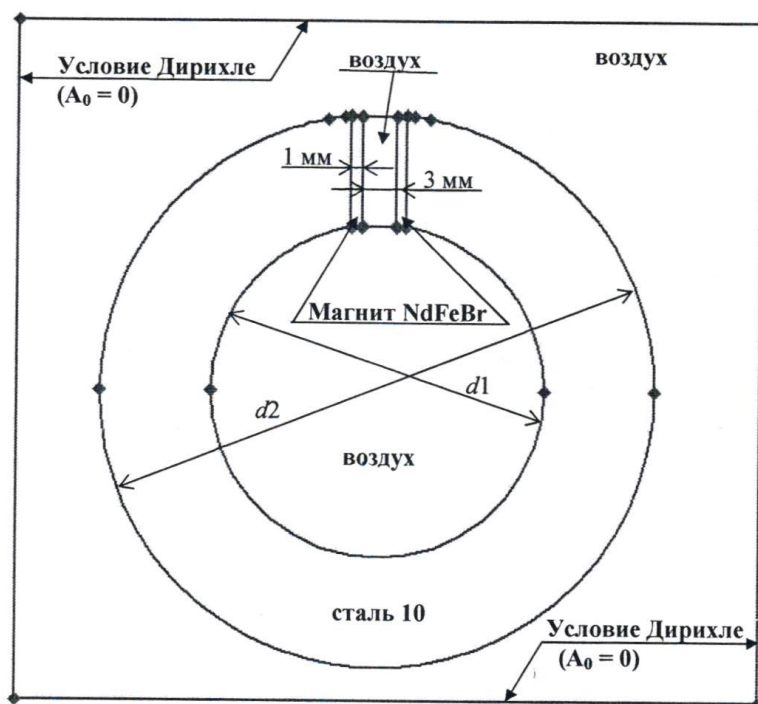


Рис. 3.31. Геометрическая модель тороидального сердечника с двумя магнитами и воздушным зазором 3 мм

– выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии)

параметров «Нелинейный материал» и «Анизотропный материал»;

– в числовом поле « $\mu_x =$ » ввести значение относительной магнитной проницаемости μ , (табл. 3.6);

– в числовом поле «Величина:» ввести значение коэрцитивной силы по индукции H_{CB} (табл. 3.6);

– в числовом поле «Направление:» ввести значение направления (в градусах) вектора коэрцитивной силы «0».

В окне задачи (рис. 3.30) выбрать пункт «Метки блоков». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке блока «воздух».

Открыть окно «Свойства метки блока – воздух», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «воздух». В открывшемся окне «Свойства метки блока – воздух» (рис. 3.32) ввести:

– выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии) параметров «Нелинейный материал» и «Анизотропный материал»;

– в числовом поле « $\mu_x =$ » ввести значение относительной магнитной проницаемости $\mu = 1$.

Открыть окно «Свойства метки блока – сталь 10», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку блока «сталь 10». В открывшемся окне «Свойства метки блока – сталь 10» (рис. 3.32):

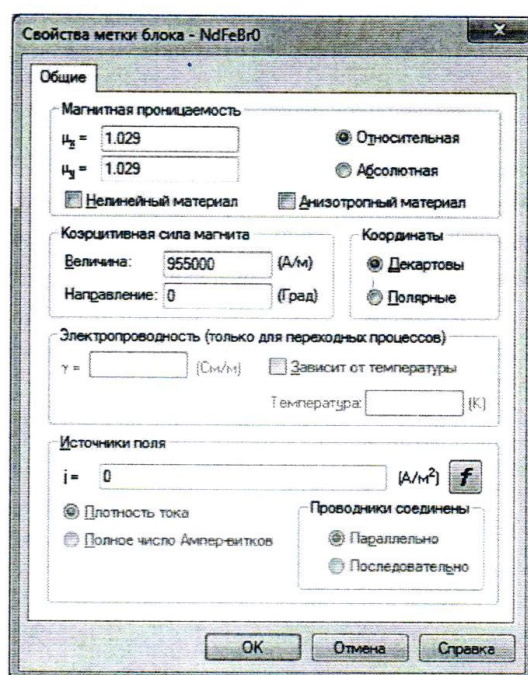


Рис. 3.32. Окно «Свойства метки блока»

– выбрать линейный материал, для чего убрать флажки (при наличии) параметров «Нелинейный материал» и «Анизотропный материал»;

– в числовом поле « $\mu_r =$ » ввести значение относительной магнитной проницаемости стали $\mu_r = 461,476$.

В геометрической модели последовательно выделить и выбрать блоки «Магнит NdFeBr» (рис. 3.31). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 3.33), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «NdFeBr0».

В геометрической модели последовательно выделить и выбрать блоки «воздух» (рис. 3.31). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 3.33), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «воздух».

В геометрической модели выбрать блок «сталь 10» (рис. 3.31). Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов» (рис. 3.33), в выпадающем меню «Метка», присвоить блоку метку «сталь 10».

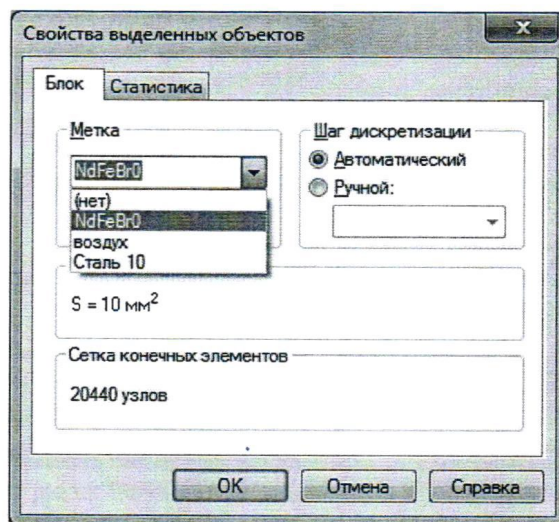


Рис. 3.33. Окно «Свойства выделенных объектов»

В окне задачи (рис. 3.30) выбрать пункт «Метки ребер». Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Создать метку» и присвоить название метке ребра «A0».

Открыть окно «Свойства метки ребра – A0», выбрав двойным щелчком левой кнопки мыши ранее созданную в окне задач метку ребра «A0». В

открывшемся окне «Свойства метки ребра – A_0 » (рис. 3.34) включить флажок «Магнитный потенциал: $A = A_0$ » и в числовом поле « $A_0 =$ » ввести значение $A_0 = 0$.

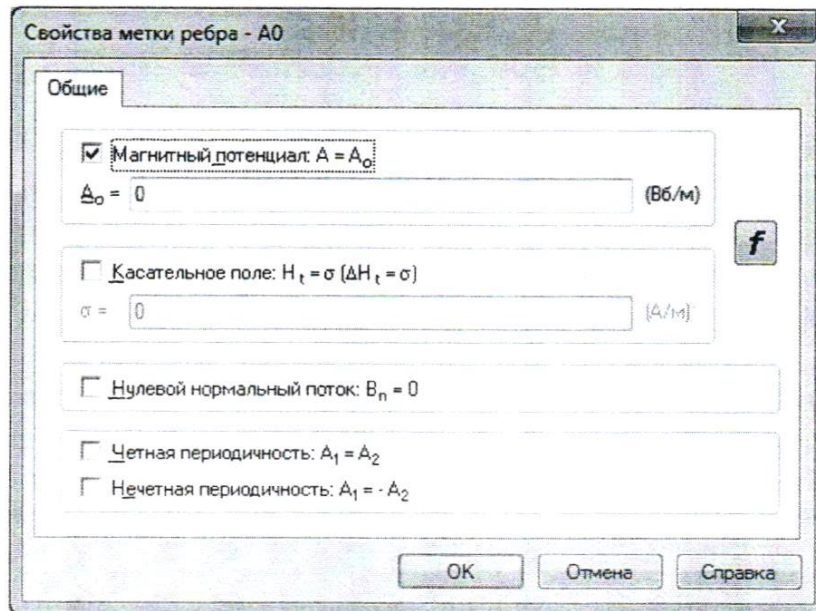


Рис. 3.34. Окно «Свойства метки ребра»

Задать граничные условия, для чего последовательно выделить и выбрать четыре граничных ребра блока «воздух», как показано на рис. 3.31. Открыть контекстное меню (правой кнопкой мыши), в котором выбрать пункт «Свойства». В открывшемся окне «Свойства выделенных объектов», в выпадающем меню «Метка», выбрать метку « A_0 ».

На остальных ребрах, по умолчанию, устанавливается однородное условие Неймана.

27. Решить задачу магнитостатического поля

На панели инструментов окна «Геометрическая модель» нажать кнопку «Построение сетки» (рис. 3.35).

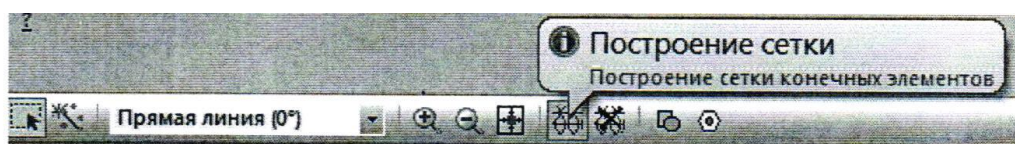


Рис. 3.35. Панель инструментов окна «Геометрическая модель»

После построения сетки конечных элементов в блоках «воздух», «Магнит NdFeBr» и «сталь 10» геометрической модели, нажать кнопку «Решить» на панели инструментов окна задач (рис. 3.36) и подтвердить сохранение файлов решения.

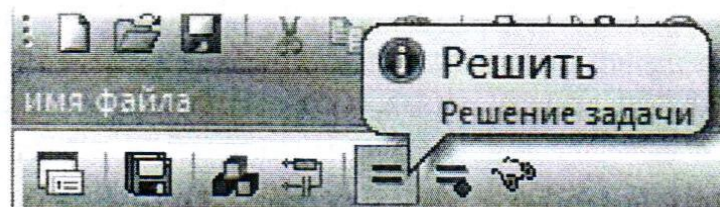


Рис. 3.36. Панель инструментов окна задач

28. Провести анализ результатов решения.

В открывшемся дополнительном окне «Результат расчета», которое представлено геометрией модели с магнитными силовыми изолиниями, задать контур интегрирования, проходящий по центру тороидального сердечника, как показано на рис. 3.37, нажав кнопку «Добавить к контуру» в заголовке окна «Результат расчета» (рис. 3.38).

Создание и манипулирование контурами приведено в руководства пользователя «*Elcut*» (Глава 8. Редактирование контуров) и в справке программы «*Elcut*» → «Работа с контуром».

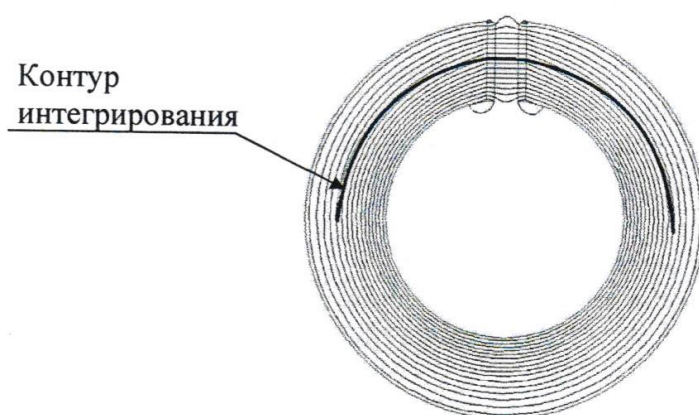


Рис. 3.37. Окно «Результат расчета» (картина магнитного поля)

Открыть окно «График Результат расчета» нажав кнопку «График» в заголовке окна «Результат расчета» (рис. 3.26).



Рис. 3.38. Заголовок окна «Результат расчета»

По полученному графику распределения индукции вдоль контура интегрирования (рис. 3.39) определить значение индукции $B_{расч}$ в центре воздушного зазора тороидального сердечника.

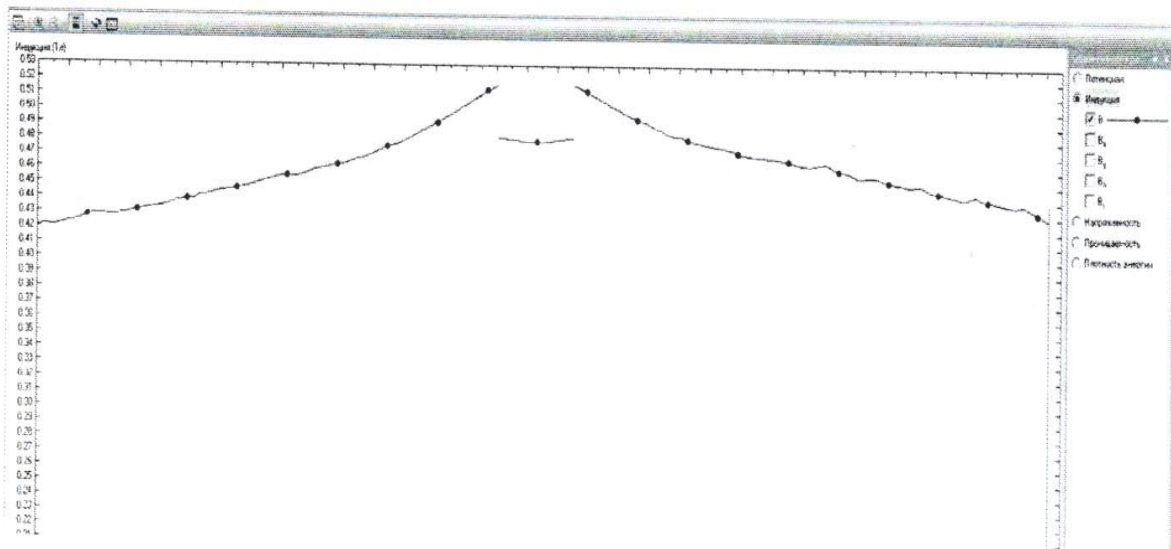


Рис. 3.39. Окно «График Результат расчета» (распределение магнитной индукции)

29. Повторить работы по п. 22 – 28 для тороидального сердечника с магнитами из сплава редкоземельных металлов типа NdFeBr (марка магнитов N38) и воздушным зазором 5 мм.

Повторить работы по п. 22 – 28 для тороидальных сердечников с ферритовыми магнитами (марка магнитов Y30).

30. Сравнить значения магнитной индукции в центре воздушных зазоров тороидальных сердечников, полученные по результатам численного расчета магнитостатического поля $B_{расч}$, со значениями магнитной индукции B_{δ} (табл. 3.6), полученными экспериментально. Сделать вывод.

Сделать обобщающий вывод по лабораторной работе.

Более подробное описание работы с программой «Elcut» приведено в

руководстве пользователя «*Elcut*».

Контрольные вопросы

1. Какая часть петли гистерезиса магнитотвердых материалов называется прямой возврата, каков её физический смысл?
2. Какова величина магнитной индукции на поверхности замкнутого ферромагнитного сердечника?
3. Опишите методику измерения индукции магнитного поля в данной лабораторной работе.
4. Приведите качественно картину магнитного поля, создаваемого прямоугольным магнитом.
5. Приведите определение однородного магнитного поля.
6. Укажите тип задачи математической физики, решаемой в лабораторной работе.
7. Приведите определение магнитного потенциала.
8. Перечислите граничные условия, применяемые при решении задачи математической физики.
9. Какие параметры материалов задаются при решении задачи магнитоэстатического поля?
10. Приведите картину магнитного поля системы из двух магнитов.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

П1. Редактор чисел

Редактор чисел вызывается при помощи нажатия на поле, подлежащее редактированию. При нажатии открывается редактор ввода чисел (см. рис. П.1).

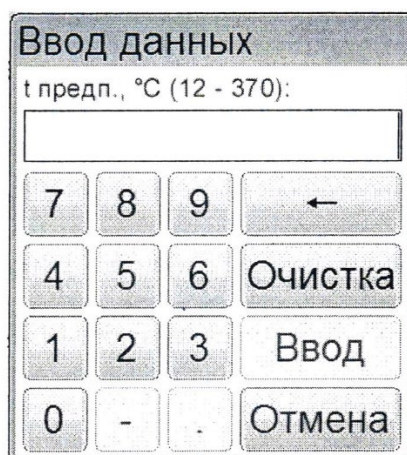


Рис. П.1. Редактор чисел

Клавиатура имеет набор цифровых и специальных кнопок:

Кнопка	Действие
«·»	Ввод десятичной точки (активна по необходимости)
«-»	Изменение знака числа (активна по необходимости)
«Очистка»	Удаление всего числа
«←»	Удаление последней введенной цифры
«Отмена»	Закрытие окна редактора без сохранения значения
«Ввод»	Закрытие окна редактора с сохранением значения

При выходе с сохранением значения введенное значение заменяет значение редактируемого параметра.

Если введенное значение выходит за границы допустимого диапазона, происходит закрытие окна редактора без сохранения введенного значения.

П2. Редактор текста

Редактор текста вызывается при помощи нажатия кнопок «Добавить» или «Изменить», расположенных в окне редактора справочника.

При нажатии кнопки открывается редактор текста и в поле ввода отображается значение текущего параметра либо пустое поле при добавлении новой записи (см. рис. П2).

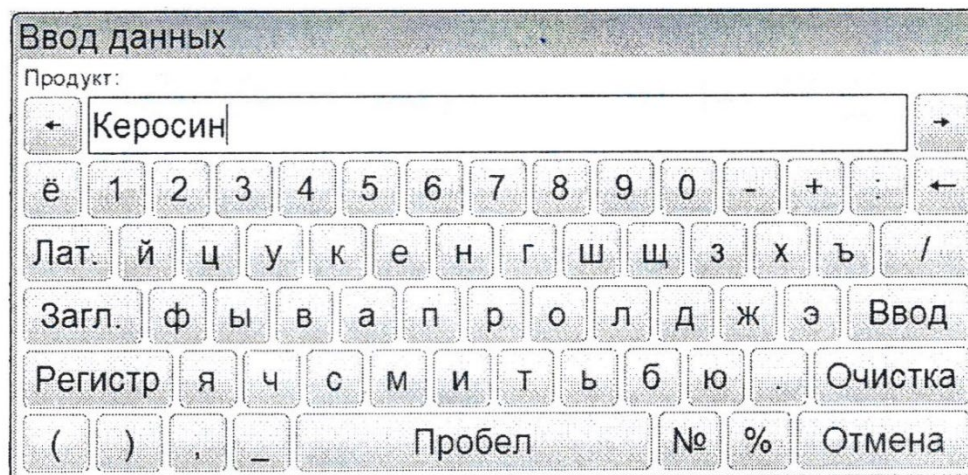


Рис. П2. Редактор текста

Клавиатура имеет следующий набор специальных кнопок:

Кнопка	Действие
«←»	Удаление символа слева от курсора
«Очистка»	Очистка всей строки
«←», «→»	Перемещение курсора влево/вправо
«Загл.», «Регистр»	Переключение клавиатуры в режиме заглавных/строчных букв
«Лат.», «Рус.»	Переключение клавиатуры в режиме латинских/русских букв
«Отмена»	Закрытие окна редактора без сохранения значения
«Ввод»	Закрытие окна редактора с сохранением значения

При выходе с сохранением значения результат заменяет запись редактируемого списка или добавляет новую.

П3. Список методов испытаний

Список методов испытаний вызывается при нажатии на строку вывода метода испытания. При этом открывается окно, приведенное на рис. П3.

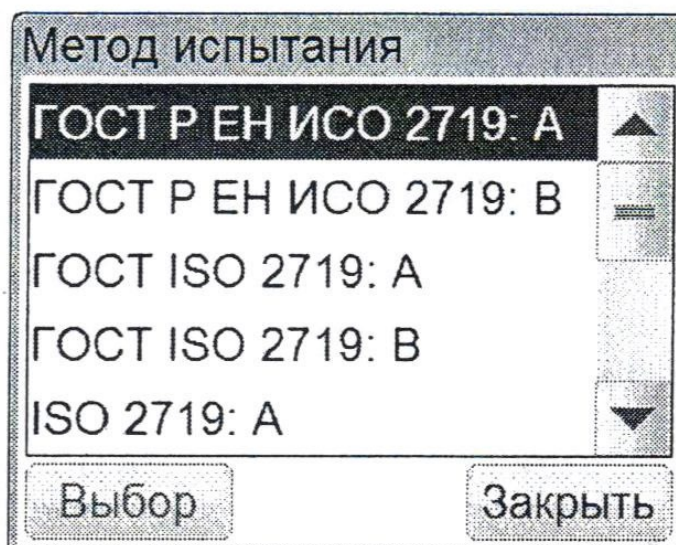


Рис. П3. Методы испытания

Окно имеет следующий набор кнопок:

Кнопка	Действие
«Выбрать»	Выбрать метод испытания
«Закреть»	Закрытие окна списка без выбора метода испытания

Выбранная запись из списка выделяется синим цветом.

П4. Список продуктов

Список продуктов вызывается при нажатии на строку вывода наименования продукта. При этом открывается окно, приведенное на рис. П4.

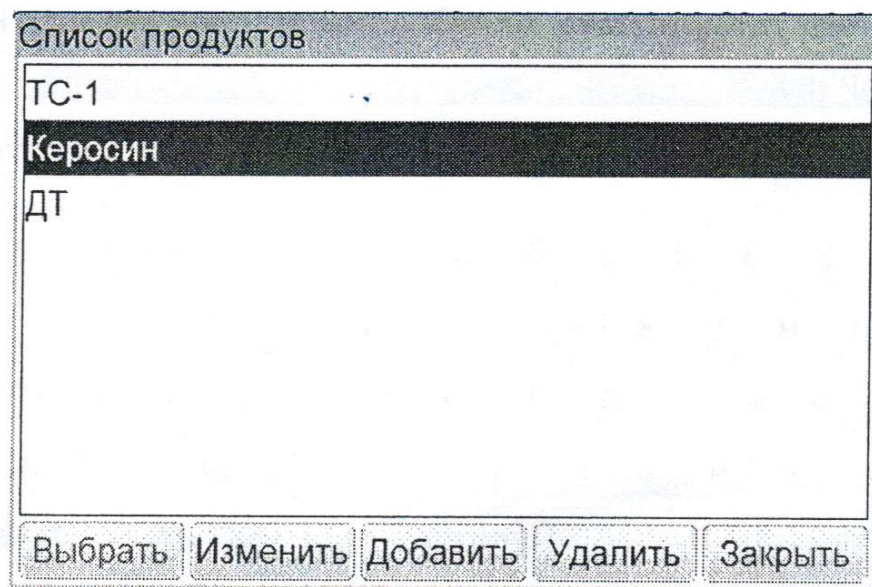


Рис. П4. Список продуктов

Окно имеет следующий набор кнопок:

Кнопка	Действие
«Выбрать»	Выбрать название продукта
«Изменить»	Переименовать название продукта
«Добавить»	Добавить новый продукт в справочник
«Удалить»	Удалить выбранный продукт из справочника
«Заккрыть»	Закрытие окна списка без выбора названия продукта

Выбранная запись из списка выделяется синим цветом.

П5. Список пользователей

Список пользователей вызывается при нажатии на строку вывода наименования продукта. При этом открывается окно, приведенное на рис. П5.

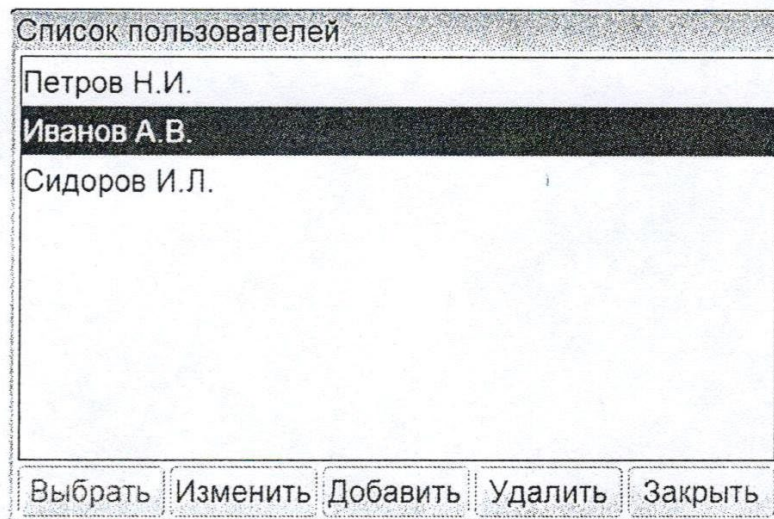


Рис. П5. Список пользователей

Окно имеет следующий набор кнопок:

Кнопка	Действие
« Выбрать »	Выбрать пользователя
« Изменить »	Переименовать пользователя
« Добавить »	Добавить нового пользователя в справочник
« Удалить »	Удалить выбранного пользователя из справочника
« Заккрыть »	Заккрытие окна списка без выбора пользователя

Выбранная запись из списка выделяется синим цветом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухарников А.Е. Электротехническое материаловедение: учеб. пособие / А.Е. Сухарников. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – 195 с.
2. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2008. – 535 с.
3. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / под ред. В.С.Чередниченко. – 5-е изд., стер. – М.: Омега – Л, 2009. – 752 с.
4. Материалы и элементы электронной техники: учебник в 2 т. Т. 1: Проводники, полупроводники, диэлектрики / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – М.: Академия, 2006. – 448с.
5. Материалы и элементы электронной техники: учебник в 2 т. Т 2: Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – М.: Академия, 2006. – 384 с.
6. Антипов, Б.Л. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы: Б.Л. Антипов, В.С. Сорокин, В.А. Терехов; Под ред. В.А. Терехова. – 3-е изд.,стер. – Спб.: Изд-во «Лань», 2003. – 208 с.
7. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы: учебник для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
8. Мишин, Д.Д. Магнитные материалы: учебное пособие для вузов / Д.Д. Мишин. – М.:Высшая школа, 1991. – 384 с.
9. Сироткин, О.С. Проводниковые и полупроводниковые материалы: учебное пособие / О.С. Сироткин, Т.Б. Татаринцева, В.И. Уваров. – Казань: КГЭУ, 2008. – 154 с.
10. Сироткин, О.С. Электротехничесие материалы. Диэлектрики: учебное пособие / О.С. Сироткин, И.А. Женжурист. – Казань: КГЭУ, 2008. – 116 с.
11. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы: учеб. пособие / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин и др.; под ред. В.А. Филикова. – 3-е изд., испр. – .М.: Академия, 2007. – 280 с.
12. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
13. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – 9-е

изд., стер. – М.: Изд – во МЭИ, 2001. – 440 с.

14. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. В.Г. Герасимова и др. – М.: Изд – во МЭИ, 2003. – 518 с.

15. Сироткин, О.С. Материаловедение. Электротехнические материалы: Лабор. практикум / О.С. Сироткин, А.Е. Сухарников, П.Б. Шибяев и др. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 156 с.

16. Дудкин, А.Н. Электротехническое материаловедение / А.Н. Дудкин, В.С. Ким. – СПб.: Лань, 2016. – 200 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/75509/>.

17. Сорокин, В.С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – СПб.: Лань, 2016. – 384с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71735/>.

18. Сироткин, О.С. Основы материаловедения: учебное пособие / О.С. Сироткин. – Москва: КноРус, 2015. – 261 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.book.ru/book/918995/>.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ.....	4
Порядок выполнения лабораторных работ.....	4
Методические указания к выполнению лабораторных работ.....	5
Предварительная подготовка к проведению лабораторных работ.....	6
1. Проводники, полупроводники	8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Измерение удельного сопротивления проводников. Определение значения сопротивления проводников по результатам численного расчета электрического поля постоянных токов	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Изучение температурной зависимости сопротивления проводников и резисторов	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Контактные явления в проводниках и термоэлектродвижущая сила	36
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Изучение температурной зависимости сопротивления полупроводников	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. Фотопроводимость.....	43
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. Контактные явления в полупроводниках и барьерный фотоэффект	50
2. Диэлектрики	60
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. Измерение диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь твёрдых диэлектриков....	74
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. Измерение зависимости угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости диэлектрика от температуры	85
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. Измерение диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь активных диэлектриков ..	88
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. Изучение прямого и обратного пьезоэффекта	92
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. Электрический пробой в диэлектриках. Определение электрической прочности воздуха, бумаги. Численный расчет электростатического поля, определение значения напряженности и максимальной плотности энергии поля	99
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12. Определение общезначимых характеристик электроизоляционных материалов.....	116

3. Магнитные материалы	135
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13. Основная кривая намагничивания ферромагнетика	145
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14. Изучение свойств ферромагнетика при помощи петли гистерезиса	150
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15. Определение точки Кюри	157
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16. Изучение магнитотвердых материалов. Численный расчет магнитостатического поля, определение значения магнитной индукции.....	164
ПРИЛОЖЕНИЯ. ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ.....	188
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	191
СОДЕРЖАНИЕ.....	195

Учебное издание

Бунтин Артем Евгеньевич,

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Практикум

Кафедра материаловедения и технологии материалов КГЭУ

Редактор издательского отдела М.С. Беркутова, компьютерная верстка:

Подписано в печать

Формат 60 ×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел КГЭУ, 420066,
Казань, Красносельская, 51