

**Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна»
Филиал «Протвино»
Кафедра «Математики и естественных наук»**

**В.А. Коковин, А.В. Куликов,
А.А. Масликов**

**Лабораторные работы
по общей физике
«Электричество»**

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано
кафедрой математики и естественных наук
филиала «Протвино» государственного
университета «Дубна»
в качестве методического пособия для студентов
направлений
«Автоматизация технологических процессов и производств»,
«Информатика и вычислительная техника»,
«Прикладная информатика», «Физика»

Протвино
2017

ББК 22.3 я 73
К 59

Рецензент:
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
ФГБУ ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий»
НИЦ «Курчатовский институт»
А.В. Разумов

Коковин, В.А.

К–59 Лабораторные работы по общей физике.
Электричество : электронное методическое пособие /В.А.
Коковин, А.В. Куликов, А.А. Масликов. – Протвино, 2017. —
84 с.

В методическое пособие включены описания и руководства по выполнению лабораторных работ по общей физике (раздел «Электричество»). Каждая работа содержит краткое теоретическое введение, описание экспериментальной части, порядка проведения измерений и обработки их результатов. В пособии представлены лабораторные работы двух типов – в одном из них студенты выполняют измерения с помощью аппаратуры и приборов на стендах Лаборатории Филиала, в другом – используется компьютерная симуляция физических явлений и процессов.

Предназначено для студентов 2-го курса, обучающихся по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств», «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная информатика» и «Физика». Для студентов направления «Физика» представленные в описании работы составляют экспериментальную часть общефизического практикума, дополняющую компьютерный практикум.

© Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области «Университет
«Дубна», филиал «Протвино», 2017
© Коковин В.А., Куликов А.В., Масликов А.А.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	7
Лабораторная работа № 1	
Знакомство с осциллографом	7
Лабораторная работа № 2	
Измерение сопротивления с помощью амперметра и вольтметра	14
Лабораторная работа № 3	
Определение зависимости индуктивного и емкостного сопротивления от частоты	20
Лабораторная работа № 4	
Градуировка термомпары.....	24
Лабораторная работа № 5	
Транзистор	29
РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ ПРОГРАММЫ.....	36
Лабораторная работа № 6	
Движение заряженной частицы в электрическом поле.....	38
Лабораторная работа № 7	
Электрическое поле точечных зарядов.....	43
Лабораторная работа № 8	
Магнитное поле	49
Лабораторная работа № 9	
Электромагнитная индукция	56
Лабораторная работа № 10	
Свободные колебания в контуре	62
Лабораторная работа № 11	
Вынужденные колебания в RLC -контуре	67
ПРИЛОЖЕНИЕ	74
Библиографический список	83

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий сборник лабораторных работ рассчитан на студентов, изучающих общую физику в рамках комплекса общеобразовательных дисциплин. Сборник составлен авторами на основе опыта преподавания дисциплины «Электричество и магнетизм» (лекции, семинары и лабораторные работы) начиная с 2005 г. для студентов специальностей «Автоматизация технологических процессов и производств», «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» и «Техническая физика» в Международном университете «Дубна», филиал «Протвино». Впоследствии, с переходом на образовательные стандарты 3-го поколения, представленные в сборнике лабораторные работы стали использоваться для обучения бакалавров по направлениям подготовки «Автоматизация технологических процессов и производств», «Прикладная информатика» и «Информатика и вычислительная техника».

В течение 4-го семестра студенты должны выполнить комплекс лабораторных работ по электричеству и магнетизму. Пособие позволит студентам самостоятельно вникнуть в сущность и цели проводимых лабораторных экспериментальных исследований.

В сборнике представлены лабораторные работы двух типов – «настоящие» работы, которые выполняются студентами с использованием стендов, приборов и аппаратуры Лаборатории Филиала, и работы, в которых используется компьютерная симуляция физических процессов. Использование компьютерных программ даёт возможность значительно расширить круг исследуемых явлений, введя в него работы, которые невозможно поставить в условиях и хорошей физической лаборатории. В то же время без самостоятельного выполнения работ, «руками», невозможно понять сущ-

ность физики как науки. Поскольку современный технологический прогресс в очень значительной степени связан с изучаемыми в данных лабораторных работах областями общей физики, то лабораторные работы рассматриваются как первая ступень знакомства студентов с современной электроникой и электромагнитной техникой.

Большое внимание уделяется формату представления результатов лабораторных исследований и корректному оцениванию погрешностей. Студентам прививаются навыки представления результатов экспериментальных исследований в законченной и удобной для дальнейшего анализа форме.

Пособие снабжено серией вопросов по теоретическому минимуму, что позволяет студентам более осмысленно готовиться к выполнению лабораторной работы и понимать сущность явлений непосредственно при работе с лабораторной установкой.

Представленные лабораторные работы охватывают основные разделы электричества и магнетизма. Близкое знакомство с экспериментальными методами, лежащими в основе наших физических знаний о природе, несомненно, совершенно необходимо любому современному специалисту в области технических наук.

Допуск к лабораторной работе

Каждая работа выполняется бригадами, состоящими, как правило, из 2–3-х студентов. Допуск к выполнению лабораторной работы проводится преподавателем по бригадам, с персональным опросом каждого студента. Для допуска:

- каждый студент предварительно оформляет свой персональный конспект данной лабораторной работы (ЛР) (см. соответствующие требования);

- преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов;

- студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черно-вике конспекта или устно);

- преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

Оформление лабораторной работы к зачету

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

В отчете должны быть представлены все расчеты требуемых величин и погрешностей к ним, заполнены все таблицы, построены все графики.

Графики должны быть представлены на миллиметровой бумаге или с помощью компьютерной графики. Оси декартовой системы должны быть подписаны и иметь риски равномерного масштаба, должны быть ярко отмечены экспериментальные и теоретические точки. Форма графика – гладкая линия (не ломаная).

Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.

Записаны **выводы** по каждому графику.

Выписан **ответ** по установленной форме (осмысленное количество значащих цифр с указанием погрешности).

Записаны **выводы** по ответу.

В случае, если измерялась известная физическая величина, должно быть сделано сравнение с табличным значением.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1

ЗНАКОМСТВО С ОСЦИЛЛОГРАФОМ

Принципы работы

— прибор, предназначенный для исследования
-го

-фика.

Делается это посредством лучевой трубки, отклоняющей системы и генератора развертки. Луч представляет собой пучок электронов, образованный электронной пушкой, сфокусированный специальными пластинами. Лучевая трубка формирует пучок электронов, который, попадая на экран, заставляет светиться люминофор. На люминесцентном экране мы можем видеть пятно большего или меньшего диаметра и четкости. Отклоняющая система, которая может быть магнитной или электростатической, позволяет перемещать пучок по поверхности экрана в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Чем сильнее напряжение, приложенное к управляющим электродам, тем больше отклоняется пучок. Подавая на управляющие электроды по координате X пилообразное напряжение, мы создаем развертку. То есть луч синхронно с управляющим напряжением начинает двигаться по экрану слева направо и доходит до конечной точки. При спаде пилообразного напряжения до нуля луч возвращается в исходную точку слева. В результате на экране появляется светящаяся линия, и эта линия прочерчивается с каждым периодом «пилы». Длительность периода развертки определяется переключателем генератора развертки (от 1 с до 0.05 мкс). На управляющие электроды по координате Y подается изучаемое напряжение. В результате луч отклоняется от горизонтали, пропорционально поданному напряжению. Таким образом, если подобрать частоту развертки равной частоте исследуемого сигнала («синхронизировать»), то за каждый цикл электронный луч прочертит на экране линию, формой подобную исходному сигналу.

Электронно-лучевой осциллограф имеет экран, на котором отображаются графики входных сигналов. На экран нанесена разметка в виде сетки. У цифровых осциллографов (рис. 1.1) изображение выводится на дисплей (монохромный или цветной) в виде

готовой картинки. У аналоговых осциллографов в качестве экрана используется электронно-лучевая трубка с электростатическим отклонением.

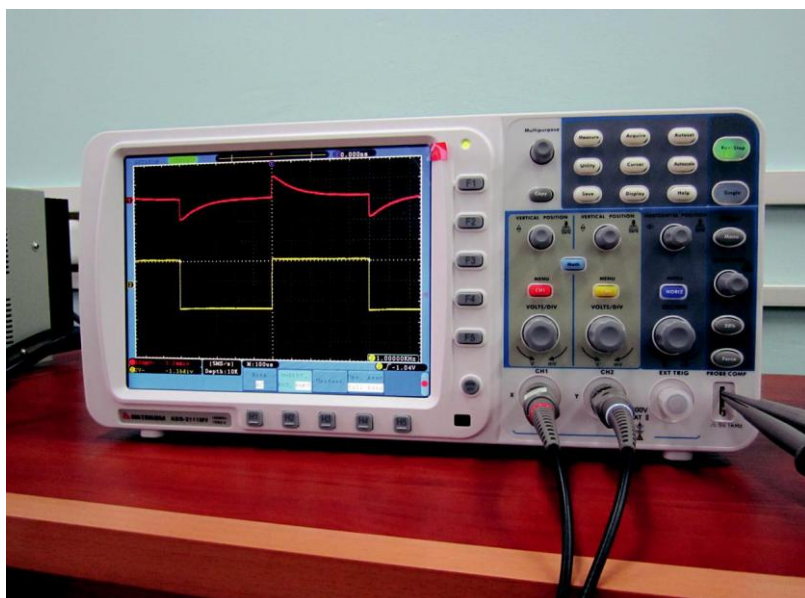


Рис. 1.1. Изображение передней панели цифрового осциллографа

На вход Y подается напряжение исследуемого сигнала. С помощью входного усилителя и переключателя делителя напряжения сигнала производится его нормализация, и мы можем видеть вертикальную линию (при выключенном генераторе развертки), удобную для определения величины амплитуды напряжения.

Осциллографы разделяются на одноканальные и многоканальные. Многоканальные осциллографы позволяют одновременно сравнивать сигналы между собой (формы, амплитуды, частоты и пр.)

Если запуск развёртки никак не связан с наблюдаемым сигналом, то изображение на экране будет выглядеть «бегущим» или даже совершенно размазанным. Это происходит потому, что в этом случае осциллограф отображает *различные* участки наблюдаемого сигнала на одном и том же месте. Для получения стабильного изображения все осциллографы содержат систему, называемую триггер.

Триггер в осциллографе — это устройство, которое задерживает запуск развертки до тех пор, пока не будут выполнены некоторые условия. Триггер имеет как минимум две настройки:

- Уровень сигнала: задаёт входное напряжение (в вольтах), при достижении которого запускается развертка

- Тип запуска: по *фронту* или по *спаду*

Таким образом, триггер запускает развертку всегда с одного и того же места сигнала, поэтому изображение сигнала на осциллограмме выглядит стабильным и неподвижным (конечно, только при правильных настройках триггера).

Если начало появления периода пилы (луч в крайнем левом положении) и начало периода сигнала совпадают, то за один проход развертки нарисуются один или несколько периодов измеряемого сигнала и картинка как бы остановится. Меняя скорость развертки можно добиться того, что на экране вообще останется только один период — то есть за один период пилы пройдет один период измеряемого сигнала.

Синхронизировать пилу с сигналом можно либо вручную, подстраивая ручкой скорость так, чтобы синусоида остановилась, а можно — по уровню. То есть мы указываем, при каком уровне напряжения на входе нужно запустить генератор развертки. Как только напряжение на входе превысит уровень, так сразу же запустится генератор развертки и выдаст нам импульс. В итоге генератор развертки выдает пилу только тогда, когда надо. В этом случае синхронизация получается полностью автоматической. При выборе уровня следует учитывать такой фактор, как помехи. Так что если взять слишком низкий уровень, то мелкие иголки помех могут запустить генератор когда не нужно, а если взять уровень слишком большой, то сигнал может под ним пройти и ничего не случится. Но тут проще покрутить ручку самому и сразу же все станет понятно. Сигнал синхронизации можно подать и с внешнего источника.

Для работы с осциллографом, необходимо произвести калибровку канала (каналов) осциллографа. Калибровка производится после прогрева прибора (примерно минут 10). Калибратор встроен в большинство осциллографов. Для калибровки высокочастотных моделей желательно иметь шнур с двумя разъемами (на выход калибратора и вход осциллографа), иначе возможны искажения сигнала. Для низкочастотных моделей возможно просто коснуться щупом выхода калибратора. Итак ставим ручку вольт/дел. так, чтобы сигнал калибратора занимал 2-4 деления на

экране (то есть если калибратор 1 вольт то на 250 милливольт) и включаем канал на переменное напряжение — на экране появится сигнал. Далее, смотря от частоты калибратора, ставим ручку развертки в положение, при котором видно не менее 5-7 периодов сигнала. Для частоты 1 кГц частота развертки, при которой каждый период занимает одно деление экрана, равен 1 мс (одна миллисекунда). Далее смотрим, чтобы сигнал на протяжении этих 5-7 периодов попадал точно по делениям экрана. Для аналоговых осциллографов выбирается, как правило, ± 4 деления от центра экрана, так что на протяжении восьми делений сигнал должен точно совпадать. Если не совпадает, крутим ручку плавного изменения развертки, добиваясь совпадения. Заодно проверяем амплитуду (размах) сигнала, добиваясь совпадения с тем, что написано на калибраторе — для этого крутим ручку плавного изменения чувствительности вольт/дел. Не забываем, что если у вас стоит чувствительность канала в 250 милливольт, то сигнал в 1 вольт занимает при правильной настройке 4 деления. После калибровки ваш прибор будет точно показывать сигнал. Вот теперь можно не только смотреть, но и измерять сигналы. Допустим, у вас есть устройство, на выходе которого заведомо известный по напряжению сигнал. Вы ставите чувствительность вертикального отклонения (вольт/дел) на удобную для наблюдения позицию так, чтобы сигнал не выходил за рамки экрана, и касаетесь щупом нужного места на плате. На экране видите ваш сигнал. При необходимости переключаете развертку на удобную для наблюдения позицию. Если амплитуда сигнала больше, чем допускает документация на ваш осциллограф, то обязательно надо воспользоваться делителем с коэффициентом деления 1/10 или 1/100, соблюдая при этом правила электробезопасности. Можно измерять амплитуду и частоту сигнала, подсчитывая деления по вертикали и горизонтали. Некоторые модели осциллографов оснащены системой, которая подсвечивает часть луча и измеряет время этого подсвеченного участка, что удобно при измерении частоты или периода. В этом случае вы отдельными ручками ставите длину подсвеченного участка на начало и конец одного или нескольких периодов сигнала, и на цифровом табло считываете значение в мс или ином интервале времени. Также измеряется и амплитуда. Это повышает точность измерений и ускоряет их.

Настройки панели управления

Яркость, фокус и освещение шкалы не требуют пояснений. Это настройки интерфейса.

Усилитель Y и стрелочки «вверх-вниз». Эта ручка позволяет перемещать изображение сигнала вверх или вниз, добавляя ему дополнительное смещение. Иногда не хватает размера экрана, чтобы вместить весь сигнал. Приходится его загонять вниз, принимая за ноль не середину, а нижнюю границу.

Тумблер, переключающий ввод с прямого на емкостный. Этот тумблер в том или ином виде есть на всех без исключения осциллографах. Он позволяет подключать сигнал к усилителю либо напрямую, либо через конденсатор. Если подключить напрямую, то пройдет **и постоянная составляющая, и переменная**.

А через емкость проходит **только переменная**. Например, пусть надо посмотреть на уровень помех блока питания с напряжением 12 вольт, а величина помех может быть не более 0.3 вольт. На фоне 12 вольт эти 0.3 вольт будут совсем незаметны. Можно, конечно, увеличивать коэффициент усиления по Y, но тогда график вылезет за экран, а смещения по Y не хватит, чтобы увидеть вершину. Тогда нам нужно лишь подключить конденсатор и тогда те 12 вольт постоянной составляющей отфильтруются на нем, а в осциллограф пройдет только переменный сигнал — те самые 0.3 вольта помехи, который можно усилить и наблюдать на экране.

Коаксиальный разъем подключения щупа. Каждый щуп содержит в себе **сигнал и землю**. Землю обычно подключают на минус или на общий провод схемы, а сигнальным тестируют схему. Осциллограф показывает напряжение на щупе относительно общего провода. Чтобы понять, где сигнальный вход, а где земля, достаточно взять за них рукой по очереди. Если возьмешься за землю, то на экране останется прямая линия. А если возьмешься за сигнальный вход, то на экране появятся случайные наводки — от твоего тела, служащего в данный момент антенной. На некоторых щупах **внутри встроен делитель напряжения 1:10**

или 1:100, который позволяет подключать осциллограф к высокому напряжению без риска его сжечь. Включается и выключается он тумблером на щупе.

Калибровочный выход. На нем имеется **прямоугольный сигнал частотой 1 КГц и напряжением 1 вольт**. Он используется для проверки работы самого осциллографа.

Усиление служит для масштабирования сигнала по оси Y. Там же показано, сколько приходится вольт на деление сетки экрана.

Скажем, если стоит 2 вольт на деление, а сигнал на экране достигает высоты две клеточки размерной сетки, значит, амплитуда сигнала равна 4 вольт.

Длительность определяет частоту развертки. Чем короче интервал, чем больше частота, тем более высокочастотный сигнал мы можем разглядеть. Тут клеточки проградуированы уже в милли- и микросекундах. Так что по ширине сигнала можно посчитать, сколько занимает он клеток, а умножив число клеток на масштаб по оси *X*, получим длительность сигнала в секундах. Аналогично можно посчитать длительность одного периода и, зная длительность, найти частоту сигнала $f=1/t$. Поверх грубой регулировки расположена ручка, позволяющая менять масштаб плавно.

Вход X. На него можно подать свой сигнал вместо пилы развертки. Таким образом, осциллограф может послужить телевизором или монитором, если собрать схему, которая будет формировать изображение.

Развертка и стрелочки влево и вправо позволяют перемещать график по экрану влево и вправо. Их используют, чтобы подогнать нужный участок под деления сетки.

Блок синхронизации.

Ручка уровня — задает уровень, от которого будет стартовать генератор пилы.

Переключатель с внутренней на внешнюю, позволяет подать на вход синхросигналы с внешнего источника.

Переключатель с надписью +/- переключает полярность уровня. Есть не на всех осциллографах.

Ручка стабильность - позволяет вручную попытаться подогнать скорость синхронизации.

ХОД РАБОТЫ

Определение частоты и амплитуды исследуемого сигнала

1. Переключатель диапазонов поставить в положение 1, 10, 10² или 10³. Выставить с помощью верньерной ручки какую-либо частоту в пределах этих четырех указанных диапазонов. Записать в таблицу 1.1 исследуемую частоту. Ручкой «усиление Y» осциллографа, установить величину сигнала по вертикали порядка 25-30 мм. Отрегулировать яркость и фокусировку. Меняя положение ручки «развертка», наблюдать изменение изображения сигнала с изменением частоты развертки. Установить такой диапазон развертки, чтобы на экране поместилось два, три или четыре периода

синусоидального напряжения. (Если изображение перемещается, то можно добиться неподвижности изображения ручками «часто-та плавно» и «синхронизация»).

2. Для калибровки осциллографа используется внутренний генератор сигналов («1v, 1kHz»). Сигнал с выхода этого усилителя (блок калибровки) подают на вход рабочего канала. На экране появятся две горизонтальные линии. С помощью рукоятки–переключателя развёртки добиться появления меандра (непрерывная последовательность прямоугольных импульсов).

3. Измерить величину поданного с генератора сигнала. Для этого определяют на экране осциллографа по масштабной сетке величину в клетках между минимумом и максимумом сигнала. Определяют цену деления прибора по положению рукоятки «V/дел». Амплитуда сигнала равна половине получившегося числа. Теперь можно измерить величину периода сигнала. Для этого устанавливают синусоиду симметрично относительно горизонтальной прямой, проходящей через центр экрана, и регистрируют величину периода по точкам пересечения исследуемой синусоидой этой прямой.

4. Меняют с помощью генератора амплитуду и длительность сигнала, а затем измеряют параметры сигнала с помощью осциллографа. Результаты заносят в таблицу 1, повторив измерения трижды.

Таблица 1.1. Сравнение параметров сигнала на генераторе и осциллографе

Номер измерения	ν , КГц (на генераторе)	ν , КГц (на осциллографе)	A вольт (на генераторе)	A вольт (на осциллографе)
1				
2				
3				

Контрольные вопросы

1. Основные части осциллографа и их назначение.
2. Устройство и принцип действия электроннолучевой трубки.
3. Принцип действия генератора развертки. Синхронизация.
4. Измерение частоты синусоидального напряжения.
5. Измерение эффективного значения напряжения.

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы: познакомиться с основными методами измерения сопротивления проводников.

Приборы и принадлежности: источник тока, цифровой вольтметр В7-38, измеряемые сопротивления, провода.

1. Теоретические сведения

а) Метод двух приборов (амперметра и вольтметра).

Методы измерения электрических сопротивлений чрезвычайно разнообразны. Выбор метода для измерения того или иного сопротивления зависит от целого ряда условий, при которых производится измерение.

Одним из методов измерения сопротивлений является метод амперметра и вольтметра. Он применяется как на постоянном, так и на переменном токе. Метод не требует специальных добавочных приспособлений аппаратуры, и поэтому имеет широкое практическое применение. Погрешность метода зависит в основном от погрешности используемых приборов.

В основе этого метода лежит закон Ома, применяемый к участку цепи, включающему измеряемое сопротивление. Включение приборов для измерения неизвестного сопротивления R_X осуществляется по одной из двух схем рис. 2.1, рис 2.2.

Рассмотрим каждую из схем в отдельности.

В **схеме рис. 2.1** вольтметр учитывает не только падение напряжения на измеряемом сопротивлении, но и падение напряжения на амперметре, следовательно, показание вольтметра U будет:

$$U = U_X + U_A \quad (2.1)$$

Если воспользоваться показаниями приборов для определения измеряемого сопротивления, то получим величину:

$$R_X' = \frac{U}{I} = \frac{U_X + U_A}{I} = R_X + R_A \quad (2.2)$$

В этом случае $I_X = I_A$, тогда абсолютная погрешность измерения сопротивления, обусловленная самой схемой, будет:

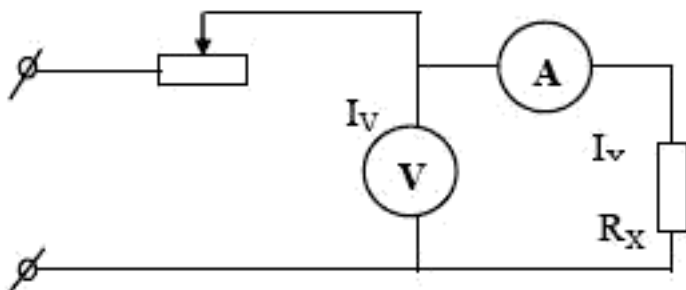


Рис. 2.1 Первый вариант подключения приборов

$$\Delta = R_X' - R_X = R_A$$

Настоящая величина измеряемого сопротивления определяется формулой:

$$R_X = R_X' - R_A$$

Относительная погрешность определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{R_X} = \frac{R_A}{R_X' - R_A} = \frac{R_A}{R_X} \quad (2.3)$$

Если измерения проводить **по схеме рис. 2.2**, то вольтметр покажет падение напряжения на искомом сопротивлении, показание же амперметра будет равно сумме токов, протекающих по измеряемому сопротивлению R_X и по вольтметру, то есть $I = I_X + I_V$, где I_V – ток через вольтметр:

$$I_V = \frac{U_X}{R_V}$$

Искомое сопротивление можно найти из выражения:

$$R_X = \frac{U_X}{I} = \frac{U_X}{I - I_V} = \frac{U_X}{I - \frac{U_X}{R_V}} \quad (2.4)$$

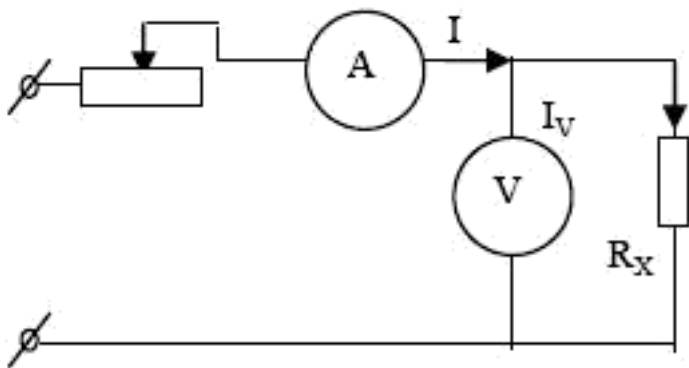


Рис. 2.2 Второй вариант подключения приборов

где R_V – сопротивление вольтметра. Если величину измеряемого сопротивления вычислять по показаниям приборов, то полученное численное значение его в этом случае окажется равным

$$R'_x = \frac{U_x}{I} \quad (2.5)$$

Используем значение R_X из уравнения (2.4) и подставим I из (2.5), получим

$$R_x = \frac{U_x}{\frac{U_x}{R'_x - R_V}} = \frac{R'_x R_V}{R'_x - R_V} \quad (2.6)$$

Абсолютная погрешность измерения, обусловленная применяемой схемой, выражается формулой

$$\Delta = R'_x - R_x = R'_x - \frac{R'_x R_V}{R'_x - R_V} = -\frac{(R'_x)^2}{R_V - R'_x}$$

Относительная же погрешность измерения окажется равной

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta}{R_x} = \frac{(R'_x)^2 (R_V - R'_x)}{(R_V - R'_x) R'_x R_V} = -\frac{R'_x}{R_V} \quad (2.7)$$

Принимая во внимание (1.6), находим

$$\varepsilon = - \frac{R_x R_V}{(R_x + R_V) R} = - \frac{R_x}{R_x + R_V}$$

Из выражений (2.3) и (2.7) следует, что погрешность при измерении сопротивления по методу амперметра и вольтметра зависят от величины измеряемого сопротивления и сопротивления приборов.

На рис. 2.3 представлены кривые I и II измерения относительных погрешностей в функции измеряемого сопротивления, вычисленные по формуле (2.3) и (2.7). Кривая II является зеркальным изображением кривой I, причем точка ее пересечения с кривой I (точка А) соответствует некоторому сопротивлению R , при котором абсолютные величины относительных погрешностей для обеих схем равны между собой.

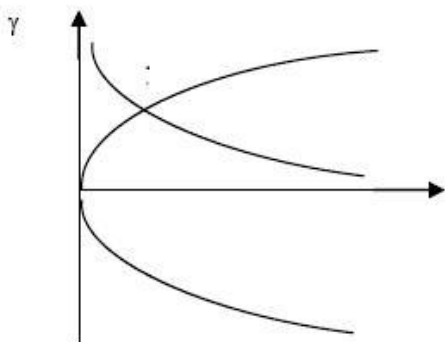


Рис. 2.3. Относительная погрешность измерений как функция измеряемого сопротивления

Для этой точки справедливо равенство

$$\frac{R_A}{R} = \frac{R}{R + R_V}$$

Решая это уравнение относительно R , получим

$$R = \frac{R_A}{2} + \sqrt{\frac{R_A^2}{4} + R_A R_V} \quad (2.8)$$

Так как всегда $R > 0$, то в уравнение (2.8) знак минус перед корнем не рассматривается. Кривые I и II (рис. 4) позволяют сделать следующие заключения: если величина $R_x > R$, то следует пользоваться первой схемой, дающей меньшую относительную погрешность, если измеряемое сопротивление $R_x < R$, то нужно применять вторую схему.

Так как в большинстве случаев оказывается возможным пренебречь величинами $R_A / 2$ и $R_A^2 / 4$ по сравнению с величиной $R_A R_V$, находящейся под корнем ($R_A \ll R_V$), то вместо уравнения (2.8) получается выражение очень удобное для практического использования при выборе схемы измерения:

при $R_x > R_A \sqrt{R_V}$ применяют первую схему; при

$R_x < R_A \sqrt{R_V}$ применяют вторую схему.

Разумеется, при получении всех результатов, кроме погрешностей, обусловленных используемой схемой измерения, необходимо стандартным образом учитывать погрешности самих измерительных приборов.

2. Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по схемам, изображенным на Рис. 2.1 и Рис. 2.2.

2. Снять показания приборов, учитывая, что V — вольтметр В7-38 с погрешностью измерения постоянного напряжения на пределе 100 В не более 0,2%, ($R_V = 1 \text{ Мом}$); A — амперметр, реализованный как вольтметр измеряющий падение напряжения на эталонном сопротивлении. То есть сила тока — это показания вольтметра деленные на эталонное сопротивление 0.1 Ом.

3. Полученные результаты записать в отчет и определить R_x .

4. Рассчитать погрешности измерений для каждого случая.

Контрольные вопросы

1. Вывести формулы абсолютной и относительной ошибок (схемы Рис. 1 и Рис. 2).

2. Какой схемой следует пользоваться при измерении малых сопротивлений?

3. Какой схемой следует пользоваться при измерении больших сопротивлений и почему?

4. Назовите основные методы измерения сопротивления проводников.

5. Дать физическое объяснение зависимости сопротивления металла от температуры и явления сверхпроводимости.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНДУКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ ОТ ЧАСТОТЫ

1. Теоретические сведения

Если на некоторую электрическую цепь подается синусоидальное напряжение вида:

$$U = U_0 \cos \omega t \quad (3.1)$$

то, вообще говоря, ток, проходящий через цепь, будет сдвинут по фазе:

$$I = I_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (3.2)$$

что объясняется возможным присутствием емкости и индуктивности в цепи.

В этом случае средняя потребляемая мощность определяется формулой:

$$P_{\text{ср.}} = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi \quad (3.3)$$

В электротехнике, кроме амплитудных значений, используется также понятие эффективного напряжения и силы тока:

$$U_{\text{эфф.}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}, I_{\text{эфф.}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

Закон Ома для цепи переменного тока в произвольный момент времени представляет собой дифференциальное уравнение, которое с математической точки зрения целесообразно решать в комплексной форме. При этом естественным образом возникает комплексный параметр, называемый импедансом

$$Z = R + i(\omega L - \omega C) \quad (3.5)$$

(здесь i — мнимая единица), который является обобщением понятия сопротивления для переменного тока.

В случае преимущественного индуктивного вклада в импеданс сила тока отстает по фазе на $p/2$ от напряжения. При этом соотношение между амплитудами имеет вид:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L}, \quad (3.6)$$

где $R_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление катушки.

В случае преимущественного емкостного вклада в импеданс сила тока опережает по фазе на $p/2$ напряжение на конденсаторе. При этом соотношение между амплитудами имеет вид:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_C}, \quad (3.7)$$

где $R_C = 1/\omega C$ представляет собой емкостное сопротивление конденсатора.

В общем случае сдвиг фазы j и соотношение между амплитудами вычисляется с помощью векторных диаграмм для амплитуд. При этом оказывается, что справедливо соотношение между амплитудами, аналогичное закону Ома:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \quad (3.8)$$

и такое же соотношение для эффективных значений. А сдвиг фазы определяется формулой:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = \frac{R_L - R_C}{R} \quad (3.9)$$

2. Выполнение работы

На коммутационном стенде поочередно собирают схему 3.1 и 3.2 с индуктивностью или емкостью соответственно. Заранее измеряют активное сопротивление R_L (*activ.*) катушки индуктивно-

сти и подводящих проводов с диодами. Включив звуковой генератор ГЗ-102 в сеть, устанавливают частоту $n = 50$ Гц и на потенциометр П подают эффективное напряжение 5–10 В. Включив схему, реостатом выставляют эффективное напряжение на вольтметре $V = 5$ В и измеряют эффективный ток I_Σ через цепь. Для этого измеряют вольтметром падение напряжения V_a на эталонном сопротивлении $R_a = 0,1$ Ом (или 1 Ом), включенном параллельно диодному мостику и пользуются формулой:

$$I_\Sigma = V_a / R_a \quad (3.10)$$

Затем последовательно устанавливают частоты 5000, 10000, 20000 Гц для индуктивности (и 50, 100, 500, 1000, 5000 Гц для емкости). При напряжении $V = 5$ В отмечают соответствующие значения тока I_Σ . Постоянство напряжения V при различных частотах контролируют, подстраивая потенциометр П. Значения частот и тока заносят в таблицу. По экспериментальным данным из формулы (3.8) находят значения реактивных сопротивлений:

$$R_{L,C} = \sqrt{\frac{V^2}{I_\Sigma^2} - R^2} \quad (3.11)$$

Здесь в качестве активного сопротивления R в случае измерения реактивного R_L выступает сумма: $R = R_a + R_L$ (activ.), а в случае измерения R_C — $R = R_a$ (мы считаем, что сопротивление вольтметра и диодного мостика R_a).

Погрешности вычисленных таким образом сопротивлений определяются стандартным образом и находятся по формуле:

$$\Delta K_{L,C} = \frac{V}{I^2 R} \sqrt{\Delta V^2 + \frac{V^2}{I^2} \Delta I^2} \quad (3.12)$$

Погрешность цифрового вольтметра В7-38 при измерении постоянного напряжения на пределе 100 В не более 0,2%, ($R_V = 1$ Мом); погрешность стрелочного вольтметра можно принять равной цене одного деления шкалы.

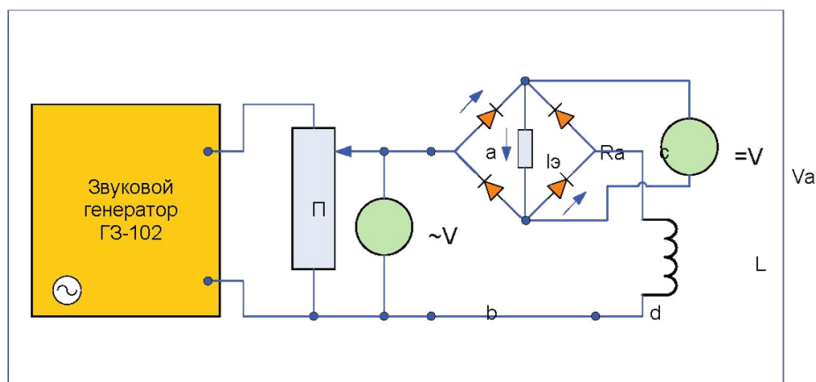


Рис. 3.1 Схема с индуктивным сопротивлением

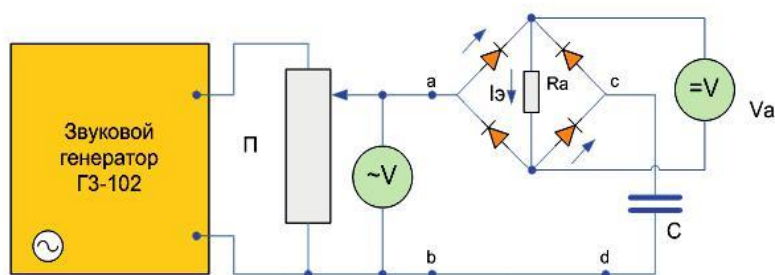


Рис. 3.2 Схема с емкостным сопротивлением

Контрольные вопросы

1. Что такое ёмкость конденсатора?
2. Как найти дифференциальное уравнение, которому подчиняется ток, протекающий через конденсатор?
3. В каких единицах измеряется ёмкость (и связь с другими единицами СИ)?
4. В каких единицах измеряется величина $\tau = RC$?
5. Что такое индуктивность?
6. Как найти дифференциальное уравнение, которому подчиняется ток, протекающий через катушку индуктивности?
7. В каких единицах измеряется индуктивность (и связь с другими единицами СИ)?

Лабораторная работа № 4

ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

1. Теоретические сведения

Термопарой называется совокупность 2-х (полу) проводников, спаянных в замкнутый контур. При разности температур между горячим и холодным спаями в контуре возникает электродвижущая сила. Металл или полупроводник, к которому идет ток через более нагретый спай термопары, называется положительным, а другой — отрицательным. Первый играет роль анода, а второй — катода. По этому признаку все металлы располагают в так называемый термоэлектрический ряд. Электродвижущая сила всякой термопары складывается из электродвижущих сил обоих ее спаев. Электродвижущая сила спая зависит от рода контактирующих металлов и от температуры. Если обозначить ее через $f(t)$, то электродвижущая сила термопары представится разностью:

$$E = f(t_1) - f(t_2)$$

где t_1 — температура более, а t_2 — менее нагретого спаев. Производная $\alpha = df / dt$ называется коэффициентом термоэлектродвижущей силы. Этот коэффициент является характеристикой обоих металлов термопары. Условились величину α измерять по отношению к эталонному металлу, за который принят свинец. Тогда коэффициент термоэлектродвижущей силы α_{12} металла 1 по отношению к металлу 2 определяется формулой:

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$$

Все величины зависят от чистоты материалов и сильно меняются с добавлением примесей.

Простейшей является линейная функция $f(t) = f_0 + \alpha_{12}t$. В этом случае:

$$E = \alpha_{12} (t_1 - t_2)$$

Вообще говоря, термоэлектрические свойства у полупроводников выражены значительно сильнее, чем у металлов. Это объ-

ясняется тем, что в металлах свободные электроны находятся в вырожденном состоянии, и их энергия и концентрация слабо зависят от температуры. В то время, как ситуация для дырок и электронов в полупроводниках противоположная. Напомним, что полупроводники с дырочной проводимостью называют полупроводниками *p*-типа и получают путем добавления акцепторной примеси, а полупроводники с электронной проводимостью называют *n*-типа, они содержат донорную примесь.

2. Подготовка к работе

Для выполнения работы необходимо:

1. Подключить стенды к сети $U=24\text{В}$ (в сети должно быть напряжение $+12\text{В}$!!) строго соблюдая полярность подключения (+/-), при этом загорится красный светодиод.
2. Проверить, чтобы переменный резистор R_1 на плате стенда находился в крайнем левом положении (против часовой стрелки до упора), то есть. в исходном положении. При этом положении ток через нагреватель не протекает и радиатор не греется.
3. Сделать заготовку таблиц для записи измеряемых данных.

3. Калибровка *p-n* перехода

- При калибровке *p-n* перехода переключатель режима измерения находится в крайнем левом положении. Выходные клеммы стенда соединены с вольтметром В7-38. Разъем термопары соединен с милливольтметром (в специальный разъем) и переключатель милливольтметра включен для измерения температуры.

- Таким образом, В7-38 измеряет напряжение на *p-n* переходе, а милливольтметр измеряет температуру в $^{\circ}\text{C}$.

- Устанавливаем резистор R_1 в рабочее положение (метка на резисторе) и через транзистор нагревателя начинает протекать ток порядка $550\text{--}600\text{ мА}$.

- Радиатор нагревателя начинает нагреваться, и мы фиксируем через каждый градус значение температуры и напряжение на *p-n* переходе.

- По данным из таблицы 1 строим график зависимости:

$$t = f(V_{pn})$$

Таблица 4.1. Калибровка p - n перехода

Номер измерения	Температура t °C	Напряжение на p - n переходе, V
1	19	0.6973
2	20	0.6934
3	21	0.6908
*		
*		
*		
*		
n	42	0.5300

4. Градуировка термопары

- При градуировке термопары выходные клеммы подсоединить к В7-38 (согласно полярности).
- Переключателем выбираем источник напряжения (p - n переход или термопара). На резисторе R_1 выставяем рабочее положение (метка).
- Через транзистор нагревателя начинает протекать ток порядка $550\text{--}600\text{ мА}$
- Фиксируем в таблице 2 значение напряжения на термопаре и на p - n переходе. Данные записываем в таблицу через пять единиц $5 \times 10^{-5} V$ напряжения на термопаре.

Таблица 4.2. Градуировка термопары.

Номер измерения	Напряжение на термопаре, V	Напряжение на p - n переходе
	Нагревание	
1.		
*		
*		
n		
	Остывание	
1.		
2.		
3.		

Замеры производим при нагревании и остывании нагревателя.

- С помощью графика (или формулы), полученной по результатам Таблицы 1, конвертируем напряжение на p - n переходе V_{p-n} в температуру t .

- По результатам эксперимента строим график $t = f(V_{термон.})$.

5. Построение графиков и получение формул

При построении графиков в п. 1 и п. 2 будем предполагать, что они имеют линейный вид и описываются зависимостью вида:

$$y = f(x) = a + bx$$

Далее, коэффициенты a и b находятся с помощью метода наименьших квадратов, который предполагает минимизацию суммы квадратов отклонений:

$$Q(a, b) = \sum_i [y_i - (a + bx_i)]^2 \rightarrow \min$$

Тогда расчетные формулы для коэффициентов имеют вид:

$$b = \frac{(y \cdot x)_{\text{средн}} - (y)_{\text{средн}} \cdot (x)_{\text{средн}}}{(x^2)_{\text{средн}} - [(x)_{\text{средн}}]^2}$$

и

$$a = (y)_{\text{средн}} - b \cdot (x)_{\text{средн}}$$

где *средн.* — означает усреднение данной величины по всем имеющимся значениям.

При расчетах по Таблице 4.1 в качестве x у нас будет выступать напряжение на p - n переходе, а в качестве y — температура.

При расчетах по Таблице 4.2 в качестве x у нас будет выступать напряжение на термопаре, а в качестве y — температура, полученная из напряжения на p - n переходе при помощи графика (формулы) Таблицы 4.1.

В связи с большим количеством исходных данных все вычисления рекомендуется выполнять на *PC* с помощью стандартной программы типа *EXCEL* или *OpenOffice*.

Коэффициенты термоэлектродвижущей силы a_{12} для термопары и p - n перехода, упомянутые в теоретическом введении связаны с вычисленными коэффициентами по формуле $a_{12} = 1/b$. Их следует вычислить и сравнить.

Лабораторная работа № 5

ТРАНЗИСТОР

В настоящей работе снимаются характеристики транзистора, вычисляются его параметры и наблюдается усиление переменного сигнала усилителем на транзисторе.

1. Физические процессы в транзисторе

Рассмотрим биполярный транзистор, то есть полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами, для работы которого существенно участие в создании тока носителей заряда обоих знаков. n -полупроводник представляет собой полупроводящий кристалл с примесью образующей дополнительные свободные электроны, а p -полупроводник содержит примесь связывающую свободные электроны, что приводит к образованию носителей положительного знака — дырок. Транзистор представляет собой пластинку германия или другого полупроводника, в которой созданы три области с различной электропроводностью. Транзистор типа n - p - n имеет среднюю область с дырочной электропроводностью, а две крайние области — с электронной электропроводностью. Средняя область называется базой, одна крайняя область — эмиттером, другая — коллектором. Расстояние между p - n переходами должно быть очень малым, не более нескольких микрон, то есть область базы должна быть очень тонкой.

Обычно к эмиттерному переходу подключают напряжение того же знака, что и основные носители эмиттера, а к коллекторному переходу — обратное напряжение. p - n -переход, включенный в прямом направлении, пропускает электрический ток, а включенный в обратном — практически не пропускает. Свойства p - n -перехода отображаются его **вольтамперной характеристикой**, представляющей зависимость значения и направления тока от значения и полярности напряжения (рис. 5.1). При достижении обратным напряжением некоторого критического значения $U_{кр}$ обратный ток возрастает. Этот режим называется **пробоем p - n -перехода**.

При описанном включении n - p - n транзистора ток между эмиттером и базой i_e будет в основном состоять из электронов, движущихся из эмиттера в базу. Дырки из базы в эмиттер проникают также легко — для них эмиттерный переход включен в прямом направлении. Но концентрацию дырок в базе делают значительно меньше концентрации свободных электронов в области

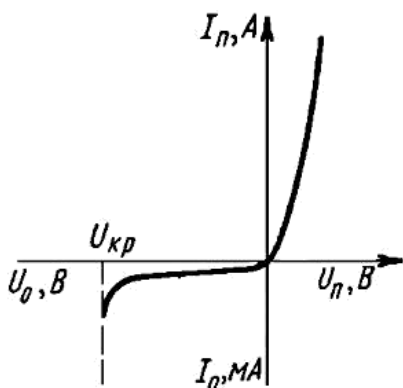


Рис 5.1. Вольтамперная характеристика электронно-дырочного перехода

эмиттера. Поэтому током дырок из базы в область эмиттера можно пренебречь. Часть электронов, проходя через базовую область, рекомбинирует там с дырками, однако большая их часть диффундирует сквозь узкую базовую область и попадает в поле коллекторного перехода, который для них открыт. Таким образом, ток коллектора практически равен току эмиттера, отлича-

ясь от него на небольшую долю вследствие рекомбинации части электронов в базовой области. Так как часть дырок в базе рекомбинирует с электронами, пришедшими из эмиттера, то для их восполнения в базе образуются новые дырки (вследствие ухода лишних электронов из базы во внешнюю цепь). Таким образом, ток базы можно считать состоящим из дырок, как бы приходящих из внешней цепи. Назначением эмиттера является инжекция (впуск, впрыскивание, но не эмиссия в обычном понимании этого термина) носителей заряда в базу. База – это область, в которую инжектируются эмиттером неосновные для нее носители заряда. Коллектор – область, назначением которой является экстракция (прием, поглощение) носителей заряда из базы. Между рассмотренными токами в соответствии с законом Кирхгофа выполняется соотношение

$$i_{\Sigma} = i_K + i_B \quad (5.1)$$

Аналогичное соотношение выполняется и для приращений токов: $\Delta i_{\Sigma} = \Delta i_K + \Delta i_B$

Если тип электропроводности областей меняется в следующем порядке: *p* (эмиттер), *n* (база), *p* (коллектор), то прибор называют транзистором типа *p-n-p*. Он может быть изготовлен и на основе кремния *n*-типа.

Если в качестве базы использовать германий или кремний *p*-типа, а эмиттерный и коллекторный переходы образовать с помощью донорных материалов, то получим транзистор типа *n-p-n*.

Принцип действия транзисторов обоих типов одинаков. Разница в том, что полярность включения источников питания для них противоположна (рис. 5.2). В соответствии с этим в транзисторе типа $p-n-p$ коллекторный ток создается движением дырок, а в транзисторе типа $n-p-n$ – движением электронов.

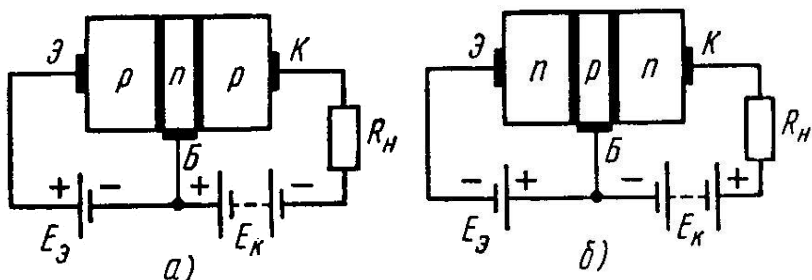


Рис. 5.2. Включение источников питания транзистора а) типа $p-n-p$ и б) типа $n-p-n$

2. Характеристики транзистора

Зависимость между токами, действующими в транзисторе, имеет сложный характер. Ее удобно описывать графически в виде характеристик. Существуют три основных схемы включения транзистора в усилителях. Они различаются тем, какой из трех электродов является общим для входной и выходной цепи. Рассмотрим схему с общим эмиттером. Входное напряжение $U_{сигн}$, которое необходимо усилить, подается на участок база – эмиттер. На базу подается также напряжение смещения $U_{бэ}$. При этом в цепи базы протекает некоторый ток, т.е. входное сопротивление транзистора получается сравнительно небольшим. Цепь коллектора (выходная цепь) питается от источника $U_{кэ}$. Для получения усиленного выходного напряжения в эту цепь включен резистор нагрузки R . Статические характеристики снимаются на постоянном токе. В качестве входных характеристик для описанной схемы можно рассматривать зависимость

$$i_б(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = const,$$

а выходных – зависимость

$$i_к(U_{кэ}) \text{ при } i_б = const.$$

Семейства указанных характеристик изображены на рис. 5.3.

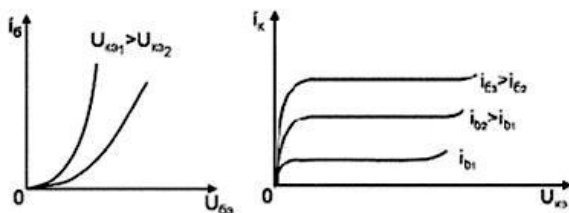


Рис. 5.3. Входные и выходные характеристики транзистора

Входные и выходные характеристики транзистора имеют тесную связь с вольтамперной характеристикой полупроводникового диода. Действительно, входные характеристики относятся к эмит-терному переходу, который работает при прямом напряжении. Поэтому они подобны характеристике прямого тока диода. Выходные характеристики подобны характеристике обратного тока диода, так как отображают свойства коллекторного перехода, работающего при обратном напряжении (для основных носителей заряда).

3. Параметры транзистора

По входным характеристикам можно определить входное сопротивление транзистора:

$$\kappa_{BX} = \left[\frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right]_{U_{КЭ} = \text{const}} \quad (5.2)$$

а по выходным – выходное сопротивление:

$$\kappa_{ВЫХ} = \left[\frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta I_K} \right]_{I_B = \text{const}} \quad (5.3)$$

Вычисленные таким образом величины R_{BX} и $R_{ВЫХ}$ являются сопротивлениями транзистора по переменному току, т. е. такое сопротивление оказывает транзистор переменному току небольшой амплитуды (сравнительно с величиной постоянного тока, текуще-го соответственно во входной и выходной цепях). Величины R_{BX}

и $R_{\text{блх}}$ используются при анализе транзистора в схемах усиления переменного тока или напряжения. Входное и выходное сопротивления транзистора по постоянному току вычисляются по формулам, в которых фигурируют не малые приращения, а сами токи и напряжения. Одним из важнейших параметров транзисторов является коэффициент усиления тока базы β , который определяется как отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы при постоянной разности потенциалов между эмиттером и коллектором.

$$\beta = \left| \frac{\Delta i_R}{\Delta i_B} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} \quad (5.4)$$

Так как основная часть тока эмиттера замыкается через цепь коллектора, коэффициент β всегда значительно больше единицы. У современных транзисторов $\beta = 10,300$. Иногда бывает удобно рассматривать другой параметр – коэффициент усиления по току эмиттера α . Он определяется отношением приращения тока коллектора к приращению тока эмиттера при постоянной разности потенциалов между коллектором и базой $U_{\text{БК}}$:

$$\alpha = \left| \frac{\Delta i_K}{\Delta i_E} \right|_{U_{БК} = \text{const}} \quad (5.5)$$

Значение α всегда меньше единицы. Так как обычно всегда $U_{\text{ЭБ}} \ll U_{\text{ЭК}}$ и, следовательно, $U_{\text{ЭК}} \approx U_{\text{БК}}$, то, учитывая связь между приращениями токов, можно записать связь между коэффициентами β и α в виде

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (5.6)$$

4. Описание экспериментальной установки

Изучение транзистора выполняется на установке, основным элементом которой является специальная монтажная панель (рис. 5.4). На ней размещены транзистор типа $n-p-n$ (или $p-n-p$) и некоторые другие элементы. Питание схемы осуществляется от источника постоянного напряжения 15 в. Ток, потребляемый схемой от источника, не более 5 мА. На панели есть специальные гнезда для подключения приборов, измеряющих ток и напря-

жение базы, ток и напряжение коллектора, гнезда для подачи на вход транзисторного усилителя сигнала от генератора переменного напряжения, гнезда для подключения осциллографа, чтобы наблюдать форму и величину этого сигнала на входе и выходе усилителя.

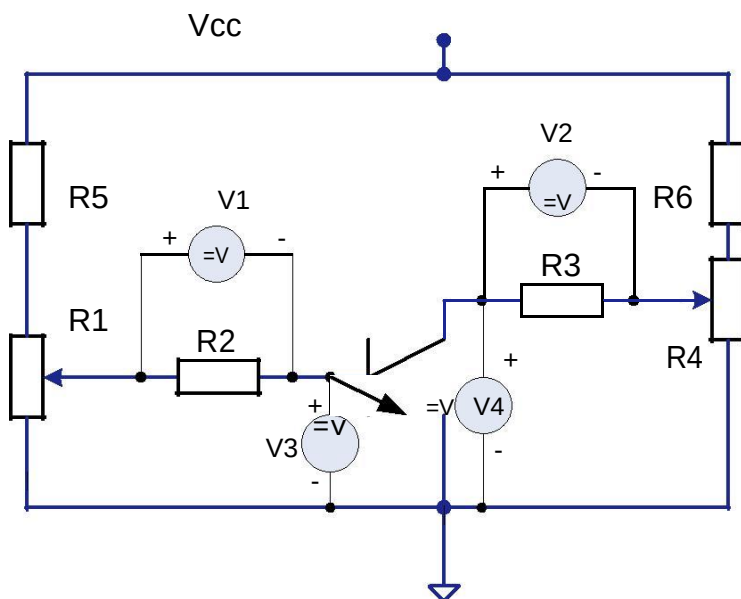


Рис. 5.4. Принципиальная схема стенда

Величина постоянного напряжения на базе транзистора регулируется потенциометром $R1$, а на коллекторе — потенциометром $R4$. Резистор $R2$ играет вспомогательную роль, ограничивая величину базового тока транзистора и способствуя плавности регулировки базового напряжения. Резистор $R3$ при изучении усиления выполняет роль нагрузки. Резистор $R5$ уменьшает величину напряжения, подаваемого на потенциометр $R1$.

Токи базы и коллектора измеряются вольтметрами V_1 и V_2 на известных сопротивлениях $R2$ и $R3$. Напряжения на базе и коллекторе измеряются вольтметрами $V3$ и $V4$. $V1$, $V2$ — вольтметры $B7-38$; $V3$, $V4$ — вольтметры, встроенные в стенд $CLE-118$ (на котором выполняется лабораторная работа). $R1 = 6,8 \text{ k}\Omega$, $R2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R3 = 1 \text{ }\Omega$, $R4 = 6,8 \text{ k}\Omega$, $R5 = 12 \text{ k}\Omega$.

5. Снятие выходных характеристик транзистора

Ручки потенциометров R1 и R4 установить в крайнее положение против часовой стрелки.

Плавное вращение ручки потенциометра R1, установить ток базы $I_{\bar{\delta}} = 10 \text{ мкА}$. Затем вращать ручку потенциометра R4 до появления коллекторного тока (при этом ток базы может слегка измениться). Потенциометром R1 восстановить значение $I_{\bar{\delta}} = 10 \text{ мкА}$. Получившиеся при этом значения $U_{кэ}$ и I_{κ} занести в таблицу. Снять зависимость $I_{\kappa}(U_{кэ})$ при $I_{\bar{\delta}} = 10 \text{ мкА}$, увеличивая $U_{кэ}$ с помощью R4 и поддерживая $I_{\bar{\delta}}$ постоянным с помощью R1. После этого аналогичным образом снять зависимость $I_{\kappa}(U_{кэ})$ при $I_{\bar{\delta}} = 20, 30$ и 40 мкА . Результаты измерений занести в таблицу. Построить графики $I_{\kappa}(U_{кэ})$ при $I_{\bar{\delta}}$ в качестве параметра.

6. Снятие входной характеристики транзистора.

С помощью потенциометра R4 установить $U_{кэ}$. Снять зависимость $I_{\bar{\delta}}(U_{\bar{\delta}э})$, заноса данные в таблицу. При этом напряжение $U_{\bar{\delta}э}$ увеличивать с помощью потенциометра R1, поддерживая $U_{кэ}$ с помощью потенциометра R4. Закончив измерения, уменьшить напряжения и токи в схеме до минимума. Построить график $I_{\bar{\delta}}(U_{\bar{\delta}э})$ при $U_{кэ} = \text{const}$. Для выбранного значения $I_{\bar{\delta}}$ по наклону зависимости $I_{\bar{\delta}}(U_{\bar{\delta}э})$ определить величину входного сопротивления транзистора $R_{вх}$.

РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ ПРОГРАММЫ

Используются компьютерные модели из курса «Открытая Фи-зика», разработанного компанией «Физикон».

Для начала работы необходимо дважды щелкнуть левой кноп-кой мыши, когда ее маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей. После этого появится начальная картин-ка, имеющая следующий вид (рис. 5.5):

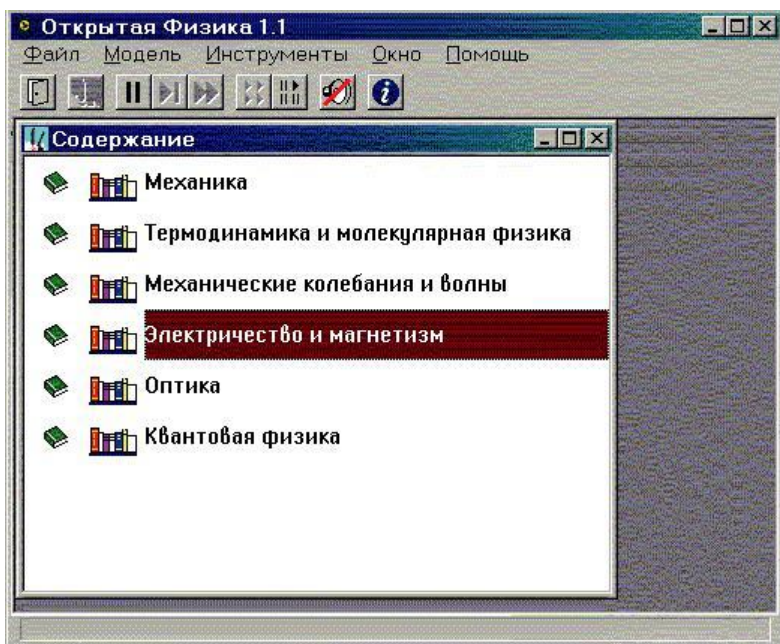


Рис. 5.5. Окно выбора раздела

После этого необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, установив ее маркер над названием раздела, в котором рас-положена данная модель. Для электромагнетизма вы увидите сле-дующую картинку (рис. 5.6).

Чтобы просмотреть дальнейшие пункты содержания данного раздела, надо щелкать левой кнопкой мыши, установив ее мар-кер на кнопку со стрелкой вниз, расположенную в правом нижнем углу внутреннего окна.

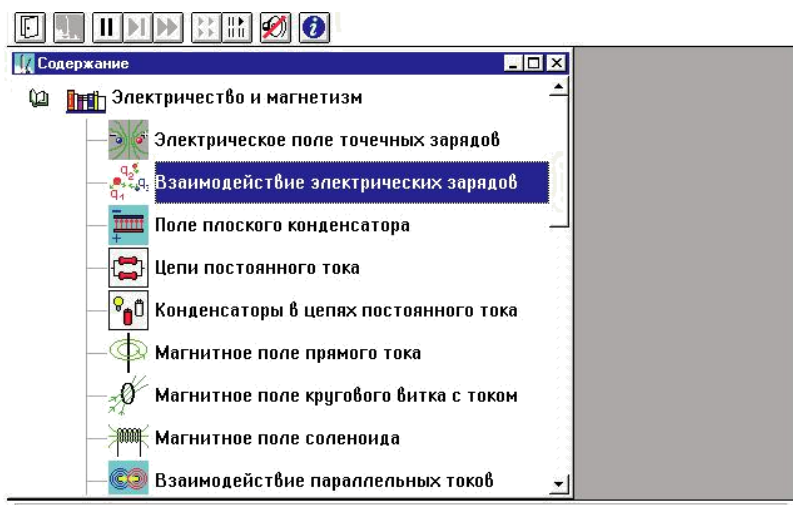


Рис. 5.6. Окно выбора темы раздела «Электричество и магнетизм»

Кнопки вверху картинки являются служебными. Предназначение каждой проявляется, когда маркер мыши располагается над ней в течение 1-2 секунд (без нажатия кнопок мыши). Очень важной является кнопка с двумя вертикальными чертами «||», которая служит для остановки эксперимента, а кнопки, расположенные рядом — для шага «▶|» и продолжения «▶» работы.

Прочитав надписи во внутреннем окне, установите маркер мыши над названием требуемой компьютерной модели и дважды быстро нажмите левую кнопку мыши. В появившемся внутреннем окне сверху также расположены служебные кнопки. Кнопка с изображением страницы служит для вызова теоретических сведений. Перемещать окна можно, зацепив мышью заголовок окна, имеющий синий фон. Для закрытия окна надо нажать мышью кнопку с крестом в правом верхнем углу данного окна.

Лабораторная работа № 6

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте и учебнике (Савельев, т. 2, § 5, § 73). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Движение заряда в электрическом поле». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ с. 5 еще раз.)

Цель работы:

- Знакомство с моделью процесса движения заряда в однородном электрическом поле.
- Экспериментальное исследование закономерностей движения точечного заряда в однородном электрическом поле.
- Экспериментальное определение величины удельного заряда частицы.

Краткая теория

Движение заряженных частиц в электрическом поле широко используется в современных электронных приборах, в частности, в электронно-лучевых трубках с электростатической системой отклонения электронного пучка.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД есть величина, характеризующая способность объекта создавать электрическое поле и взаимодействовать с электрическим полем.

ТОЧЕЧНЫЙ ЗАРЯД — это абстрактный объект (модель), имеющий вид материальной точки, несущей электрический заряд (заряженная МТ).

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ — это то, что существует в области пространства, в которой на заряженный объект действует сила, называемая электрической.

ОСНОВНЫМИ СВОЙСТВАМИ заряда являются:

- аддитивность (суммируемость);
- инвариантность (одинаковость во всех инерциальных системах отсчета);
- дискретность (наличие элементарного заряда, обозначаемого e , и кратность любого заряда этому элементарному: $q = Ne$, где N — любое целое положительное или отрицательное число);

- подчинение закону сохранения заряда (суммарный заряд электрически изолированной системы, через границы которой не могут проникать заряженные частицы, сохраняется);
- наличие положительных и отрицательных зарядов (заряд — величина алгебраическая).

ЗАКОН КУЛОНА определяет силу взаимодействия двух то-

чечных зарядов: $r_{12} = - \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} e$, где e_{12} — единичный вектор, направленный от первого заряда q_1 ко второму q_2 .

НАПРЯЖЕННОСТЬЮ называется векторная характеристика поля, численно равная отношению силы $F_{эл}$, действующей на то-

чечный заряд, к величине q этого заряда: $E = \frac{F_{эл}}{q}$. Если задана напряженность электрического поля, тогда сила, действующая на

заряд, будет определяться формулой $F_{эл} = qE$.

ОДНОРОДНЫМ называется поле, напряженность которого во всех точках одинакова как по величине, так и по направлению. Сила, действующая на заряженную частицу в однородном поле, везде одинакова, поэтому неизменным будет и ускорение частицы, определяемое вторым законом Ньютона (при малых скоростях

движения $V \ll c$, где c — скорость света в вакууме): a

$$= const. \text{ Тогда } Y = \frac{at_{дв}^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{q}{m} \left(\frac{L}{v_{0x}} \right)^2$$

$$V_Y = at_{дв} = \frac{q}{m} E \frac{L}{v_{0x}}, \text{ где } Y \text{ — смещение частицы по вертика-}$$

ли и V_Y — вертикальная компонента скорости в момент времени, когда частица вылетает из конденсатора.

Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок (рис. 6.1), найдите все регуляторы и другие основные элементы.

Зарисуйте поле эксперимента и траекторию движения частицы. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте на экране движение частицы.

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

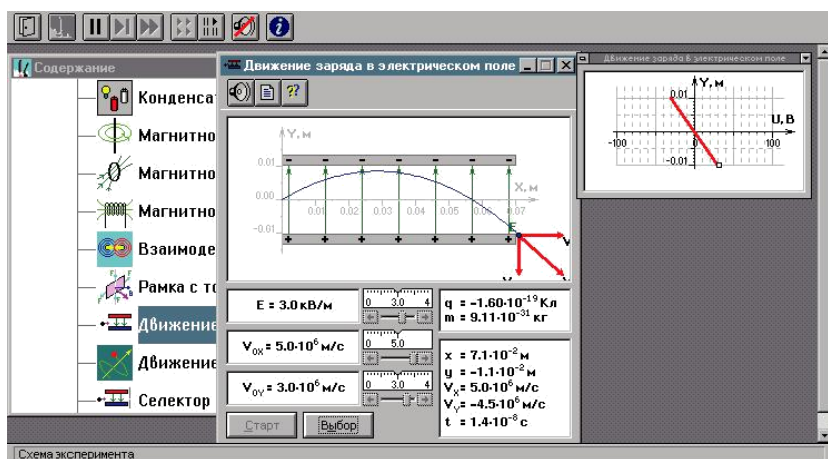


Рис. 6.1. Движение заряда в электрическом поле

Измерения:

- Нажмите мышью кнопку «Выбор». Подведите маркер мыши к движку регулятора напряженности E . Нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте E . Установите числовое значение E , равное взятому из табл. 1 для вашей бригады.

- Аналогичным способом установите $V_{0x} = 2 \cdot 10^6$ м/с, $V_{0y} = 0$. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте движение частицы. Увеличивая V_{0x} , подберите минимальное значение, при котором частица вылетает из конденсатора. Запишите значение длины пластин конденсатора L .

- Проведите измерения параметров движения частицы в момент вылета из конденсатора. Запишите числовые значения с экрана в табл. 2.

- Повторите измерения по п. 3 еще 5 раз, каждый раз увеличивая V_{0x} на $0,2 \cdot 10^6$ м/с. Результаты записывайте в табл. 2.

Таблица 6.1. Напряженность электрического поля (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
E , В/м	100	200	300	400	-100	-200	-300	-400

Таблица 6.2. Результаты измерений при $E = \text{--- В/м}$, $L = \text{--- м}$.

$V_{0X}, 10^6 \cdot \text{м/с}$							
$Y, \text{мм}$							
$X, \text{мм}$							
$t \text{ ДВ, нс}$							
$VX, 106 \cdot \text{м/с}$							
$VY, 106 \cdot \text{м/с}$							

Обработка результатов и оформление отчета:

Постройте на отдельных листах графики экспериментальных зависимостей:

- вертикального смещения на вылете из конденсатора (Y) от квадрата обратной начальной скорости $(1/V_{0X})^2$,
- вертикальной составляющей скорости V_Y на вылете из конденсатора от обратной начальной скорости $(1/V_{0X})$.

Для каждого графика определите — по его наклону — экспериментальное значение удельного заряда частицы, используя формулы $q = \frac{2}{\Delta \left| \frac{1}{v_{0x}} \right|} \frac{\Delta Y}{\Delta \left| \frac{1}{v_{0x}} \right|}$ для первого и $q = \frac{1}{\Delta \left| \frac{1}{v_{0x}} \right|} \frac{\Delta V_Y}{\Delta \left| \frac{1}{v_{0x}} \right|}$ для второго.

Рассчитайте среднее значение экспериментально полученного удельного заряда частицы.

Запишите ответ. Сформулируйте выводы по ответу и графикам.

Табличное значение удельного заряда электрона $q_e/m = -1,76 \cdot 10_{11} \text{ Кл/кг}$.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дайте определение электрического заряда.
2. Выберите, к какому классу характеристик относится электрический заряд:

- характеристика движения,
- характеристика воздействия,
- характеристика объекта.

3. Перечислите все свойства заряда.

4. Сформулируйте свойство дискретности заряда.

5. Сформулируйте свойство аддитивности заряда.

6. Сформулируйте свойство инвариантности заряда.

7. Напишите закон Кулона для силы взаимодействия двух неподвижных зарядов.
8. Дайте определение электростатического (электрического) поля.
9. Дайте определение напряженности электрического поля.
10. Напишите формулу, определяющую напряженность электрического поля.
11. Напишите формулу, определяющую электрическую силу, действующую на точечный заряд в электрическом поле с заданной напряженностью.
12. Напишите формулу для напряженности электрического поля точечного заряда, расположенного в начале координат.
13. Сформулируйте принцип суперпозиции для электрическо-го поля.
14. Дайте определение потенциала электрического поля.
15. Напишите формулу для потенциала электрического поля точечного заряда, расположенного в начале координат.
16. Какое поле называется однородным?
17. Что такое конденсатор?
18. Напишите формулу емкости плоского конденсатора.
19. Какое поле существует между пластинами плоского конденсатора?
20. Какую форму имеет траектория движения электрона между пластинами плоского конденсатора?

Лабораторная работа № 7

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т. 2, § 5–10). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Взаимодействие электрических зарядов». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ с. 5 еще раз.)

Цель работы

- Знакомство с моделированием электрического поля от точечных источников.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей для электрического поля точечного заряда и электрического диполя (ЭД).
- Экспериментальное определение величины электрической постоянной.

Краткая теория

ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ (ЭП) называется то, что существует в области пространства, в которой на электрически заряженную частицу действует сила, называемая электрической (кулоновской).

ИСТОЧНИКОМ ЭП являются электрически заряженные частицы.

ЗАРЯДОМ (электрическим) называется особая характеристика объекта, определяющая его способность создавать ЭП и взаимодействовать с ЭП. Часто «зарядом» называют заряженную частицу, а «точечным зарядом» — материальную точку, имеющую электрический заряд.

Основные СВОЙСТВА электрического заряда:

1. Заряд ИНВАРИАНТЕН – его величина одинакова при измерении в любой инерциальной системе отсчета.
2. Заряд СОХРАНЯЕТСЯ — суммарный заряд изолированной системы тел не изменяется.
3. Заряд АДДИТИВЕН — заряд системы тел равен сумме зарядов отдельных тел.

4. Заряд ДИСКРЕТЕН — заряд любого тела по величине краен минимальному заряду, который обозначается символом e и равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

5. Существуют заряды ДВУХ разных «сортов». Заряды одного «сорта» названы положительными, а другого «сорта» — отрицательными. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Если вблизи одной заряженной частицы (заряда Q_1), расположенной в начале координат, будет находиться вторая заряженная частица (заряд Q_2), то на второй заряд будет действовать электрическая (кулоновская) сила $F_{эл}$, определяемая законом Куло-

на: $F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r$ где r — радиус-вектор точки наблюдения, e_r — единичный радиус-вектор, направленный в точку наблюдения, e_0 — электрическая постоянная, e — диэлектрическая проницаемость среды (в вакууме $e = 1$).

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ — характеристика силового действия ЭП на заряд. Напряженность ЭП, создаваемого зарядом Q_1 , есть векторная величина, обозначаемая

символом $E(Q_1)$ и определяемая соотношением $E(Q_1) = \frac{F}{Q_2}$, где F — сила, действующая на заряд Q_2 .

ЛИНИЯ ЭП — линия, в любой точке которой вектор напряженности ЭП направлен по касательной к ней.

ЭП подчиняется ПРИНЦИПУ СУПЕРПОЗИЦИИ: напряженность ЭП нескольких источников является суммой векторов напряженности поля, создаваемого независимо каждым источни-

ком: $E_{SUM} = \sum_i E_i$.

ПОТОКОМ ЭП называется интеграл по некоторой поверхности S от скалярного произведения напряженности ЭП на элемент поверхности: $\Phi_E = \int_S E dS$, где вектор dS направлен по нормали к поверхности.

ЗАКОН ГАУССА ДЛЯ ЭП: ПОТОК ЭП через замкнутую поверхность S_0 пропорционален суммарному ЗАРЯДУ, расположенному внутри объема, ограниченного поверхностью интегрирования потока $V(S_0)$:

$$\Phi_{0E} = \int_{S_0} E dS = \frac{1}{\epsilon} \sum_{j=0} Q_j.$$

Линии напряженности электрического поля точечного заряда представляют собой прямые линии, идущие от заряда (положительного) или к заряду.

ПОТЕНЦИАЛОМ данной точки r ЭП называется скалярная характеристика ЭП, численно равная работе сил поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки в другую фиксированную точку r_0 , в которой потенциал принят за 0

(например, в бесконечность): $\varphi(r) = \int_r E dr$.

Уравнение, выражающее напряженность через потенциал:

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

$$\text{где оператор градиента } \text{grad} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z} \right\} \equiv \nabla.$$

ДИПОЛЬ – два одинаковых по величине, но противоположных по знаку точечных зарядов Q , расположенных на расстоянии L (L – плечо диполя).

ДИПОЛЬНЫЙ (ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ) МОМЕНТ – произведение $p_e = QL$. Вектор направлен от отрицательного к положительному заряду.

Напряженность ЭП диполя вычисляется с использованием принципа суперпозиции для ЭП.

Как видно из рисунка 7.1, $\sin \beta = \frac{L/2}{r_{12}}$, а для суммарной силы

$$\text{получим } F_2 = 2F_{12} \sin(\beta) = F_{12} \frac{L}{r_{12}}.$$

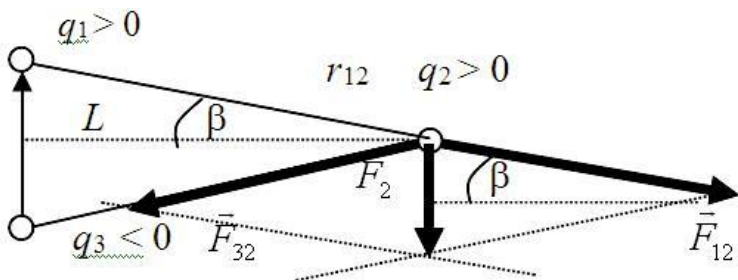


Рис. 7.1. Силы, действующие на заряд в поле диполя

На линии, проходящей через центр диполя, перпендикулярно электрическому моменту, и на большом расстоянии r от его центра:

$$E = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^3}.$$

Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Рассмотрите внимательно рисунок (рис. 7.2) и зарисуйте необходимое в конспект:

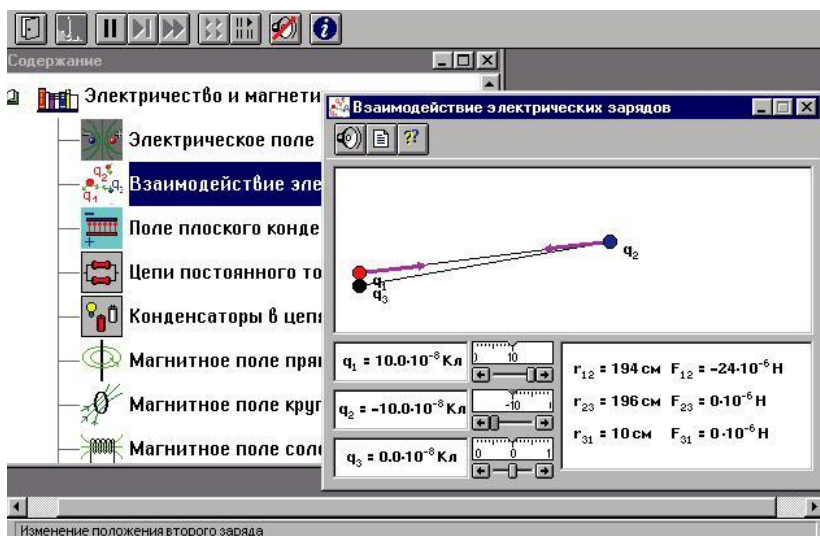


Рис. 7.2. Окно эксперимента «Взаимодействие электрических зарядов»

Таблица 7.1. Результаты измерений (9 столбцов)

r (см) =	20	30	...	100	
$1/r^2$, м ⁻²					
E_1 , В/м					
E_2 , В/м					
E_3 , В/м					
E_4 , В/м					

Подготовьте 3 таблицы, используя как образец таблицу 7.1. Таблицы 2 и 3, аналогичны табл. 7.1, за исключением второй строки, содержание которой см. в следующем разделе.

Измерения

ЭКСПЕРИМЕНТ 1. Исследование поля точечного заряда

Закройте окно теории, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите эксперимент «Взаимодействие электрических зарядов».

Зацепив мышью, перемещайте заряд q_1 и зафиксируйте его вблизи левой границы экспериментального поля. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора величины первого заряда и установите величину заряда q_1 , указанную в табл. 2 для вашей бригады. Заряд q_3 поместите под первым, а его величину установите равной 0. Заряд q_2 установите равным 10^{-8} Кл.

Перемещайте, нажав левую кнопку мыши, заряд q_2 вправо, устанавливая расстояния r_{12} до первого заряда, указанные в табл.

1. Измеренные в данных точках значения $E_1 = F_{12} / q_2$ занесите в соответствующую строку табл. 1. Повторите измерения для трех других значений заряда q_1 из табл. 2, записывая в табл. 1 значения E_2 , E_3 и E_4 .

ЭКСПЕРИМЕНТ 2. Исследование поля диполя

Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора величины второго заряда диполя (q_3) и зафиксируйте значение заряда, указанное в табл. 2 для вашей бригады, изменив знак на противоположный. Переместите заряд q_3 так, чтобы электрический момент диполя был вертикальным, а плечо диполя ($L = r_{13}$) было равно 10 см.

Перемещайте мышью заряд q_2 по линии, перпендикулярной оси диполя (горизонтально), удерживая левую кнопку мыши. На расстояниях r от оси диполя, указанных в табл. 1, измерьте и занесите значения $E_1 = (F_{12} / q_2) (L / r_{12})$ в табл. 3, аналогичную табл. 1 (кроме второй строки, в которой здесь надо записать $(1 / r_3, \text{ м})$). Повторите измерения для трех других значений зарядов q_1 (и q_3) из табл. 2, записывая в табл. 3 значения E_2 , E_3 и E_4 .

Обработка результатов и оформление отчета

Вычислите и запишите в табл. 1 и 3 значения для второй строки.

Постройте на одном листе графики зависимости напряженности ЭП E точечного заряда от квадрата обратного расстояния $1/r_2$.

Постройте на втором листе графики зависимости напряженности ЭП E на оси диполя от куба обратного расстояния $1/r_3$.

По тангенсу угла наклона графиков на каждом из двух листов

определите постоянную, используя формулы $\varepsilon_0 = \frac{q_1}{4\pi \Delta E} \frac{\left(\frac{1}{r^2}\right)}{\left(\frac{1}{r^2}\right)}$ для

первого чертежа и $\varepsilon_0 = \frac{p}{4\pi \Delta E} \frac{\left(\frac{1}{r^3}\right)}{\left(\frac{1}{r^3}\right)}$ для второго (для больших расстояний r).

Вычислите среднее значение электрической постоянной.

Запишите ответы и проанализируйте ответ и график.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое электрическое поле (ЭП)?
2. Назовите источники ЭП.
3. Перечислите и разъясните основные свойства заряда.
4. Какая сила действует между зарядами?
5. Дайте определение линии напряженности ЭП. Зачем их рисуют?
6. Запишите закон Кулона.
7. Запишите формулу для напряженности поля точечного заряда.
8. Сформулируйте принцип суперпозиции для ЭП.
9. Дайте определение потока ЭП.
10. Сформулируйте и запишите закон Гаусса для ЭП.
11. Что такое электрический диполь?
12. Запишите и разъясните формулу дипольного (электрического) момента.
13. Сформулируйте и запишите формулу для ЭП на оси диполя.
14. Что такое магнитный момент витка с током?
15. Какую форму имеет линия поля, проходящая через центр диполя?
16. Что такое потенциал ЭП и для чего он используется?
17. Что такое градиент?

Лабораторная работа № 8

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т. 2, § 39–47). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Магнитное поле прямого тока». (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ с. 5 еще раз.)

Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа сверху этого окна, и вызовите сначала эксперимент «Магнитное поле витка с током», а затем «Магнитное поле соленоида». Прочитайте и запишите в свой конспект необходимые краткие теоретические сведения.

Цель работы

- Знакомство с моделированием магнитного поля от различных источников.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей для магнитного поля прямого провода и кругового витка (контура) с током.
- Экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

Краткая теория

МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ (МП) называется то, что существует в области пространства, в которой на электрически нейтральный проводник с током действует сила, называемая магнитной. ИСТОЧНИКОМ МП является движущаяся электрически заряженная частица (заряд), которая создает также и электрическое поле.

Если вблизи одной движущейся заряженной частицы (заряда №1) будет находиться вторая заряженная частица (заряд №2), движущаяся с такой же скоростью V , то на второй заряд будут действовать две силы: электрическая (кулоновская) $F_{эл}$ и магнитная сила F_M , которая будет меньше электрической в $\left(\frac{V}{c}\right)^2$ раз, где c — скорость света.

Для практически любых ПРОВОДОВ с током выполняется ПРИНЦИП КВАЗИНЕЙТРАЛЬНОСТИ: несмотря на наличие

и движение заряженных частиц внутри проводника, любой (не слишком малый) его отрезок имеет нулевой суммарный электрический заряд. Поэтому между обычными проводниками с током наблюдается только магнитное взаимодействие.

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ – характеристика силового действия МП на проводник с током, векторная величина, обозначаемая символом B .

ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ — линии, в любой точке которых вектор индукции МП направлен по касательной.

Анализ взаимодействия движущихся зарядов с учетом эффектов теории относительности (релятивизма) дает выражение для индукции dB МП, создаваемой элементарным отрезком dL с током I , расположенным в начале координат (закон Био–Савара–Лапласа или Б–С–Л):

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} [dL, e_r],$$

где r — радиус-вектор точки наблюдения, e_r — единичный радиус-вектор, направленный в точку наблюдения, μ_0 — магнитная постоянная.

МП подчиняется **ПРИНЦИПУ СУПЕРПОЗИЦИИ**: индукция МП нескольких источников является суммой индукций полей, создаваемых независимо каждым источником: $B_{SUM} = \sum_i B_i$.

ЦИРКУЛЯЦИЕЙ МП называется интеграл по замкнутому контуру от скалярного произведения индукции МП на элемент

$$\text{контура: } \Gamma_B = \int_L B dL.$$

ЗАКОН ЦИРКУЛЯЦИИ МП: циркуляция МП по замкнутому контуру L_0 пропорциональна суммарному току, пронизывающему поверхность $S(L)$, ограниченную этим контуром L :

$$\Gamma_{0B} = \oint_{L_0} B dL = \mu_0 \sum_j I_j.$$

Закон Б–С–Л и принцип суперпозиции МП позволяют получить многие другие закономерности, в частности, индукцию магнитного поля прямого бесконечно длинного проводника с током:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Линии магнитной индукции поля прямого проводника с током представляют собой концентрические окружности, лежащие в плоскостях, перпендикулярных проводнику, с центрами, расположенными на его оси.

Индукция МП на оси кругового контура (витка) радиуса R

с током I на расстоянии r от центра: $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_m}{(R^2 + r^2)^{3/2}}$, где

$p_m = ISe_n$ — МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ витка площадью S ,

— единичный вектор нормали к поверхности витка.

e_n СОЛЕНОИДОМ называется длинная прямая катушка с током. Величина индукции МП вблизи центра соленоида меняется очень мало. Такое поле можно считать практически однородным.

Из закона циркуляции МП можно получить формулу для индукции МП в центре соленоида $B = \mu_0 In$, где n — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Рассмотрите внимательно рисунок, изо-бражающий компьютерную модель. Найдите на нем все основные регуляторы и поле эксперимента (рис. 8.1, 8.2, 8.3). Зарисуйте не-обходимое в конспект.

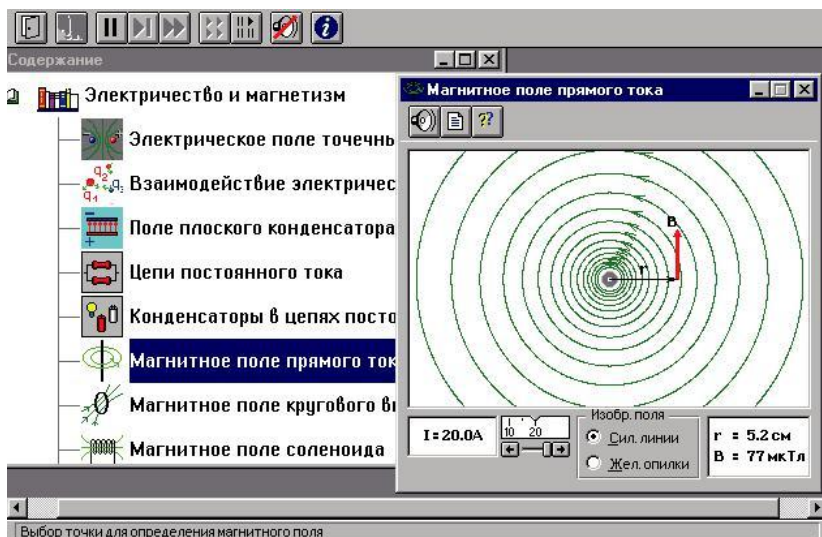


Рис. 8.1. Окно эксперимента «Магнитное поле прямого тока»

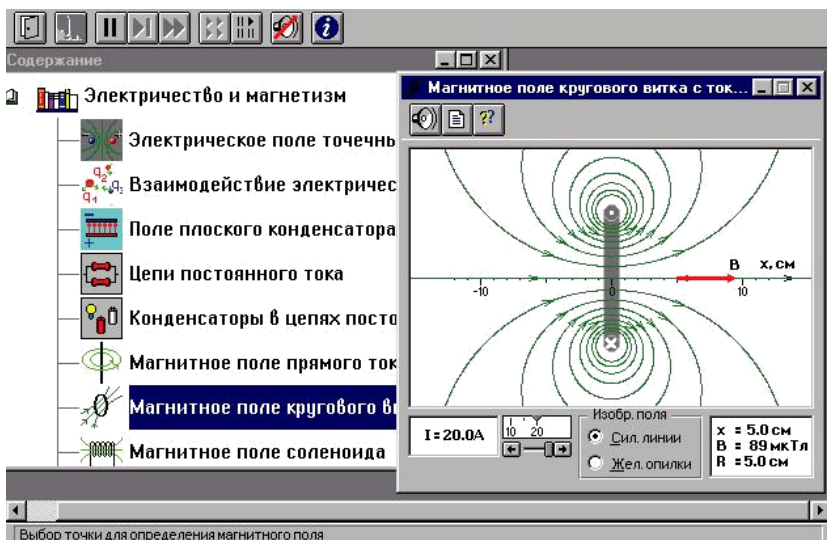


Рис. 8.2. Окно эксперимента «Магнитное поле кругового витка»

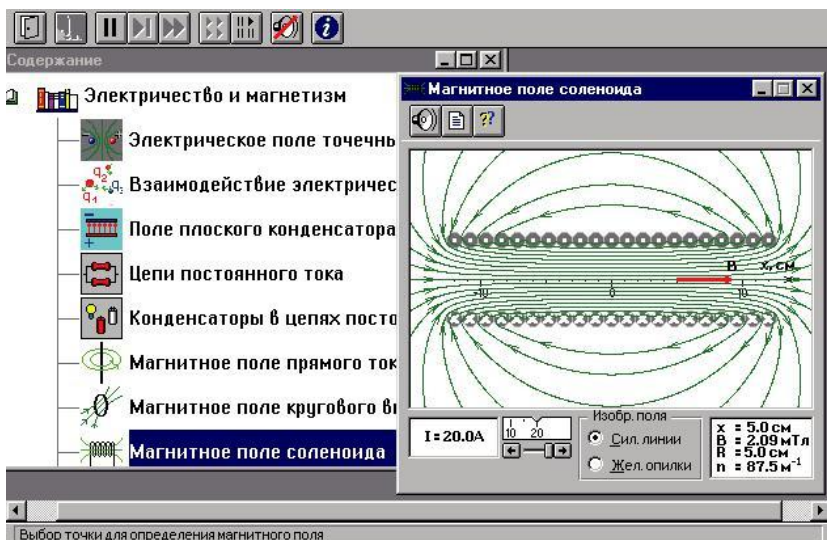


Рис. 8.3. Окно эксперимента «Магнитное поле соленоида»

Подготовьте табл. 8.1 и 8.2, используя образцы. Подготовьте ещё две таблицы, аналогичные табл. 8.1, за исключением второй строчки, содержание которой см. в следующем разделе.

Таблица 8.1. Результаты измерений (12 столбцов). $B = \underline{\hspace{2cm}}$ мТл

$v, \text{ м/с} =$	-10	-8	...	10
ЭДС, В				
$I, \text{ мА}$				

Таблица 8.2. Значения характеристик (не перерисовывать)

Бригады	R, Ω	$B1, \text{ мТл}$	$B2, \text{ мТл}$	$B3, \text{ мТл}$
1 и 5	11	-30	40	90
2 и 6	22	-40	20	80
3 и 7	11	-50	10	70
4 и 8	22	-60	-20	100

Измерения

ЭКСПЕРИМЕНТ 1.

1. Закройте окно теории, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, эксперимент «Магнитное поле прямого тока». Наблюдайте линии индукции МП прямого провода.

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока, указанную в таблице 2 для вашей бригады.

3. Перемещая мышью «фуку» вблизи провода, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях r до оси провода, указанных в табл. 1. Значения r и B занесите в табл. 1. Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 2.

ЭКСПЕРИМЕНТ 2.

1. Закройте окно эксперимента 1, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, эксперимент «Магнитное поле кругового витка с током». Наблюдайте линии индукции МП кругового витка (контура).

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока, указанную в табл. 2 для вашей бригады.

3. Перемещая мышью «руку» по оси витка, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях r до оси витка, указанных в табл. 8.1. Значения r и B занесите в табл. 3, аналогичную табл. 1 (кроме второй строки, в которой здесь надо записать $1 / (R_2 + r_2)^{3/2}$, м-3. Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 2.

ЭКСПЕРИМЕНТ 3.

1. Закройте окно эксперимента 2, нажав кнопку в правом верх-нем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, следующий эксперимент «Магнитное поле соленоида». Наблю-дайте линии индукции МП соленоида.

2. Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. За-фиксируйте величину тока, указанную в табл. 2 для вашей брига-ды.

3. Перемещая мышью «руку» по оси соленоида, нажимайте левую кнопку мыши на расстояниях r до оси соленоида, указан-ных в табл. 1. Значения r и B занесите в табл. 4, аналогичную табл. 1 (кроме второй строки, в которой здесь не надо записывать ничего). Повторите измерения для трех других значений тока из табл. 2.

Обработка результатов и оформление отчета

1. Вычислите и запишите в табл. 1, 3 и 4 значения для второй строки.

2. Постройте на одном листе графики зависимости индукции МП (B) прямого провода с током от обратного расстояния ($1 / r$).

3. Постройте на втором листе графики зависимости индук-ции МП (B) на оси витка с током от куба обратного расстояния $1 / (R_2 + r_2)^{3/2}$.

4. На третьем листе постройте графики зависимости индукции МП на оси соленоида от расстояния до его центра.

5. По тангенсу угла наклона графиков на первых двух листах

определите постоянную, используя формулы $\mu_0 = \frac{2\pi}{I} \frac{\Delta B}{\Delta \left(\frac{1}{r} \right)}$ для

первого чертежа и $\mu_0 = \frac{4\pi}{IS} \frac{\Delta B}{\Delta \left(\frac{1}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \right)}$ для второго (пло-

щадь витка $S = \pi R^2$

6. Вычислите среднее значение магнитной постоянной.

7. Для магнитного поля соленоида при каждом токе определите протяженность D_r области однородности, в которой индукция меняется не более, чем на 10 % от максимальной. Вычислите среднее значение области однородности.

8. Запишите ответы и проанализируйте ответ и график.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое магнитное поле (МП)?
2. Назовите источники МП.
3. Какие силы действуют между движущимися зарядами?
4. Во сколько раз магнитная сила меньше электрической для двух движущихся точечных электрических зарядов?
5. Сформулируйте определение квазинейтральности проводов с током.
6. Какие силы и почему действуют между проводами с током?
7. Дайте определение линии индукции МП. Зачем их рисуют?
8. Запишите закон Био–Савара–Лапласа. В чем он похож на закон Кулона?
9. Сформулируйте принцип суперпозиции для МП.
10. Дайте определение циркуляции МП.
11. Сформулируйте и запишите формулу закона циркуляции МП.
12. Сформулируйте и запишите формулу для МП прямого провода с током.
13. Как выглядят линии индукции МП прямого провода с током?
14. Сформулируйте и запишите формулу для МП на оси кругового витка (контура) с током.
15. Что такое магнитный момент витка с током?
16. Какую форму имеет линия индукции, проходящая через центр витка с током?
17. Что такое соленоид и для чего он используется?
18. Чему равно магнитное поле в центре соленоида?
19. Является ли МП внутри соленоида точно однородным?

Лабораторная работа № 9

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т. 2, § 39–47). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Электромагнитная индукция». (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ с. 5 еще раз.)

Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа сверху этого окна.

Цель работы

- Знакомство с моделированием явления электромагнитной индукции (ЭМИ).
- Экспериментальное подтверждение закономерностей ЭМИ.

Краткая теория

ЭЛЕМЕНТАРНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ $d\Phi_B$ через физически малый элемент поверхности площадью dS называется скалярное произведение вектора индукции магнитного поля B на вектор нормали n к данному элементу поверхности и на площадь dS :

$$d\Phi_B = (B n) \times dS .$$

МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ Φ_B через поверхность площадью S называется сумма всех элементарных потоков через все элементы этой поверхности (интеграл по поверхности):

$$\Phi_B = \int_S B \cdot dS .$$

Анализируя свойства интеграла в правой части данного соотношения, можем получить условия, когда для определения потока не требуется интегрирование.

Простейший вариант: потока нет ($\Phi_B = 0$), если 1) $B = 0$, или 2) вектор магнитной индукции направлен по касательной к поверхности в любой ее точке ($B \perp n$).

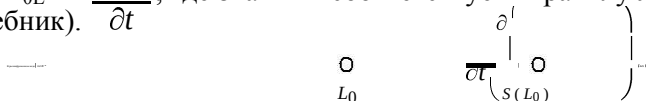
Второй вариант: поток есть произведение индукции на площадь ($\Phi_B = B \times S$), если $(B \cdot n) = const$, то есть одновременно выполняются два условия: вектор индукции направлен по нормали и имеет одну и ту же величину в любой точке поверхности.

ИНДУКЦИЕЙ называется явление возникновения одного поля (например, электрического) при изменении другого поля (например, магнитного).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИЕЙ называется явление возникновения электрического поля при изменении магнитного поля.

ЗАКОН ЭМИ: циркуляция электрического поля по замкнутому контуру Γ_{0E} пропорциональна скорости изменения потока магнитного поля Φ_{0B} через замкнутую поверхность $S_0 (L_0)$, ограниченную контуром L_0 , по которому рассчитана циркуляция. Математически:

$\Gamma_{0E} = - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$, где знак « $\rightarrow$ » соответствует «правилу Ленца» (см. учебник).



В результате ЭМИ возникает электрическое поле с ненулевой циркуляцией. Поле с ненулевой циркуляцией называется вихревым.

Если в таком поле находится проводящее вещество, то в веществе возникает ВИХРЕВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК, величина которого пропорциональна напряженности вихревого электрического поля. Такие токи называются токами Фуко.

Если проводящее вещество имеет форму ЗАМКНУТОГО КОНТУРА, тогда циркуляция электрического поля в нем определяет ЭДС, которая в случае ЭМИ называется ЭДС индукции.

Закон ЭМИ для проводящего контура будет выглядеть так:

$$\underline{\frac{\partial \Phi}{\partial t}}$$

Ток, который в этом случае появляется в контуре, называется индукционным.

Обозначая ЭДС индукции символом $\epsilon_{\text{инд}}$ и используя закон Ома для полной цепи, получим выражение для тока индукции: $I_{\text{инд}} = \epsilon_{\text{инд}} / R$, где R – сопротивление контура.

Если имеется замкнутый контур с переменным током, тогда магнитное поле с изменяющимся потоком создается собственным

током в этом контуре, и в соответствии с законом ЭМИ в контуре возникает дополнительная ЭДС, называемая ЭДС самоиндукции.

Явлением САМОИНДУКЦИИ называется возникновение ЭДС самоиндукции при протекании по проводнику переменного тока.

ЗАКОН самоиндукции: $\mathcal{E}_{\text{САМОИНД}} = -L \frac{dI}{dt}$, где L – индуктивность проводника.

Методика и порядок измерений

Закройте окно теории.

В данной лабораторной работе используется компьютерная модель, в которой изменяющийся магнитный поток возникает в результате движения проводящей перемычки по параллельным проводникам, замкнутым с одной стороны.

Эта система изображена на рисунке 9.1:

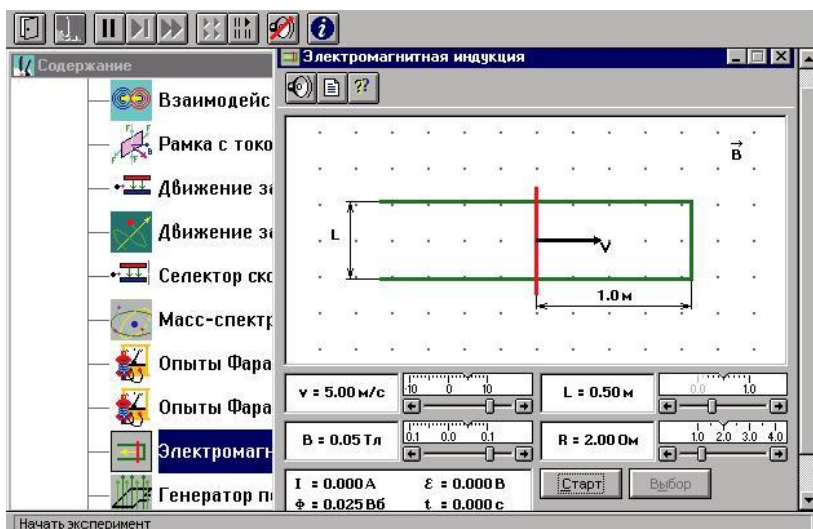


Рис. 9.1. Окно эксперимента «Электромагнитная индукция»

Задача

Проводящая перемычка движется со скоростью V по параллельным проводам, замкнутым с одной стороны. Система проводников расположена в однородном магнитном поле, индукция которого равна B и направлена перпендикулярно плоскости, в

которой расположены проводники. Найти ток в перемычке, если ее сопротивление R , а сопротивлением проводников можно пренебречь.

Решив задачу в черновике, получите уравнение для тока в общем виде.

Подготовьте табл. 9.1 и 9.2, используя образцы.

Подготовьте ещё две таблицы, аналогичные табл. 9.1.

Таблица 9.1. Результаты измерений (12 столбцов) $B = \underline{\hspace{1cm}}$ мТл

$v, \text{ м/с} =$	-10	-8	...	10
ЭДС, В				
$I, \text{ мА}$				

Таблица 9.2. Значения характеристик (не перерисовывать)

Бригады	$R, \text{ Ом}$	$B_1, \text{ мТл}$	$B_2, \text{ мТл}$	$B_3, \text{ мТл}$
1 и 5	11	-30	40	90
2 и 6	22	-40	20	80
3 и 7	11	-50	10	70
4 и 8	22	-60	-20	100

Для бригад 1–4 $L = 1 \text{ м}$, для бригад 5–8 $L = 0,7 \text{ м}$.

Измерения

1. Закройте окно теории (если вы ее вызывали), нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите эксперимент, щелкнув мышью по кнопке «Старт». Наблюдайте движение перемычки и изменение магнитного потока Φ (цифры внизу окна).

2. Зацепив мышью, перемещайте движки регуляторов

L – расстояния между проводами,

R – сопротивления перемычки,

B_1 – величины индукции магнитного поля,

и зафиксируйте значения, указанные в табл. 2 и под ней для вашей бригады.

3. Установив указанное в табл. 1 значение скорости движения перемычки, нажмите левую кнопку мыши, когда ее маркер размещен над кнопкой «Старт». Значения ЭДС и тока индукции занесите

те в табл. 1. Повторите измерения для других значений скорости из табл. 1.

4. Повторите измерения для двух других значений индукции магнитного поля, выбирая их из табл. 2. Полученные результаты запишите в табл. 3 и 4.

Обработка результатов и оформление отчета

1. Постройте на одном листе графики зависимости тока индукции от скорости движения переключки при трех значениях индукции магнитного поля.

2. Для каждой прямой определите тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg}(j) = \frac{\Delta i}{\Delta V}.$$

3. Вычислите теоретическое значение тангенса для каждой прямой по формуле $\operatorname{tg}(j)_{\text{ТЕОР}} = \frac{BL}{R}.$

4. Заполните таблицу результатов измерений

Номер измерения	$\operatorname{tg}(j)$ ЭКСП, Ас/м	$\operatorname{tg}(j)$ ТЕОР, Ас/м

5. Сделайте выводы по графикам и результатам измерений.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что называется элементарным магнитным потоком?
2. Что называется магнитным потоком?
3. При каких условиях магнитный поток равен нулю?
4. При каких условиях магнитный поток равен произведению индукции магнитного поля на площадь контура?
5. Сформулируйте определение явления электромагнитной индукции.
6. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
7. Дайте определение циркуляции магнитного поля.
8. Запишите закон ЭМИ в расшифрованном виде.
9. Какое поле является вихревым?

10. Что такое ток Фуко?
11. Чем отличается электрическое поле, созданное точечным зарядом, от электрического поля, появляющегося при ЭМИ?
12. Сформулируйте закон ЭМИ для замкнутого проводящего контура.
13. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?
14. Сформулируйте определение явления самоиндукции.
15. Сформулируйте словами закон самоиндукции.
16. Назовите все способы создания переменного магнитного потока.
17. Как изменяется со временем магнитный поток в данной работе?
18. Как выглядит поверхность, через которую формируется переменный магнитный поток в данной работе?
19. Какова зависимость магнитного потока от времени в данной работе?
20. Как направлен вектор магнитной индукции в данной работе?

Лабораторная работа № 10

СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОНТУРЕ

Ознакомьтесь с теорией в конспекте, учебнике (Савельев, т. 2, § 89, § 90). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Свободные колебания в RLC–контуре». Нажмите вверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ с. 5 еще раз.)

Цель работы:

- Знакомство с компьютерной моделью процесса свободных затухающих колебаний в электрическом колебательном контуре.
- Экспериментальное исследование закономерностей свободных затухающих колебаний.
- Экспериментальное определение величины индуктивности контура.

Краткая теория:

КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ называется замкнутая цепь, содержащая катушку индуктивности с индуктивностью L и конденсатор с емкостью C . Если в цепи нет активного сопротивления R (резистора), то в контуре возможны гармонические (незатухающие) колебания тока I , заряда конденсатора q и напряжения на элементах. q НАПРЯЖЕНИЕ НА КОНДЕНСАТОРЕ:

$$U_c = C \cdot \frac{dq}{dt}$$

$$\text{ЭДС САМОИНДУКЦИИ В КАТУШКЕ: } \varepsilon = -L \frac{dI}{dt}.$$

$$\text{НАПРЯЖЕНИЕ НА РЕЗИСТОРЕ: } U_R = IR$$

$$\text{ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА: } I = \frac{dq}{dt}.$$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ свободных незатухающих колебаний:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega^2 q = 0, \text{ где } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} - \text{СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА}$$

контура.

$$\text{ПЕРИОД: } T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Его решение $q(t) = q_v \cos(\omega_0 t + a)$, где a – начальная фаза.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ свободных затухающих колебаний

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \text{ где } b = \frac{R}{2L} - \text{коэффициент затухания.}$$

Его решение: $q(t) = q_{v0} e^{-bt} \cos(\omega t + a)$, где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота затухающих колебаний.

ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ в контуре t есть время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в $e = 2,73$ раз. На графике зависимости амплитуды затухающих колебаний от времени касательная, проведенная к этому графику в начальный момент времени, пересекает ось времени в точке $t = T$.

ЛОГАРИФИЧЕСКИМ ДЕКРЕМЕНТОМ ЗАТУХАНИЯ называется величина, определяемая формулой $\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$.

ДОБРОТНОСТЬ контура равна $Q = \lambda$.

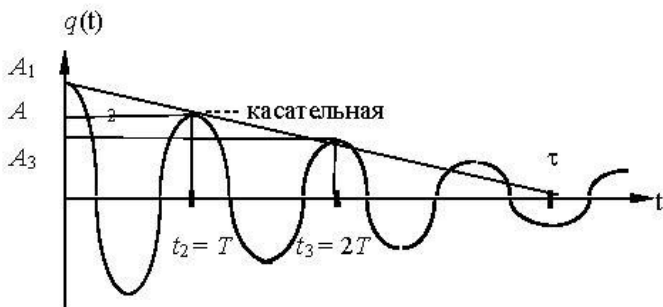


Рис. 10.1. График затухающих колебаний

Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок (рис. 10.2), найдите все регуляторы и другие основные элементы и зарисуйте их в конспект.

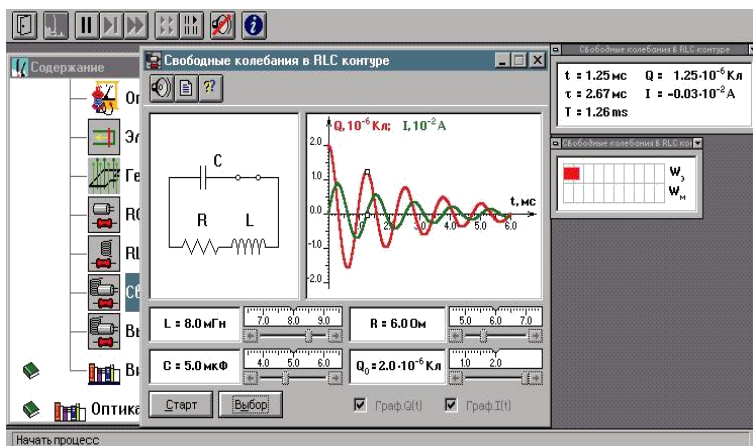


Рис. 10.2. Окно эксперимента «Свободное колебание RLC контуре»

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Измерения

Нажмите мышью кнопку «Выбор». Подведите маркер мыши к движку регулятора, нажмите на левую кнопку мыши и, удерживая ее в нажатом состоянии, меняйте величину емкости конденсатора и установите числовое значение, равное взятому из табл. 1 для вашей бригады. Аналогичным способом установите величину индуктивности в соответствии с табл. 1.

Установите сопротивление резистора $R = 1 \text{ Ом}$. Нажав кнопку «Старт», наблюдайте график зависимости заряда конденсатора от времени. Измерьте линейкой значения первых шести амплитуд и запишите их в табл. 2. Меняя сопротивление R , повторите измерения амплитуд и заполните табл. 2.

Таблица 10.1. Значения емкости конденсатора и индуктивности катушки (не перерисовывать)

Бригада	1	2	3	4	5	6	7	8
C, мкФ	3	3	2,7	2,7	2,4	2,4	2	2
L, мГн	6	7	8	9	10	9	8	7

Таблица 10.2. Результаты измерений при $C = \underline{\hspace{2cm}}$

мкФ, $L = \underline{\hspace{2cm}}$ мГн, $T = \underline{\hspace{2cm}}$ мс.

R, Ом	A1, мм	A2, мм	A3, мм	A4, мм	A5, мм	A6, мм	t, мс	b, с-1
1								
2								
3								
4								
5								
6								
t, мс								

Обработка результатов и оформление отчета

Рассчитайте значения периода колебаний и запишите в заголовке табл. 2.

Рассчитайте время t , при котором измерена соответствующая амплитуда и запишите в табл. 2.

Постройте на одном чертеже графики экспериментальных за-висимостей амплитуды колебания A от времени t (6 линий, соот-ветствующих разным R).

Для каждого графика постройте касательную к нему в началь-ный момент времени. Продолжив касательную до пересечения с осью времени, определите экспериментальное значение постоян-ной времени затухания t и запишите в табл. 2.

Рассчитайте величины коэффициента затухания $b = 1/t$ и так-же внесите в табл. 2.

Постройте график зависимости коэффициента затухания от сопротивления резистора.

По графику $b(R)$ определите индуктивность контура, исполь-

зуя формулу $L = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{\Delta b}$.

Запишите ответ и сформулируйте выводы по ответу и графи-кам.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое колебательный контур?
2. Каковы электрические характеристики резистора, конденса-тора, катушки?
3. Дайте определение гармонических колебаний.

4. Что такое период колебания?
5. Какая физическая величина испытывает колебания в колебательном контуре?
6. Напишите формулу для напряжения на конденсаторе.
7. Напишите формулу для напряжения на катушке индуктивности. Какое другое название она имеет?
8. Напишите формулу для напряжения на резисторе. Какое другое название она имеет?
9. Какие законы выполняются для тока и напряжения на отдельных элементах в колебательном контуре?
10. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон электро-магнитной индукции в общем виде.
11. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон электро-магнитной индукции для проводящего контура.
12. Сформулируйте и запишите в виде формулы закон самоиндукции.
13. Запишите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные гармонические колебания.
14. Запишите дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе в контуре, где существуют свободные затухающие колебания.
15. Напишите формулу циклической частоты свободных гармонических колебаний в контуре.
16. Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных гармонических колебаниях в контуре.
17. Напишите формулу циклической частоты свободных затухающих колебаний в контуре.
18. Напишите формулу зависимости заряда на конденсаторе от времени при свободных затухающих колебаниях в контуре.
19. Напишите формулу для коэффициента затухания.
20. Дайте определение постоянной времени затухания.
21. Напишите формулу логарифмического декремента затухания. Что он характеризует?
22. Напишите формулу связи логарифмического декремента затухания с коэффициентом затухания.
23. Напишите формулу для добротности контура. Что определяет добротность?
24. Нарисуйте зависимость заряда на конденсаторе от времени при свободных затухающих колебаниях в контуре. Покажите на рисунке, как определяется графически постоянная времени затухания.

Лабораторная работа № 11

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В RLC -КОНТУРЕ

Ознакомьтесь с конспектом лекций и учебником (Савельев, т. 2, § 91–92). Запустите программу. Выберите «Электричество и магнетизм» и «Вынужденные колебания в RLC -контуре». (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ (с. 5) еще раз.) Нажмите сверху внутренне-го окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Необходимое запишите в свой конспект. Закройте внутреннее окно, нажав кнопку с крестом справа сверху этого окна.

Цель работы

- Знакомство с компьютерным моделированием процессов в колебательном RLC -контуре.
- Экспериментальное подтверждение закономерностей при вынужденных колебаниях в RLC -контуре.

Краткая теория

Повторите основные определения для колебательного движения, которые приведены в ЛР 1–4. Прочитайте также снова теорию к ЛР 2–3, в которой рассмотрены свободные колебания в контуре.

Вынужденными колебаниями называются процессы, происходящие в контуре, содержащем конденсатор, катушку индуктивности, резистор и источник с переменной ЭДС, включенные последовательно и образующие замкнутую электрическую цепь.

Если ЭДС источника меняется по гармоническому закону, то в контуре наблюдаются *вынужденные гармонические колебания*. При этом ток в контуре также будет переменным, подчиняющимся закону Ома в комплексной форме.

Комплексная величина есть определенная совокупность двух алгебраических чисел $Z = A + iB = Ze^{i\varphi}$, где A – действительная часть, B – мнимая часть, Z – модуль, φ – фаза комплексной величины. Графически Z изображается, как радиус-вектор на комплексной плоскости: его длина равна Z , а угол между вектором и горизонтальной (действительной) осью равен φ .

Комплексный ток и комплексное напряжение

$$\hat{I}(t) = I_0 \cdot e^{i\omega t}$$

— это векторы, которые вращаются

с угловой скоростью ω . $U(t) = U_0 \cdot e^{i\omega t}$

Здесь $U_0 = U_0 \cdot e^{i\varphi_0}$ — комплексная амплитуда напряжения;

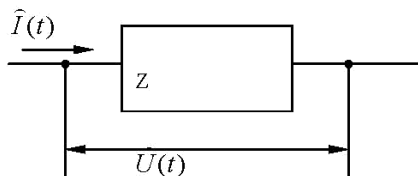
$I_0 = I_0 \cdot e^{i\varphi_0}$ — комплексная амплитуда тока.

I_0 и U_0 — комплексные векторы, которые на комплексной плоскости неподвижны. Они соответствуют «мгновенной фотографии» реальных комплексных токов и напряжений, сделанной в начальный момент времени ($t = 0$).

Комплексная амплитуда — сама комплексная величина, взятая в начальный момент времени.

Математически:

$$\frac{U_0}{I_0} = Z \text{ (импеданс),}$$



Импеданс — это отношение комплексной амплитуды напряжения на данном элементе, к комплексной амплитуде тока через данный элемент.

Модуль импеданса называется *полным электрическим сопротивлением* цепи.

$$\frac{U_0}{I_0} = \frac{U_0}{I_0} \cdot e^{i(\Delta\varphi)} \quad \Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i$$

напряжением

а) резистор: $\frac{U}{I} = R$; $\frac{U_0}{I_0} = R$; фазы напряжения и тока

одинаковые. Импеданс равен R : $Z_R \equiv X_R = R$.

б) катушка индуктивности: Действует закон электромагнит-

$$dI$$

Использував его и закон Ома для комплексных величин, получим:

$$U_L = L \frac{dI}{dt}; I = I_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi_i)} \Rightarrow \frac{dI}{dt} = I_0 \cdot e^{\varphi_i} (i\omega) \cdot e^{i\omega t} \Rightarrow$$

$$U_L = L (i\omega) I_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi_i)}$$

$$\frac{U_L}{I} = i\omega L \Rightarrow X_L = i\omega L \quad I(t) \text{ – импеданс катушки индуктивности.}$$

Напряжение на катушке *опережает* по фазе ток через нее на $\pi/2$.

в) *конденсатор*: $U_C = \frac{q}{C} \Rightarrow \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{C} I$, или

$$\frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} I.$$

Пусть $U_C = U_{0C} \cdot e^{i(\omega t + \varphi_u)}$; тогда $I = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = C \cdot i \cdot \omega \cdot U_C(t)$.

Найдем отношение $\frac{U_C}{I} = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{i}{\omega C}$; отсюда $X_C = -\frac{i}{\omega C}$ –

комплексное сопротивление (импеданс) конденсатора.

Напряжение на конденсаторе *отстает* по фазе от тока через него на $\pi/2$.

Модуль комплексного сопротивления (катушки или конденсатора) называется *реактивным сопротивлением* (индуктивным или емкостным). Обозначается символом без крышечки над ним.

Все элементы в контуре соединены последовательно, поэто-

му для нахождения импеданса контура надо просуммировать им-

педансы всех элементов: $Z_K = R + X_L + X_C$. После подстановки можем получить модуль импеданса, то есть полное сопротивление контура:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Резонансом для тока называется явление резкого увеличения амплитуды колебаний тока при приближении частоты ЭДС к некоторому значению, называемому резонансной частотой $\omega_{\text{рез}}$.

Нетрудно видеть, что максимум амплитуды тока будет тогда, когда минимально полное сопротивление контура, или $Z_{\text{рез}} = R$ и

$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, отсюда $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, что соответствует частоте свободных колебаний в контуре.

Максимум напряжения на конденсаторе соответствует резонансу для напряжения, который наблюдается при несколько мень-шей частоте ЭДС:

$$\omega_{\text{рез.}U} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}.$$

R

$d = \sqrt{2L}$ – коэффициент затухания для данного контура.

Амплитуда резонансного напряжения на конденсаторе U_{0C} пропорциональна амплитуде ЭДС и добротности контура Q :
 $U_{0C} = Q \times \epsilon_0$.

При не слишком большом затухании в контуре добротность определяется соотношением $Q = \frac{\rho}{L}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ называется ха-рактеристическим сопротивлением контура. Чем больше доброт-ность, тем «острее» резонанс.

Резонансной кривой называется зависимость амплитуды на-пряжения на конденсаторе от частоты ЭДС.

Методика и порядок измерений

Закройте окно теории. Внимательно рассмотрите рисунок (рис. 11.1) для компьютерной модели.

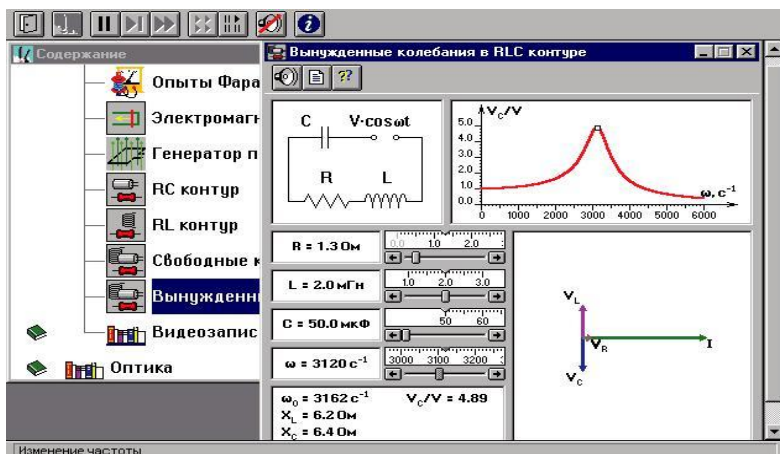


Рис. 11.1. Окно эксперимента «Вынужденные колебания в RLC контуре»

Перерисуйте необходимое в конспект, используя обозначения, принятые в нашей теоретической части (ϵ_0 вместо V , U_{0C} вместо V_C , U_{0L} вместо V_L и U_{0R} вместо V_R).

Подготовьте 3 таблицы, используя как образец табл. 11.1.

Таблица 11.2. Результаты измерений (12 столбцов). $l = \text{---}$ мГн

$C, \text{ мкФ} =$	50	55	...	100
$\omega_{PE3}, 1/c$				
$\omega_0, 1/c$				
U_{0C}/ϵ_0				
$1/\sqrt{C}$				

Таблица 11.2. Значения характеристик (не перерисовывать)

Бригады	R, Ом	L1, мГн	L2, мГн	L3, мГн
1 или 5	1 или 2	1,0	1,7	2,4
2 или 6	2 или 1	1,2	1,9	2,6
3 или 7	1 или 2	1,4	2,1	2,8
4 или 8	2 или 1	1,6	2,3	3,0

Получите у преподавателя допуск для выполнения измерений.

Измерения

1. Закройте окно теории (если вы ее вызывали), нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Изменяйте величину емкости конденсатора и наблюдайте изменение резонансной кривой.

2. Зацепив мышью, перемещайте движки регуляторов:

a) R – сопротивления резистора,

b) L – индуктивности катушки,

и зафиксируйте значения, указанные в табл. 2 для вашей бригады. 3.

Установите указанное в табл. 1 значение емкости конденсатора. Изменяя величину частоты ЭДС, следите за перемещением отметки на резонансной кривой и числовым значением добротности (U_{0C}/ϵ_0). Добейтесь максимального значения добротности и

соответствующие значения частоты источника ЭДС и собственной частоты контура занесите в табл. 1. Повторите измерения для других значений емкости конденсатора из табл. 1.

4. Повторите измерения для двух других значений индуктивности катушки, выбирая их из табл. 2. Полученные результаты за-пишите в табл. 3 и 4.

Обработка результатов и оформление отчета

1. Постройте на одном листе графики зависимости резонансной частоты от корня из обратной емкости при трех значениях ин-дуктивности.

2. Для каждой прямой определите котангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{ctg} \varphi = \frac{\Delta \left(\frac{1}{\sqrt{C}} \right)}{\Delta \omega_{\text{ЭКСР}}} \equiv A_{\text{ЭКСР}}.$$

3. Вычислите теоретическое значение константы $A_{\text{ТЕОР}}$ для каждой прямой по формуле $A_{\text{ТЕОР}} = L \cdot \sqrt{\quad}$.

4. Заполните таблицу результатов измерений.

Номер измерения	$A_{\text{ЭКСР}}, \Gamma \text{H}^{1/2}$	$A_{\text{ТЕОР}}, \Gamma \text{H}^{1/2}$

Сделайте выводы по графикам и результатам

измерений. **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте определение вынужденным колебаниям.
2. Что такое колебательный контур?
3. Когда возникают вынужденные гармонические колебания?
4. Как графически изображается комплексная величина?
5. Что такое комплексная амплитуда тока или напряжения?
6. Дайте определение импеданса.
7. Что такое полное электрическое сопротивление?
8. Чему равен импеданс резистора?
9. Чему равен импеданс идеальной катушки индуктивности?

10. Как формулируется закон электромагнитной индукции для катушки?
11. Чему равен импеданс конденсатора?
12. Чему равны реактивные сопротивления катушки и конденсатора?
13. Чему равно реактивное сопротивление последовательно соединенных катушки и конденсатора?
14. Чему равен импеданс колебательного контура?
15. Чему равен полное сопротивление колебательного контура?
16. Дайте определение резонанса для тока в колебательном контуре.
17. На какой частоте наблюдается резонанс для тока в колебательном контуре?
18. На какой частоте наблюдается резонанс для напряжения на конденсаторе в колебательном контуре?
19. Чему равно отношение амплитуд напряжения на конденсаторе при резонансе и ЭДС?
20. Чему равно характеристическое сопротивление контура? Как оно влияет на добротность?
21. Что такое резонансная кривая контура?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Инструкция по эксплуатации учебного стенда CLE-119

1. НАЗНАЧЕНИЕ СТЕНДА

Учебный стенд настольный модели CLE-118 предназначен для выполнения лабораторных работ, предусмотренных учебным планом по специальностям «Автоматизация технологических процессов и производств», «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», «Информатика и вычислительная техника», при изучении дисциплин «Физика » и «Электротехника». Стенд используется для макетирования простейших электрических схем, параметры которых соответствуют техническим характеристикам стенда.

2. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

- 2.1 Максимальное коммутируемое напряжение, В - до 36
- 2.2 Количество измерительных устройств - 2
- 2.3 Параметры измерительного устройства:
 - Разрядность – 3,5 разряда
 - Предел измерения - 200mV, 20V, 200V, 500V
- 2.4 Число клемм коммутационного поля - 32
- 2.5 Число клемм нажимных (сдвоенные клеммы) - 8
- 2.6 Масса стенда - 1,5 кг
- 2.7 Размеры - 300x210x70 мм

3. СОСТАВ ИЗДЕЛИЯ

- В состав изделия (рис.1) входят:
- Корпус 1.
 - Ламинированная панель
 - 2. • Измеритель 3.
 - Тумблер включения питания измерителя 4 (на рисунке не видно).
 - Клемма коммутационная 5.
 - Клемма нажимная (входная) 6.
 - Клемма на приборный блок 7.
 - Соединители 8.



Рис. П.1 Общий вид стенда

4. ВЕДОМОСТЬ ПОКУПНЫХ КОМПОНЕНТОВ

№ п/п	Наименование состав- ных частей издел.	Количество шт.	Примечание
1.	Корпус стенда	1	
2.	Ламинированная панель	1	
3.	Цифровой дисплей, Измеритель <i>PMLCDL 3 ½</i>	2	
4.	Тумблер 6конт. <i>DPDT</i> (<i>on-on</i>) (<i>PST-22A</i>)	8	
5.	Клемма на приборный блок Тип <i>BP-10</i> (красный)	32	
6.	Клемма на приборный блок <i>BP-1A</i>	4	
7.	Вилка «Вапана» тип (<i>TS-1</i>) чер.	20	
8.	Клемма нажимная <i>PT-2A</i>	8	

5. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ СТЕНДА

5.1 Устройство стенда

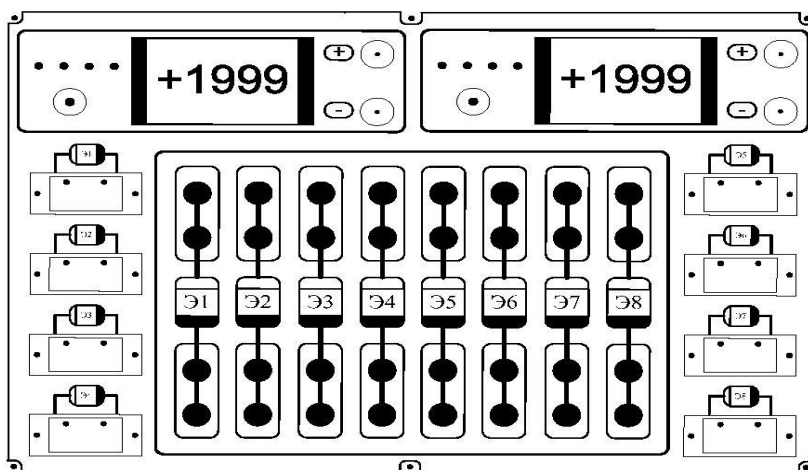


Рис. П.2 Коммутационное поле стенда

Учебный стенд модели *CLE-119* представляет собой настольную конструкцию, предназначенную для макетирования различных электрических схем. Для закрепления макетируемых элементов исследуемой схемы используются нажимные клеммы **6** (рис. П1, П2) марки *PT-2A*. Нажимные клеммы (в дальнейшем будем называть их *входными клеммами*) размещены по краям стенда на лицевой панели корпуса **1**. Максимальный диаметр вывода закрепляемого радиоэлемента должен быть не более 5 мм. Каждый вывод входной клеммы соединяется с двумя клеммами **5**, типа *BP-10* (*коммутационные клеммы*), из которых формируется коммутационное поле. Коммутационное поле размещено в центре лицевой панели стенда и представляет из себя матрицу 8x4 (рис. 2). Для измерения электрических сигналов в составе стенда используется цифровой измеритель **3**, модели *PMLCDL 3½*, размещенный в верхней части корпуса. Измеритель имеет отдельное питание 9В (батарейка типа «Крона»), которое включается с помощью тумблера **4**. Измеряемый сигнал подключается к измерителю через клеммы **7**, типа *BP-1A*. Такие же клеммы используются для подключения к стенду внешнего блока питания, для питания исследуемой схемы. Соединение отдельных радиоэлементов между

собой выполняется с помощью соединителей **8**, представляющих собой отрезки провода, на концах которых смонтированы однополюсные вилки типа *TS-1*.

5.2 Принцип работы стенда

Макетируемые элементы исследуемой схемы закрепляются во входных клеммах **6** согласно заданной схемы. Каждому элементу, закрепленному в той или иной входной клемме присваивается обозначение Э1, Э2 ... Э8. Для формирования исследуемой схемы необходимо на коммутационном поле выполнить соединения выводов элементов Э1, Э2 ...Э8 с помощью соединителей **8**. Сигнал исследуемого узла схемы соединить с входными клеммами измерителя.

6. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Своевременное качественное обслуживание и ремонт является залогом безотказной и безопасной работы стенда.

6.1 Обслуживание и ремонт изделия выполняется квалифицированным персоналом с соблюдением правил техники безопасности.

6.2 Техническое обслуживание перед началом каждой лабораторной работы.

6.2.1 Проверить правильность работы измерителя **3**, для чего подать на вход измерителя калиброванный элемент питания (например 1,5 В), включить тумблер **4** и считать с экрана измерителя измеренное напряжение. Значение измеренного напряжения не должно отличаться более чем на 10%. В случае неправильного значения измеренного напряжения проверить элемент питания измерителя.

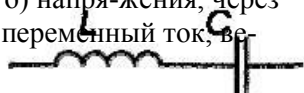
6.2.2 Проверить соединители **8** на предмет обрыва и плохого контакта.

7. ПРИМЕР СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НА СТЕНДЕ *CLE-119*

Рассмотрим пример создания электрической схемы колебательного контура на стенде *CLE-119*.

7.1 Общие сведения о колебательном контуре

Последовательный колебательный контур является простейшей резонансной (колебательной) цепью. Состоит последовательный колебательный контур, из последовательно включенных катушки индуктивности и конденсатора. При воздействии на такую цепь переменного (гармонического) напряжения, через катушку и конденсатор будет протекать переменный ток, величина которого вычисляется по за-



кону Ома: $I = U/X_y$, где X_y — сумма реактивных сопротивлений последовательно включенных катушки и конденсатора (используется модуль суммы).

Рассмотрим, как зависят реактивные сопротивления конденсатора и катушки индуктивности от частоты приложенного переменного напряжения. Для катушки индуктивности, эта зависимость будет иметь вид:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

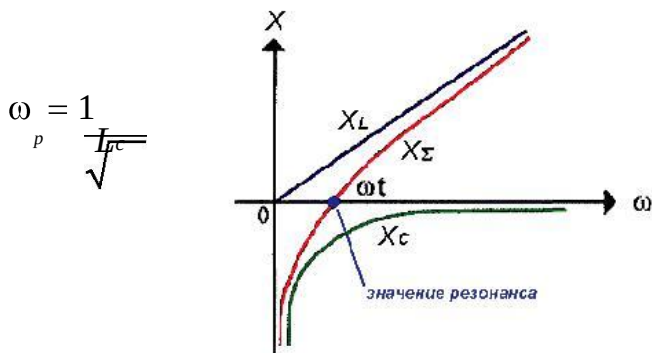
Из формулы видно, что при увеличении частоты, реактивное сопротивление катушки индуктивности увеличивается. Для конденсатора зависимость его реактивного сопротивления от частоты будет выглядеть следующим образом:

$$X_C = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi fC}$$

В отличие от индуктивности, у конденсатора всё происходит наоборот — при увеличении частоты, реактивное сопротивление уменьшается. На следующем рисунке графически представлены зависимости реактивных сопротивлений катушки X_L и конденсатора X_C от циклической (круговой) частоты ω , а также график зависимости от частоты ω их алгебраической суммы X_y . График, по сути, показывает зависимость от частоты общего реактивного сопротивления последовательного колебательного контура.

Из графика видно, что на некоторой частоте $\omega = \omega_p$, на которой реактивные сопротивления катушки и конденсатора равны по модулю (равны по значению, но противоположны по знаку), общее сопротивление цепи обращается в ноль. На этой частоте в цепи наблюдается максимум тока, который ограничен только

омическими потерями в катушке индуктивности (т.е. активным сопротивлением провода обмотки катушки) и внутренним сопротивлением источника тока (генератора). Такую частоту, при которой наблюдается рассмотренное явление, называемое в физике резонансом, называют резонансной частотой или собственной частотой колебаний цепи. Также из графика видно, что на частотах, ниже частоты резонанса реактивное сопротивление последовательного колебательного контура носит емкостной характер, а на более высоких частотах - индуктивный. Что касается самой резонансной частоты, то она может быть вычислена при помощи формулы Томсона, которую мы можем вывести из формул реактивных сопротивлений катушки индуктивности и конденсатора, приравняв их реактивные сопротивления друг к другу:



На рисунке справа изображена эквивалентная схема последовательного резонансного контура с учетом омических потерь R , подключенного к идеальному генератору гармонического напряжения с амплитудой U . Полное сопротивление (импеданс) такой цепи определяется: $Z = \sqrt{R^2 + X_\Sigma^2}$, где $X_\Sigma = \omega L - 1/\omega C$. На резонансной частоте, когда величины реактивных сопротивлений катушки $X_L = \omega L$ и конденсатора $X_C = 1/\omega C$ равны по модулю, величина X_Σ обращается в нуль (следовательно, сопротивление цепи чисто активное), а ток в цепи определяется отношением амплитуды напряжения генератора к сопротивлению омических потерь: $I = U/R$. При этом на катушке и на конденсаторе, в которых запасена реактивная электрическая энергия, падает одинаковое напряжение $U_L = U_C = IX_L = IX_C$.

На любой другой частоте, отличной от резонансной, напряжения на катушке и конденсаторе неодинаковы - они определяются амплитудой тока в цепи и величинами модулей реактивных сопротивлений X_L и X_C . Поэтому резонанс в последовательном колебательном контуре принято называть резонансом напряжений. Резонансной частотой контура называют такую частоту, на которой сопротивление контура имеет чисто активный (резистивный) характер. **Условие резонанса - это равенство величин реактивных сопротивлений катушки индуктивности и ёмкости.**

Частотные свойства различных цепей в технике принято оценивать с помощью амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), при этом сами цепи рассматривают как четырёхполюсники. На рисунках ниже представлены два простейших четырёхполюсника, содержащих последовательный колебательный контур и АЧХ этих цепей, которые приведены (показаны сплошными линиями). По вертикальной оси графиков АЧХ отложена величина коэффициента передачи цепи по напряжению K , показывающая отношение выходного напряжения цепи к входному.

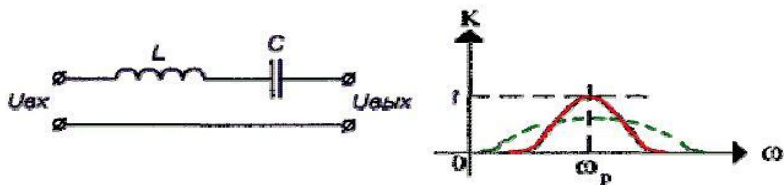


Рис. П.3 Схема колебательного контура и резонансная кривая

Для пассивных цепей (т.е. не содержащих усилительных элементов и источников энергии), величина K никогда не превышает единицу. Сопротивление переменному току изображённой на рисунке цепи, будет минимально при частоте воздействия, равной резонансной частоте контура. В этом случае коэффициент передачи цепи близок к единице (определяется омическими потерями в контуре). На частотах, сильно отличающихся от резонансной, сопротивление контура переменному току достаточно велико, а, следовательно, и коэффициент передачи цепи будет падать практически до нуля.

7.2 Подготовка схемы

Рассмотрим схему последовательного колебательного контура, изображенную на рис. П3, содержащую RLC – контур. На этой схеме к исследуемому контуру подсоединен источник гармонических колебаний. Для того чтобы собрать схему на стенде $CLE-119$, необходимо назначить каждому элементу нажимную клемму РТ-2А (см. рис. П. 1). В этом случае схема будет иметь вид, показанный на рис. П.4.

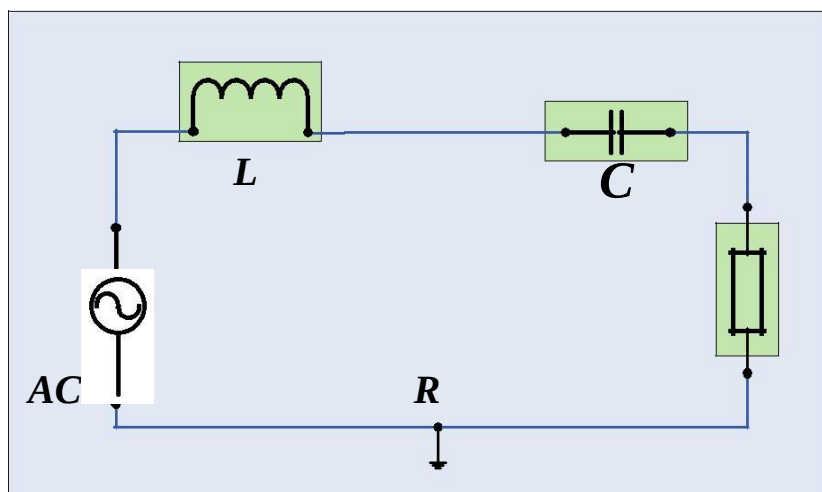


Рис. П.3 Схема последовательного колебательного контура

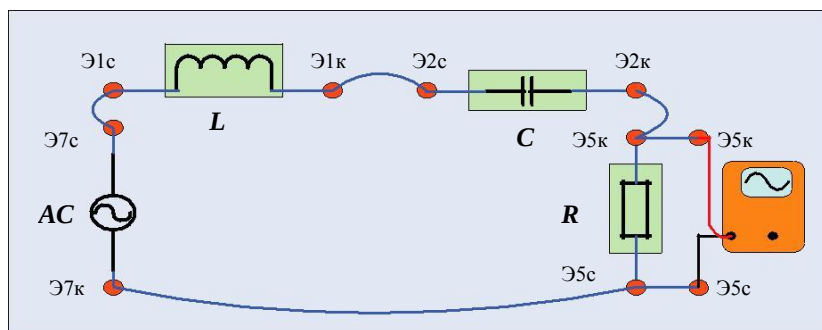


Рис. П.4 Схема последовательного колебательного контура,
подготовленная для монтажа

На этом рисунке для каждого элемента выбраны контакты на-жимной клеммы. Например, для индуктивности L выбрана клем-ма Э1 с контактами Э1с (серый цвет) и Э1к (красный цвет). Ана-логично выбраны клеммы и контакты для других элементов. На рис. 4 соединение с помощью дугообразной линии означает, что клеммы на приборном блоке (см. рис. П.1) Э1к и Э2С соединены на коммутационном поле гибким проводником (Э1с и Э 7с, Э2к и Э5к, Э7к и Э5с). Соединение прямой линией (рис. П.4) означает, что клеммы на приборном блоке Э5к и Э5к уже соединены. Для формирования гармонического сигнала выбран генератор ГЗ-102, который подключен к клемме Э7 (контакты Э7с и Э7к). Для на-блюдения сигнала используется генератор, подключенный к клем-ме Э5 (контакты Э5с и Э5к). Результат монтажных соединений изображен на рис. П.5

Библиографический список

1. Т. И. Трофимова. Курс физики: учебн. пособие для вузов /Т. И. Трофимова – 18-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. — 516 с.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики: в 4 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учебное пособие /И. И. Савельев, под общей ред. В. И. Савельева – М.: КНОРУСС, 2009. — 576 с.

Электронное учебное издание

Коковин Валерий Аркадьевич, **Куликов** Андрей
Владимирович, **Масликов** Александр Альбертович

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна»
142281 г. Протвино Московской обл.,
Северный проезд, д. 9