

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Общие методические указания	6
Указания по технике безопасности	8
Лабораторный стенд «Электричество и магнетизм»	9
Модуль «Наборное поле».....	9
Модуль питания.....	10
Модуль измерительный.....	11
Модуль «Мультиметр».....	12
Модуль «Электростатика».....	15
Модуль «Функциональный генератор».....	16
Модуль «Магнитостатика».....	19
Модуль «Входы аналоговые».....	20
Набор Миниблоков.....	21
Работа № 1. Исследование электростатического поля	23
Работа № 2. Измерение сопротивления проводника и определение его удельного сопротивления	29
Работа № 3. Определение температурного коэффициента сопротивления металла и энергии активации полупроводника	35
Работа № 4. Наблюдение сигналов и определение их параметров с помощью осциллографа	43
Работа № 5. Определение ёмкости конденсаторов	50
Работа № 6. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона ..	59
Работа № 7. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли	65
Работа № 8. Изучение эффекта Холла в полупроводниках	70
Библиографический список	75

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оно обращено, прежде всего, к тем студентам, которые действительно пришли к нам учиться, чтобы стать профессионалами в выбранной специальности, людьми образованными и успешными. Лабораторный практикум – это неотъемлемая и очень важная часть курса физики. Если осваивать теорию и решать задачи можно и дома, то для выполнения измерений необходимо прийти в лабораторию в отведённые для этого часы занятий. Пропуск таких занятий всегда влечёт за собой неприятные последствия – задолженности, отработки, финансовые потери и др.

Так какова же цель лабораторного практикума в высшем учебном заведении? Таких целей несколько. Лабораторные работы позволяют:

- * проиллюстрировать *теоретические* положения физики;
- * познакомиться с *приборами*;
- * приобрести опыт в проведении *экспериментов*.

Каждая из этих целей важна и сама по себе, но в целом лабораторный практикум может дать нечто большее. Он может дать представление о том, каков *общий метод физики*.

Физика – эта одна из наук, цель которых – познание природы. Когда физик сталкивается с каким-либо явлением природы, он старается выделить те особенности явления, которые ему кажутся самыми важными. Затем, обобщая то, что выделил, строит теорию, из которой следуют те или иные выводы. Выводы же проверяются путем эксперимента. Но теоретические выводы относятся к идеализированной или упрощенной ситуации. Чтобы их проверить, нужно создать такую упрощённую ситуацию в сложном реальном мире, что не всегда легко сделать.

На лекциях вам преподносят теорию. При этом рассматриваются те стороны реального мира, которые существующая теория считает самыми важными. Может получиться так, что ваше познание природы ограничится только этими сторонами и Вы будете уверены, что это и есть весь реальный мир, а не отдельные его стороны. К тому же в такой картине мира всё столь хорошо увязано, что легко утратить представление о том, какие усилия потребовались человеческому гению для её создания. Самое лучшее лекарство от такой болезни – прийти в лабораторию и там убедиться в сложности реального мира.

Занимаясь экспериментами, Вы узнаете, как трудно бывает проверить теорию, измерить именно то, что хотите, а не что-то иное, и научитесь преодолевать такие трудности. Но кроме всего прочего, у Вас появится взгляд на физику в целом, на взаимоотношение между теорией и экспериментом, которое составляет главное содержание предмета.

ВВЕДЕНИЕ

Данный практикум содержит описание лабораторных работ по электричеству и магнетизму, выполняемых в Златоустовском филиале ЮУрГУ студентами инженерных специальностей во втором семестре изучения курса физики. На выполнение каждой работы отводится два академических часа. К лабораторным заняти-

ям необходимо готовиться заранее, пользуясь не только описанием лабораторной работы в данном учебном пособии, но и материалом лекций, рекомендованной литературой. При подготовке особое внимание должно быть обращено на ясное понимание физических закономерностей, на которых основано определение искомых величин, работа приборов и т.п. Не меньшую важность представляет и усвоение основных определений, характеристик приборов, единиц измерения, методики проведения измерений и обработки их результатов.

Настоящее пособие содержит описание 8 лабораторных работ, выполняемых на новых лабораторных стендах, разработанных и изготовленных сотрудниками кафедры ЭАПП по техническому заданию кафедры физики Златоустовского филиала ЮУрГУ. Каждый стенд состоит из набора различных модулей и персонального компьютера, включенного в компьютерную сеть университета. Для выполнения лабораторной работы, к стенду прилагается набор миниблоков и иногда отдельные устройства.

С установкой нового оборудования появилась возможность проводить лабораторные работы фронтальным методом, преимущества которого очевидны: все студенты выполняют на каждом занятии одинаковые лабораторные работы после изучения темы на теоретических занятиях. Это способствует более глубокому пониманию сути физических явлений, законов, определений, даёт возможность научить студентов работе с современной измерительной техникой, облегчает труд сотрудников лаборатории и оперативный контроль за действиями каждого студента при сборке схемы, проведении и записи измерений. Наличие ПК на каждом рабочем месте позволяет быстро и объективно оценить степень готовности студента к выполнению конкретной лабораторной работы путём тестирования, дать в компьютерной сети электронные учебники, пособия, необходимые справочные материалы, выйти в Интернет для поиска дополнительной информации.

Последовательность выполнения лабораторных работ согласована в хронологическом порядке с лекционным материалом: электростатика, постоянный ток, электрические свойства материалов и элементов электрических схем, магнитное поле в вакууме и в веществе, движение зарядов в электрических и магнитных полях.

В описании каждой работы приведён достаточный теоретический материал, содержащий описание физического явления и выводы основных соотношений, необходимых для подготовки и проведения эксперимента. Подробно описана последовательность действий не только при измерениях, но и при обработке результатов измерений.

Для облегчения подготовки к занятиям и самоконтроля в конце описания каждой работы приведены контрольные вопросы. Для получения допуска к выполнению измерений студент должен ответить на них преподавателю и пройти компьютерное тестирование. Ответы на поставленные вопросы можно найти в рекомендованной литературе, а также в данном пособии.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Выполнение работы

Достав все необходимое для выполнения работы, сумки, пакеты и т.п. необходимо положить в ячейки, предназначенные для этой цели. Размещение сумок у рабочего места, и, тем более, на рабочем столе не допускается.

К выполнению лабораторной работы необходимо подготовиться до начала занятия в лаборатории. Кроме описания работы в данном пособии, используйте рекомендованную литературу и конспект лекций.

После проверки подготовленности к выполнению лабораторной работы и компьютерного тестирования студент получает методические указания, оборудование, миниблоки и соединительные провода у лаборанта или преподавателя.

Сборку электрической цепи следует выполнять, руководствуясь правилами безопасной работы, принципиальными и монтажными схемами, приведёнными в работе.

Начинайте собирать схему с одного из контактов блока питания. Последовательно включайте, где необходимо, измерители тока. Сборку схемы заканчивайте подключением последнего провода ко второму контакту источника питания. После этого подключите, где требуется, измерители напряжения.

Собрав схему, необходимо пригласить преподавателя или лаборанта для её проверки и только после этого можно **с разрешения руководителя включить стенд.**

Приступая к выполнению работы, следует, прежде всего, ознакомиться с особенностями используемых приборов, правильно выбрать режимы работы. Для стрелочных приборов определить цену деления и абсолютную погрешность. Цена деления C каждого прибора равна максимальному значению измеряемой величины, делённому на число делений шкалы. Абсолютная погрешность стрелочных приборов определяется по указанному классу точности на шкале прибора. Например, вольтметр класса точности $n = 0,5$, рассчитанный на максимальное измеряемое напряжение $U_m = 30$ В, имеет абсолютную погрешность $\Delta U = 0,15$ В.

Обратите внимание на то, что относительная погрешность $\varepsilon = (\Delta X/X) \cdot 100\%$ тем больше, чем меньше измеряемая величина, поскольку абсолютная погрешность ΔX электроизмерительного прибора не зависит от значения X измеряемой величины. Так, при измерении указанным вольтметром напряжения 25 В, относительная погрешность $\varepsilon = (0,15/25) \cdot 100 \% = 0,6 \%$, а при измерении этим же вольтметром напряжения 5 В $\varepsilon = (0,15/5) \cdot 100 \% = 3 \%$. Поэтому следует пользоваться такими приборами или пределами измерений, чтобы значение измеряемой величины составляло 70...90 % от предела измерения, то есть чтобы при измерениях стрелка прибора отклонялась *дальше середины шкалы*.

У цифровых измерительных приборов погрешности для всех видов измерений и на всех пределах приводятся в технических паспортах. В наших измерениях за погрешность измерения принимается минимальное число младшего разряда.

По окончании измерений полученные результаты необходимо без промедления представить руководителю работ для проверки и утверждения, затем с его разрешения отключить питание и разобрать схему.

Перед уходом студент должен привести рабочее место в порядок, задвинуть стул и вернуть руководителю работ методические указания, миниблоки.

Обработка результатов измерений и оформление отчёта

Отчет по выполненной работе делается по форме, известной из первой части практикума по физике.

В нашем лабораторном практикуме принят упрощённый способ обработки результатов измерений, так как на следующих семестрах студентам читается материал по метрологии. Нахождение *среднего значения* и определение *абсолютной* и *относительной* погрешностей сводится к заполнению известной из первой части практикума табл. 1.

После обработки результатов измерений и оформления отчёта предусматривается защита проделанной работы (как правило, на следующем занятии, перед опросом подготовки к следующей лабораторной работе).

Таблица 1

№ п.п.	Результаты измерений X_i	Отклонение от среднего ΔX_i	
		–	+
1			
2			
...			
Среднее значение: $\langle X \rangle = \dots$		Сумма «+»	Сумма «–»
Средняя абсолютная погрешность: $\langle \Delta X \rangle = \dots$			
Результат измерений: $X = (\langle X \rangle \pm \langle \Delta X \rangle)$ (ед. измерения)			
Относительная погрешность: $\varepsilon = \frac{\langle \Delta X \rangle}{\langle X \rangle} 100\%$			

При обработке результатов измерений помните, что **точность расчётов должна соответствовать точности результатов измерений**. Например, если Вы измеряете углы с ценой деления компаса 2° , то в расчётах среднее значение этой величины не может быть посчитано с точностью $0,5^\circ$, т.е. средние значения углов должны быть целыми. Если Вы делите, например, число 53,8 на 0,046, то результат должен быть записан в виде $1,17 \cdot 10^3$ или $1,2 \cdot 10^3$.

При графическом оформлении работы используйте рекомендации по построению и обработке графиков, приведённые в первой части практикума.

Отчёт по лабораторной работе выполняется на двойном листе тетрадного формата с указанием на обложке названия лабораторной работы, Ф.И.О. и группы студента, Ф.И.О. проверяющего и содержит следующие разделы:

- 1) цель работы и оборудование;
- 2) схема установки принципиальная;

- 3) основные расчётные формулы с пояснениями обозначений величин;
- 4) результаты прямых измерений (в таблицах);
- 5) оценки точности измерений;
- 6) графики, построенные на миллиметровой бумаге;
- 7) вывод – это заключение о полученных результатах работ.

Вывод включает в себя:

- 1) основные численные результаты расчетов;
- 2) погрешность измерений, в случае относительной погрешности более 15% обязательны анализ и указание причин, приведших к снижению точности эксперимента;
- 3) анализ результатов:
 - сравнение опытных зависимостей (графиков) с теорией;
 - количественное (в процентах) сравнение экспериментальных результатов с табличными значениями, с обязательными ссылками на источники информации;
 - сопоставление отклонений с погрешностями измерений.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Питание стендов в лаборатории осуществляется от сети с напряжением 220 В, поэтому при нарушении изоляции на металлических корпусах приборов может возникнуть напряжение, опасное для жизни человека. В связи с этим студентам запрещается проводить любые несанкционированные работы.

Включение и отключение питающего напряжения в собранной схеме, осуществляется вводным автоматом на стенде в блоке питания (см. описание модуля питания).

При выполнении лабораторных работ студентам **запрещается:**

- 1) приступать к выполнению работы, не имея допуска на выполнение данной лабораторной работы;
 - 2) выполнять действия, не связанные напрямую с лабораторной работой;
 - 3) самостоятельно подключать силовое питание лабораторных стендов;
 - 4) подавать питание на собранную схему без проверки правильности соединений преподавателем или лаборантом;
 - 5) использовать для выполнения лабораторной работы оборудование, не входящее в комплект работы, без соответствующих указаний преподавателя;
 - 6) производить перекоммутацию схем, замену миниблоков при включённом питании;
 - 7) уходить из лаборатории по окончании работы, не представив результаты измерений руководителю работ и не сдав полученное оборудование. Разборка схемы допускается только после проверки преподавателем результатов измерений.
- Перед разборкой схемы необходимо выключить источники питания.**

Если во время проведения работы замечены какие-либо неисправности оборудования, то необходимо сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

В лаборатории запрещается курить, шуметь, осуществлять приём пищи и напитков, пользоваться сотовыми телефонами.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

Лабораторный стенд «Электричество и магнетизм» (рис. 1) представляет собой набор из восьми модулей, которые будут описаны далее, и встроенный компьютер с жидкокристаллическим экраном, клавиатурой, мышью.

Модуль «Наборное поле»

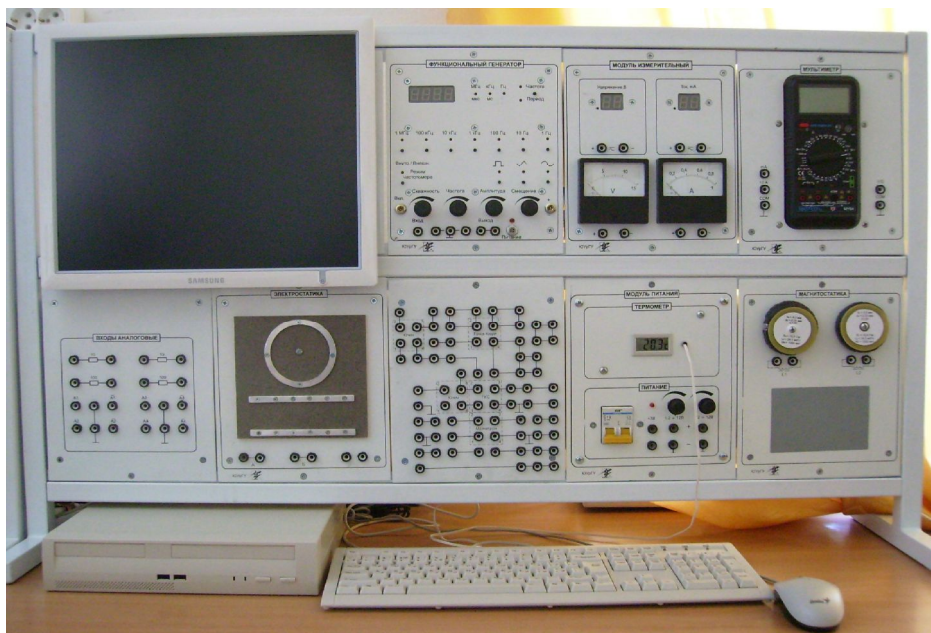


Рис. 1

Наборное поле представляет собой металлическую пластину с укрепленными на ней гнездами, соединенными между собой, как показано на рис. 2. Наборное поле используется для сборки электрических схем. В его гнезда устанавливаются миниблоки, штекера соединительных проводов от блоков питания, функционального генератора, измерительных приборов, аналоговых выходов для связи с компьютером, приставных элементов электрической схемы и т.п.

На наборном поле пунктиром указано рекомендуемое местоположение миниблоков и их контакты 1, 2, 3, 4. При сборке схем необходимо, чтобы номера этих контактов совпадали с соответствующими контактами вставляемых миниблоков.

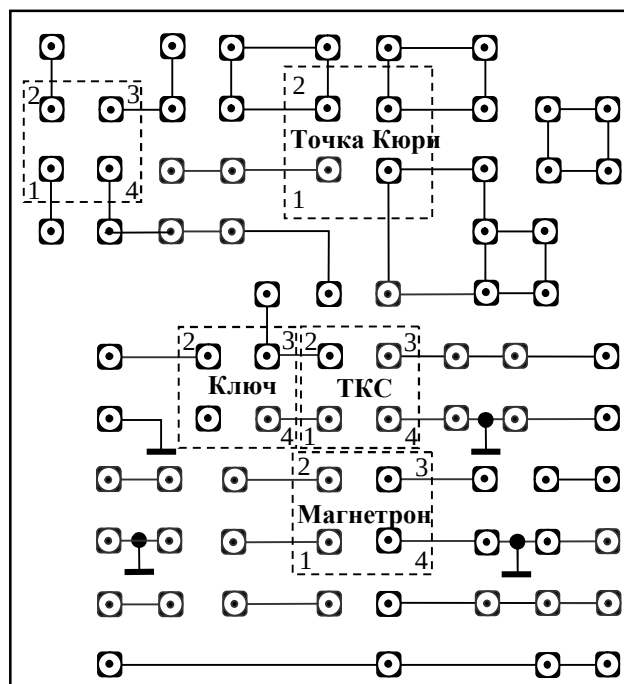


Рис. 2

Модуль питания

Модуль питания предназначен для подачи напряжения на собираемые электрические схемы для проведения физических экспериментов. Он состоит (рис. 3) из двух блоков: блока питания и блока термометра. Блок питания содержит три источника постоянного тока. Первый источник даёт постоянное нерегулируемое напряжение 3 В. Два других источника являются абсолютно одинаковыми с регулируемыми напряжениями от 1,2 В до 12 В. Величина выходного напряжения меняется регуляторами 3. В модуле находится автомат 1, с помощью которого подаётся питание на весь стенд, т.е. на другие модули, где это необходимо.

Блок термометра внешне представляет собой табло температуры 2 и датчик температуры 4 с кабелем 5. Термометр используется при исследовании зависимости сопротивления проводников и полупроводников от температуры.

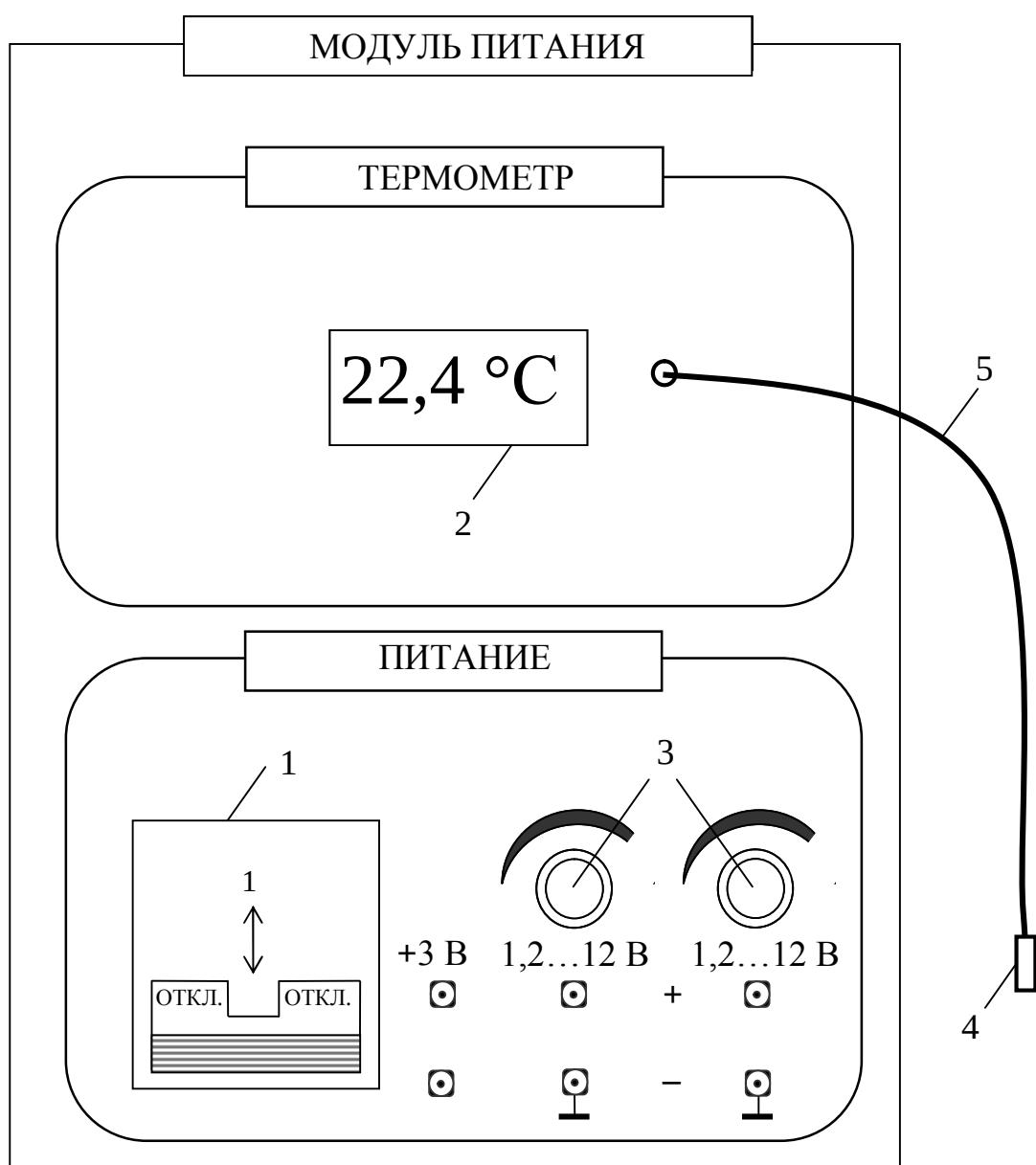


Рис. 3

Модуль измерительный

Модуль предназначен для измерения напряжений и токов в электрических цепях, собираемых для проведения физического эксперимента. Он представляет собой панель, на которой смонтировано четыре измерительных прибора – два цифровых прибора и два стрелочных (рис. 4).

Цифровой вольтметр, расположенный слева в верхнем ряду, измеряет постоянное и переменное напряжения в пределах от 0,02 до 12 В с дискретностью 0,01 В. Справа в том же ряду расположен цифровой миллиамперметр, предназначенный для измерения постоянных и переменных токов с пределами измерения от 0,01 до 99 мА с точностью 0,01 мА. В нижнем ряду расположены стрелочные приборы: слева вольтметр для измерения постоянного напряжения от 0 до 15 В, справа – амперметр постоянного тока, пределы измерения от 0 до 1 А. Класс точности стрелочных приборов – 1,5.

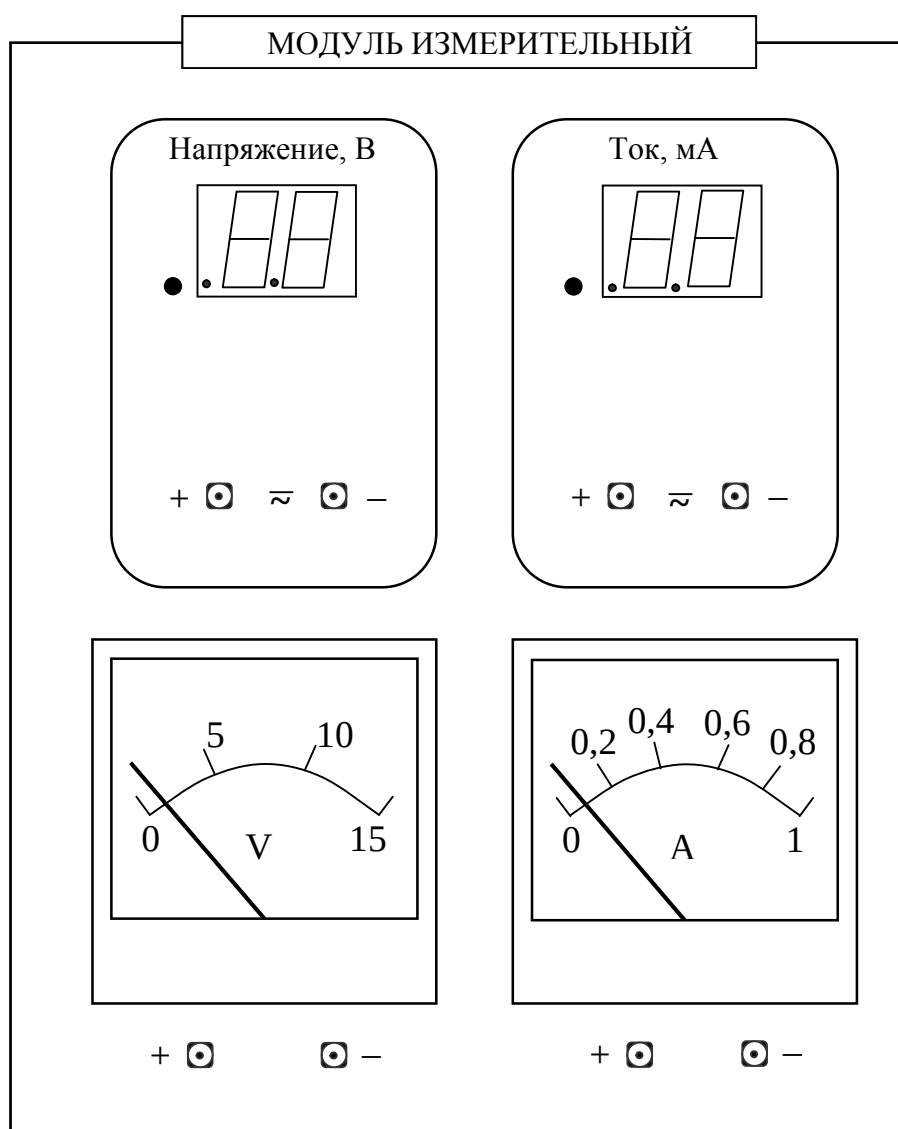


Рис. 4

Модуль «Мультиметр»

Модуль представляет собой расположенный на панели мультиметр «МУ-64» с выносными гнёздами для его подключения к электрическим схемам (рис. 5).

Мультиметр МУ-64 является одним из серии портативных профессиональных измерительных инструментов, способных выполнять следующие функции:

- измерение постоянного и переменного напряжения;
- измерение постоянного и переменного тока;
- измерение сопротивлений;
- измерение емкости конденсаторов;
- диодный и транзисторный тесты;
- звуковая прозвонка;
- измерение температуры;
- измерение частоты.

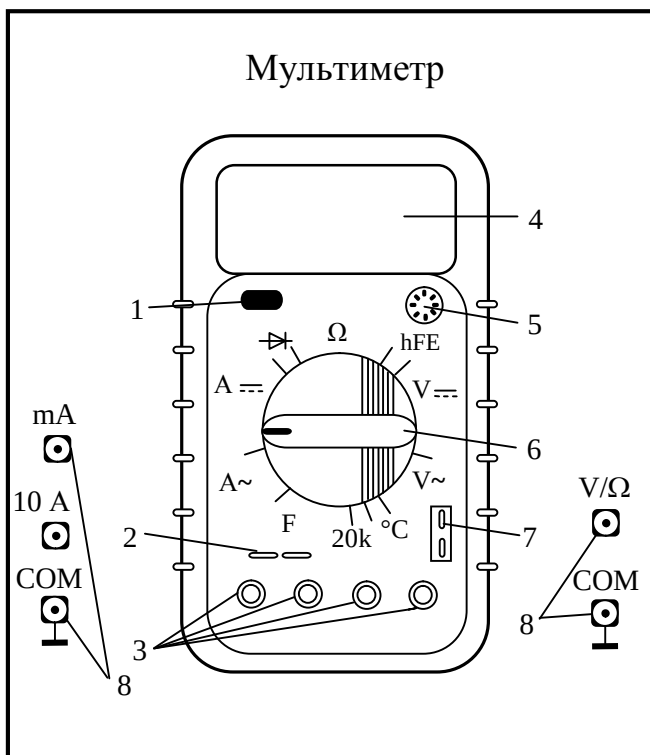


Рис. 5. Мультиметр: 1– кнопка включения/выключения питания; 2 – разъем для измерения ёмкостей; 3 – гнезда для измерения тока, напряжения, сопротивления, частоты; 4 – жидкокристаллический дисплей (табло); 5 – разъем для проверки транзисторов; 6 – переключатель функций; 7 – входные гнезда датчика температуры; 8 – выносные гнезда, дублирующие гнезда 3

Включение и выключение мультиметра осуществляется однократным нажатием красной кнопки 1.

Для продления срока службы батареи предусмотрено автоматическое выключение питания. Прибор автоматически отключается через 40 мин. Для его включения необходимо дважды нажать красную кнопку.

Выбор предела измерений обеспечивается вращением переключателя 6.

Входные гнезда мультиметра: COM, V/Ω, 10 A, mA для продления срока службы прибора вынесены на плату модуля. **Используйте выносные гнезда!** В описании модуля мультиметра приведены не все режимы измерений, а только те, которые могут потребоваться в настоящих лабораторных работах.

Меры безопасности

Для безопасной и надежной работы мультиметра МУ-64 следуйте всем инструкциям по безопасности.

1. Оберегайте прибор от неправильного включения.
2. Никогда не превышайте максимально допустимых значений входных сигналов, указанных в спецификации для каждого диапазона измерений.
3. Не касайтесь открытых гнезд мультиметра, когда он подключён к схеме.
4. Если порядок измеряемой величины заранее не известен, установите переключатель диапазонов на максимальное значение.
5. Всегда отключайте щупы от измеряемой схемы при смене функции работы прибора.
6. Никогда не проводите измерение величины сопротивлений в схемах при включённом питании.
7. Никогда не измеряйте емкость конденсаторов, не убедившись, что они полностью разряжены.
8. Будьте всегда осторожны при работе с напряжениями более 60 В постоянного или 30 В переменного тока. При проведении измерений держите щупы за изолирующие концы. Изолирующая часть щупов не должна иметь сколов, механических повреждений.
9. При появлении неисправности или аномалий в работе прибор не может далее использоваться и подлежит проверке.

Измерение напряжения

Соедините **на панели модуля** один провод с гнездом СОМ, а другой – с гнездом V/ Ω . Поворотным переключателем выберите желаемый предел измерения постоянного (V=) или переменного (V~) напряжения и подсоедините свободные концы проводов к источнику напряжения или исследуемой нагрузке. Включите кнопку 1. Прочтите показания на дисплее. При измерении постоянного напряжения дисплей покажет полярность сигнала на щупе, подключённом к гнезду V/ Ω . Если дисплей показывает «1», то это указывает на перегрузку (слишком большой измеряемый сигнал), тогда нужно выбрать больший предел измерения.

Измерение тока

Соедините **на панели модуля** один провод с гнездом СОМ, а второй – с гнездом mA модуля мультиметра для токов не более 200 mA. Для больших токов второй провод вставьте в гнездо А вместо mA. Переключателем выберите необходимый предел измерения постоянного тока (A=) или переменного (A~) и подсоедините щупы последовательно с исследуемой нагрузкой. Включите кнопку 1. Прочтите показания на табло. При измерении постоянного тока дисплей покажет полярность сигнала на гнезде mA (или А). Если дисплей показывает «1», это указывает на перегрузку и необходимость выбрать больший предел измерения.

Измерение частоты

Соедините **на панели модуля** один провод с гнездом COM, а другой – с гнездом V/ Ω . Установите переключатель в положение KHz и подсоедините щупы к источнику сигнала или исследуемой нагрузке.

Примечание. При входном сигнале свыше 10 В считывание возможно, но точность не гарантируется. При малых входных сигналах в условиях сильных внешних шумов предпочтительнее использовать экранированный кабель.

Измерение сопротивлений

Соедините **на панели модуля** один провод с гнездом COM, а другой – с гнездом V/ Ω модуля мультиметра. Полярность гнезда V/ Ω будет положительной (+). Переключателем выберите желаемый предел измерения Ω и подсоедините щупы к исследуемому сопротивлению.

Примечания:

- если измеряемое сопротивление превышает максимальное значение выбранного предела измерения или вход не подсоединен к сопротивлению, то дисплей покажет «1»;
- при измерении величины сопротивления, находящегося в схеме, убедитесь, что схема выключена, и конденсаторы полностью разряжены;
- при измерениях свыше 1 МОм прибор может устанавливать показания в течение нескольких секунд. Это является нормальным при измерении больших сопротивлений.

Измерение ёмкости конденсаторов

Установите переключатель режимов 6 на желаемый предел измерения ёмкости F . Перед установкой конденсатора в разъем для конденсаторов убедитесь, что конденсатор полностью разряжен. При измерении ёмкости конденсатора с короткими выводами установите в разъем для конденсаторов переходной адаптер.

Внимание! Для того чтобы избежать поражения электрическим током, выньте переходной адаптер, приступая к измерению других параметров.

Измерение температуры

Установите переключатель в положение « $^{\circ}C$ » и дисплей покажет температуру окружающей среды. Для измерения температуры в каком-либо объекте вставьте пробник с термопарой в разъем «Темп». Термопару поместите в измеряемый объект, и через некоторое время прочтите температуру на табло.

Внимание! Для того чтобы избежать поражения электрическим током, выньте термопару, приступая к измерению других параметров.

Модуль «Электростатика»

Модуль «Электростатика» (рис. 6) используется для исследования электрического поля методом его моделирования на плоскости с использованием электропроводной бумаги. На панели модуля расположен лист электропроводной бумаги с плотно прижатыми к ней металлическими электродами, имитирующими плоский и цилиндрический конденсаторы. В первом случае электродами являются две параллельные металлические пластины A и A' , во втором – кольцо B и винт с головкой B' . Электроды соединены с одноимёнными гнездами, посредством которых «конденсаторы» включаются в электрическую схему.

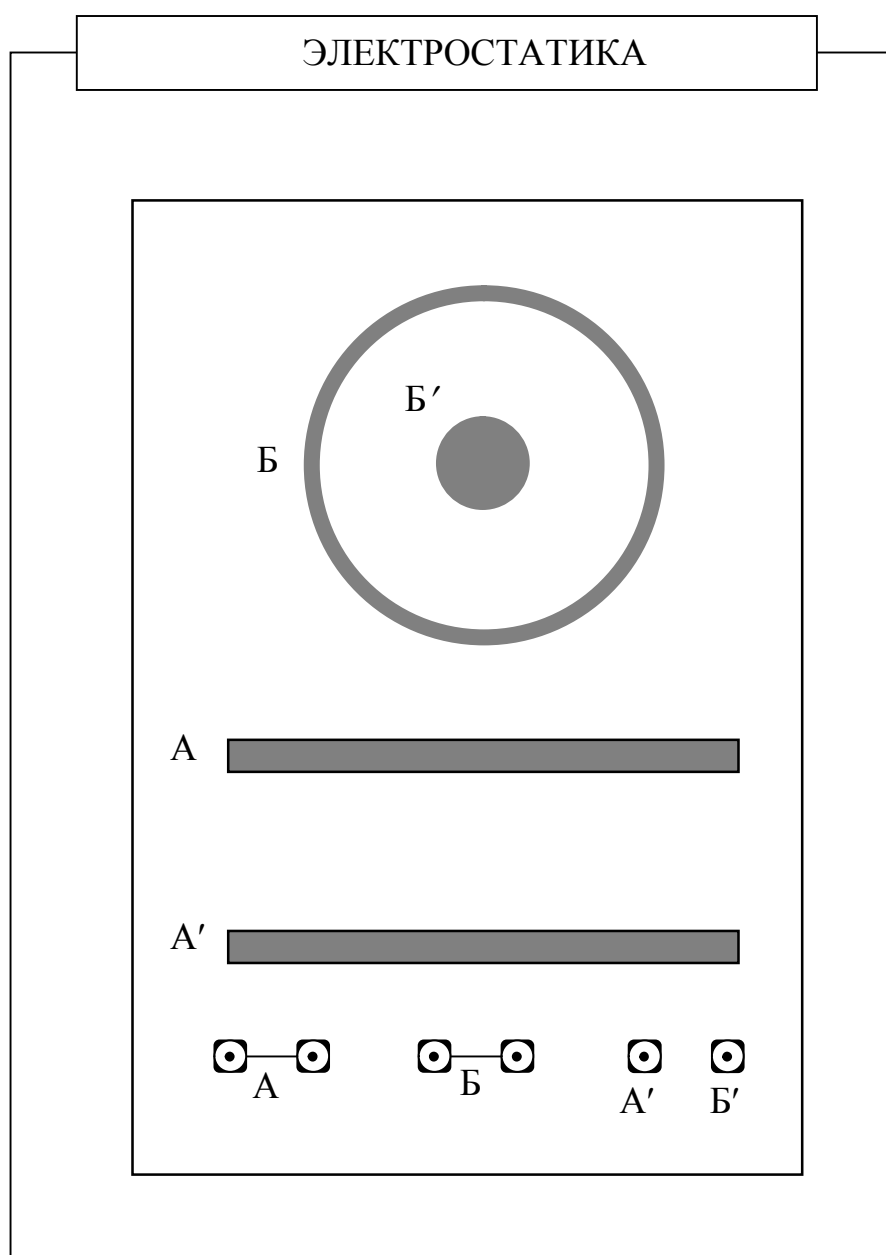


Рис. 6

Модуль «Функциональный генератор»

Данный модуль (рис. 7) представляет собой источник колебаний стабильной частоты в диапазоне от 0,5 Гц до 1 МГц, кроме этого встроенный частотомер позволяет измерять частоту внешнего сигнала от 0,5 до 1 МГц (кнопка «Режим частотомера»). Диапазон частот генератора разбит на семь декад: 1 Гц, 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц.

Ручка «Частота» позволяет плавно менять и задавать необходимую частоту в пределах выбранного диапазона, а ручкой «Амплитуда» можно плавно регулировать амплитуду выходного напряжения от 0 до 9 В.

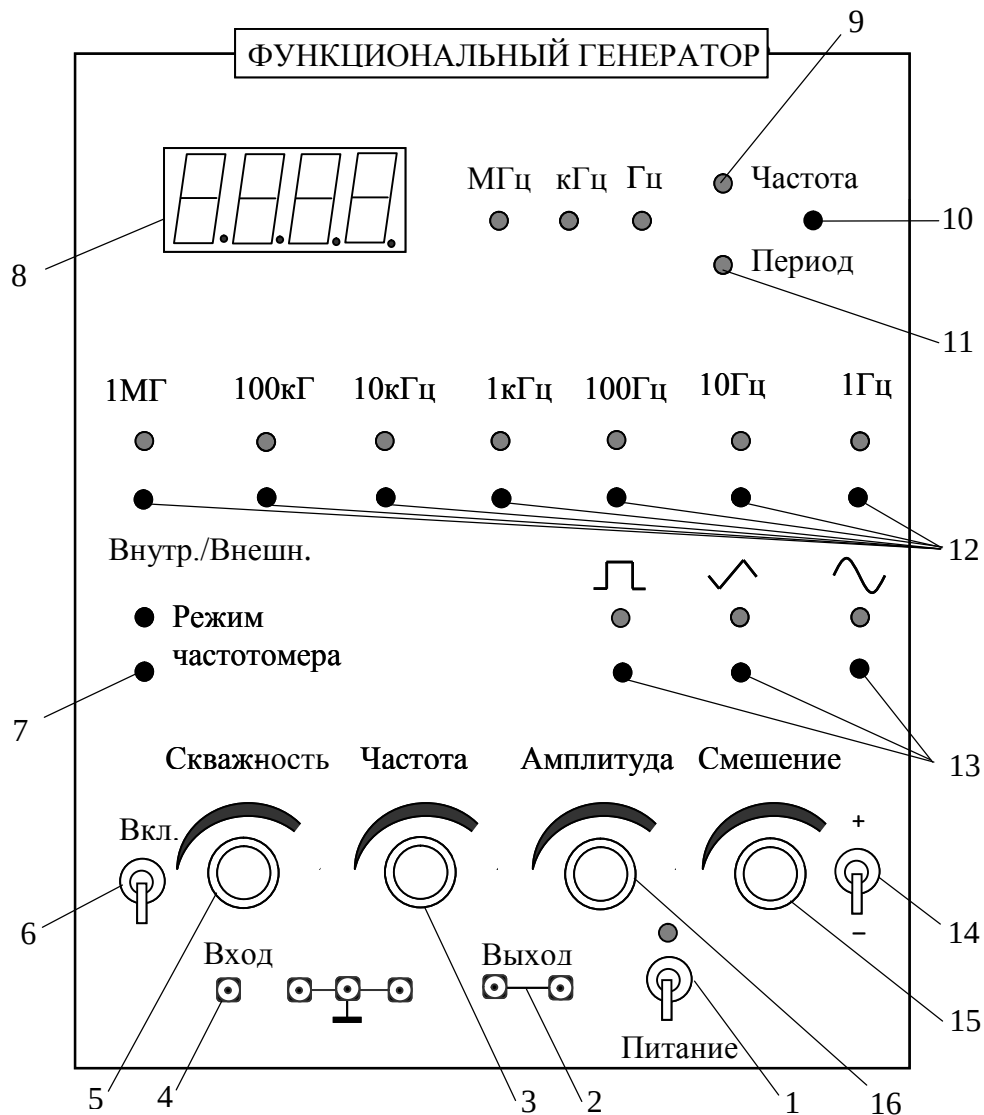


Рис. 7

Генератор может выдавать сигнал синусоидальной, прямоугольной и треугольной форм (рис. 8). Форма сигнала, его частота, вид индикации сигнала (частота или период), режим частотомера (Внутренний/Внешний) выбирается зелеными кнопками под соответствующим рисунком или надписью на панели модуля генератора. При этом о выборе режима сообщает загоревшийся красный светодиод над кнопкой, которую Вы нажали.

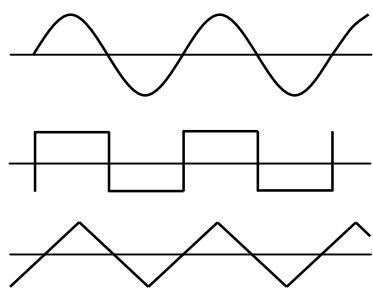


Рис. 8

Для наблюдения и исследования формы сигналов генератора необходимо запустить компьютерную программу «Oscilograf», используя при этом модуль «Входные сигналы», или подключить любой электронный осциллограф.

В табл. 2 приводится назначение органов управления генератора.

Таблица 2

Поз.	Наименование	Выполняемые функции
1	Тумблер «Питание»	Включение/выключение питания
2	Выход	Гнездо основного выхода сигнала
3	Регулятор «Частота»	Плавное изменение частоты сигнала
4	Вход	Гнездо для подачи входного сигнала
5	Регулятор «Скважность»	Плавное изменение скважности прямоугольных импульсов или изменение формы треугольного и синусоидального сигналов
6	Тумблер «Вкл.»	Включение/выключение режима изменения скважности или формы сигнала
7	Кнопки «Режим частотомера»	Выбирает режим работы встроенного частотомера. Измерение частоты внутреннего или внешнего сигнала
8	Индикатор	Индикация частоты или периода сигнала
9	Частота	При загорании светодиода отсчёт показаний индикатора по шкале частот (Гц, кГц)
10	Кнопка «Частота/Период»	Переключение индикации частоты/периода
11	Период	При загорании светодиода отсчёт показаний по шкале времени (мс, мкс)
12	Выбор диапазона частот	Для выбора необходимого диапазона частот нажать соответствующую кнопку
13	Выбор формы сигнала	Нажать одну из трех кнопок, чтобы выбрать нужную форму выходного сигнала
14	Тумблер «Смещение» +/-	Для установки положительного смещения тумблер в верхнее положение, для отрицательного смещения – в нижнее положение.
15	Регулятор «Смещение»	Установка величины смещения выходного сигнала постоянным напряжением
16	Регулятор «Амплитуда»	Плавное изменение амплитуды

Особенности использования

1. Настройка режима постоянного смещения генератора позволяет смещать сигнал (рис. 9) относительно оси «Х» (времени) в пределах ± 4 В. На рис. 9а показан треугольный сигнал без смещения. При положении тумблера 14 «+» и вращении ручки 15 по часовой стрелке происходит смещение вверх – первая осциллограмма на рис. 9б. При положении тумблера 14 «-» и вращении ручки 15 происходит смещение вниз – вторая осциллограмма на рис. 9б. При превышении суммы напряжений сигнала и смещения допустимых значений ± 10 В сигнал будет обрезан либо сверху, либо снизу, как показано на рис. 9в.

2. При включённом тумблере 6 и вращении ручки 5, прямоугольный сигнал изменяет свою скважность S , т.е. отношение периода сигнала к длительности его положительного импульса (рис. 10). Как видно из рисунка, чем короче положительный импульс ($\tau_1 < \tau_2$), тем больше скважность $S_1 > S_2$.

3. Для выбора диапазона частот имеются семь кнопок 12 – «1 Гц», «10 Гц», «100 Гц», «1 кГц», «10 кГц», «100 кГц», «1 МГц». При выборе диапазона частот около соответствующей кнопки загорается светодиод.

4. Три кнопки 13 позволяют выбрать форму сигнала – прямоугольный, треугольный или синусоидальный.

5. Кнопка для выбора внутреннего или внешнего режима работы частотомера переключается при каждом нажатии кнопки. Светодиод рядом с кнопкой загорается, когда включен внутренний режим измерения. При измерении частоты внешнего сигнала сигнал подаётся на гнездо «Вход» 4.

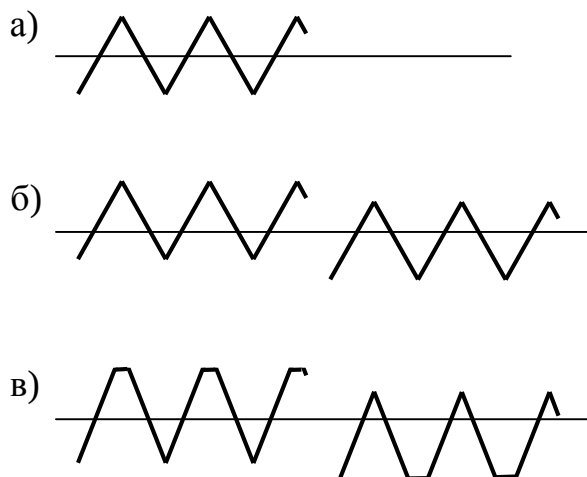


Рис. 9

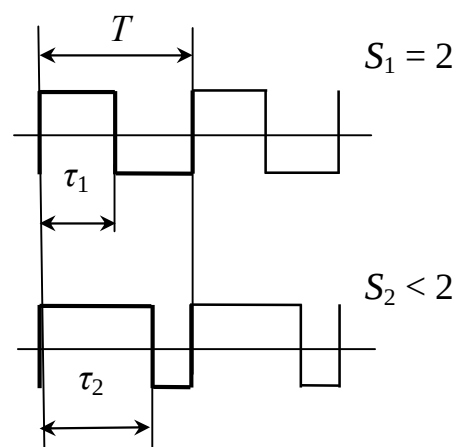


Рис. 10

6. При включении питания лабораторного модуля его исходное состояние следующее: диапазон частот «1 Гц»; форма сигнала – синусоидальная, режим частотомера – измерение частоты внутреннего сигнала; смещение – 0; скважность – 2.

Модуль «Магнитостатика»

Модуль «Магнитостатика» (рис. 11) может использоваться для проведения лабораторных работ по исследованию магнитного поля, создаваемого при прохождении постоянного тока по обмотке тороида, для изучения эффекта Холла и определения концентрации носителей в полупроводниках.

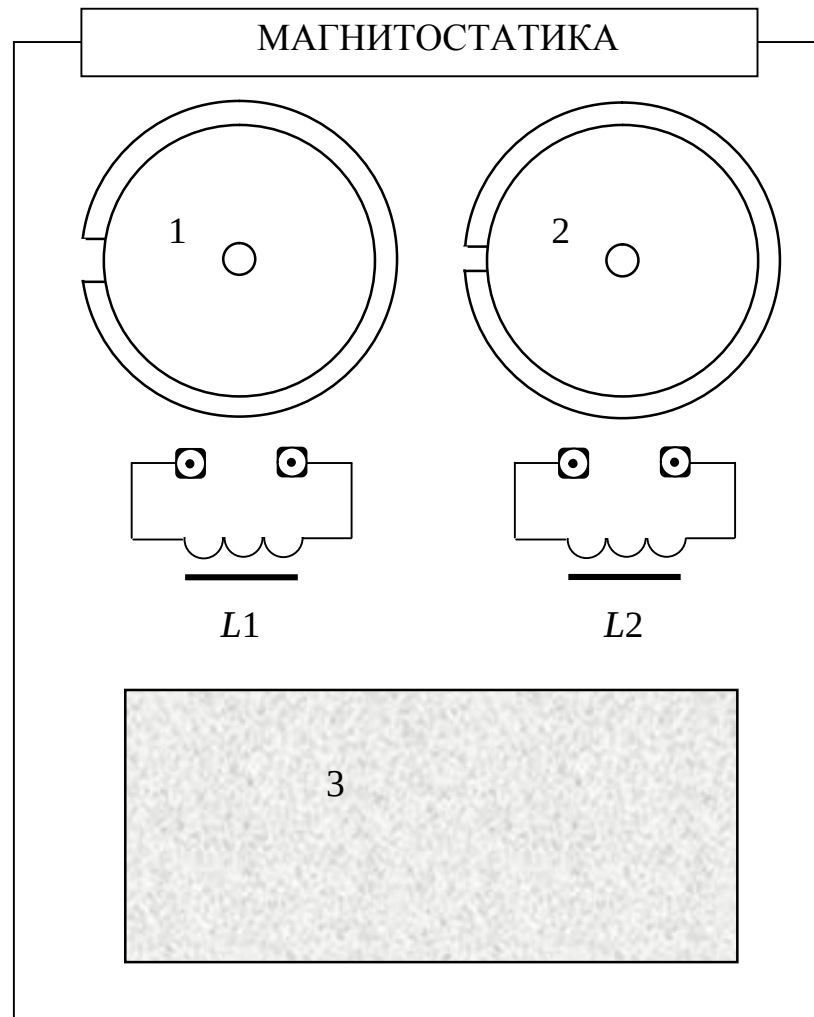


Рис. 11

На панели модуля расположены два тороидальных электромагнита 1 и 2 с сердечниками из углеродистой стали с малым содержанием углерода. Сердечники имеют сквозные прорезы – зазоры, шириной 2 мм и 4 мм. Обмотки тороидов содержат одинаковое количество витков, указанное на крепёжной шайбе. Под электромагнитами находятся гнезда, к которым присоединены концы их обмоток ($L1$, $L2$). На панели также расположена стальная пластина 3, на которой могут располагаться постоянные магниты для проведения экспериментов по определению конфигураций создаваемых ими магнитных полей.

Модуль «Входы аналоговые»

Лабораторный модуль «Входы аналоговые» (рис. 12) предназначен для связи электрических схем, собираемых на наборном поле, с монитором компьютера, включенным в режиме «осциллограф». Этот модуль совместно с программой «Oscillograf» позволяет наблюдать и измерять параметры изменяющихся во времени физических величин: напряжение, ток, мощность, температуру; форму, частоту, период, скважность, затухание и другие характеристики сигналов.

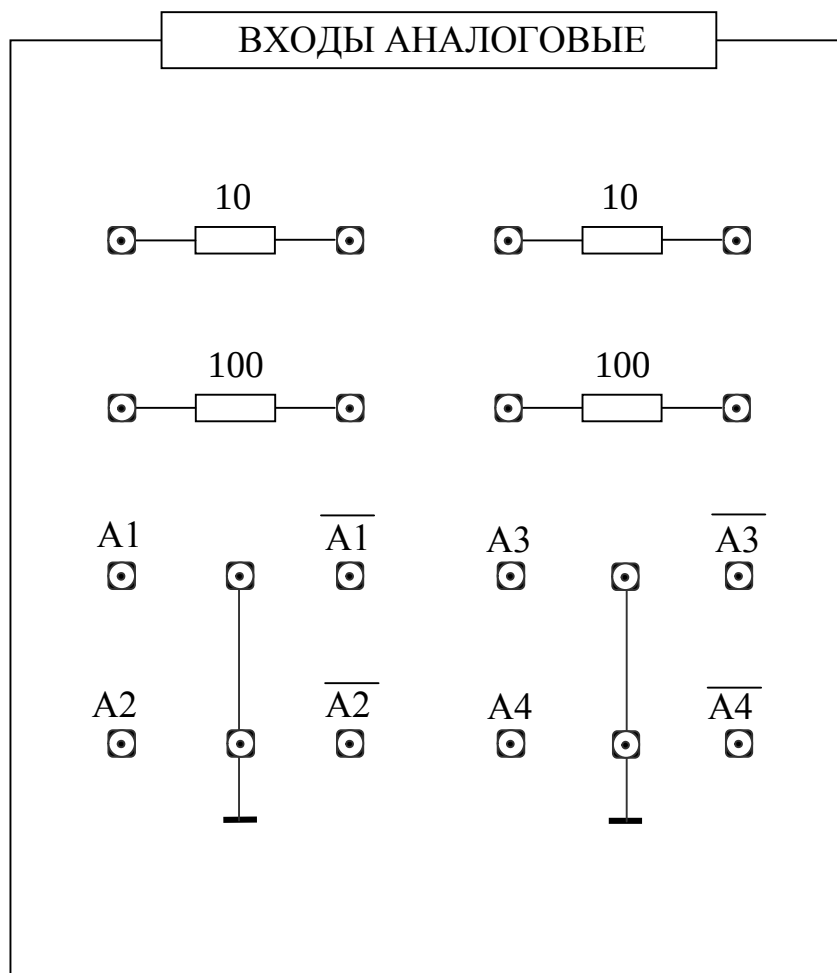


Рис. 12

Аналоговый сигнал (т.е. непрерывно изменяющаяся физическая величина, преобразованная с помощью соответствующих датчиков в электрические импульсы) с помощью аналого-цифровых преобразователей переводится в цифровую форму, обрабатывается специальной программой и затем отображается на дисплее компьютера.

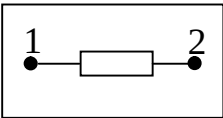
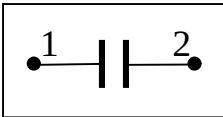
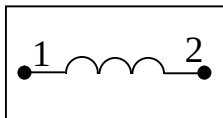
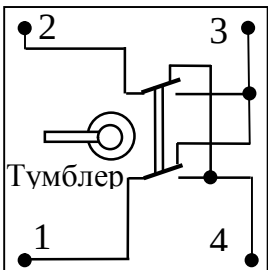
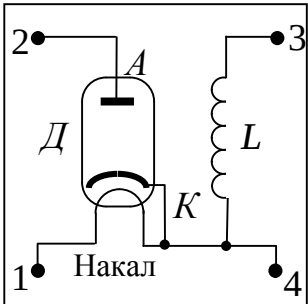
Число каналов для ввода аналоговой информации равно четырём. Максимальное входное напряжение ± 10 В.

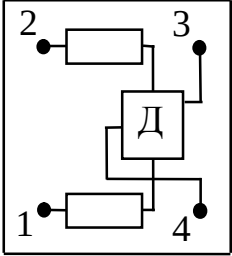
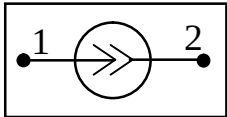
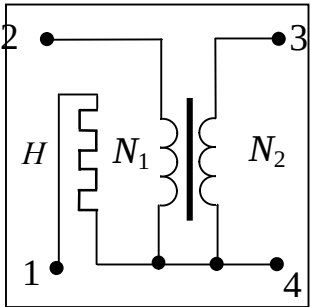
Более подробное описание использования модуля Вы найдёте в конкретных лабораторных работах.

Набор миниблоков

В табл. 3 даётся краткое описание миниблоков – элементов электрических цепей, заключённых в прозрачный корпус, из которых на наборном поле собирается электрическая схема для проведения физического эксперимента.

Таблица 3

Обозначение в схеме	Краткое описание
	Миниблок «Сопротивление» Содержит сопротивление R, номинал которого указан на корпусе миниблока
	Миниблок «Конденсатор» Содержит конденсатор C, ёмкость которого указана на корпусе миниблока
	Миниблок «Катушка индуктивности» Содержит катушку L, величина индуктивности которой указана на корпусе миниблока
	Миниблок «Ключ» С помощью этого миниблока замыкают или размыкают электрические цепи, изменяя направление тока. В левом положении тумблера замыкаются контакты 1–3 и 2–4, в правом – 1–4 и 2–3.
	Миниблок «Магнетрон» Состоит из соленоида L, внутрь которого вставлен вакуумный диод D. Катод K диода подогревается нитью накала, по которой проходит ток от отдельного источника питания, и испускает электроны. Электроны под действием напряжения, приложенного между анодом и катодом, движутся к аноду, создавая электрический ток в лампе. Ток, протекающий по соленоиду, создаёт магнитное поле, которое изменяет траекторию движения электронов в диоде, что влияет на величину анодного тока

Обозначение в схеме	Краткое описание
	Миниблок «Датчик Холла» Представляет собой щуп, на конце которого встроен датчик Холла (пластинка полупроводника в пластмассовом корпусе). Выводы датчика 1, 2, 3, 4 распаяны через разъём в корпусе на контакты миниблока 1, 2, 3, 4. На контакты 1–2 подаётся питающее напряжение 3 В, которое создаёт ток в полупроводнике, а с контактов 3–4 снимается э.д.с. Холла при внесении датчика в магнитное поле
	Миниблок «Стабилизатор тока» Поддерживает в электрической цепи постоянную величину тока
	Миниблок «Точка Кюри» Состоит из Ш-образного сердечника, на центральный стержень которого надета катушка с двумя обмотками, с числом витков соответственно N_1 и N_2. К сердечнику прижат нагревательный элемент H. В корпусе миниблока имеется отверстие для датчика температуры

Работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Краткая теория

При подготовке к работе следует изучить характеристики электрического поля: напряжённость $\vec{E}$ и потенциал φ , их физический смысл, единицы измерения, методы определения, связь между напряжённостью и потенциалом, теорему Остроградского – Гаусса и её применение для вычисления напряжённости, зависимость $\vec{E}$ и φ от координат для различных полей (точечный заряд, нить, цилиндр, плоскость), силовые линии и эквипотенциальные поверхности.

Для изучения полей используют экспериментальные методы их моделирования. Один из них основан на применении слабо проводящего электропроводного материала с прижатыми к ней металлическими электродами. Электростатическое поле заменяют электрическим полем, в котором на электроды подают такие же потенциалы, как и в моделируемом поле. Несмотря на движение заряженных частиц, плотность зарядов на электродах постоянна, так как на место зарядов, уходящих по слабопроводящему материалу, непрерывно поступают новые заряды от источника питания. Поэтому заряды электродов создают на электропроводном материале такое же электрическое поле, как и неподвижные заряды такой же плотности, а электроды являются эквипотенциальными поверхностями. Моделирование на электропроводной бумаге позволяет использовать токоизмерительные приборы, которые более просты и надёжны в работе, нежели электростатические.

Картина электростатического поля может быть наглядно представлена линиями напряжённости (силовыми линиями) и эквипотенциальными поверхностями (рис. 1.1). Линии напряжённости начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных, или в бесконечности. Густота линий пропорциональна величине напряжённости. Направление вектора $\vec{E}$ в некоторой точке поля определяют по направлению касательной к силовой линии в этой точке.

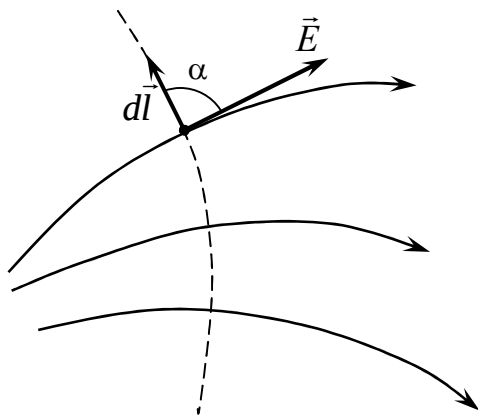


Рис. 1.1

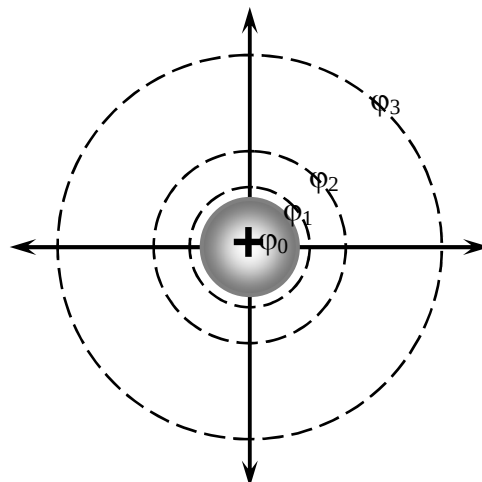


Рис. 1.2

Эквипотенциальные поверхности – это поверхности равного потенциала. Они перпендикулярны линиям напряжённости, что следует из равенства нулю элементарной работы $\delta A = -q d\varphi$, совершаемой силой $\vec{F} = q\vec{E}$ при бесконечно малом перемещении $d\vec{l}$ заряда. Если перемещение происходит по эквипотенциальной поверхности, то $d\varphi = 0$; $\delta A = qE dl \cos \alpha = 0$, следовательно, угол α между векторами $\vec{E}$ и $d\vec{l}$ равен 90° (см. рис. 1.1). В случае плоского поля уравнение эквипотенциальной линии имеет вид $\varphi(x,y) = \text{const}$. Эквипотенциальные линии строят с постоянным шагом $\Delta\varphi$, т.е. так, чтобы разность потенциалов между двумя соседними линиями была одинаковой: $\varphi_0 - \varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_2 - \varphi_3 = \text{const}$ (рис. 1.2). По густоте эквипотенциальных линий также можно судить о величине напряжённости поля.

В данной работе электрическое поле создается между электродами, прижатыми к электропроводному материалу электродов в плане соответствует форме двух типов конденсаторов: плоского и цилиндрического. К электродам подводят небольшое постоянное напряжение от модуля питания (рис. 1.3).

По электропроводному материалу между электродами протекает очень слабый электрический ток, и распределение потенциала по плоскости материала весьма напоминает распределение потенциала между обкладками конденсатора, каждая из которых имеет одинаковый потенциал во всех точках. Известно, что напряжённость $\vec{E}$ электростатического поля и его потенциал φ связаны между собой:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi, \quad (1.1)$$

где вектор

$$\text{grad}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}. \quad (1.2)$$

Знак минус является выражением того, что вектор напряжённости электростатического поля направлен против того направления, в котором потенциал увеличивается. Из выражений (1.1) и (1.2) следует, что проекции вектора $\vec{E}$ на оси координат равны частным производным от потенциала по соответствующим координатам, взятым с обратным знаком:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}. \quad (1.3)$$

Если потенциал зависит только от одной координаты r (поле точечного заряда, равномерно заряженной нити, цилиндра и др.), то проекция E_r вектора напряжённости $\vec{E}$ равна производной от потенциала по координате r , взятой с обратным знаком:

$$E_r = -\frac{d\varphi}{dr}, \quad (1.4)$$

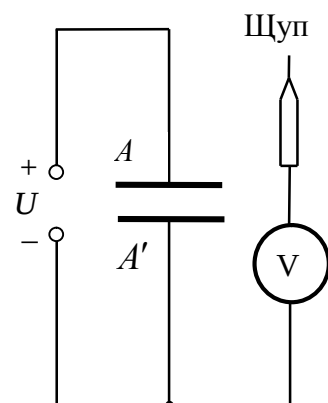


Рис. 1.3

поскольку производные по другим координатам равны нулю.

То же и в однородном поле: если направить координату x параллельно силовым линиям, то проекция вектора напряжённости

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}. \quad (1.5)$$

Измеряя потенциал в различных точках электропроводного материала, и используя связь между напряжённостью и потенциалом электрического поля, можно найти напряжённость как функцию координаты.

В теории напряжённость электростатического поля легко определяется с помощью теоремы Остроградского – Гаусса, а по напряжённости затем вычисляется потенциал или разность потенциалов:

$$\varphi(r) = -\int E_r dr + C; \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr. \quad (1.6)$$

Практически же наоборот: напряжённость удобнее определять по измеряемому потенциалу φ , так как непосредственное измерение напряжённости электрического поля чрезвычайно затруднено.

Разность потенциалов между любыми точками поля можно измерить вольтметром. В данной работе она измеряется между одним из электродов конденсатора и той точкой поля, в которую вставляется щуп мультиметра (см. рис. 1.3–1.5).

В **плоском конденсаторе**, как известно, создаётся **однородное** электрическое поле, то есть $\vec{E} = \text{const}$, поэтому в формуле (1.6) проекцию $E_r = E_x$ можно вынести за знак интеграла. Считая потенциал отрицательного электрода A' равным нулю и направляя координату x от этого электрода к положительной пластине A (рис. 1.4), получим линейную зависимость потенциала φ от координаты x , направленной против силовых линий:

$$\varphi = Ex. \quad (1.7)$$

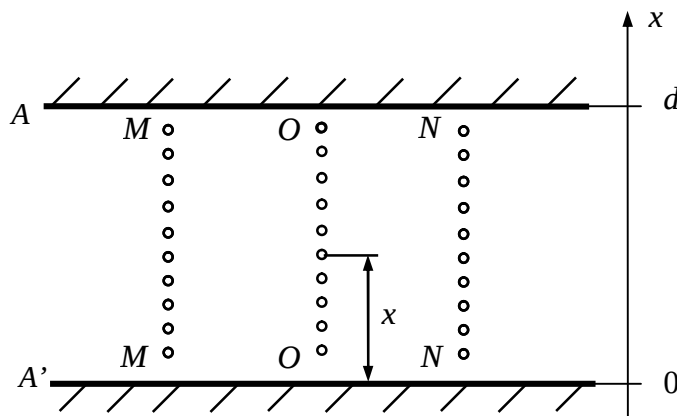


Рис. 1.4

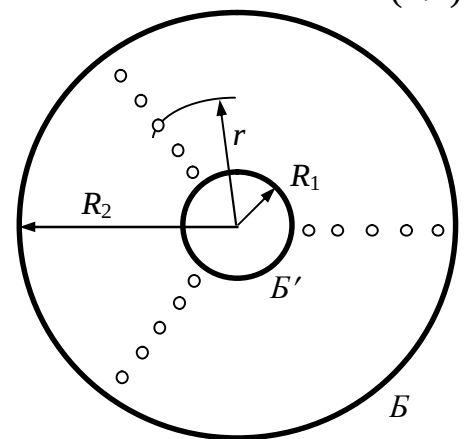


Рис. 1.5

Измеряя потенциал на различных расстояниях x от пластины A' , и строя график зависимости $\varphi(x)$, мы можем найти напряжённость как угловой коэффициент графика $\varphi(x)$, построенного в соответствующих координатах.

В **цилиндрическом конденсаторе** напряжённость поля между двумя заряженными длинными соосными цилиндрами можно найти, используя теорему Гаусса. Зависимость напряжённости E_r от расстояния r до оси цилиндров (рис. 1.5) получается обратно пропорциональная:

$$E_r = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}, \quad (1.8)$$

где τ — линейная плотность зарядов на внутреннем цилиндре.

Используя связь (1.4) между напряжённостью и потенциалом, и считая потенциал внутреннего цилиндра равным нулю, можно показать, что потенциал точки поля, находящейся на расстоянии r от центра конденсатора (см. рис. 1.4), определяется выражением

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{r}{R_1}, \quad (1.9)$$

где R_1 — радиус внутреннего цилиндра.

Измеряя потенциал на различных расстояниях r от оси цилиндров и строя график зависимости $\varphi(r)$, мы можем найти напряжённость E в любой точке поля методом графического дифференцирования (так как $E = |d\varphi/dr|$).

Выполнение работы

Оборудование: модуль «Электростатика», модуль питания 1,2...12 В, модуль «Наборное поле», мультиметр, соединительные провода.

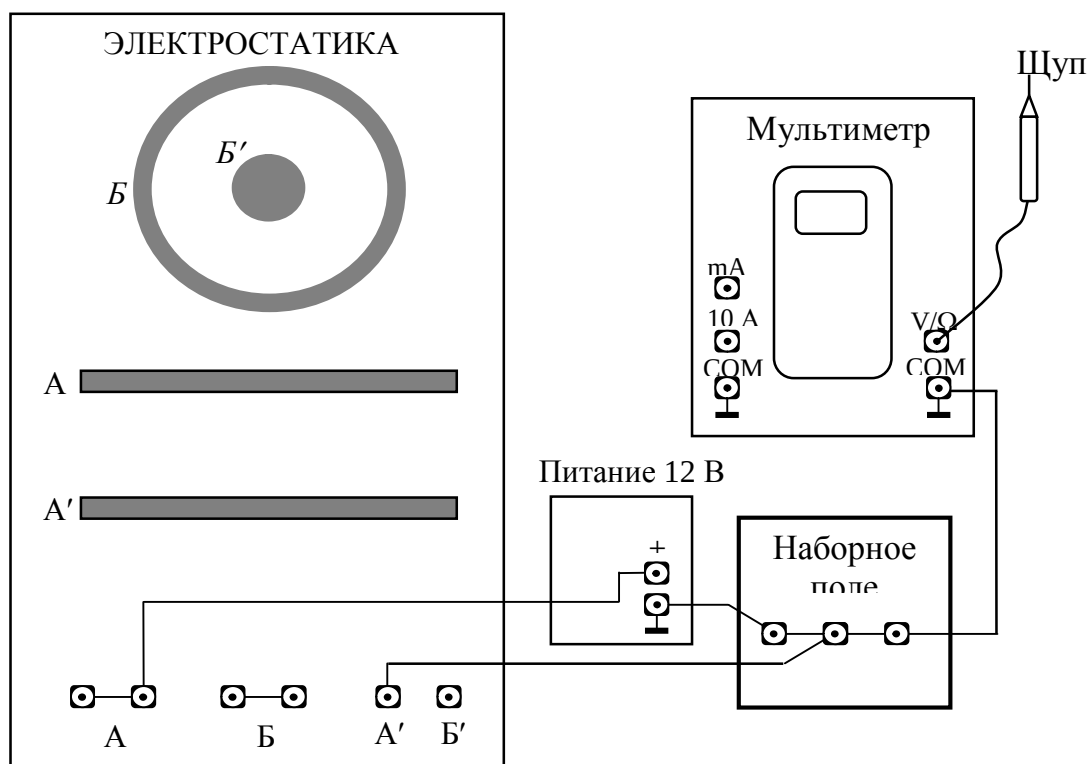


Рис. 1.6

1. Соберите схему для изучения электростатического поля плоского конденсатора (рис. 1.3), используя монтажную схему установки (рис. 1.6). Найдите на модуле «Наборное поле» любые три соединённые вместе гнезда и соедините с ними нулевые контакты ($\perp$) от мультиметра, модуля питания и пластину конденсатора A' (гнездо A'). Плюс источника питания соедините с пластиной A .

2. Регулятор питания 1,2...12 В установите в крайнее левое положение (минимум напряжения).

3. Переключатель мультиметра установите на «20 В» постоянного напряжения.

4. Покажите собранную схему руководителю работ.

5. Включите модуль питания и мультиметр (красная кнопка слева).

6. Измерьте потенциал на обкладках конденсатора, коснувшись щупом нижней и верхней пластин, запишите эти значения в табл. 1.1. Измерение потенциала в поле конденсатора проводите в трёх положениях линейки: MM , OO , NN (рис. 1.3). Линейка должна быть из непроводящего материала! Измерения необходимо проводить через каждые 4–5 мм (по заданию преподавателя), начиная от внутреннего нижней пластины. Результаты продолжайте заносить в табл. 1.1.

7. Измерьте диаметр центрального электрода цилиндрического конденсатора и запишите его значение в черновик.

8. Поочередно перенесите провода с контакта «А» на контакт «Б» и с контакта A' на B' . Этим самым Вы перекинете напряжение с плоского конденсатора на цилиндрический. На центральном электроде во всех его точках будет нулевой потенциал, а на внешней обкладке – максимальный. Проверьте, так ли это!

Таблица 1.1

Таб-

лица 1.2

№ п/п	x , мм	φ , В		
		OO	MM	NN

№ п/п	r	φ_1	φ_2	φ_3	$\langle \varphi \rangle$
	(R_1)				

9. Измерения потенциала φ проводите от центра конденсатора к внешнему кольцу через каждые 4–5 мм по трём любым радиусам (см. рис. 1.5), **начиная от края центрального электрода**. Измеренные значения записывайте в табл. 1.2.

10. По окончании измерений представьте результаты преподавателю или руководителю работ для проверки и подписи.

11. Выключите модуль питания и мультиметр, разберите схему, наведите порядок на рабочем месте.

Обработка результатов измерений

1. Постройте графики зависимости $\varphi(x)$ для плоского конденсатора (*можно все три графика разместить в одной системе координат*), определите из них величину напряжённости E в середине конденсатора и по обе стороны от нее. Убедитесь, действительно ли в плоском конденсаторе поле однородно.

2. Постройте график зависимости $\langle\varphi\rangle(r)$ для цилиндрического конденсатора и определите по нему напряжённость E в трёх точках: при r равном 1, 2 и 3 см. Сделайте вывод о характере зависимости E и φ от координат x , y , r (см. рис. 1.4 и 1.5).

3. По полученным в результате измерений значениям E найдите поверхностную плотность зарядов σ на обкладках плоского конденсатора. Для цилиндрического конденсатора вычислите линейную плотность τ и поверхностные плотности σ_1 на внутреннем цилиндре. Используйте для этого формулы напряжённости электрического поля, полученные на основании теоремы Гаусса для случаев:

- двух параллельных, разноименно заряженных плоскостей;
- бесконечного, равномерно заряженного цилиндра.

По данным измерений на миллиметровой бумаге, *соблюдая масштаб*, постройте картину силовых линий и эквипотенциальных линий:

- для плоского конденсатора;
- для цилиндрического конденсатора.

При построении эквипотенциальных поверхностей разность потенциалов $\Delta\varphi$ между соседними эквипотенциальными поверхностями примите равной 0,2 В.

Контрольные вопросы

1. Как изображается электростатическое поле?
2. Дайте определения: напряжённости и потенциала электростатического поля; силовой линии; эквипотенциальной поверхности, потока вектора $\vec{E}$.
3. Как выражается связь между вектором $\vec{E}$ и потенциалом φ в случае произвольного поля?
4. Чему равна напряжённость поля в плоском конденсаторе, если он заряжен до напряжения U , а расстояние между пластинами равно d ?
5. Какой физический смысл имеют величины dr и $d\varphi$ в формулах (1.4) и (1.5)?
6. Какой смысл имеет знак «—» в формулах (1.1), (1.4), (1.5)?
7. Как направлены векторы $\vec{E}$ и $\text{grad}\varphi$ по отношению к 1) отрицательно заряженной плоскости; 2) положительно заряженной нити; 3) точечному заряду — q ?
8. Чему равно отношение E_1/E_2 напряжённостей электростатического поля цилиндрического конденсатора в точках, отстоящих от оси конденсатора на расстояниях $r_1 = r$ и $r_2 = 2r$?
9. Сформулируйте теорему Гаусса. Получите выражение (1.8), применив алгоритм применения теоремы. Для каких значений r справедливо это выражение?
10. Выведите формулы (1.7) и (1.9), используя связь между $\vec{E}$ и φ .

11. Дайте определение линейной и поверхностной плотности зарядов. Каковы их единицы измерения? Выразите линейную плотность зарядов τ через их поверхностную плотность σ на длинном цилиндре, радиус которого равен R .
12. Опишите установку для моделирования электростатических полей.
13. Как влияют заряды, распределённые по внешнему цилиндру (см. рис. 1.5), на напряжённость поля между цилиндрами?

Работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Краткая теория

Сопротивление проводника простейшим способом можно определить, используя закон Ома для участка электрической цепи. Для этого нужно измерить вольтметром разность потенциалов U на концах проводника, 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 рис. 2.1 показания вольтметра соответствуют напряжению на сопротивлении R ($U_V = U$), но показания амперметра соответствуют не току через сопротивление, а сумме токов через проводник и вольтметр:

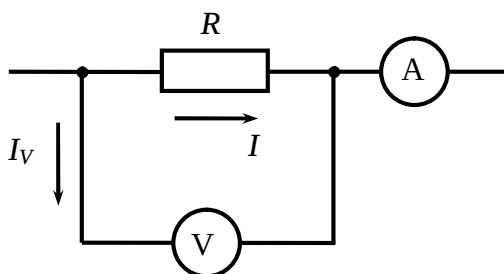


Рис. 2.1

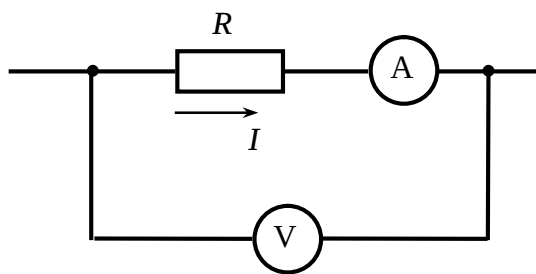


Рис. 2.2

$$I_A = I_V + I. \quad (2.1)$$

При включении по схеме рис. 2.2 показания амперметра соответствуют току через сопротивление ($I_A = I$), но вольтметр показывает не напряжение на сопротивлении, а суммарное напряжение на сопротивлении и амперметре:

$$U_V = IR + IR_A. \quad (2.2)$$

Из выражений (2.1) и (2.2) следует, что для уменьшения погрешностей, вносимых при подключении приборов, сопротивление амперметра должно быть малым, а сопротивление вольтметра – большим.

Мостовые схемы измерения сопротивлений позволяют избавиться от ошибок, вносимых электроизмерительными приборами, так как здесь эти приборы исполь-

зуются 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*).

Схема *моста Уитстона*, используемого в данной работе, составлена из сопротивлений R_X , R_M , R_1 , R_2 , образующих плечи моста (рис. 2.3). В одну из диагоналей мостовой схемы CD включается чувствительный измеритель тока – миллиамперметр. К другой диагонали AB подключается источник питания с ограничивающим ток I добавочным сопротивлением R_D . В плечи моста AC и CB включаются известные сопротивления R_1 и R_2 . В плечо AD включается измеряемое сопротивление R_X , а в плечо BD – магазин сопротивлений. Магазин сопротивлений представляет собой ступенчато изменяемое достаточно точное сопротивление. Процесс измерения по этой схеме заключается в подборе такого сопротивления магазина, при котором миллиамперметр в диагонали CD показывает отсутствие тока.

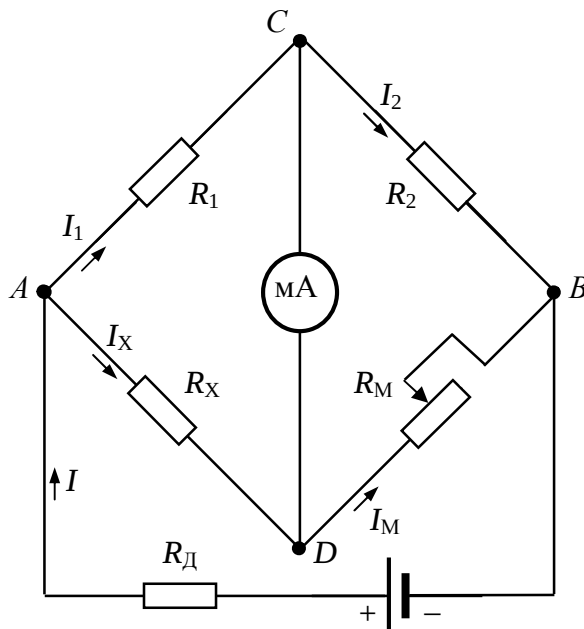


Рис. 2.3

При произвольном соотношении сопротивлений через все плечи моста и через гальванометр идут токи. Переключая декады магазина сопротивлений, можно добиться такого состояния, при котором потенциалы точек C и D будут одинаковыми и ток через миллиамперметр станет равным нулю. Это состояние схемы называется **равновесием моста**.

Легко сообразить, что в состоянии равновесия разность потенциалов между точками A и C равна разности потенциалов между точками A и D , а $\varphi_C - \varphi_B = \varphi_D - \varphi_B$. В соответствии с законом Ома для пассивного участка электрической цепи разность потенциалов на концах участка равна падению напряжения на участке – произведению силы тока на сопротивление этого участка цепи: $\varphi_1 - \varphi_2 = IR$. Приравняв падения напряжения на сопротивлениях R_X и R_1 , R_2 и R_M , получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_X R_X; \\ I_2 R_2 &= I_M R_M. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Эти равенства справедливы только тогда, когда мост находится в состоянии равновесия. Так как ток в диагонали CD при этом равен нулю, то ток I_1 , протекающий по сопротивлению R_1 , равен току I_2 , протекающему по сопротивлению R_2 , а ток I_X , протекающий по сопротивлению R_X , равен току I_M , протекающему по магазину сопротивлений R_M . Разделив первое уравнение в (2.3) на второе, получим **условие равновесия** моста Уитстона:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_M}. \quad (2.4)$$

Из него следует, что если установить ток в миллиамперметре равным нулю, то неизвестное сопротивление R_x можно найти, зная остальные три сопротивления:

$$R_x = R_M \frac{R_1}{R_2}. \quad (2.5)$$

Выполнение работы

I. Технический метод измерений

Оборудование: стрелочный вольтметр и мультиметр в режиме миллиамперметра, модуль питания, соединительные провода.

1. Соберите схему (рис. 2.4), используя монтажную схему (рис. 2.5). На наборном поле найдите для R_x соответствующие гнезда (см. рис. 2.5), поставьте в них

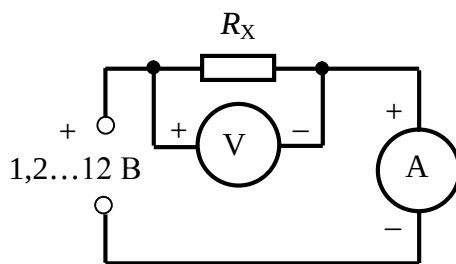


Рис. 2.4

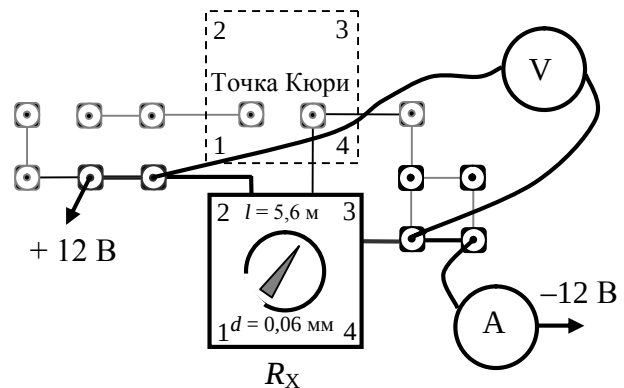


Рис. 2.5

миниблок « R_x », соедините его проводами с измерительными приборами и модулем питания. Регулятор выходного напряжения блока питания установите в крайнее левое положение (минимальное напряжение), а мультиметр – в режим измерения постоянного тока (предел измерений 200 мА). По заданию преподавателя установите на миниблоке длину исследуемого металлического проводника и на протяжении всей работы **не меняйте эту величину и местоположения миниблока на наборном поле!** Запишите в черновик значение общей длины и диаметра проводника с панельки миниблока « R_x », а также величину установленной длины в долях l .

2. После проверки схемы преподавателем включите автомат модуля питания, мультиметр (красная кнопка). Изменяя выходное напряжение блока питания его регулятором, установите на R_x напряжение 3 В. Замерьте при этом напряжении величину тока, протекающего по миниблоку. Полученные данные запишите в табл. 2.1. Меняя напряжение на R_x

Таблица 2.1

№ п/п	U , В	I , мА	R_x , Ом
1	3	...	
2		...	
		...	

через каждые 1–2 В, проведите 6–8 измерений напряжений и тока и запишите их значения в табл. 2.1.

3. Отключите модуль питания и соберите второй вариант технического метода измерения сопротивлений (рис. 2.6 и 2.7).

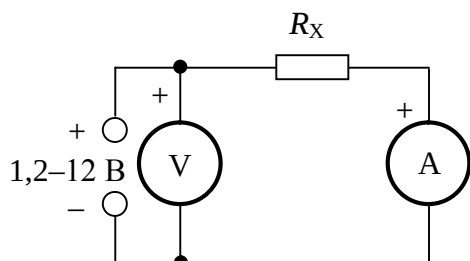


Рис. 2.6

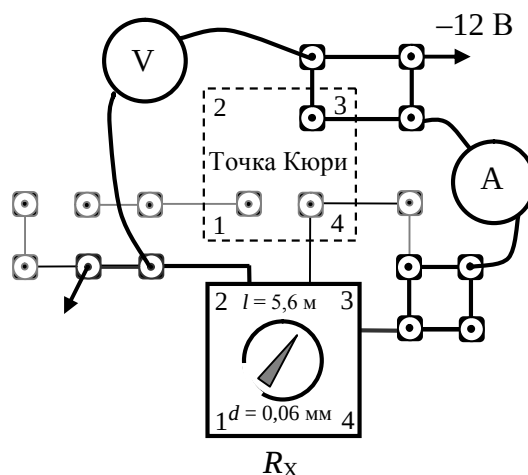


Рис. 2.7

4. После проверки схемы преподавателем проведите точно такие же измерения напряжения и тока, как в п. 2. Измеренные значения занесите в табл. 2.2.

5. Покажите результаты измерений руководителю работ. Разберите схему, оставив миниблок « R_X » на своём месте.

II. Измерение сопротивлений омметром

Оборудование: мультиметр в режиме омметра, набор сопротивлений, соединительные провода.

1. Поставьте переключатель мультиметра в положение для измерения сопротивлений и выберите предел измерений «2k». Соедините проводами выносные гнезда мультиметра V/ Ω и $\perp$ с концами сопротивления R_X . Включите мультиметр. Показания мультиметра (т.е. измеренное значение R_X) запишите в табл. 2.3.

2. Поскольку обычные резисторы выпускаются с погрешностью $\pm 5\%$ от номинала, то фактические значения сопротивлений резисторов, используемых в мостовой схеме, необходимо измерить омметром, так как при использовании их в

Таблица 2.2

№ п/п	U , В	I , мА	R_X , Ом
1	3	...	
2		...	
		...	

Таблица 2.3

№ п/п	Номинальное значение R , Ом	Измеренное значение R , Ом
1		
2		
3		
$R_X = \dots$ Ом		

на 10 000 Ом и убедитесь, что направление тока изменилось. Это означает правильность сборки схемы.

4. Переключая декады магазина сопротивлений, подберите такое сопротивление, чтобы ток на мультиметре был равен нулю. Это является «грубым» измерением.

5. Для более точного измерения переведите предел мультиметра на «2 mA». Как правило, при этом на табло мультиметра появится какое-то значение тока. Меняя сопротивление магазина в младших декадах, добейтесь нулевого показания тока. Иногда знак тока мигает, так как не имеет определённого направления. Это признак точной настройки.

6. Запишите полученное значение сопротивления R_M в табл. 2.3.

7. Выключите модуль питания.

8. Поменяйте местами R_1 и R_2 . Включите модуль питания и снова уравновесьте мост, изменяя только младшие разряды магазина сопротивлений. Предел измерения тока «2 mA».

9. Полученное значение запишите в табл. 2.4.

Таблица 2.4

№ п/п	R_1	R_2	R_M	R_1/R_2	R_X
1					
2					

Обработка результатов измерений

1. Для технического метода: по данным табл. 2.1 и 2.2 рассчитайте средние значения R_X . Оформите погрешность этого метода табличным способом.

2. В одном из вариантов технического метода посчитайте мощность, выделяемую на сопротивлении в начале измерения и в конце.

3. Для мостового метода, по расчётной формуле этого метода, найдите R_X . Определите его среднее значение и погрешности измерения.

4. Сравните между собой все четыре средние значения R_X , полученных при измерениях разными методами. Объясните, почему они разные, какое из них самое точное.

5. Рассчитайте удельное сопротивление проводника ρ , используя значение R_X , полученное наиболее точным методом (каким?).

6. Используя справочную литературу, по полученному значению удельного сопротивления определите, из какого материала изготовлен проводник.

Контрольные вопросы

1. Как определить сопротивления с помощью амперметра и вольтметра? Какие погрешности при этом возникают?

2. В чем преимущество мостовой схемы? Нарисуйте её и опишите способ измерения сопротивлений с помощью мостика Уитстона.

3. По показаниям какого прибора Вы можете установить, что мост уравновешен, что должен показывать этот прибор?
4. Выведите условие равновесия моста Уитстона.
5. При каком условии напряжения на сопротивлениях R_X и R_1 , R_M и R_2 равны?
6. Как вычисляется сопротивление при параллельном и последовательном соединении проводников?
7. Что называют удельным сопротивлением? Какова его единица измерения?
8. Как вычисляются работа и мощность постоянного тока?
9. От каких величин зависит сопротивление проводника?
10. Как изменятся уравнения (2.3), если ток в диагонали моста не равен нулю?
11. Изобразите принципиальные схемы методов измерений сопротивления.
12. Какой основной закон постоянного тока и как используется при измерениях сопротивлений?

Работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКА

Теория метода

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 $10^5 \dots 10^{14}$ Ом·м. Материалы, у которых величина удельного сопротивления больше 10^{14} Ом·м, считаются диэлектриками. Полупроводниками являются ряд элементов III–VI групп таблицы элементов Д.И. Менделеева (B, Ge, Si, As, Te ...), 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 77 К – диэлектрик, при комнатной температуре – полупроводник, а в жидком виде – проводник.

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 $T = 0$ К (-273 °C). Следующая, «пустая» разрешённая энергетическая зона называется в полупроводниках **зоной проводимости**. Энергетические зоны валентных электронов для металлов, диэлектриков и полупроводников и их заполнение при температуре $T = 0$ представлены на рис.

3.1. 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

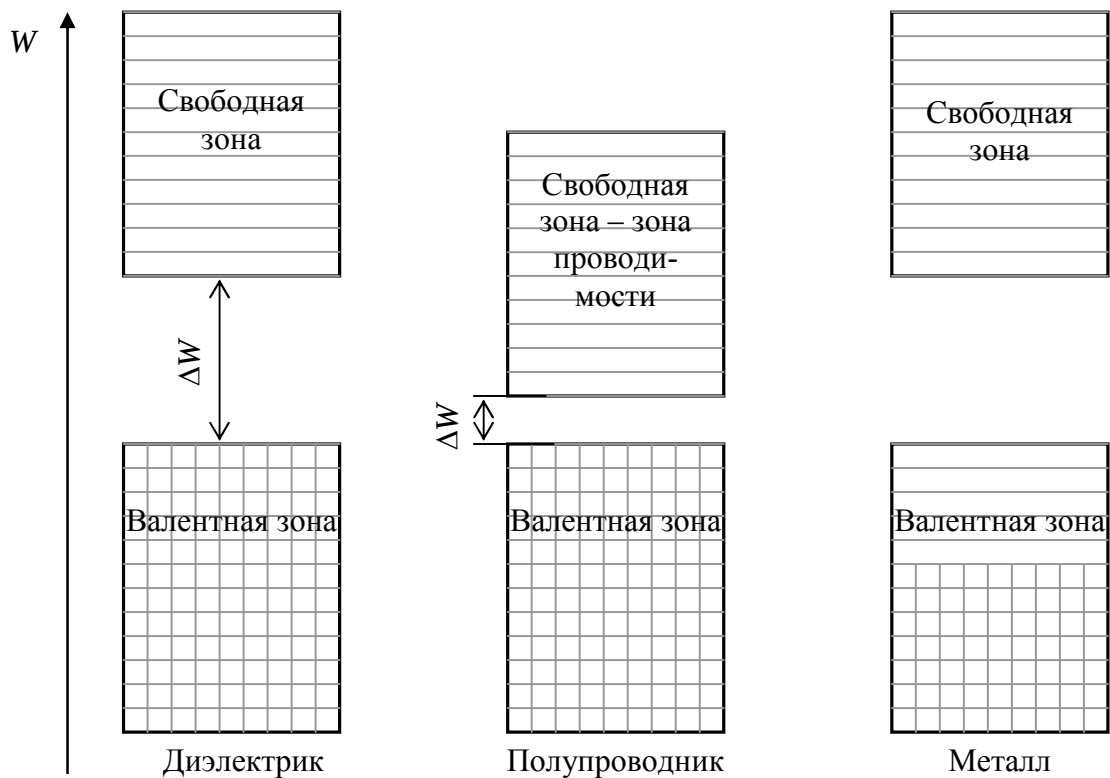


Рис. 3.1

электронами. Такими являются валентные зоны полупроводников и диэлектриков при абсолютном нуле температуры (см. рис. 3.1). При этом, согласно принципу Паули, на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины.

У металлов при $T = 0$ валентная зона заполнена частично (см. рис. 1). Например, в кристалле щелочного металла натрия 11Na в валентной зоне $3s$ электронами заполнена только половина уровней.

Ширина запрещённой зоны между зоной проводимости и валентной зоной при абсолютном нуле температуры называется энергией активации ΔW полупроводника (см. рис. 3.1). 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 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 свободный

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.

При повышении температуры энергия теплового движения электронов увеличивается (их средняя энергия теплового движения $\langle \varepsilon \rangle = 1,5kT$), и уже при температурах порядка 10^2 К некоторые электроны в полупроводниках за счет этой энергии могут перейти с верхних уровней заполненной валентной зоны в зону проводимости (рис. 3.2). 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:

$$n_e = n_0 e^{\frac{\Delta W}{kT}}. \quad (3.1)$$

Здесь T – абсолютная температура; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана.

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

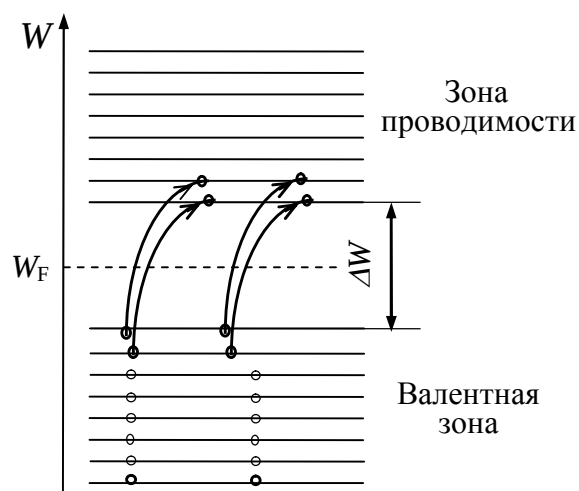


Рис. 3.2

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 – В), 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

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (3.2)$$

От концентрации свободных зарядов зависит удельная проводимость σ , обратная удельному сопротивлению ρ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.3)$$

Зависимость удельной проводимости σ от концентрации n свободных зарядов легко получить, используя закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.4)$$

и зависимость сопротивления R проводника от его длины l и площади S поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (3.5)$$

Полагая электрическое поле внутри проводника однородным, выразим напряжение U через напряжённость E и длину проводника:

$$U = El. \quad (3.6)$$

Из формул (3.3)–(3.5) легко получить закон Ома в дифференциальной форме:

$$j = \sigma E, \quad (3.7)$$

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

С другой стороны, плотность тока может быть выражена через концентрацию n свободных зарядов и скорость v_n 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 за-

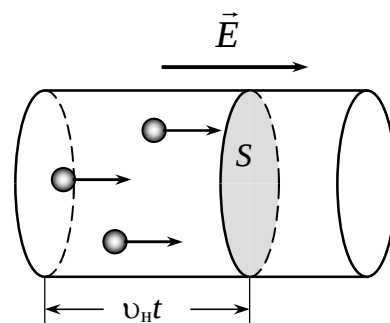


Рис. 3.3

рядов, прошедших за это время сквозь выделенное сечение (рис. 3.3). Если средняя скорость направленного движения равна 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 таких носителей пропорционально их концентрации n и объёму элемента проводника:

$$N = n v_H t S. \quad (3.8)$$

Тогда перенесённый заряд

$$q = e n v_H t S. \quad (3.9)$$

По определению, сила неизменяющегося тока

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.10)$$

Из определения плотности тока и уравнений (3.9) и (3.10) получим

$$j = n e v_H. \quad (3.11)$$

Приравнивая правые части уравнений (3.7) и (3.11) приходим к выводу, что средняя скорость направленного движения носителей тока прямо пропорциональна напряжённости электрического поля:

$$v_H = b E. \quad (3.12)$$

Коэффициент пропорциональности b называют подвижностью носителей. Подвижность зависит от типа носителей (у электронов она существенно выше, чем у дырок) и от их взаимодействия с атомами вещества.

Заменяя в (3.11) скорость через подвижность и напряжённость поля и сравнивая полученное выражение с (3.7), получаем зависимость удельной проводимости от характеристик носителей тока:

$$\sigma = n e b. \quad (3.13)$$

В металлах (проводниках) концентрация носителей не зависит от температуры, а в полупроводниках и диэлектриках она с ростом температуры быстро увеличивается (см. распределение Больцмана (3.2)) – 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:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (3.14)$$

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

График температурной зависимости сопротивления проводника в координатах $R - t$ изображается прямой линией, угловой коэффициент которой равен $R_0\alpha$. Определив из графика угловой коэффициент K_1 и R_0 , можно определить значение ТКС исследуемого проводника:

$$\alpha = \frac{\hat{E}_1}{R_0}. \quad (3.15)$$

Для полупроводника зависимость сопротивления от температуры экспоненциальная:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}}. \quad (3.16)$$

Эта формула получается путём несложных преобразований из выражений (3.3), (3.5) и (3.2) с заменой $1/(S n_0 e b) = R_0$.

Прологарифмируем формулу (3.16):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (3.17)$$

Полученная зависимость $\ln R$ от $1/T$ является линейной, и график зависимости $\ln R$ от обратной температуры T^{-1} будет представлять собой некоторую прямую, угловой коэффициент которой $K_2 = \Delta W/(kT)$ пропорционален энергии активации. Следовательно, найдя из графика угловой коэффициент, можно вычислить энергию активации

$$\Delta W = 2K_2 k. \quad (3.18)$$

Выполнение работы

Оборудование: миниблоки «Ключ», «ТКС», мультиметр, стрелочный вольтметр, датчик температуры, модуль питания 1,2...12 В, соединительные провода.

1. Соберите принципиальную схему установки (рис. 3.4) по монтажной схеме (рис. 3.5). Для этого найдите на наборном поле гнезда для установки миниблоков «Ключ» и «ТКС» (обозначены пунктиром) и аккуратно вставьте в них миниблоки, соблюдая правильность расположения номеров контактов (в гнездо 1 должен попасть 1-й контакт миниблока, во 2-е – 2-й контакт и т.д.). В качестве измерителя сопротивлений используйте мультиметр: выносные гнезда V/Ω и COM , предел измерений – «2k». Для установки и контроля напряжения используйте стрелочный вольтметр. При сборке схемы соблюдайте правильную полярность приборов,

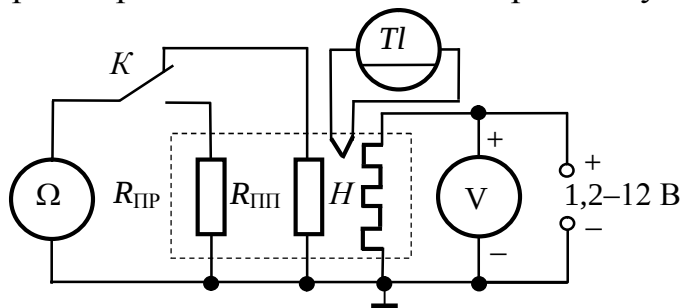


Рис. 3.4

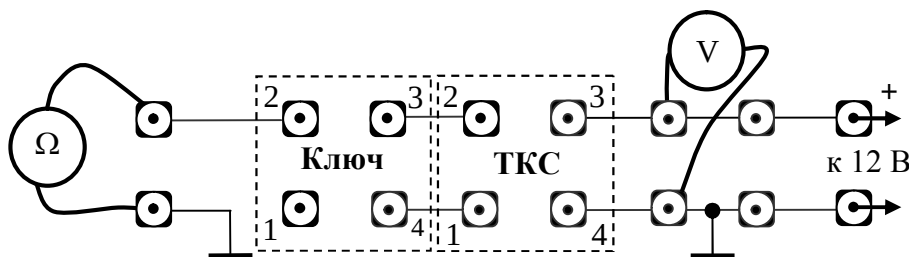


Рис. 3.5

она указана на схеме.

2. Вставьте в отверстие миниблока «ТКС» датчик температуры на глубину 5–8 мм (до упора) и покажите собранную схему преподавателю.

3. Замерьте сопротивление проводника и полупроводника при комнатной температуре. При положении «Ключа» – «влево» к омметру подключается полупроводник, «вправо» – металлический проводник. Полученные значения запишите в таблицу.

4. Включите модуль питания. Установите ручкой регулировки питающее напряжение 8–9 В. Наблюдайте за показаниями термометра и омметра, и через каждые 4–5 °С записывайте одновременно (переключая тумблер «Ключ») значения сопротивлений проводника, полупроводника и температуры в табл. 1. Измерения проводите до 65 °С, а нагрев образцов на два-три градуса больше, чтобы замерить сопротивления при 65 °С, но теперь уже при остывании.

5. Отключите питание и проведите предыдущие измерения в тех же температурных точках при охлаждении образцов.

7. По окончании работы покажите результаты измерения преподавателю. Выключите модуль питания и мультиметр, разберите схему.

Таблица 3.1

№ п/п	T, °С	R, Ом					
		Нагревание		Охлаждение		<R>	
		полупро- водник	провод- ник	полупро- водник	провод- ник	полупро- водник	провод- ник
1							
2							
3							
...							
10	65°						

Обработка результатов измерений

I. Для металлического проводника ($R_{\text{пр}}$)

1. По данным из табл. 3.1 постройте график зависимости сопротивления проводника $\langle R_{\text{пр}} \rangle$ от температуры в градусах Цельсия. За начало координат возьмите точку 0 °С по оси температур и ($R_{\text{комн.}} - 1 \text{ Ом}$) по оси R. Выбранные Вами масштабы должны обеспечить угол наклона графика не менее 35...40°.

2. По графику определите сопротивление проводника при температуре 0 °С и значение углового коэффициента K_1 . Расчёты представьте на свободном месте диаграммы R(T).

3. По найденным a_1 и R_0 определите температурный коэффициент сопротивления исследованного образца.

4. Сравните полученное значение ТКС со справочными данными и определите, из какого материала изготовлен проводник.

II. Для полупроводника ($R_{\text{пп}}$)

1. По данным опыта (см. табл. 3.1) постройте график зависимости среднего значения сопротивления $\langle R_{\text{ПП}} \rangle$ при каждой температуре от её величины. Точку пересечения осей графика выбирайте, исходя из условия оптимального использования пространства.

2. По результатам измерений (см. табл. 3.1) вычислите абсолютную температуру T , обратную температуру $T^{-1} = 1/T$ и $\ln \langle R_{\text{ПП}} \rangle$ и заполните табл. 3.2.

3. Постройте график зависимости $\ln \langle R_{\text{ПП}} \rangle$ от обратной температуры T^{-1} и найдите угловой коэффициент K_2 в единицах СИ (точка пересечения осей графика – см. п. 1).

Таблица 3.2

№ п/п	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	$\ln \langle R_{\text{ПП}} \rangle$
1			
2			
...			

4. Вычислите энергию активации полупроводника в джоулях, а затем выразите её в электрон-вольтах.

5. Найдите в справочной литературе энергию активации германия и кремния, сопоставьте с полученным Вами значением ΔW и определите, из чистого или примесного вещества изготовлен полупроводник.

6. Сделайте обобщающий вывод по Вашим измерениям, расчётам и графикам о характере температурной зависимости сопротивления полупроводников и металлов. Сопоставьте полученные результаты с теоретическими положениями.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются металлы, диэлектрики и полупроводники по своим электрическим свойствам?

2. Какова зависимость сопротивления полупроводников и металлов от температуры? Назовите причины различия этих зависимостей.

3. Какая физическая величина имеет аббревиатуру «ТКС»? В каких единицах она измеряется?

4. Выведите расчётную формулу для определения ТКС по угловому коэффициенту графика $R(T)$.

5. Как образуются энергетические зоны при объединении атомов в кристаллах? Каковы названия этих зон? Какова их заполненность электронами в металлах, диэлектриках и полупроводниках при $T = 0$?

6. Что называют энергией активации полупроводника, в каких единицах она измеряется? Какие величины зависят от этой характеристики полупроводника?

7. Дайте определения собственной и примесной, электронной и дырочной проводимостей.

8. Выведите формулы (3.7), (3.12), (3.13).

9. Каковы физический смысл и единицы измерения подвижности b ? Как она зависит от температуры?

10. Каков физический смысл величин n_0 и R_0 в формулах (3.1) и (3.16)?

Работа № 4

НАБЛЮДЕНИЕ СИГНАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Краткая теория

Осциллограф – это прибор для наблюдения зависимости между двумя или несколькими быстро меняющимися величинами, характеризующими какой-либо физический процесс. Поскольку осциллограф работает только с электрическими сигналами, то физические величины неэлектрической природы должны быть предварительно преобразованы в электрические с помощью **датчиков** (датчики давления, скорости, перемещения, температуры, освещённости и др.). Наиболее распространены **электронно-лучевые осциллографы**, в которых электрические сигналы, пропорциональные изменению исследуемых величин, поступают на взаимно перпендикулярные отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. На экране трубки наблюдают, измеряют, фотографируют графическое изображение зависимости – **осциллограмму**.

Основной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), в которой используется отклонение пучка электронов электрическим полем. Электронно-лучевая трубка представляет собой стеклянный баллон с несколькими электродами и флюоресцирующим экраном. Воздух из баллона ЭЛТ откачан до давления примерно 10^{-4} Па. Упрощённая схема электронно-лучевой трубки представлена на рис. 4.1.

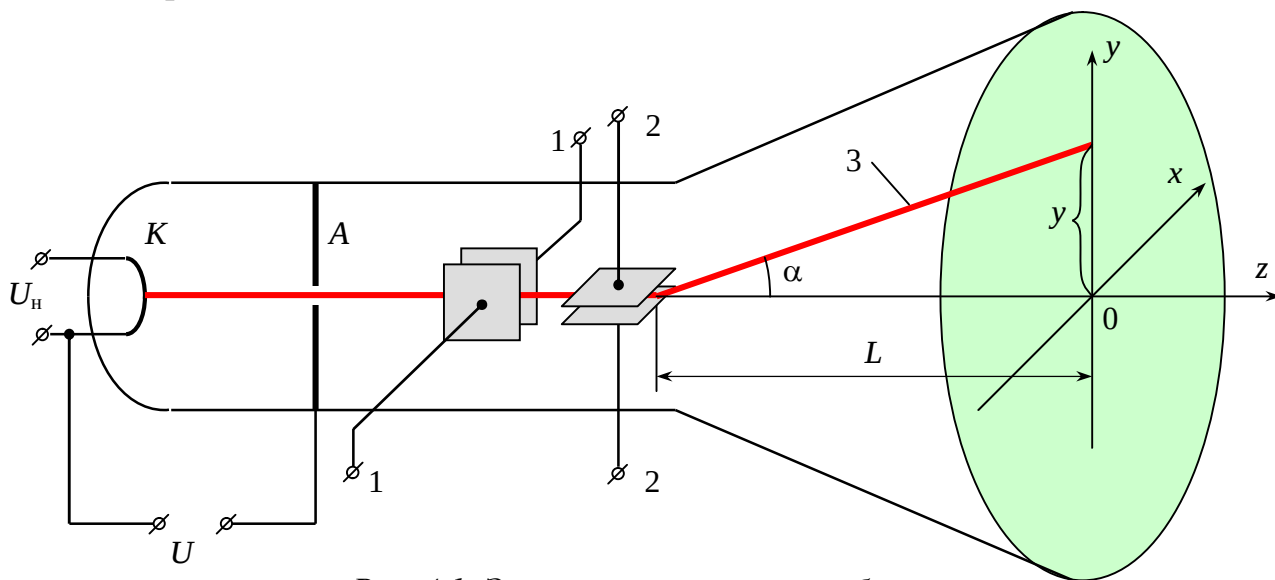


Рис. 4.1. Электронно-лучевая трубка:

K – катод, A – анод, 1-1 – горизонтально отклоняющие пластины X ,
2-2 – вертикально отклоняющие пластины Y , 3 – электронный луч y –

В *электронном прожекторе* ЭЛТ формируется электронный луч, который вызывает свечение экрана в месте попадания электронного пучка – на экране появляется светящаяся точка. Источником электронов является катод K , нагреваемый

от источника накального напряжения U_n . Между анодом A и катодом прикладывается высокое напряжение U (порядка нескольких киловольт), ускоряющее электроны. Нетрудно подсчитать, что электроны после анода будут иметь скорость v_z порядка 10^7 м/с и пролетят расстояние L от отклоняющих пластин до экрана за очень малое время $t = L/v_z$, что позволяет наблюдать сигналы с частотой порядка 10^7 – 10^8 Гц.

Пройдя узкое отверстие в аноде, электроны дальше движутся по инерции вдоль оси OZ и на пути к экрану пролетают через две пары отклоняющих пластин. Если на вертикально отклоняющие пластины Y подать переменное напряжение U_y , то под действием создаваемого между пластинами электрического поля пучок электронов будет колебаться в вертикальной плоскости и светящееся пятно будет смещаться вдоль оси OY , образуя на экране вертикальную светящуюся линию. При подаче напряжения U_x на горизонтально отклоняющие пластины X на экране вычерчивается горизонтальная линия. Если напряжение подаётся на обе пары отклоняющих пластин, то электронный луч «рисует» на экране более сложные линии, форма которых определяется зависимостями $U_x(t)$ и $U_y(t)$.

При исследовании зависимости какой-либо физической величины от времени исследуемый сигнал поступает на вход Y усилителя вертикального отклонения (УВО) и отклонение y (см. рис. 4.1) по вертикали изменяется прямо пропорционально напряжению U_y на входе осциллографа:

$$y = h_y U_y, \quad (4.1)$$

где h_y – коэффициент пропорциональности, который зависит от выбора коэффициента усиления УВО.

Равномерное горизонтальное перемещение луча обеспечивает генератор развёртки, с которого на горизонтально отклоняющие пластины X подаётся напряжение U_x , прямо пропорциональное времени t :

$$U_x = kt. \quad (4.2)$$

Отклонение по горизонтали

$$x = h_x U_x = h_x kt. \quad (4.3)$$

В результате сложения движений луча по горизонтали и вертикали на экране рисуется график зависимости напряжения U_y от времени. Например, если напряжение изменяется по гармоническому закону

$$U_y = U_0 \cos \omega t, \quad (4.4)$$

то на экране должна отобразиться синусоида, уравнение которой

$$\phi = h_y U_0 \cos \left(\frac{\omega}{h_x k} x \right) \quad (4.5)$$

нетрудно получить из формул (4.1) и (4.4), заменив t по формуле (4.3).

Для получения воспринимаемого изображения процесс развёртки, то есть равномерный пробег луча по горизонтали, должен происходить многократно, для чего на пластины X от генератора развёртки подаётся пилообразное напряжение (рис. 4.2б): линейное нарастание и мгновенный спад до нуля. Тогда изображение будет воспроизводиться многократно и его сможет зафиксировать наш довольно инерционный глаз. Чтобы синусоида на экране была неподвижной, она должна

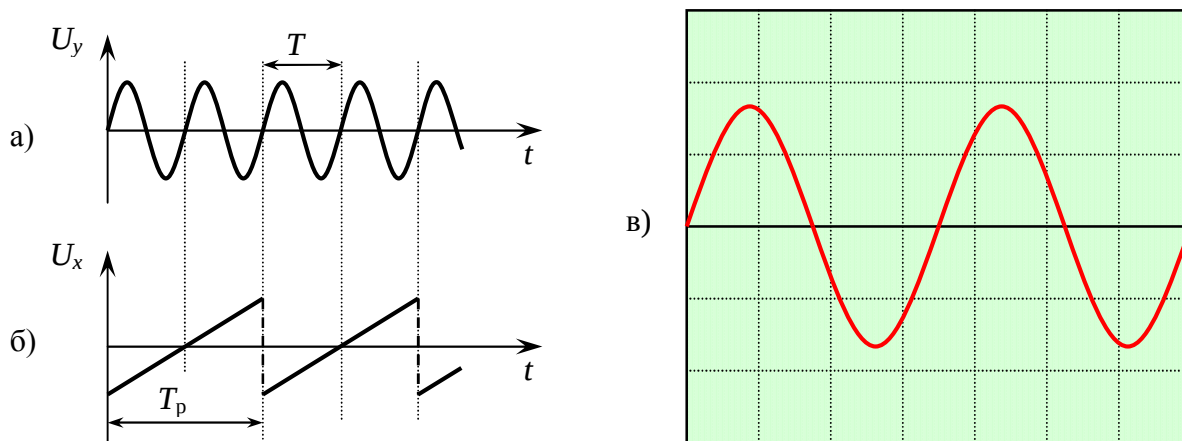


Рис. 4.2

появляться при каждом пробеге на одном и том же месте, для чего развёртку нужно синхронизировать с сигналом, либо устанавливать период T_p пилообразного напряжения, кратный периоду T наблюдаемого сигнала.

На рис. 4.2а,б представлены графики напряжений, подаваемых на отклоняющие пластины осциллографа для случая, когда период развёртки в 2 раза больше периода колебаний сигнала: $T_p = 2T$. При таком соотношении периодов осциллограмма будет иметь вид, показанный на рис. 4.2в.

Зная масштабы по осям OX и OY , по делениям сетки на экране можно определить период и амплитуду колебаний переменного напряжения. Например, если на рис. 4.2в масштаб по горизонтальной оси 2,0 мс на деление (развёртка 2,0 мс/дел.), а по вертикальной оси 5 В/дел., то сигнал имеет следующие параметры: период T примерно 7 мс; амплитуда U_0 около 8 В, частота ν приблизительно 140 Гц.

Действующее значение U_d изменяющегося напряжения U определяется как корень квадратный из среднего значения квадрата напряжения за период колебаний:

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt} . \quad (4.6)$$

Для синусоидального напряжения (4.4)

$$\int_0^T (U_0 \cos \omega t)^2 dt = \frac{U_0^2}{2} T \quad \text{и} \quad U_d = \frac{U_0}{\sqrt{2}}, \quad (4.7)$$

где U_0 – амплитудное значение напряжения. Так же соотносятся действующее и амплитудное значения переменного тока: $I_0 = \sqrt{2} I_d$. На рис. 4.2в U_d приблизительно равно 5,7 В.

Для несинусоидальных напряжений и токов отношение U_0/U_d не равно $\sqrt{2}$, но всегда больше единицы. Можно показать, что в случае прямоугольных однополярных импульсов отношение U_0/U_d равно скважности (см. с. 17).

С появлением быстродействующих персональных компьютеров для наблюдения переменных величин всё чаще пользуются виртуальным осциллографом, ко-

торый может не только показывать вид зависимости сигнала от времени, но и точно определять разнообразные параметры сигнала: эффективное значение, период, частоту, нелинейные искажения, спектр, амплитуды гармоник и др. Для представления графика зависимости U_y от U_x на мониторе компьютера аналоговый (то есть непрерывно изменяющийся) сигнал с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуют в набор цифр и затем обрабатывают с помощью специальной компьютерной программы.

На нашем стенде лабораторные работы с виртуальным осциллографом проводятся с помощью модуля «Входы аналоговые». Он состоит из аппаратной части и программного обеспечения «Oscillograf».

Аппаратная часть выполнена в виде передней панели с гнездами для подключения сигналов. Устройство позволяет одновременно наблюдать и исследовать 4 сигнала, подаваемых на входы A1, A2, A3 и A4 (см. описание модулей, с. 19, рис.

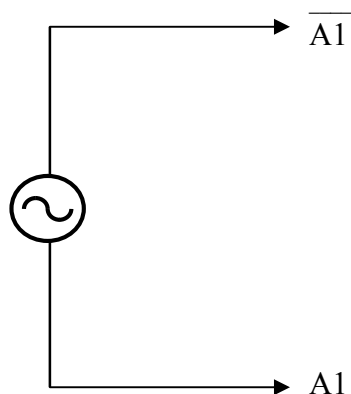


Рис. 4.3

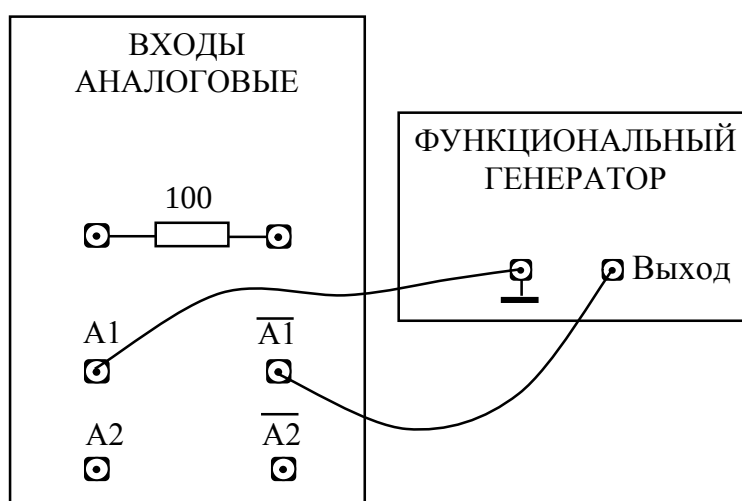


Рис. 4.4

12). На обратной стороне модуля расположены разъёмы для подключения к электрической сети и к персональному компьютеру.

Выполнение работы

Оборудование: модуль питания, функциональный генератор, соединительные провода, программное обеспечение «Осциллограф».

I. Наблюдение периодических сигналов и определение их параметров

1. Соберите электрическую цепь (рис. 4.3) по монтажной схеме (рис. 4.4) Для этого просто соедините выходные гнезда модуля «Функциональный генератор» с гнездами A1 и $\overline{A1}$ модуля «Входы аналоговые».

2. После проверки схемы преподавателем включите питание стенда и тумблер «Вкл.» функционального генератора.

3. Ручки «Амплитуда», «Частота», «Смещение» на функциональном генераторе установите в крайнее левое положение.

4. Выберите синусоидальную форму сигнала, диапазон «100 Гц». В этом диапазоне частота меняется примерно от 10 до 190 Гц, что видно на табло генератора в левом верхнем углу, если поворачивать ручку «Частота».

5. Найдите на диске «С» компьютера программу [Осциллограф] и запустите её: Oscillograf.exe\Настройка\analog U. На мониторе появится изображение пустого экрана осциллографа, слева внизу будет находиться панель управления работой осциллографа (рис. 4.5).

6. На этой панели мышкой выберите следующие режимы работы: «Автомат»; «Канал A1»; развёртка – 2,0 мс/дел; усиление 1,0 В/дел; синхронизация – по переднему фронту; отображение значений – «Действующее».

7. Установите частоту генератора в пределах 100–120 Гц, ручку «Амплитуда» – в среднее положение.

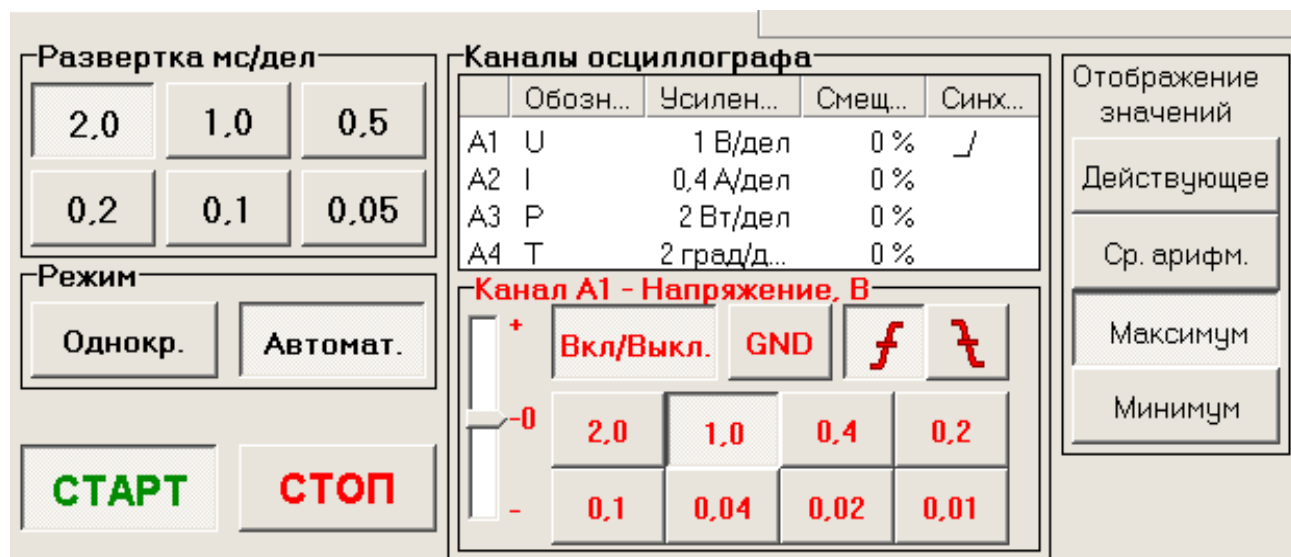


Рис. 4.5

8. Нажмите кнопку «Старт» (левой клавишей «мышки»). На экране должна появиться синусоида (красная линия). Справа вверху на экране отобразится действующее значение напряжения U_d , поступающего на вход A1.

9. Поворачивая ручки «Амплитуда» и «Частота» наблюдайте, как изменяются изображение и действующее напряжение. Запишите свои впечатления в черновик.

10. Установите произвольные значения амплитуды и частоты и в ходе последующих действий не изменяйте их. Показания частотомера по цифровому табло запишите в табл. 4.1 и нажмите кнопку «Стоп». Если синусоида на экране ранее «дёргалась», то теперь она должна стать неподвижной. По делениям на сетке экрана определите амплитуду и период колебаний. Значения запишите в табл. 4.1. Также запишите в соответствующую ячейку таблицы действующее напряжение U_d по показаниям на экране.

11. Выберите на функциональном генераторе треугольный сигнал и нажмите кнопку «Старт». На экране должны появиться следующие друг за другом треугольники – так называемая «пила».

12. Повторите с треугольным сигналом такие же действия как с синусоидой по пунктам 9. и 10. Полученные данные также запишите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Форма сигнала	Частота, Гц	Амплитуда U_0 , В	Период T , мс	$\frac{1}{\bar{O}}$, c^{-1}	Действ. значение U_d , В	Отношение U_0/U_d
						
						

13. Выберите на функциональном генераторе прямоугольный сигнал и нажмите кнопку «Старт». На экране должны появиться прямоугольные импульсы.

14. Тумблер «Смещение» переведите в положение «+», ручками «Амплитуда» и «Смещение» получите на экране монитора положительные прямоугольные импульсы с амплитудным напряжением 2...4 В. Изменяя частоту генератора, наблюдайте и запишите, как изменяются осциллограммы и действующее напряжение. Такие же наблюдения проведите, изменяя скважность импульсов.

15. Выключите тумблер «Скважность», установите произвольные значения амплитуды и частоты и в ходе последующих действий не изменяйте их. Показания частотомера по цифровому табло запишите в табл. 4.2.

16. Нажмите кнопку «Стоп». По делениям на сетке экрана определите амплитуду, период колебаний и длительность τ положительных импульсов. Значения запишите в табл. 4.2. Также запишите действующее напряжение U_d по показаниям на экране.

16. Включите тумблер «Скважность», нажмите кнопку «Старт». Ручкой «Скважность» установите произвольную длительность импульсов $\tau < 0,5T$ и повторите измерения по п. 15. Данные измерений запишите в табл. 4.2.

17. Нажмите кнопку «Старт», установите другую длительность импульсов $\tau > 0,5T$. Повторите измерения по п. 15.

Таблица 4.2

Форма сигнала	Частота, Гц	Амплитуда U_0 , В	Период T , мс	Длит. имп. τ , мс	Скважность S	Действ. значение U_d , В	Отношение U_0/U_d
Прямоугольная							

Обработка результатов измерений

Для синусоидального и треугольного сигналов

1. По данным измерений в табл. 4.1 вычислите обратный период $1/T$ и отношение амплитудного напряжения к действующему.

2. Сравните $1/T$ с частотой сигнала, а отношение U_0/U_d с $\sqrt{2}$.

Для прямоугольного сигнала

1. По данным измерений в табл. 4.2 вычислите скважность $S = T/\tau$ и отношение амплитудного напряжения к действующему.

2. Сравните между собой скважность и отношение U_0/U_d .

В выводе отдельно для синусоиды, треугольника и прямоугольника опишите, как влияет изменение параметров сигнала на его отображение на экране осциллографа, на величину амплитуды напряжения и на его действующее значение.

Контрольные вопросы

1. Какую физическую величину подают непосредственно на вход осциллографа? Можно ли измерять им неэлектрические величины?

2. Нарисуйте ЭЛТ и объясните назначение и роль элементов трубки в получении изображения на экране осциллографа.

3. Какие напряжения нужно подать на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины осциллографа, чтобы получить на экране синусоиду?

4. Что называется частотой, периодом, и амплитудой электрического сигнала? В каких единицах они измеряются?

5. Какие условия необходимо выполнить для получения неподвижного изображения на экране?

6. Выведите формулу (4.5).

7. Определите амплитуду, период, частоту входного сигнала, если: а) масштаб по оси Y составляет 0,5 В/дел. при полном размахе сигнала 4 клетки; б) масштаб по оси X – 1,0 мс/дел. и наблюдаемый период развёртки занимает 3,5 клетки?

8. Какое изображение появится на экране осциллографа, если: а) на вход Y подаётся постоянное напряжение, например 5 В, на вход X – ничего не подаётся; б) на вход Y – синусоидальное напряжение, на вход X – ничего; в) на вход Y – ничего, на вход X – обычное напряжение развёртки (какое оно по форме сигнала?); г) на вход Y – положительное (или отрицательное) постоянное напряжение, например 3 В, на вход X – напряжение развёртки; е) на входы Y и X – напряжения с одинаковыми частотами и с одинаковыми амплитудами? Нарисуйте Ваши ответы в виде осциллограмм и обоснуйте рисунки.

9. Что такое амплитудное и действующее значения синусоидального тока, напряжения? Выведите формулу (4.7). Если амплитудное напряжение равно, например, 5,6 В, то чему равно действующее напряжение?

10. Что такое скважность? Для какой формы сигналов вводится это понятие?

11. В чём отличие виртуального осциллографа от электронного?

12. С помощью какого модуля преобразуется и подаётся сигнал на вход виртуального осциллографа в данной лабораторной работе?

13. Какие виды сигналов выдаёт функциональный генератор (см. с. 15–16) и каков диапазон его частот?

14. В каких единицах отображается информация на табло генератора в положениях кнопок: а) частота; б) период?

15. Какова роль тумблера смещения функционального генератора (см. с. 16)?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Краткая теория

Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды q_1 и q_2 , то между ними возникает некоторая разность потенциалов $\Delta\varphi$, зависящая от величин зарядов и геометрии проводников. Разность потенциалов $\Delta\varphi$ между двумя точками в электрическом поле часто называют напряжением и обозначают буквой U . Наибольший практический интерес представляет случай, когда заряды проводников одинаковы по модулю и противоположны по знаку: $q_1 = -q_2 = q$. В этом случае можно ввести понятие электрической ёмкости.

Электроёмкостью системы из двух проводников называется физическая величина, определяемая как отношение заряда q одного из проводников к разности потенциалов (напряжению) U между ними:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (5.1)$$

В системе СИ единица электроёмкости называется фарад (Ф): $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$.

Величина электроёмкости зависит от формы и размеров проводников и от свойств диэлектрика, разделяющего проводники. Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства. Такие системы называются конденсаторами, а проводники, составляющие конденсатор, называются обкладками.

Простейший конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделённых слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется плоским. Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами (рис. 5.1), однако вблизи краёв пластин и в окружающем пространстве также возникает сравнительно слабое электрическое поле, которое называют полем рассеяния. В целом ряде задач можно пренебрегать полем рассеяния и полагать, что электрическое поле конденсатора целиком сосредоточено между его обкладками. Тогда, используя теорему Гаусса и связь между напряжённостью и потенциалом для однородного поля, можно вычислить ёмкость плоского конденсатора, которая прямо пропорциональна площади S каждой пластины, и обратно пропорциональна расстоянию d [5, с. 34]:

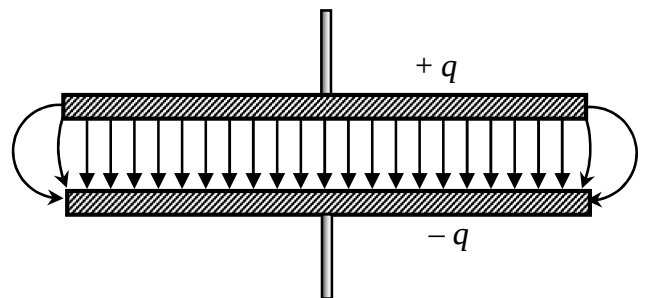


Рис. 5.1

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}. \quad (5.2)$$

Измерение ёмкости конденсатора можно осуществить различными методами. Самый очевидный способ – использовать определяющую формулу (1). Для этого нужно измерить заряд конденсатора и напряжение на его обкладках. Напряжение можно измерить вольтметром, который должен иметь очень большое сопротивление, в идеале $R_V \rightarrow \infty$. Тогда заряд на одной обкладке конденсатора будет равен заряду, прошедшему по цепи (рис. 5.2), если пренебречь током, проходящим по вольтметру. Так как, по определению, сила тока

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (5.3)$$

то заряд Δq , прошедший по цепи за время $\Delta t = t_2 - t_1$, равен интегралу

$$\Delta q = \int_{t_1}^{t_2} i dt. \quad (5.4)$$

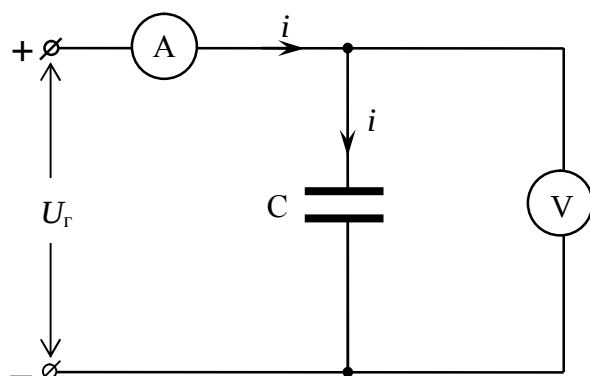


Рис.

При постоянном напряжении U_r генератора напряжение U на конденсаторе при зарядке увеличивается, приближаясь к U_r , а зарядный ток уменьшается от максимального значения до нуля по экспоненте. Соответствующие графики при зарядке двух конденсаторов разной ёмкости представлены на рис. 5.3 и 5.4.

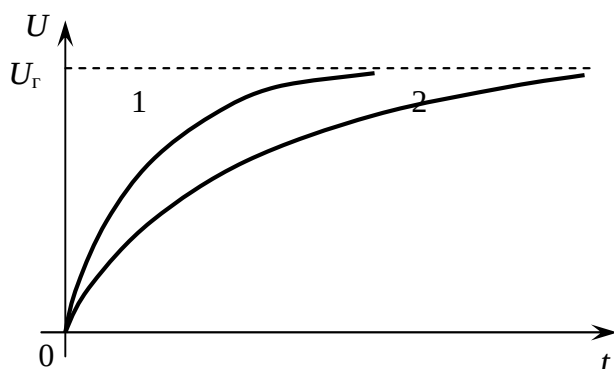


Рис. 5.3

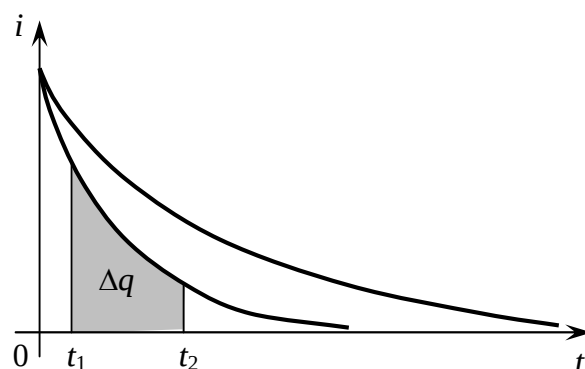


Рис. 5.4

Изменение заряда конденсатора легко определить, если заряжать его током, сила I которого не изменяется. Тогда заряд конденсатора будет увеличиваться прямо пропорционально времени зарядки:

$$\Delta q = I \Delta t. \quad (5.5)$$

Напряжение на конденсаторе при этом условии будет изменяться также пропорционально времени, и ёмкость можно определить, поделив $I \Delta t$ на соответствующее изменение напряжения ΔU :

$$C = \frac{I \Delta t}{\Delta U}. \quad (5.6)$$

Так как процессы зарядки – разрядки конденсатора протекают очень быстро, то наблюдения и измерения проводят с помощью осциллографа, на экране которого одновременно отображаются две зависимости: $U(t)$ и $i(t)$. Для вычисления ёмкости по формуле (6) зависимость $i(t)$ должна иметь горизонтальный участок, на протяжении которого сила I зарядного тока не изменяется, и напряжение $U(t)$ линейно зависит от времени (рис. 5.5).

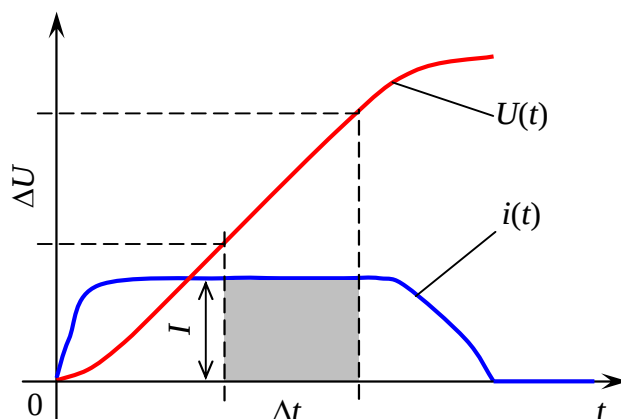


Рис. 5.5

Для реализации данного способа измерения ёмкости на вход схемы (см. рис. 2) с некоторой частотой подаются прямоугольные импульсы напряжения. Зарядный ток проходит через специальное устройство – стабилизатор тока, которое при достаточном напряжении импульсов обеспечивает постоянство тока в течение некоторой части длительности импульсов (см. рис. 5.5).

Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов. При параллельном соединении конденсаторов (рис. 5.6) напряжения на конденсаторах одинаковы: $U_1 = U_2 = U$, а заряды равны $q_1 = C_1 U$ и $q_2 = C_2 U$. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор электроёмкости C , заряженный зарядом $q = q_1 + q_2$ при напряжении между обкладками, равном U . Из определяющей формулы (1) получаем

$$C = \frac{q_1 + q_2}{U}, \text{ или } C = C_1 + C_2. \quad (7)$$

При последовательном соединении (рис. 5.7) одинаковыми оказываются заряды

$$U_1 = \frac{q}{C_1} \text{ и}$$

ды обоих конденсаторов: $q_1 = q_2 = q$, а напряжения на них равны

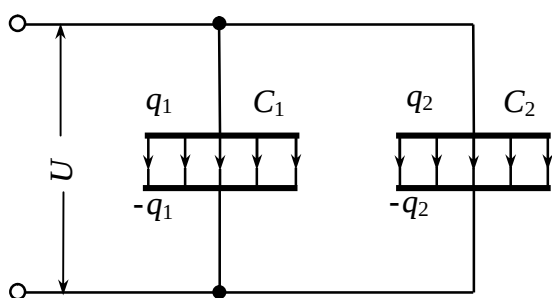


Рис. 5.6

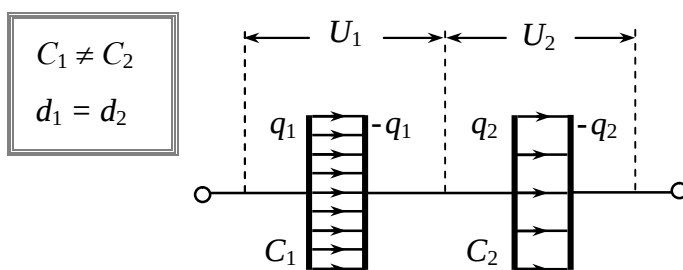


Рис. 5.7

$U_2 = \frac{q}{C_2}$. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряд которого равен q при напряжении между обкладками $U = U_1 + U_2$. Следовательно,

$$C = \frac{q}{U_1 + U_2} \text{ или } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (8)$$

При параллельном соединении конденсаторов складываются ёмкости, а при последовательном соединении складываются их обратные величины.

Формулы для параллельного и последовательного соединения остаются справедливыми при любом числе конденсаторов, соединённых в батарею.

Выполнение работы

Оборудование: функциональный генератор, два миниблока «Конденсатор», миниблок «Стабилизатор тока», модуль питания, соединительные провода, виртуальный осциллограф.

I. Наблюдение переходных процессов в конденсаторе.

1. Соберите электрическую цепь (рис. 5.8) по монтажной схеме (рис. 5.9) Для этого на наборном поле найдите место, отведённое для миниблока, и вставьте в найденные гнезда один из миниблоков «Конденсатор». Проводами соедините его с модулем «Функциональный генератор» и модулем «Аналоговые входы». Отдельным проводом закоротите конденсатор.

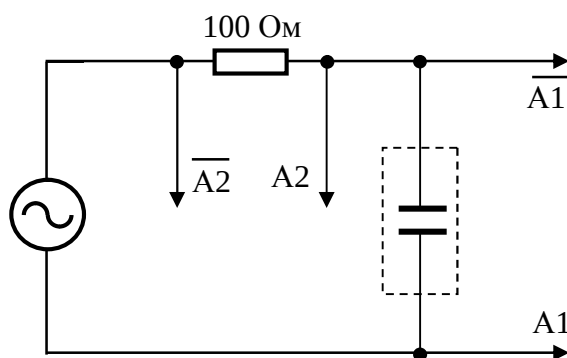


Рис. 5.8

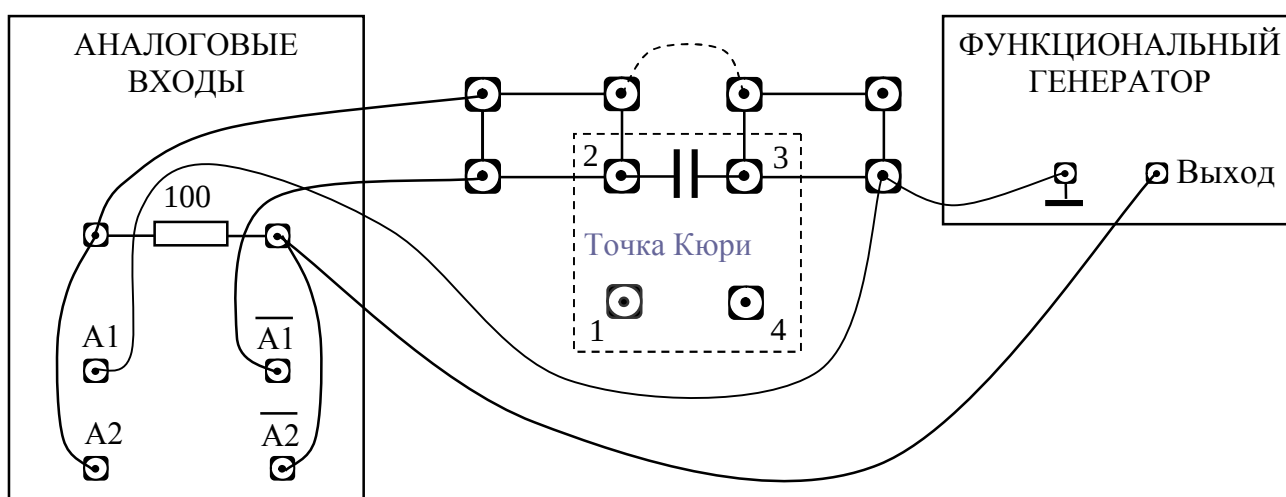


Рис. 5.9

2. После проверки схемы преподавателем включите питание стенда. Выберите прямоугольную форму сигнала, диапазон «100 Гц».

5. Ручки «Амплитуда», «Частота», «Смещение» на функциональном генераторе установите в крайнее левое положение. Покрутите ручку «Частота», в этом диапазоне частота меняется примерно от 10 до 190 Гц, что видно на табло генератора в левом верхнем углу.

6. Найдите на диске «С» компьютера программу [Осциллограф] и запустите её: Oscillograf.exe\Настройка\analog U.

На мониторе появится изображение пустого экрана осциллографа, слева внизу будет находиться панель управления работой осциллографа (рис. 5.10).

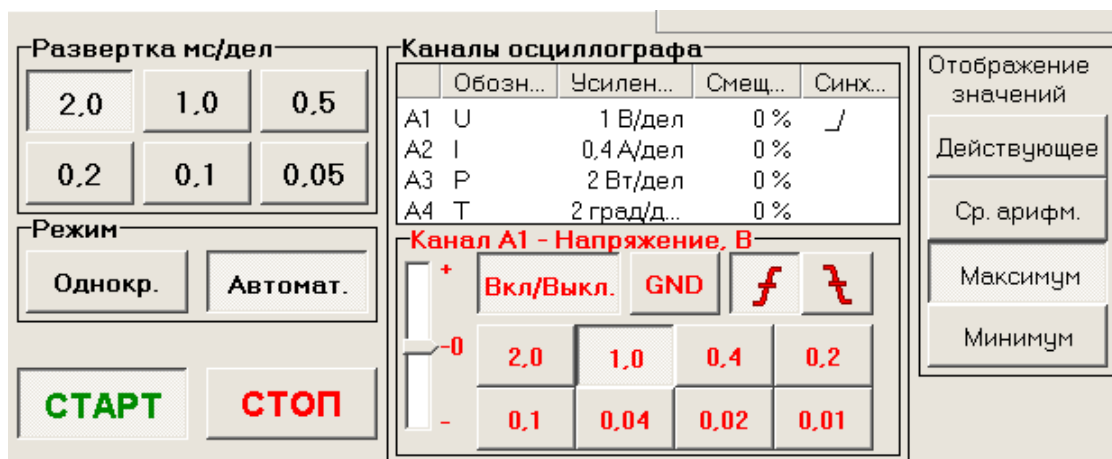


Рис.

7. Мышкой выберите следующие режимы работы: развёртка – 2,0 мс/дел; канал A1 – усиление 1 В/дел; синхронизация – по переднему фронту; канал A2 – усиление 0,4 А/дел; отображение значений – «Максимум».

8. Установите частоту генератора в пределах 100–120 Гц, ручку «Амплитуда» – в среднее положение.

9. Нажмите кнопку «Старт» (левой клавишей «мышки»). На экране должны появиться прямоугольные импульсы тока генератора (синяя линия).

10. Тумблер «Смещение» переведите в положение «+», ручками «Амплитуда» и «Смещение» получите на экране монитора положительные прямоугольные импульсы с амплитудой 2...4 В. Зарисуйте картину, соблюдая масштаб. Запишите значение частоты. Изменяя частоту генератора, наблюдайте и запишите, как изменяются осциллограммы.

11. Верните начальную частоту, снимите закоротку. Посмотрите, как изменилась картина. Форма импульсов тока и напряжения должна принять вид, как на рис. 5.11. Из-

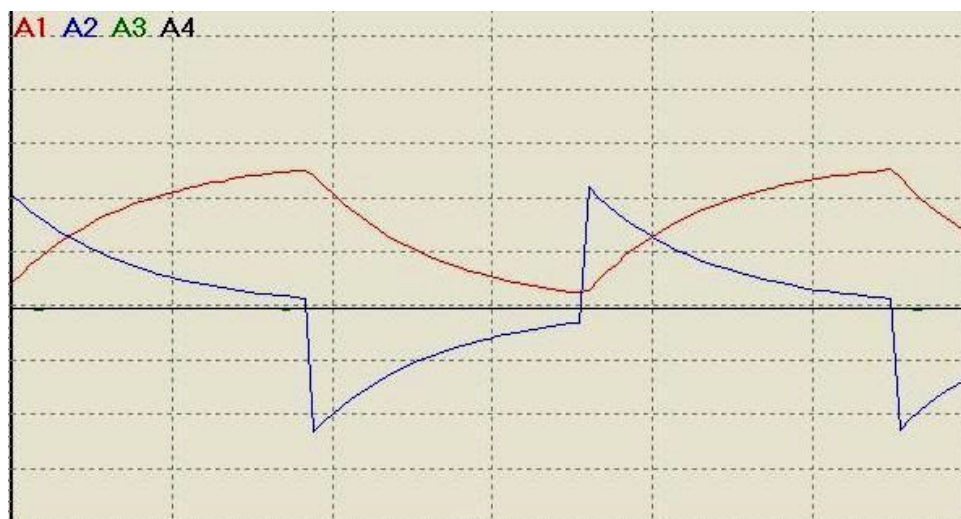


Рис. 5.11

меняя частоту, наблюдайте изменение формы сигналов.

12. Верните начальную частоту, вставьте вместо закоротки второй конденсатор. Посмотрите, как изменилась картина, и зарисуйте все осциллограммы. Нажмите мышкой кнопку «Стоп» для остановки программы «Осциллограф». Отключите питание стенда. Сделайте вывод по своим наблюдениям.

II. Определение ёмкости одного конденсатора.

1. Отсоедините второй конденсатор. Вставьте миниблок «Стабилизатор тока», как показано на схемах (рис. 5.12 и 5.13).

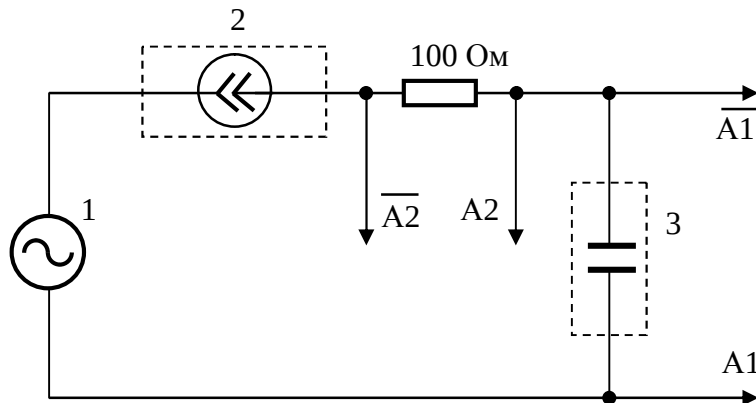


Рис. 5.12

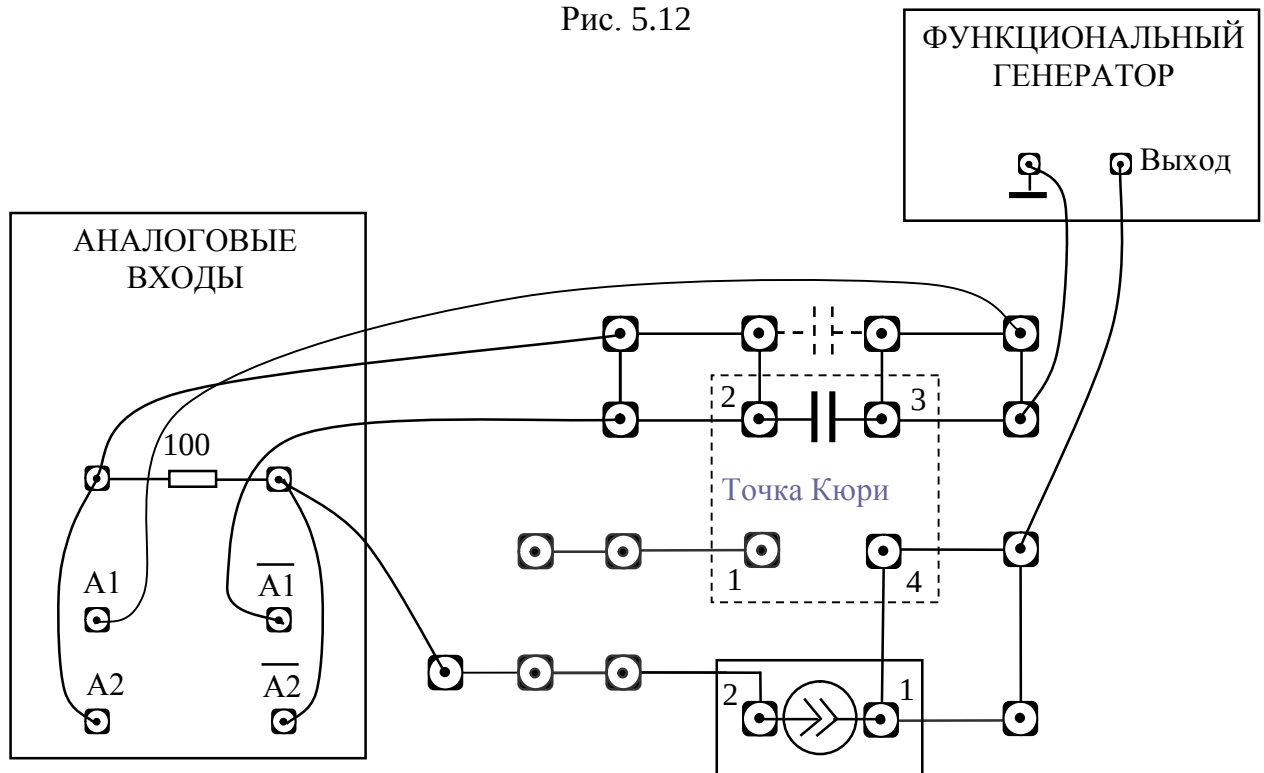


Рис. 5.13

2. Ручку «Амплитуда» поставьте в крайнее левое положение.

3. После проверки схемы включите блок питания стенда, затем функциональный генератор. Снова задайте те же параметры, что и в первом задании, т.е. частота примерно 110–120 Гц, развёртка – 2 мс, синхронизация по переднему фронту, отображение значений – «Максимум».

4. В правом верхнем углу высвечивается столбик из четырёх чисел (рис. 5.14). Верхнее красное число будет показывать максимальное напряжение (амплитуду) исследуемого сигнала относительно оси X (чёрная горизонтальная линия посередине экрана). Второе, синее число определяет величину тока в цепи (при расчётах это число необходимо поделить на 100, т.к. фактически в нашем случае это число является напряжением, снимаемым с сопротивления 100 Ом).

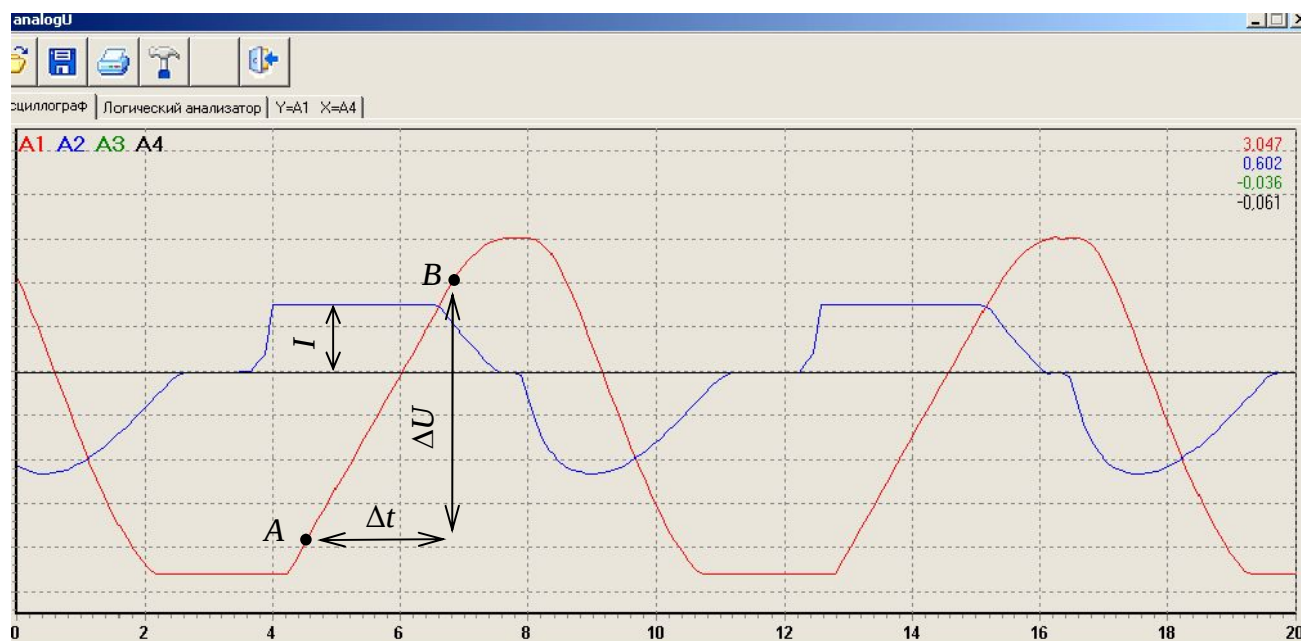


Рис. 5.14

5. Нажмите мышкой «Старт». Медленно увеличивайте амплитуду выходного сигнала генератора до тех пор, пока на осциллограмме тока не появится горизонтальный участок. В этом случае сигналы на мониторе примут вид, как на рис. 5.14.

6. Выберите на изображении импульса напряжения на конденсаторе прямолинейный участок АВ и сделайте измерения напряжения, времени и тока: ΔU , Δt , I , учитывая выбранные режимы усиления и масштаб развёртки. Измерения лучше проводить в режиме «Стоп», т.к. нет подёргивания сигналов на экране. Полученные данные занесите в табл. 1.

7. Снова мышкой нажмите на кнопку «СТАРТ», при этом осциллограмма придёт в движение. Ручкой «Частота» на функциональном генераторе увеличьте частоту выходного сигнала примерно на 30 Гц.

8. Остановите программу кнопкой «СТОП» и снова замерьте ΔU , Δt , I .

9. Повторите подобные измерения при 3-х различных частотах.

10. Осторожно поменяйте первый конденсатор на второй и проведите с ним такие же измерения. Данные запишите в табл. 1.

III. Параллельное соединение конденсаторов

1. Вставьте в гнезда наборного поля второй миниблок «Конденсатор» параллельно первому (его положение на рис. 5.12 показано штриховой линией) и проведите точно такие же измерения, как и с одним конденсатором. Данные заносите в табл. 1.

2. Убавьте частоту сигнала до минимума. Выключите питание.

IV . Последовательное соединение конденсаторов

1. Перекоммутируйте схему параллельного соединения конденсаторов в схему последовательного соединения (рис. 5.15) и повторите последовательность пре-

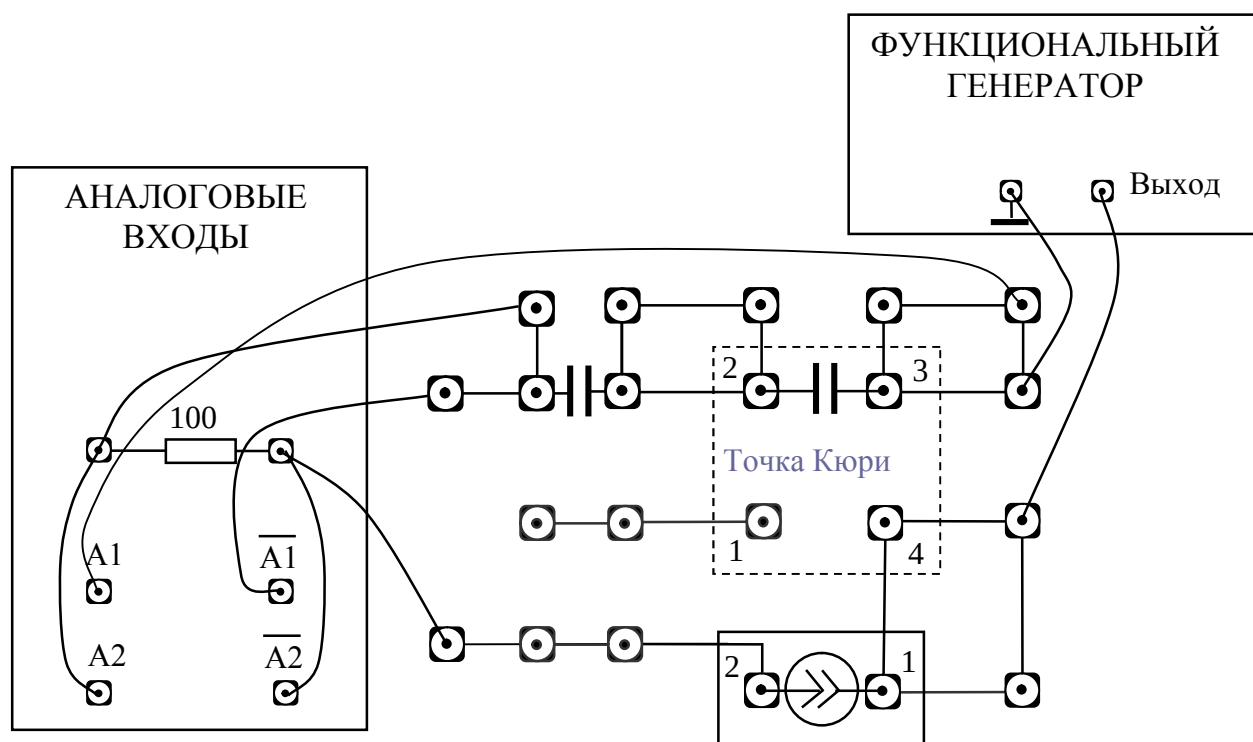


Рис. 5.15

дыдущих измерений. Данные продолжайте записывать в табл. 1.

Таблица 1

Поз.	Частота, Гц	ΔU , В	Δt , мс	I , мА	C , мкФ
1-й конд.					
2-й конд.					
Парал- лельно					
Последо- вательно					

2. После оформления черновика и проверки результатов измерений преподавателем или лаборантом, отключите питание, разберите схему и представьте стенд в полной комплектности.

Обработка результатов измерений

1. Используя формулу (6), определите ёмкости каждого конденсатора, двух конденсаторов соединённых параллельно, и двух – соединённых последовательно. Сравните ваши результаты с ёмкостями, указанными на конденсаторах, определите относительные отклонения.

2. Используя полученные на опыте значения ёмкостей C_1 и C_2 , по формулам для соединения конденсаторов вычислите величину общей ёмкости для каждого случая.

3. Найдите относительное отклонение измеренных значений ёмкости батареи от вычисленных (в %).

4. Приведите в отчёте зарисованные Вами в I задании осциллограммы с указанием частот, напряжений и токов, значений ёмкостей для случаев:

конденсатор закорочен;

один конденсатор;

два конденсатора.

Напишите заключение о влиянии ёмкости на форму импульсов тока и напряжения.

Сформулируйте и запишите общие выводы о проведённых Вами наблюдениях, измерениях и расчётах.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения электроёмкости проводника и конденсатора. В каких единицах измеряется и от каких величин зависит ёмкость конденсатора?

2. Выведите формулу (2).

3. Как изменяются заряд и напряжение на конденсаторе при внесении диэлектрика? При изменении расстояния между обкладками? Рассмотреть случаи: а) конденсатор подключён к источнику постоянного напряжения; б) конденсатор отключён.

4. Как связаны между собой заряд конденсатора и сила тока в цепи рис. 2?

5. Сравните ёмкости конденсаторов C_1 и C_2 на рисунках 5.3, 5.6, 5.7.

6. Опишите метод определения ёмкости с использованием стабилизатора тока. Выведите расчётную формулу (6).

7. Выведите формулы для расчёта ёмкости при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов. Как изменяется ёмкость в соединении по сравнению с ёмкостью одного конденсатора?

8. Сравните параметры (заряд, напряжение) одного конденсатора и батареи конденсаторов, соединённых: а) последовательно; б) параллельно.

Работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Теоретическое обоснование метода

Электрические и магнитные поля, воздействуя на движущиеся заряженные частицы, изменяют их скорость и траекторию. В электрическом поле с напряженностью $\vec{E}$ на частицу, обладающую зарядом q , действует сила

$$\vec{F}_\text{э} = q\vec{E}. \quad (6.1)$$

На эту же частицу, движущуюся в магнитном поле, будет действовать сила Лоренца

$$\vec{F}_\text{л} = q[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (6.2)$$

где $\vec{v}$ – скорость движения частицы; $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции.

В соответствии с определением (6.2) сила Лоренца перпендикулярна плоскости, в которой лежат векторы $\vec{v}$ и $\vec{B}$. Так как сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости, то она изменяет только направление скорости частицы и не влияет на величину скорости. Если в пространстве, где движется заряд, имеются одновременно электрическое и магнитное поля, то в общем случае скорость заряда будет изменяться как по величине, так и по направлению.

Уравнение движения частицы (второй закон Ньютона) в пространстве, где имеются и электрическое, и магнитное поля, будет иметь вид

$$m\vec{a} = \vec{F}_\text{э} + \vec{F}_\text{л}, \quad (6.3)$$

где m – масса частицы, которая полагается не зависящей от скорости, что соответствует движению со скоростью v , много меньшей скорости света в вакууме.

Используя выражения (6.1), (6.2) и (6.3), можно найти ускорение заряженной частицы, движущейся в электрическом и магнитном полях:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]). \quad (6.4)$$

Это уравнение показывает, что движение заряженной частицы в силовых полях зависит от отношения q/m , которое называется **удельным зарядом** данной частицы. Изучая движение различных заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, можно определить удельный заряд частицы и тем самым получить сведения о природе частиц. В данной лабораторной работе определяется отношение заряда e электрона к его массе m методом магнетрона. Магнетроном называется устройство, в котором электроны движутся во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. В нашем случае магнетрон выполнен в виде миниблока «магнетрон», в котором магнитное поле создаётся цилиндрической катушкой с током (соленоида), внутрь которой помещён вакуумный диод – электронная лампа с двумя электродами: катодом и анодом. Электроды лампы цилиндрические (рис. 6.1), и их общая ось совпадает с осью соленоида. Анод является холодным электродом, а катод подогревается нитью накала для создания элек-

тронной эмиссии. Магнитное поле соленоида направлено вдоль оси катушки и лампы. Благодаря коаксиальной форме электродов напряжённость электрического поля внутри вакуумного диода перпендикулярна оси лампы и, следовательно, электрическое поле между катодом и анодом лампы перпендикулярно магнитному полю соленоида.

При подаче на лампу анодного напряжения U (при разогретом катоде) электроны из электронного облака вблизи катода устремляются к аноду. В лампе появляется анодный ток I_A , который будет зависеть от величины приложенного анодного напряжения. Чем выше напряжение, тем большее количество электронов притянется к аноду, обеспечивая увеличение анодного тока лампы.

Модуль питания обеспечивает также прохождение тока I по обмотке соленоида, причём величину тока можно плавно изменять. При этом меняется величина магнитной индукции, которая в середине длинной цилиндрической катушки соленоида может быть найдена по формуле

$$B_c = \frac{\mu\mu_0 IN}{l}, \quad (6.5)$$

где N – число витков в соленоиде, а l – его длина, которая должна быть много больше радиуса соленоида.

В рассматриваемом случае катушка имеет длину, сравнимую с её диаметром, поэтому реальная магнитная индукция B будет немного меньше B_c , рассчитанной по формуле (6.5). Поэтому экспериментальное значение

$$B = KB_c, \quad (6.6)$$

где $K < 1$ – эмпирический или расчётный коэффициент, зависящий от длины и диаметра цилиндрической катушки.

В отсутствие магнитного поля на электрон, вылетевший из катода за счёт термоэлектронной эмиссии, действует только сила $\vec{F}_Э$ (см. формулу (6.1)), под действием которой электрон движется прямолинейно от катода к аноду с ускорением

$$\vec{a} = \frac{e\vec{E}}{m} \text{ в радиальном направлении (рис. 6.2, траектория 1).}$$

Если по обмотке соленоида пропустить ток I , то внутри цилиндрического анода создаётся магнитное поле, вектор индукции которого параллелен оси лампы, и вылетающие из катода электроны, пересекая магнитное поле, будут двигаться уже не по радиальным, а по кривым линиям.

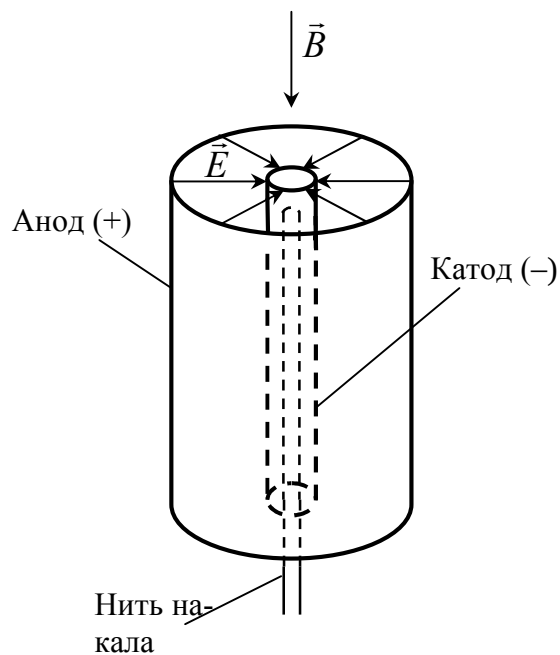


Рис. 6.1

Искривление траектории электронов будет тем больше, чем больше сила Лоренца, пропорциональная индукции магнитного поля. Если индукция B мала, то траектории электронов будут слабо искривлены и все электроны будут попадать на анод (см. рис. 6.2, траектория 2), так что анодный ток лампы изменяться не будет.

По мере увеличения индукции магнитного поля траектории электронов все больше искривляются, и при некотором её критическом значении $B = B_{кр}$ траектория электрона будет только касаться анода (траектория 3). При этом анодный ток должен резко уменьшиться, поскольку при дальнейшем увеличении B электроны не будут достигать анода, образуя вокруг катода вихревое электронное облако (траектория 4).

Критическая магнитная индукция $B_{кр}$ при соответствующем напряжении U находится по сбросовой характеристике магнетрона – графику зависимости анодного тока I_a от индукции B магнитного поля (рис. 6.3). При возрастании магнитной индукции анодный ток сначала почти не изменяется. При достижении $B = B_{кр}$ (траектория 3 на рис. 6.2), ток должен резко падать практически до нуля (график 1 на рис. 6.3), так как электроны не достигают анода. В реальных условиях электроны вылетают из катода с различными скоростями, поэтому радиусы кривизны их траекторий не одинаковы и ток уменьшается не столь резко.

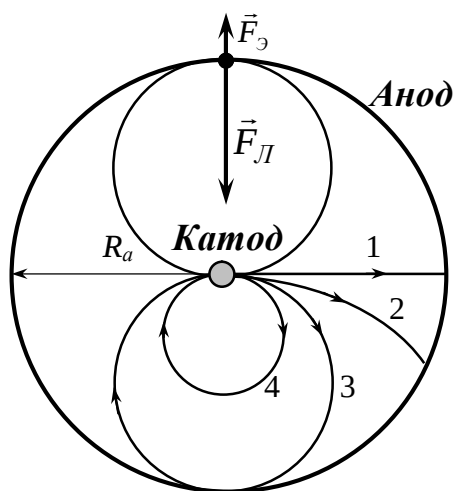


Рис. 6.2

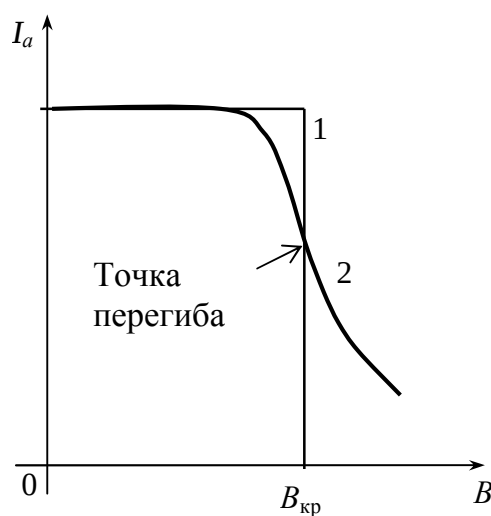


Рис. 6.3

Рассмотрим случай, когда $B = B_{кр}$. Поскольку в этом случае траектория электрона касается анода, то в точке касания силы $\vec{F}_Э$ и $\vec{F}_Л$ лежат на одной прямой (см. рис. 6.2) и, в соответствии с формулой (6.4), их равнодействующая будет сообщать электрону центростремительное ускорение

$$\frac{v^2}{R} = \frac{e}{m}(vB - E), \quad (6.7)$$

где R – радиус траектории электрона; v – скорость электрона в точке касания.

Учитывая, что скорость электрона перпендикулярна индукции магнитного поля и величина его заряда равна элементарному заряду e , модуль силы Лоренца

$$F_{\text{л}} = e\nu B. \quad (6.8)$$

Используя связь между напряжённостью и потенциалом электрического поля, можно показать, что величина напряжённости прямо пропорциональна напряжению U между анодом и катодом электронной лампы и обратно пропорциональна расстоянию r от оси:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R_A}{R_K}}. \quad (6.9)$$

Здесь R_A – радиус анода, R_K – радиус катода электронной лампы.

Так как $R_A \gg R_K$, то действием электрического поля в точке касания ($r = R_A$) можно пренебречь, тогда

$$m \frac{\nu^2}{R} = e\nu B \quad (6.10)$$

и удельный заряд электрона

$$\frac{e}{m} = \frac{\nu}{BR}. \quad (6.11)$$

Скорость электронов вблизи анода легко найти, так как работа электрического поля при переносе зарядов не зависит от траектории и равна произведению переносимого заряда на разность потенциалов. При перемещении электрона от катода к аноду его кинетическая энергия увеличивается за счет работы сил электрического поля:

$$\frac{m\nu^2}{2} - \frac{m\nu_0^2}{2} = eU. \quad (6.12)$$

Если считать, что скорость электрона, испущенного нагретым катодом, мала ($\nu_0 \approx 0$), то для скорости ν электрона вблизи анода получим формулу

$$\nu = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (6.13)$$

Заменив в выражении (6.11) скорость по формуле (6.13), получим

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 R^2}. \quad (6.14)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи нужно знать радиус траектории электрона и соответствующее ему значение индукции магнитного поля при известном анодном напряжении.

Для траектории 3, соответствующей критическому значению магнитной индукции $B_{\text{кр}}$, можно принять, что радиус этой траектории равен половине радиуса R_a анода ($R_{\text{кр}} = 0,5R_a$) (см. рис. 6.2), тогда расчётная формула для определения удельного заряда электрона будет иметь вид

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{B_{\text{кр}}^2 R_a^2}. \quad (6.15)$$

Практически определяют зависимость анодного тока I_a не от индукции B , а от силы тока I в соленоиде. По измеренным значениям токов I и I_a строят график за-

зависимости $I_a(I)$ и по точке перегиба (см. рис. 6.3) определяют $I_{кр}$. Критическое значение индукции магнитного поля рассчитывают по формуле (6.5), подставляя в неё полученное из графика значение $I_{кр}$. Значение коэффициента K указано на миниблоке.

Выполнение работы

Оборудование: миниблок «Магнетрон», модуль питания, мультиметр, стрелочный амперметр, вольтметр.

1. Для проведения эксперимента необходимо собрать схему установки (рис. 6.4), используя монтажную схему (рис. 6.5). На наборном поле установите миниблок «Магнетрон» в отведённое для него место. Его контакт № 1 соедините с плюсом источника питания 3 В.

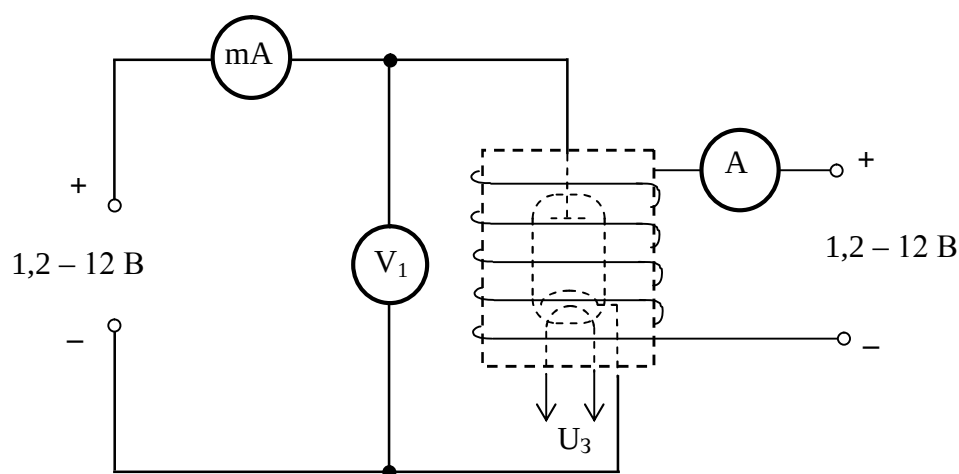


Рис. 6.4

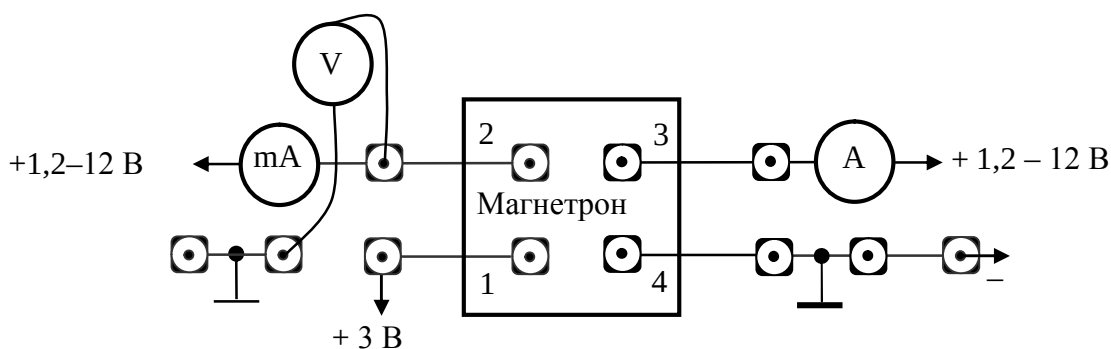


Рис. 6.5

2. Так как все контакты «земля $\perp$ » на наборном поле внутри блока соединены между собой, и так же соединены между собой подобные контакты блоков питания на модуле питания, то достаточно один контакт $\perp$ блока питания соединить с любым контактом $\perp$ наборного поля. Например, можно соединить «землю» от 12 В с любой «землёй» наборного поля. Для подачи любого другого напряжения достаточно одного провода от клеммы «+» источника питания.

3. В работе используются два источника питания с регулируемым напряжением до 12 В. От одного из них напряжение подаётся на анод электронной лампы через мультиметр (выносные входы mA и COM, режим 20 mA), а второй источник питает соленоид через стрелочный амперметр. Третий источник питания ($U_3 = 3$ В) обеспечивает подогрев катода. Соедините их как показано на рис. 6.5.

4. При сборке схемы соблюдайте полярность приборов – плюс источника питания соединяйте с плюсом измерительного прибора.

5. Регуляторы напряжения источников питания установите в крайнее левое положение.

6. После проверки схемы преподавателем включите модуль питания, мультиметр. Установите на аноде лампы напряжение 12 В, контролируя его стрелочным вольтметром.

7. Замерьте анодный ток лампы при отсутствии магнитного поля, для этого на время измерения анодного тока уберите соединительный провод из гнезда питания соленоида и запишите значение анодного тока в табл. 6.1.

Таблица 6.1

$I_c, \text{ A}$	$I_a, \text{ mA}$ при $U_A = 12 \text{ В}$	$I_a, \text{ mA}$ при $U_A = 13 \text{ В}$
0		
...		
0,52		
0,54		

8. Вставьте провод обратно. Плавно увеличивайте ток соленоида и наблюдайте по мультиметру за поведением анодного тока. Как только он начнёт снижаться, запишите этот ток и ток соленоида в табл. 6.1. Далее увеличивайте ток соленоида шагами по 0,02 А до 0,54 А и продолжайте записывать измеряемые величины в табл. 6.1.

9. После снятия характеристики убавьте ток соленоида до минимума, увеличьте напряжение на аноде лампы до 13 В и повторите предыдущие измерения (т.е. повторите п.п. 7, 8).

10. После выполнения работы покажите результаты измерений преподавателю, отключите питание, разберите схему, запишите в черновик погрешности приборов.

Обработка результатов

1. Постройте графики зависимости анодного тока I_a от тока в соленоиде I для обеих характеристик.

2. Найдите по графикам $I_{кр}$, рассчитайте экспериментальные значения e/m .

3. Определите среднее значение удельного заряда электрона e/m и сравните ваш результат с табличными данными.

4. Напишите вывод по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется удельным зарядом частицы? Сравните удельные заряды протона и электрона.
2. Покажите направления индукции магнитного поля и напряженности электрического поля на рис. 6.2.
3. Какие силы действуют на электрон в электрическом и магнитном полях? Укажите их направления на рис. 6.2 в любой точке траектории.
4. Какое направление имеет сила Лоренца? Чему равен её модуль?
5. Какую работу совершает электрическое (магнитное) поле при перемещении заряда?
6. Как изменяется сбросовая характеристика магнетрона при увеличении или уменьшении анодного напряжения?
7. От каких величин зависит ускорение заряженной частицы в электрическом поле? В магнитном поле?
8. По каким траекториям может двигаться заряд в однородном магнитном поле?
9. Как определить радиус траектории электрона, если его скорость перпендикулярна вектору магнитной индукции?
10. Какую скорость наберёт электрон на пути к аноду при анодном напряжении, равном U ?
11. Во сколько раз изменится максимальная скорость электронов при увеличении анодного напряжения в 2 раза?
12. За счёт чего создаются электрическое и магнитное поля в магнетроне?
13. Выведите формулы (6.7), (6.14), (6.15).
14. Для чего используется источник напряжения на 3 В?

Работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Общая теория

При подготовке к работе следует изучить закономерности образования магнитного поля проводниками с током (закон Био – Савара), элементы земного магнетизма.

Наша Земля окружена естественным магнитным полем, существование которого обусловлено действием постоянных источников, расположенных внутри Земли и создающих основной компонент поля (~99%), а также переменных источников (электрических токов) в магнитосфере и ионосфере (~1%). Напряженность H геомагнитного поля убывает от полюсов к экватору от 56 до 33 А/м.

Действие магнитных сил обнаруживается как на поверхности Земли, так и в ее недрах и под водой. Все пространство, окружающее земной шар, пронизывается магнитными силовыми линиями, как бы исходящими из магнитного полюса в южном полушарии, огибающими земной шар и входящими в магнитный полюс северного полушария (рис. 7.1).

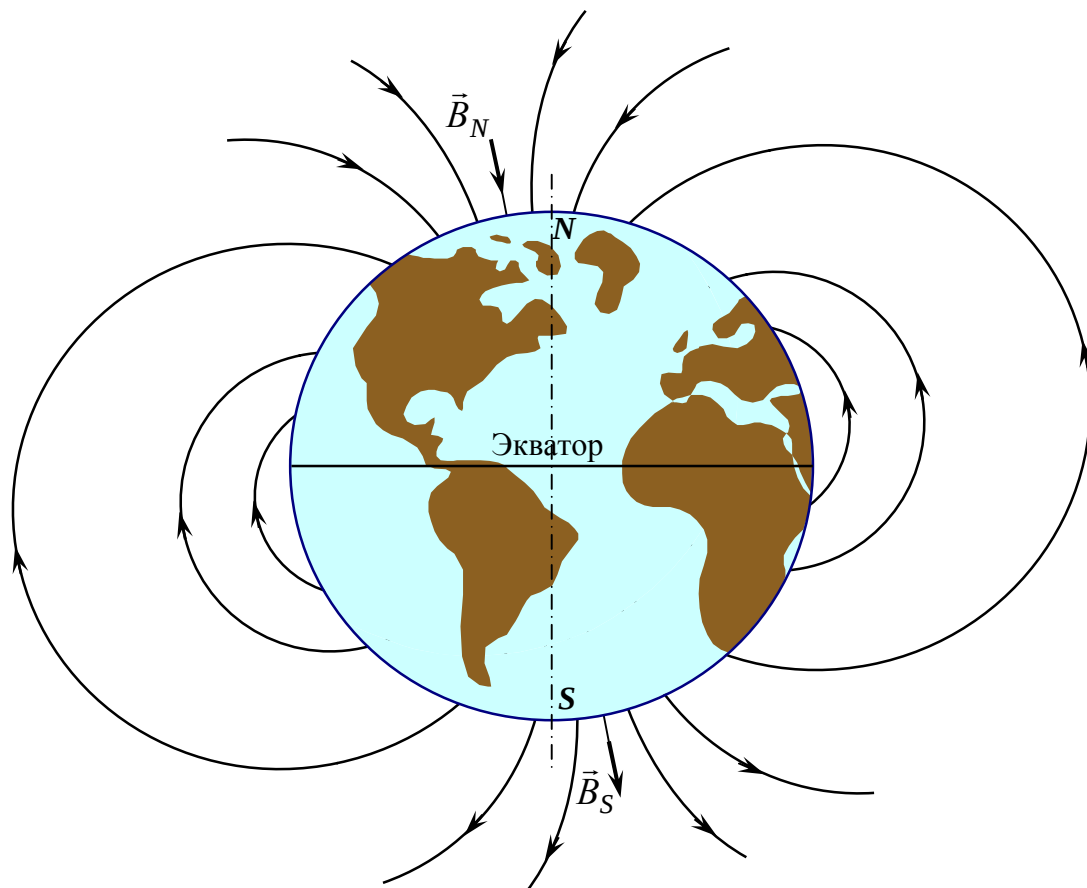


Рис. 7.1

В магнитных компасах используется свойство свободно подвешенной намагниченной стрелки устанавливаться вдоль магнитных силовых линий Земли. Такая стрелка своим северным концом указывает на север, а южным – на юг.

Магнитные полюсы расположены вблизи географических полюсов, которые обозначены на рис. 7.1 буквами N и S , но не совпадают с ними. Положение магнитных полюсов не остаётся неизменным, координаты их, хотя и очень медленно, но изменяются. В 1600 г. северный магнитный полюс находился в 1300 км от географического, а в настоящее время – примерно в 2000 км.

Магнитное поле Земли характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}_3$, который направлен по касательной к силовым линиям земного магнитного поля. В каждой точке Земли вектор индукции составляет с горизонтальной плоскостью некоторый угол φ (рис. 7.2), который приблизительно равен географической широте местности.

Направление вектора $\vec{B}_3$ можно определить, например, имея магнитную стрелку, свободно вращающуюся на горизонтальной оси. (Подумайте, как нужно сориентировать ось, чтобы стрелка показала направление магнитной индукции.) Обычно вектор магнитной индукции раскладывают на две составляющие: горизонтальную B_{Γ} и вертикальную $B_{\text{в}}$ (см. рис. 7.2).

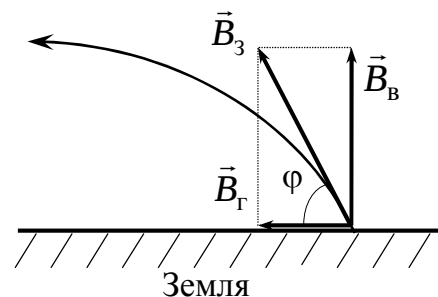


Рис. 7.2

Имеющаяся в лаборатории установка позволяет определить только одну составляющую индукции магнитного поля – горизонтальную.

Для её определения в данной работе применяется тангенс-гальванометр (ТГ). Это плоская вертикальная катушка радиусом R с числом витков N . В центре катушки расположен компас, размеры которого должны быть значительно меньше радиуса катушки.

Если ось стрелки компаса вертикальна, то при отсутствии тока в катушке стрелка располагается вдоль горизонтальной составляющей магнитного меридиана Земли (рис. 7.3). Поворотом прибора вокруг вертикальной оси можно совместить плоскость катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если после такой установки катушки пропустить по ней ток, то магнитная стрелка отклонится от направления магнитного меридиана на некоторый угол α .

Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут действовать два поля: горизонтальная составляющая B_{Γ} земного магнитного поля и поле B , созданное током. На рис. 7.3 SN – направление магнитного меридиана Земли; AC – сечение витка катушки горизонтальной плоскостью; $S'N'$ – магнитная стрелка; B_{Γ} – вектор горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли; B – вектор индукции магнитного поля, созданного током в центре катушки. Как следует из рис. 7.3, горизонтальная составляющая связана с индукцией магнитного поля катушки соотношением

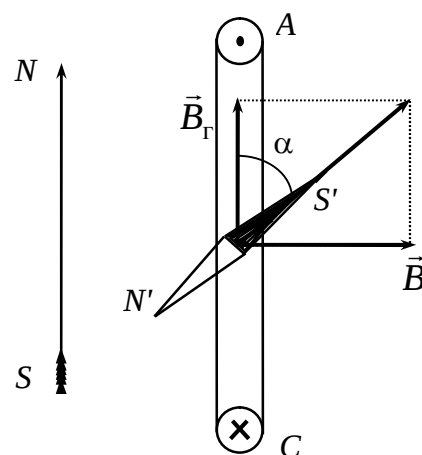


Рис. 7.3

$$B_{\Gamma} = \frac{B}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (7.1)$$

Величина индукции в центре кругового тока пропорциональна силе тока I и вычисляется по формуле, полученной из закона Био – Савара – Лапласа интегрированием по замкнутой окружности радиуса R :

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2R}. \quad (7.2)$$

Измеряя угол отклонения α при известном значении силы тока, можно по формулам (7.2) и (7.1) вычислить горизонтальную составляющую B_H магнитного поля в месте проведения измерений.

Выполнение работы

Оборудование: тангенс-гальванометр, миниблок «Ключ», стрелочный амперметр, модуль питания 1,2...12 В, соединительные провода.

Соберите схему (рис. 7.4) по монтажной схеме (рис. 7.5). Установите регулятор модуля питания в крайнее левое положение (минимум выходного напряжения). Поворачивая тангенс-гальванометр, установите его так, чтобы плоскость катушки совпадала с плоскостью магнитного меридиана. Для этого один из концов стрелки компаса нужно совместить с нулевым делением лимба компаса.

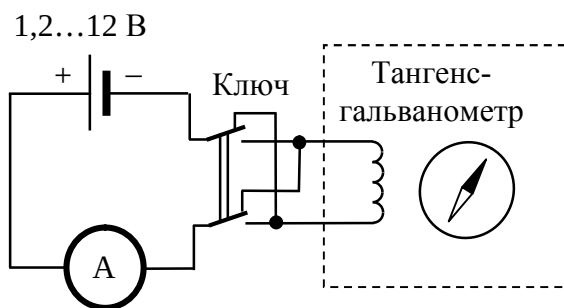


Рис. 7.4

Углы α_1 и α_2 не должны различаться между собой более чем на 2–4 градуса. В противном случае нужно отключить питание и точнее установить тангенс-гальванометр вдоль меридиана. Так же надо поступить, если во время работы Вы нечаянно сдвинете тангенс-гальванометр.

Изменяйте ток в катушке шагами по 0,02 А регулятором источника питания и записывайте значения углов α_1 и α_2 при каждом значении силы тока I в табл. 7.1. Проведите измерения для 6–8 значений тока.

Примечание: С целью уменьшения погрешностей при измерениях следует устанавливать такие значения силы тока, при которых углы отклонения стрелки не превышали бы 60° .

После проверки схемы преподавателем включите модуль питания. При этом стрелка компаса отклонится от своего первоначального положения на угол α_1 , а амперметр покажет некоторый ток. Запишите эти показания в табл. 7.1. Переключите тумблер миниблока «Ключ», тем самым изменится направление тока в катушке и стрелка компаса поменяет своё направление относительно меридиана.

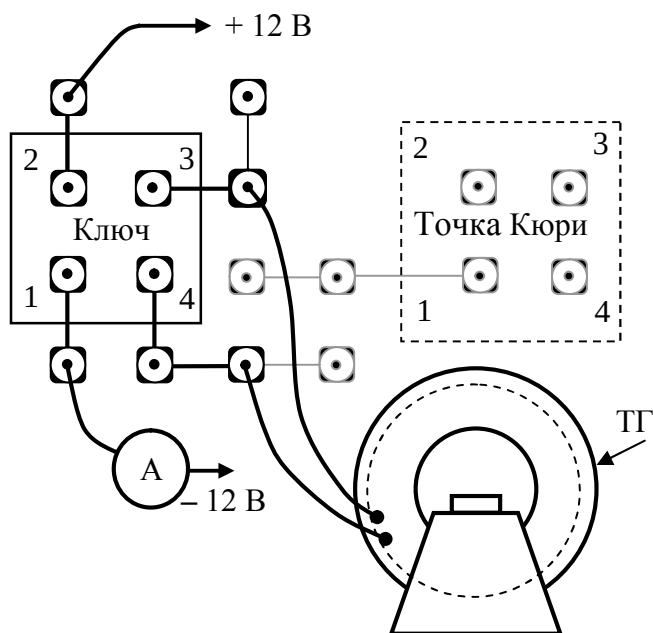


Рис. 7.5

Таблица 7.1

№ п/п	I	α_1	α_2	$\langle \alpha \rangle$	$\text{tg} \langle \alpha \rangle$	B	B_r

Для домашних вычислений спишите с катушки её радиус и число витков.

Обработка результатов измерений

1. Вычислите B и B_r по формулам (7.1) и (7.2), результаты занесите в табл. 7.1.
2. Определите погрешности B_r по известной методике, заполняя таблицу обработки результатов измерений.
3. По среднему значению горизонтальной составляющей вычислите вертикальную составляющую и полную индукцию магнитного поля (см. рис. 7.2).
4. Найдите в литературе значение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли и сравните с полученным Вами результатом измерений.
5. Найдите горизонтальную составляющую H_r напряжённости магнитного поля Земли, а также её полное значение в месте измерения.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения индукции и напряжённости магнитного поля? В каких единицах они измеряются?
2. Расскажите об индукции магнитного поля Земли, о её составляющих. В каких точках земного шара горизонтальная составляющая магнитного поля имеет наибольшее значение?
3. Каковы устройство и принцип действия тангенс-гальванометра?
4. Как нужно расположить тангенс-гальванометр в магнитном поле Земли?
5. Сформулируйте закон Био – Савара – Лапласа. Выведите формулу (7.2), используя этот закон.
6. Как установится магнитная стрелка в магнитном поле Земли, если её ось перпендикулярна плоскости магнитного меридиана?
7. Какова форма линий индукции магнитного поля прямого тока? Кругового витка с током?
8. По какому правилу определяется направление силовых линий магнитного поля?
9. Как связаны между собой характеристики магнитного поля – напряжённость и индукция? В каких единицах измеряются эти величины?
10. Как направлен вектор индукции магнитного поля прямого проводника с током?
11. Как направлен вектор напряжённости магнитного поля кругового проводника с током?
12. Как зависит угол отклонения магнитной стрелки в тангенс-гальванометре от числа витков и радиуса катушки?

Работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Краткая теория

В 1879 г. американский физик Эдвин Герберт Холл (Е.Н. Hall, 1855-1938) обнаружил, что при помещении тонкой пластины с током I в магнитное поле, перпендикулярное плоскости пластины, в ней возникает поперечная разность потенциалов, которую назвали напряжением Холла. Проведённые измерения показали, что холловское напряжение U прямо пропорционально индукции B магнитного поля и силе тока I и обратно пропорционально толщине d пластины:

$$U = R \frac{IB}{d}, \quad (8.1)$$

где R – коэффициент пропорциональности (коэффициент Холла), его величина и знак зависят от заряда и концентрации носителей тока.

Рассмотрим элементарную теорию эффекта Холла. Пусть носителями тока являются электроны (например, в металлах и в полупроводниках n -типа). При протекании в образце тока плотностью j электроны имеют скорость направленного движения v (скорость дрейфа), направленную против направления тока (рис. 8.1). Если проводник с током помещен в магнитное поле, то на электроны действует сила Лоренца:

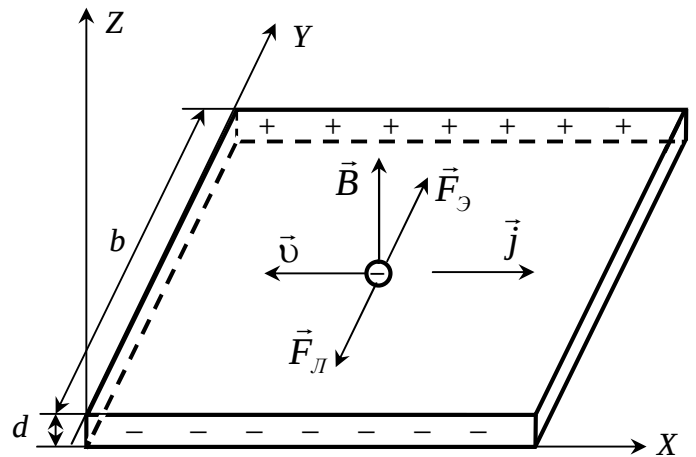


Рис. 8.1

$$F_L = -e[\vec{v}, \vec{B}], \quad (8.2)$$

направленная перпендикулярно их скорости (см. рис. 8.1). Электроны будут отклоняться к одной из граней, оставляя на противоположной стороне пластины не скомпенсированный положительный заряд. В результате вдоль оси Y появится поперечное электрическое поле, действующее на электрон с силой

$$\vec{F}_E = -e\vec{E}, \quad (8.3)$$

которая направлена противоположно силе Лоренца. Накопление зарядов будет продолжаться до тех пор, пока возникшее электрическое поле не скомпенсирует отклоняющее действие магнитного поля. При равенстве модулей сил

$$eE = evB \quad (8.4)$$

установится стационарное состояние, то есть постоянное поперечное электрическое поле Холла, напряжённость которого

$$E = vB, \quad (8.5)$$

если магнитное поле перпендикулярно скорости дрейфа электронов.

Полагая поле Холла однородным, найдём разность потенциалов между противоположными гранями пластины (напряжение Холла)

$$U = vBb \quad (8.6)$$

где b – ширина пластины, или размер образца вдоль направления поля Холла.

Скорость v электронов можно выразить через силу тока:

$$j = \frac{I}{bd}; \quad j = env; \quad \Rightarrow \quad v = \frac{I}{enbd}, \quad (8.7)$$

где n – концентрация носителей тока в пластине.

Подставив скорость (8.7) в равенство (8.6), получим напряжение Холла

$$U = \frac{1}{en} \frac{IB}{d}. \quad (8.8)$$

Сравнивая выражения (8.1) и (8.8), получаем коэффициент Холла

$$R = \frac{1}{en}. \quad (8.9)$$

Из этой формулы следует, что знак коэффициента Холла определяется знаком заряда носителей тока. Для металлов и полупроводников n -типа $R < 0$, а для полупроводников с дырочной проводимостью (p -типа) $R > 0$.

Способ определения коэффициента Холла

Напряжение Холла, согласно формуле (8.1), линейно зависит от магнитной индукции B и от тока I , протекающего в датчике. Установка позволяет получить зависимость $U(B)$ и по угловому коэффициенту экспериментальной прямой определить постоянную Холла R .

Величина индукции B магнитного поля в зазоре электромагнита зависит от силы тока $I_{ЭМ}$ в его обмотке, числа витков N и от величины зазора h :

$$B = \frac{\mu_0 I_{ЭМ} N}{h}. \quad (8.10)$$

Для корректного измерения напряжения Холла нужно учесть, что при проведении эксперимента в пластинке имеется не только поле Холла E_y (рис. 8.2), но и электрическое поле E_x , обеспечивающее протекание тока I в датчике. Это продольное поле создаёт разность потенциалов между точками, расположенными на разных расстояниях от начала датчика. Если контакты, с которых снимается напряжение Холла, смещены относительно эквипотенциальной поверхности, которая перпендикулярна полю E_x , то и без магнитного поля между ними будет разность потенциалов

$$U' = E_x \Delta x, \quad (8.11)$$

где Δx – расстояние между контактами по координате x (рис. 8.2).

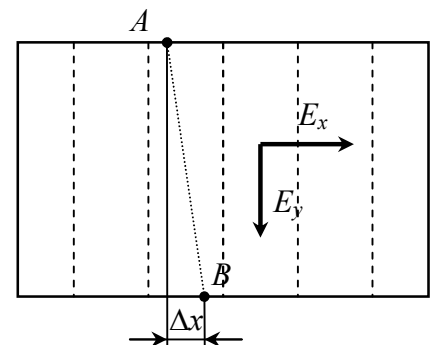


Рис. 8.2

Измеряемая разность потенциалов $\varphi_A - \varphi_B$ будет равна алгебраической сумме напряжений $U + U'$ и может быть как меньше (при разных знаках), так и больше

напряжения Холла. Для исключения этой систематической ошибки нужно измерять поперечную разность потенциалов $U_1 = U + U'$ и $U_2 = U - U'$ при двух противоположных направлениях магнитного поля и затем находить среднее значение

$$U = \frac{|U_1| + |U_2|}{2}. \quad (8.12)$$

Практически для реализации этого приёма изменяют направление тока в обмотке электромагнита. Как следует из рис. 8.2, при этом изменяется и полярность напряжения Холла. Для получения правильного результата напряжения U_1 и U_2 в формуле (8.12) нужно брать без учёта знака.

Выполнение работы

Оборудование: миниблоки «Ключ» и «Датчик Холла», тороидальный сердечник с обмоткой и прорезью (электромагнит), мультиметр, стрелочный амперметр, источник питания 1,2...12 В, источник питания 3 В, соединительные провода.

1. Схема установки состоит из двух самостоятельных схем: первая – питание электромагнита (рис. 8.3а, 8.4а), вторая – питание датчика Холла (8.3б, 8.4б).

2. Соберите схему электромагнита. Для этого на наборном поле в левом верхнем углу установите миниблок «Ключ» на отведённое для него место, его выходы 3 и 4 проводами соедините с выводами электромагнита L_1 на модуле «Магнито-статика». Вход (контакт 2) соедините с «–» стрелочного амперметра, «+» амперметра – с «+» источника питания 1,2...12 В.

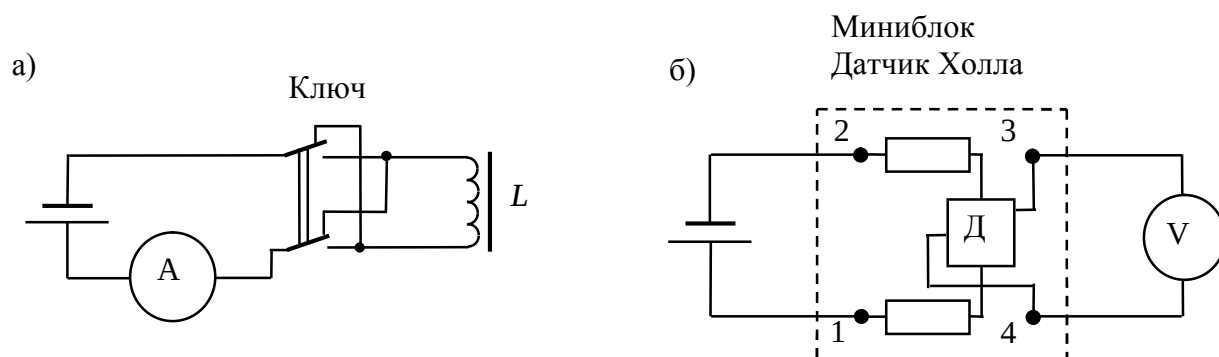


Рис. 8.3

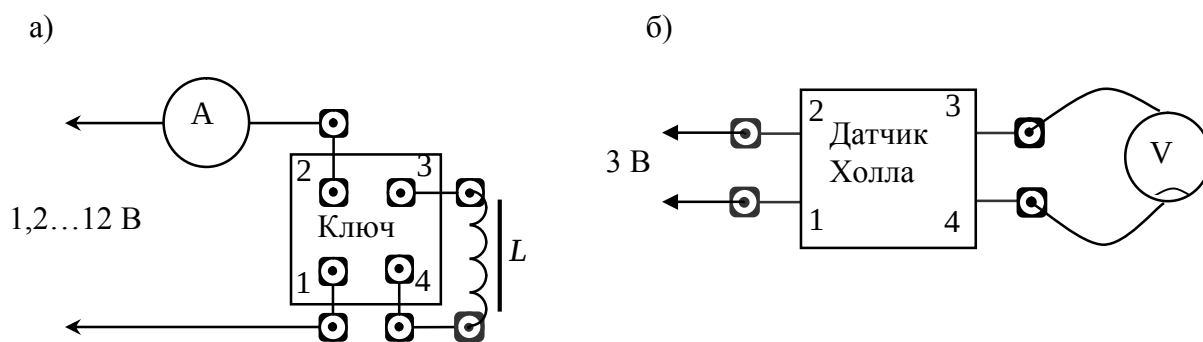


Рис. 8.4

3. Установите миниблок «Датчик Холла» на место «Магнетрона» соблюдая нумерацию контактов. Подайте питание на входы 1–2 от источника 3 В, а к выходу 3–4 подключите мультиметр в режиме 200 мВ.

4. Щуп с датчиком Холла установите в прорезь электромагнита до упора на щупе датчика.

5. Регулятор питания электромагнита установите в крайнее левое напряжение (минимум напряжения).

6. После проверки схемы преподавателем, включите модуль питания, мультиметр.

7. Регулятором выходного напряжения 12 В установите ток в электромагните 0,12 А, замерьте при этом токе напряжение датчика Холла U_1 . Тумблером миниблока «Ключ» поменяйте направление тока в электромагните и замерьте U_2 . Полученные данные запишите в табл. 8.1.

8. Проводите измерения аналогичные п. 7, увеличивая ток в электромагните с шагом 0,02 А. Измерения проводите до 0,34 А, результаты заносите в табл. 8.1.

9. В графу «Параметры установки» запишите данные электромагнита: число витков электромагнита (N), ширину зазора (h) и данные датчика Холла: ток I и толщину d пластинки полупроводника (на корпусе миниблока).

Таблица 8.1

№ п/п	$I_{ЭМ}$, А	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U , В	B , Тл	Параметры установки
1	0,12					$N =$ $h =$ $d =$ $I =$
2	0,14					
...	...					
12	0,34					

Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте величину магнитной индукции B для каждого значения $I_{ЭМ}$, используя формулу (8.10). Результаты расчетов внесите в табл. 8.1.

2. Вычислите среднее значение напряжения Холла U (без учёта знака!) по формуле (8.12) для каждого значения B .

3. По полученным результатам постройте график зависимости $U(B)$.

4. Определите угловой коэффициент K экспериментальной прямой.

5. Используя формулу (8.1) и угловой коэффициент K , найдите значение постоянной Холла для данного полупроводника.

6. По формуле (8.9) вычислите концентрацию n носителей в исследуемом полупроводнике и сравните её с концентрацией n_A атомов в германии (Ge) или в кремнии (Si).

7. В выводе отметьте, какие закономерности эффекта Холла исследованы в работе и укажите возможные применения датчика Холла.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Какие условия необходимы для наблюдения явления Холла?
3. Укажите причину появления напряжения Холла.
4. Как направлена сила Лоренца, действующая на движущийся электрон?
5. Выведите формулы (8.6) и (8.8).
6. Покажите на рисунке направление векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ для электрического и магнитного полей в пластинке полупроводника при наблюдении эффекта Холла.
7. Между какими гранями пластинки появляется напряжение Холла? Укажите положение граней по отношению к току I и магнитному полю.
8. Для измерения каких величин используют в данной работе: а) стрелочный амперметр, б) мультиметр?
9. Какие величины и параметры явления Холла изменятся, если изменить:
а) величину и направление рабочего тока датчика, б) величину и направление тока в обмотке электромагнита?
10. Опишите метод измерения напряжения Холла.
11. Какой из размеров пластинки полупроводника необходим для вычисления постоянной Холла?
12. Как по угловому коэффициенту зависимости $U(B)$ определить коэффициент Холла?
13. Какая физическая величина называется концентрацией частиц? Можно ли по эффекту Холла определить концентрацию и знак носителей тока?
14. Запишите формулы, которые используются в данной работе для расчёта концентрации электронов проводимости в полупроводнике.
15. В каких электроматериалах значение коэффициента Холла больше: в полупроводниках или в металлах?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биглер, В.И. Физика: лабораторный практикум / В.И. Биглер, А.И. Сопин, Н.М. Соколова. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2001. – Ч. 1. – 29 с.
2. Биглер, В.И. Физика: лабораторный практикум / В.И. Биглер, А.И. Сопин, В.А. Алексеев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – Ч. 2. – 30 с.
3. Гуревич, С.Ю. Физика: учебное пособие / С.Ю. Гуревич, Е.Л. Шахин. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2001. – 128 с.
4. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – СПб.: Лань, 2007. – Т. 2. – 390 с.
5. Соколова, Н.М. Физика: курс лекций / Н.М. Соколова, В.И. Биглер. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – Ч. 2. – 117 с.
6. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Академия, 2007. – 560 с.
7. Электричество и магнетизм: учебное пособие к выполнению лабораторных работ по курсу физики / Л.Ф. Гладкова, А.Е. Гришкевич, С.И. Морозов и др. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 110 с.