

## Тема 2. Электростатика

### Лабораторная работа № 3 (2.3)

#### Изучение электростатического поля методом моделирования

##### Введение

Электрическое поле – это область пространства, в которой проявляются силы электрического взаимодействия. Если оно создается неподвижными зарядами, то оно называется электростатическим, то есть не изменяющимся во времени.

Для описания свойств поля вводятся такие физические величины, как напряженность и потенциал. Напряженность ( $E$ ) – это силовая характеристика поля. Она равна силе, действующей на пробный (единичный точечный положительный) заряд, находящийся в данной точке поля. Единицей заряда в системе СИ является **кулон** (1Кл). Потенциал ( $\varphi$ ) – это энергетическая характеристика поля. Он равен потенциальной энергии такого же пробного заряда, помещенного в данную точку поля. Абсолютное значение потенциала численно равно работе по внесению заряда +1 из бесконечности (где поле равно нулю) в данную точку поля. На практике же более важно знать изменение энергии электрически заряженных тел при их перемещении в электрическом поле подобно тому, как в поле сил тяжести происходит изменение потенциальной энергии материальных тел. Разность потенциалов двух точек поля называют электрическим напряжением. Величина напряжения не зависит от абсолютного значения потенциала. Поэтому за нулевой уровень потенциала может быть принят потенциал в любой удобной для рассмотрения точке поля.

Напряженность и потенциал связаны между собой соотношением:

$$\vec{E} = - \text{grad } \varphi.$$

Другими словами, вектор напряженности направлен в сторону, противоположную направлению наиболее быстрого увеличения потенциала с расстоянием, а величина напряженности равна изменению потенциала на единице длины. Под действием сил поля движение зарядов происходит в сторону уменьшения их потенциальной энергии подобно тому, как под действием силы тяжести тело скатывается вниз с более высоких участков поверхности Земли.

Для наглядности распределение потенциала в пространстве изображают в виде эквипотенциальных поверхностей или поверхностей равного потенциала, а в случае двумерного (плоского) поля – в виде эквипотенциальных линий. Они аналогичны линиям равной высоты на географических картах. Распределение напряженности изображают в виде силовых линий, которые перпендикулярны эквипотенциальным линиям. Касательные к силовым линиям показывают направление сил, действующих на положительные заряды в электрическом поле, а густота линий пропорциональна величине этих сил.

Эти силы действуют и на заряды в токопроводящей среде между электродами, к которым приложено некоторое напряжение. Тождественность решений соответствующих математических уравнений при одинаковых граничных условиях обеспечивает математическую основу моделирования электростатического поля полем стационарного тока. Электрический ток в токопроводящей среде создает на сопротивлении соответствующих участков среды падение напряжения или разность потенциалов, аналогичную разности потенциалов между различными точками электростатического поля. Это падение напряжения может быть легко измерено вольтметром, так как методами прямых измерений определить величину заряда и параметры электростатического поля весьма затруднительно.

Изучение электростатических полей удобно проводить методом моделирования в электролитической ванне, в которую налита токопроводящая жидкость (электролит). В электролит помещают металлические электроды, форма которых соответствует форме заряженных электродов исследуемого двумерного поля. К электродам подводится электрическое напряжение и проводится серия измерений разности потенциалов  $U$  между одним из электродов и различными точками в электролите. Соединяя точки с одинаковыми значениями  $U$ , можно построить картину эквипотенциальных линий.

Полученный рисунок можно масштабировать как геометрически, так и по величине приложенного напряжения и использовать для расчетов электрических полей с подобной геометрией электродов.

### ***Экспериментальные задачи, поставленные в работе:***

- построить эквипотенциальные линии, характеризующие распределение потенциала в электролитической ванне для 3-х систем электродов;
- используя полученную модель электростатического поля, рассчитать характеристики электростатического поля для реальных систем электродов.

### **Описание экспериментальной установки**

На рис. 3.1 представлена схема экспериментальной установки.

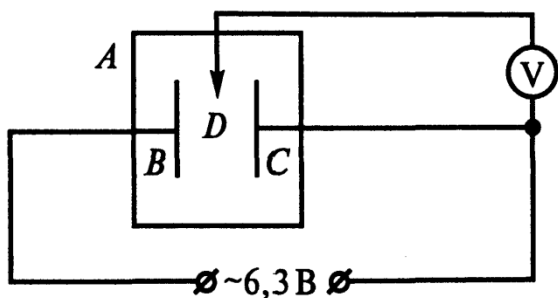


Рис. 3.1.

Она представляет собой плоскую ванну  $A$  из диэлектрика. В качестве токопроводящей среды (электролита) используется водопроводная вода (дистиллированная вода является диэлектриком). Вода наливается в ванну тонким слоем, чтобы модель можно было считать двумерной, то есть рассматривать

как модель поперечного сечения объёмной системы электродов. Тогда плоскость ванны можно считать плоскостью симметрии реальных электродов.

Ванна устанавливается строго горизонтально, чтобы проводимость слоя воды была одинаковой в любом месте.

На боковых стенках ванны установлены две вертикальные стойки для крепления и подключения электродов  $B$  и  $C$ , а также гнездо для подключения зонда – заостренного металлического стержня на диэлектрической рукоятке.

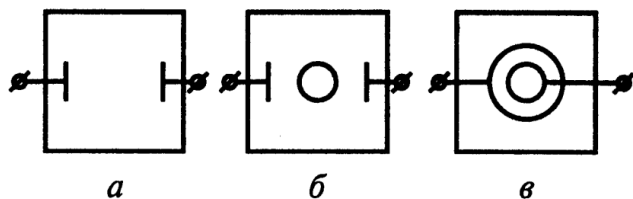


Рис. 3.2.

В данной работе предлагается исследовать несколько систем электродов (рис. 3.2):

- два параллельных прямых электрода, которые являются моделью плоского конденсатора или отклоняющих пластин электроннолучевых трубок;
- металлическое кольцо, помещенное между электродами, позволяет изучить поведение проводников, вносимых в электрическое поле, и их влияние на характеристики поля;
- два кольцевых электрода являются моделью цилиндрического или (в первом приближении) сферического конденсатора.

Каждый из электродов снабжен вертикальной стойкой для его крепления и подключения.

В комплект установки также входят два металлических стержня с зажимами на концах для соединения стоек электродов со стойками ванны.

Электроды опираются на дно ванны, возвышаясь над поверхностью воды. Они подключены к источнику переменного тока во избежание искажения поля из-за электролиза воды и образования газовых пузырьков вблизи электродов.

Для измерения напряжения между электродом  $C$  и любой точкой  $D$  в электролите (рис. 3.1) в эту точку вводят зонд с подключенным к нему вольтметром. В данной работе используется электронный вольтметр с высоким ( $\sim 1$  МОм) сопротивлением, чтобы избежать влияния сопротивления прибора на распределение потенциала в ванне.

### Подготовка протокола к работе

Запишите номер и название работы.

Подготовьте 3 листа миллиметровой бумаги для построения эквипотенциальных линий. *Укажите* на них свою фамилию и номер группы. Эти листы с выполненными построениями являются неотъемлемой частью протокола.

Запишите заголовок: «*Расчетные формулы*».

Выпишите формулу для расчетов напряженности электрического поля:

$$E = (\varphi_2 - \varphi_1) / d,$$

где  $\varphi_2$  и  $\varphi_1$  – значения потенциалов соседних с рассматриваемой точкой эквипотенциальных линий,  $d$  – кратчайшее расстояние между этими линиями в данном месте.

Выпишите формулу для расчетов поверхностной плотности зарядов в системе плоских электродов:

$$\sigma = E \varepsilon \varepsilon_0,$$

где  $E$  – напряженность поля вблизи электрода,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды между электродами и  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума.

Выпишите формулы для расчетов поверхностной плотности зарядов в системе цилиндрических электродов:

$$\sigma_1 = U \varepsilon \varepsilon_0 / (R_1 \ln (R_2/R_1)), \quad \sigma_2 = U \varepsilon \varepsilon_0 / (R_2 \ln (R_2/R_1)),$$

где  $R_2$  и  $R_1$  – радиусы большого и малого электродов, соответственно;  $U$  – разность потенциалов между электродами.

Подготовка к работе. Налейте в ванну водопроводную воду. Толщина слоя воды должна быть везде одинаковой и составлять 3 – 5 мм для того, чтобы сопротивление слоя воды было бы достаточно велико и флуктуации толщины слоя воды в ванне не влияли на результаты измерений.

Вставьте наконечник провода, идущего от зонда, в гнездо на краю ванны.

Включите тумблер «сеть» на панели вольтметра. До начала измерений прибор должен прогреться в течение 5 минут.

## Измерения и обработка результатов

### ***Задание 1. Построение эквипотенциальных линий для 1-й (рис.3.2а) конфигурации электродов***

Установите на дно ванны симметрично относительно ее краев два прямых электрода параллельно друг другу на расстоянии 6 – 8 см. Соедините стойки электродов и стойки ванны горизонтальными стержнями и закрепите зажимами в нужном положении.

Проследите, чтобы электроды опирались на дно ванны всей нижней поверхностью, и чтобы на них не было воздушных пузырьков. При необходимости удалите их прикосновением пальцев.

Нанесите на миллиметровку положение электродов и оси симметрии ванны.

Коснитесь зондом электрода  $C$  и установите стрелку вольтметра на «ноль». Коснитесь зондом электрода  $B$ , запишите показания прибора на миллиметровке рядом с изображением этого электрода. Если стрелка не отклоняется, проверьте и при необходимости подтяните все соединения электродов.

Опустите острие зонда в воду вертикально в центре ванны. Не вынимая зонд из воды, но и не прижимая его плотно ко дну ванны (чтобы избежать появления царапин и искажения поля), переместите его вдоль горизонтальной линии оси по направлению к электроду *C* до того момента, когда показания прибора станут равны 1В. Обозначьте эту точку на миллиметровке. Переместите зонд на 1см вверх и, сдвигая его вправо-влево, найдите положение, где напряжение также будет равно 1В. Обозначьте ее на миллиметровке. Вновь переместите зонд на 1см вверх и найдите такую же точку. Продолжайте аналогичные измерения до точки с координатой, превышающей края электродов на 2 - 3см. Проведите такие же измерения в нижней половине ванны. Соедините на миллиметровке полученные точки для построения эквипотенциальной линии. Запишите около нее соответствующее значение потенциала.

Найдите на горизонтальной оси точку, где напряжение будет равно 2В. Постройте аналогичным образом эквипотенциальную линию для этого случая. Повторите измерения и построение линий в пространстве между электродами для напряжений 3В, 4В и т.д. Убедитесь в том, что в центральной области между электродами линии параллельны, а вблизи краев электродов начинают их огибать.

### ***Задание 2. Построение эквипотенциальных линий для 2-й (рис. 3.2б) конфигурации электродов***

Установите в центре ванны малый кольцевой электрод. Закреплять и подключать его к установке не нужно.

Нанесите на 2-м листе миллиметровки оси ванны и отметьте положение электродов.

Измерьте потенциал в центре кольца, на самом кольце и постройте центральную и по 2-3 боковых эквипотенциальные линии аналогично тому, как это делалось в **Задании 1**. Убедитесь в том, что потенциалы внутри кольца, на его поверхности и центральной линии одинаковы, а другие линии искажаются, огибая кольцо.

### ***Задание 3. Построение эквипотенциальных линий для 3-й (рис.3.2в) конфигурации электродов***

Демонтируйте прямые электроды. Установите и подключите большой кольцевой электрод симметрично центру ванны и малому электроду. Подключите малый кольцевой электрод к одной из стоек ванны.

Нанесите на 3-м листе миллиметровки оси ванны и отметьте положение электродов.

Постройте эквипотенциальные линии между электродами.

Предъявите полученные результаты преподавателю и получите его подпись

на каждом листе.

Выключите и разберите установку. Соберите воду из ванны и предъявите установку инженеру.

#### ***Задание 4. Расчёт характеристик электрических полей по результатам полученных моделей***

На каждом из полученных рисунков эквипотенциальных линий проведите несколько силовых линий (линий напряженности) и укажите на них направление вектора напряженности.

Запишите заголовок: ***«Расчеты напряженности поля в системе плоских электродов»***.

Обозначьте на рисунке с плоскими электродами 3-4 точки, в том числе, вблизи электродов и рассчитайте значения напряженности в этих точках.

Запишите подзаголовок: ***«Расчет напряженности поля в системе цилиндрических электродов»***.

Проведите аналогичные расчеты значений напряженности в нескольких точках поля, создаваемого между электродами.

Запишите заголовок: ***«Расчеты модуля поверхностной плотности зарядов»***.

Рассчитайте модуль поверхностной плотности зарядов, которые необходимо накопить на плоских и цилиндрических электродах, чтобы они создавали в дистиллированной воде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 81$  такую же напряженность поля между электродами.

Для цилиндрических электродов предварительно измерьте и запишите в тетрадь радиусы электродов.

## **Лабораторная работа № 4 (2.7)**

### **Электронный осциллограф**

#### **Введение**

Электронный осциллограф предназначен для изучения различных электрических процессов.

Основой осциллографа является электроннолучевая трубка, на экране которой можно визуально наблюдать отображение исследуемых явлений в виде светящихся линий на экране. Изображение на экране возникает в результате свечения специального вещества – люминофора на внутренней поверхности экрана при воздействии на него пучка электронов, который создается электронной пушкой.

По пути к экрану пучок электронов проходит между плоскопараллельными пластинами. Под действием электрического поля, создаваемого приложенным к пластинам напряжением, пучок отклоняется в сторону пластины с положительным потенциалом (поэтому эти пластины называют отклоняющими) и светящаяся точка на экране смещается в ту же сторону.

Одна пара пластин располагается горизонтально и, соответственно, точка на экране смещается по вертикали. Эти пластины называют пластинами *вертикального отклонения* или отклонения по оси  $Y$  (в соответствии с общепринятым обозначением осей на графиках). Вторая пара пластин расположена вертикально. Это – пластины *горизонтального отклонения* или отклонения по оси  $X$ .

На каждую пару отклоняющих пластин может быть подано регулируемое вручную постоянное напряжение, что позволяет устанавливать светящуюся точку или изображение целиком в нужном месте на экране.

Если на одну пару пластин подано переменное напряжение, то при отсутствии напряжения на второй паре пластин на экране будет наблюдаться соответственно вертикальная или горизонтальная линии. Если переменное напряжение подано одновременно на обе пары пластин, то на экране появляется кривая линия – результат сложения двух взаимно перпендикулярных движений светящейся точки.

Чтобы наблюдать форму исследуемого напряжения (зависимость от времени), это напряжение обычно подается на пластины вертикального отклонения (по оси  $Y$ ). При этом необходимо обеспечить равномерное движение луча по горизонтали. Для этого на пластины горизонтального отклонения (по оси  $X$ ) подается напряжение, линейно изменяющееся во времени, так называемое напряжение развертки.

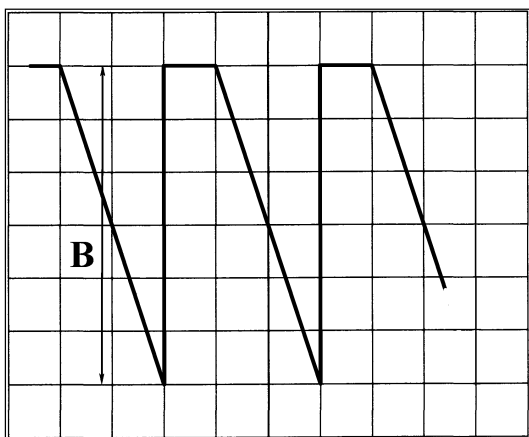
Действие напряжения развертки подобно движению бумаги при выполнении лабораторной работы по изучению колебаний песочного маятника в курсе «Механика». На неподвижном листе бумаги колеблющийся маятник оставляет след в виде прямой линии. Равномерное движение бумаги приводит к тому, что след превращается в синусоиду.

При изучении быстротекущих процессов движение пятна на экране происходит настолько быстро, что глаз человека не успевает его заметить. Поэтому после прохождения луча слева направо (прямой ход) необходимо осуществить быстрый возврат луча в исходное положение (обратный ход) и повторное его многократное прохождение по экрану. Эти соображения и обуславливают пилообразную форму напряжения, подаваемого на пластины горизонтального отклонения от внутреннего генератора развертки.

Если длительность прямого хода луча равна целому числу периодов исследуемого напряжения, то при повторном прохождении луча по экрану линии движения светового пятна будут точно накладываться друг на друга и изображение будет неподвижным. В противном случае изображение будет

перемещаться по экрану. Чтобы этого не происходило, нужно синхронизировать работу генератора развертки и исследуемый сигнал так, чтобы прямой ход пилообразного напряжения начинался с одного и того же значения фазы исследуемого напряжения. Для этого в осциллографе предусмотрено специальное синхронизирующее устройство.

Временная зависимость (осциллограмма) выходного напряжения генератора



развертки размах с учетом синхронизации изображения показана на рис. 4.1.

Наклонный участок осциллограммы соответствует прямому ходу пятна по экрану (слева - направо). Быстрый возврат напряжения развертки к начальному значению соответствует обратному ходу. Горизонтальный участок соответствует времени ожидания генератором развертки того момента, когда фаза исследуемого напряжения в начале каждого следующего прямого хода совпадет с фазой этого напряжения в начале предыдущего прямого хода.

Рис. 4.1.

Осциллограф широко используется для *измерения напряжений*, поскольку координата светящейся точки на экране прямо пропорциональна напряжению, приложенному к соответствующим отклоняющим пластинам:

$$x = \alpha_x U_x, \quad y = \alpha_y U_y,$$

где  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  – коэффициенты пропорциональности, которые называются чувствительностями по осям X и Y.

Для удобства этих измерений поверх экрана помещена прозрачная пластина с нанесенной на ней координатной сеткой, а вместо чувствительности используют обратную величину – цену деления этой сетки (далее просто: цену деления экрана). Вначале определяют расстояние между двумя выбранными положениями светящейся точки в делениях. Затем, умножая число делений на цену деления, рассчитывают соответствующую величину напряжения так же, как и при использовании стрелочных приборов.

Для измерения разных по величине напряжений в осциллографе предусмотрена возможность изменения предела измерений (и, соответственно, цены деления), как у вольтметров. Обычно цена деления указана на лицевой панели осциллографа около ручки переключателя усилителя Y. В противном случае перед измерением необходимо провести градуировку осциллографа.

Линейность прямого хода напряжения развертки позволяет измерять *малые отрезки времени*, например, период колебаний при помощи той же масштабной сетки. Цена деления в милли- или микросекундах указана на лицевой панели осциллографа против соответствующих положений ручки переключателя «развертка».



С помощью осциллографа можно также наблюдать результат *сложения переменных напряжений*, подаваемых на вход Y. Если на него подано два напряжения одной частоты, но с разными начальными фазами, то их сумма представляет собой синусоиду с той же частотой и промежуточным значением начальной фазы (см. курс «Механика»). Если подано два напряжения с близкими частотами, то на экране будут видны *биения* – колебания, амплитуда которых изменяется с частотой, равной разности частот исходных напряжений. (Подробнее образование биений рассмотрено в указаниях по выполнению соответствующего задания лабораторной работы).

### **Экспериментальные задачи, поставленные в работе:**

- настройка исходных параметров изображения на экране осциллографа (яркости, фокусировки) путем регулировки напряжений на электродах электроннолучевой трубки;
- калибровка осциллографа;
- измерение параметров синусоидального и пилообразного напряжений;
- наблюдение действия системы синхронизации изображения;
- измерение частоты биений, являющихся результатом сложения двух синусоидальных напряжений.

### **Оборудование для выполнения работы**

В работе исследуется осциллограф типа С1-65А (рис. 4.2). В ряде заданий используется второй осциллограф того же типа, а также низкочастотные генераторы ГЗ-33 и ГЗ-118. Приемы работы с приборами описаны в указаниях по выполнению соответствующих экспериментальных заданий.

В комплект оборудования также входят специальные кабели для соединения приборов друг с другом.

**Подготовка осциллографа С1-65А к работе** (Выполняется перед получением практического допуска).

Ознакомьтесь с расположением органов управления осциллографом **С1-65А** и установите их в рекомендованных ниже исходных положениях.

Основные органы управления осциллографом (ручки, разъемы и другие устройства) выведены на лицевую панель, имеют свои обозначения и объединены в группы по функциональному признаку. Группы разделены на панели сплошными линиями.

Слева от экрана (см. рис. 4.2) расположены ручки управления яркостью изображения «☼», фокусировкой пятна «◎» (установите эти ручки в среднее положение), освещением сетки экрана «☷», четкостью изображения «⊖» (две последние в данной работе не используются).



Исследуемое напряжение подается на вход «усилителя Y» через разъем, который обозначен символом « $\ominus$ » и расположен на лицевой панели прибора под экраном. Сигнал на этот и другие разъемы подводится по специальным кабелям, один из проводов которых через разъем соединяется с корпусом прибора. Рядом с разъемом « $\ominus$ » установлена клемма « $\perp$ », соединенная с корпусом прибора, которая в случае сильных помех заземляется.

На входе усилителя Y имеется переключатель  $\Pi_1$  на три положения, соответствующие «открытому» входу прибора ( $\cong$ ) для измерения постоянных и переменных напряжений, «закрытому» входу ( $\sim$ ) для измерения только переменных напряжений и «закороченному» входу ( $\perp$ ) для установления нулевого положения луча по вертикали на экране электронно-лучевой трубки.

Чувствительность усилителя вертикального отклонения может устанавливаться переключателем «V/дел.». Под «делением» здесь и далее понимается сторона квадрата ( $\approx 1$  см) на масштабной сетке, установленной перед экраном. Действие этого переключателя эквивалентно изменению предела измерений у обычных вольтметров. Соосно с ручкой указанного переключателя выведена ручка потенциометра «плавно», которая позволяет уменьшить чувствительность до 2,5 раз. Но при измерениях этот потенциометр не используется, так как это требует дополнительной градуировки шкалы. Установите эту ручку в крайнее правое положение.

Ручное перемещение электронного луча на экране по вертикали осуществляется ручкой « $\updownarrow$ ».

Справа от экрана расположена панель «развертка»

В верхней части панели расположен переключатель вида напряжения ( $\Pi_2$ ). В положении «x1» оно подается непосредственно от внутреннего генератора развертки. В положении «x0,1» период развертки может быть уменьшен в 10 раз. Установите переключатель  $\Pi_2$  в положение « $\ominus X$ », чтобы отключить внутренний генератор. В этом случае напряжение развертки может быть подано от внешнего источника через разъем « $\ominus X$ », который установлен на панели «синхронизация».

Частота внутреннего генератора развертки устанавливается переключателем «время/дел», а также с помощью ручки «плавно», расположенной на той же оси. При измерениях ручка «плавно» не используется. Установите ее в крайнее положение по часовой стрелке.

Выбор режима запуска развертки осуществляется переключателем, расположенным в нижней части панели «развертка». Установите его в верхнее положение (запуск от внутреннего синхронизирующего устройства).

Слева от этого переключателя расположены ручки ручного смещения пятна по горизонтали (« $\blacksquare$ » - грубо, « $\blacksquare$ » - плавно, соответственно).

Выходной сигнал генератора развертки может быть выведен на внешние устройства через гнездо « $\odot$ » «V» в нижней части панели «развертка» и гнездо «земля» - « $\perp$ ».

В правой части лицевой панели осциллографа расположены (сверху вниз) панели «синхронизация», «калибратор» и «сеть».

Уровень сигнала, с которого начинается его развертка на экране, регулируется соответствующей ручкой на панели «синхронизация». Вид синхронизации выбирается переключателем П<sub>4</sub>: «внутри» (по сигналам от усилителя Y), «сеть» (от сетевого питающего напряжения) либо внешним сигналом, который подается через разъем « $\ominus$ X» в положении «1:1» непосредственно на вход усилителя «X», а в положении «1:10» - с десятикратным ослаблением.

Калибратор - это внутренний источник напряжения, которое служит для проверки чувствительности осциллографа. Выходной сигнал калибратора выводится через гнезда « $\ominus$ » и « $\perp$ ». Величина этого напряжения регулируется соответствующим переключателем. Соосно с ним расположена ручка выбора режима работы калибратора. Она имеет три положения. В двух крайних положениях калибратор либо выключен, либо с него подается постоянное напряжение (символ « - »). В среднем положении « $\perp$  1kHz» калибратор вырабатывает последовательность прямоугольных импульсов (меандр).

Включение прибора осуществляется тумблером «сеть», при этом загорается расположенная рядом с тумблером сигнальная лампочка.

Включите тумблер «сеть».

Через 1-2 минуты, необходимых для прогрева осциллографа, на экране должно появиться светящееся пятно. Если увидеть пятно на экране не удастся, увеличьте яркость до максимума. Появится зеленое свечение в какой-то части экрана. Это означает, что пятно находится за пределами экрана со стороны засветки, и станет понятно, в какую сторону следует его сместить ручками регулировки положения пятна, чтобы установить в центре экрана. Затем нужно уменьшить яркость пятна до удобного уровня и подстроить электростатическую линзу электроннолучевой трубки до минимального размера пятна ручкой фокусировки.

Включите генератор развертки, переведя переключатель (П<sub>2</sub>) в положение «x1». На экране должна появиться горизонтальная линия. Установите ее в центре экрана.

Получите практический допуск к работе и приступайте к выполнению экспериментальных заданий.

### **Подготовка протокола к работе**

Запишите № и название работы.

При выполнении работы в каждом из заданий необходимо зарисовать получаемое на экране изображение (осциллограмму) и провести необходимые измерения, основываясь на этом изображении. Рис. 4.1 может служить примером такой осциллограммы.

## Указания по выполнению работы

Запишите заголовок: «**Задание 1. Калибровка осциллографа по оси Y**».

В этом задании необходимо проверить соответствие цены деления, указанной на лицевой панели для определенного положения переключателя «V/дел», ее фактическому значению. Для этого на вход осциллографа подается напряжение известной величины от внутреннего калибратора, и проводятся соответствующие измерения.

Подключите кабель со спецразъёмом на одном конце и двумя штырьками на другом ко входу Y. Для этого вставьте разъём на кабеле в гнездо «вход Y» так, чтобы выступы на корпусе панельного разъёма вошли в прорези на кольце кабельного разъёма, затем нажмите на кольцо кабельного разъёма и поверните его до упора по часовой стрелке, зафиксировав соединение. Отключение кабеля проводится в обратной последовательности: нажать на кольцо, повернуть его против часовой стрелки до легкого щелчка и движением «на себя» снять кабельную часть разъёма.

Подключите штырьки на втором конце кабеля к выходу калибратора. При этом следует соблюдать определенную полярность подключения. Значок на корпусе одного из штырьков означает, что он должен вставляться в гнездо с тем же значком («корпус» или «земля»). При отсутствии такого значка полярность штырьков проверяется следующим образом: возьмитесь пальцами за контакт одного из штырьков, если на экране появится непрерывно изменяющаяся линия, то эта вилка является «сигнальной» и её нужно вставить в гнездо на панели калибратора. Если на экране останется неизменной горизонтальная линия, то этот штырек нужно вставить в гнездо «земля».

Установите на панели калибратора:

- переключатель уровня контрольного сигнала в положение «200 мВ», что соответствует размаху прямоугольных импульсов на выходе калибратора.
- -переключатель вида контрольного сигнала (маленькая ручка на той же оси) в среднее положение « $\square$  1kHz» (указано под переключателем).

Подготовьте табл. 1.

Таблица 1.

Напряжение на выходе калибратора, $U_k$	мВ	200
Высота импульсов, $N_Y$	дел	
Цена деления экрана по Y(эксп.)	В/дел	
Цена деления экрана Y(пасп.)	В/дел	

Запишите в табл. 1 величину напряжения(200 мВ) на выходе калибратора.

Подберите такое положение переключателя «V/дел», чтобы размер изображения по вертикали (которое первоначально может представлять собой просто широкую горизонтальную полосу) составлял более половины экрана.

Запишите в табл. 1 соответствующее этому положению значение цены деления экрана как паспортное.

Подберите такое положение переключателя «время/дел» на панели «развертка», чтобы изображение на экране приняло вид  $3 \div 4$  неподвижных прямоугольных импульсов. При необходимости воспользуйтесь ручкой регулировки уровня синхронизации.

Сдвиньте полученную осциллограмму ручками перемещения изображения так, чтобы нижний край импульсов совпал бы с какой-либо сплошной горизонтальной линией сетки экрана, а начало какого-либо импульса – с какой-либо сплошной горизонтальной линией сетки. Зарисуйте осциллограмму. Измерьте по шкале высоту импульсов в делениях шкалы и запишите ее в табл. 1. Рассчитайте фактическую цену деления осциллографа по вертикали как  $U_k / N_y$  и запишите её в табл. 1. Она должна соответствовать паспортному значению. В противном случае обратитесь к инженеру для решения вопроса о возможности данного осциллографа для работы.

Запишите заголовок: «**Задание 2. Калибровка осциллографа по оси времени (X)**».

Этот вид калибровки осциллографа проводится с использованием той же осциллограммы. Подготовьте табл. 2.

Таблица 2.

Частота импульсов на выходе калибратора	кГц	
Период импульсов на выходе калибратора, $T_k$	мс	
Период импульсов по сетке на экране, $N_x$	дел	
Цена деления экрана по X(эксп)	мс/дел	
Цена деления экрана по X(пасп)	мс/дел	

Запишите в табл. 2 значение частоты импульсов на выходе калибратора. Рассчитайте и запишите в таблицу соответствующее этой частоте значение периода следования импульсов.

Укажите на осциллограмме интервал по оси X, соответствующий периоду импульсов, и запишите в таблицу его величину в делениях экрана  $N_x$ . Запишите в таблицу паспортное значение цены деления по X, указанное на панели осциллографа напротив черной риски на ручке переключателя «время/дел». Рассчитайте фактическую цену деления экрана осциллографа по вертикали как  $T_k / N_x$  и запишите её в таблицу. Она должна соответствовать паспортному значению. В противном случае обратитесь к инженеру для решения вопроса о возможности использования данного осциллографа для работы.

Отключите развертку, переведя верхний переключатель на панели «развертка» в крайнее правое положение. При этом изображение импульсов на

экране превратится в две яркие точки, расположенные на одной вертикальной линии на расстоянии, соответствующем величине импульсов. Это объясняется тем, что в отсутствие развертки луч, при своем многократном движении вверх – вниз, задерживается в верхней и нижней точках, а между ними проскакивает настолько быстро, что линия, соединяющая эти точки, оказывается малозаметной. Чтобы ее увидеть, увеличьте яркость луча, после чего верните ручку «яркость» в прежнее положение.

Запишите заголовок: **«Задание 3. Определение чувствительности по напряжению системы горизонтального отклонения осциллографа».**

Подайте сигнал от калибратора на ось X. Для этого отключите кабель от входа Y и подключите его на вход X.

На экране должно появиться изображение в виде двух точек, расположенных горизонтально, так как на пластины вертикального отклонения напряжение не подаётся – нет развертки по вертикали.

Измерьте расстояние между светящимися точками (размах импульсов) в делениях сетки экрана X и вычислите чувствительность осциллографа по оси X как  $\alpha_x = X/U_k$ . Значение  $\alpha_x$  запишите в тетради. Ее можно использовать при измерениях напряжения, подаваемого на ось X.

Не выключайте осциллограф и приступайте к выполнению **Задания 4.**

Запишите заголовок: **«Задание 4. Измерение частоты пилообразного напряжения».**

При выполнении этого задания в качестве источника пилообразного напряжения используется второй (вспомогательный) осциллограф.

Отключите кабель, соединяющий калибратор и вход X.

Соедините этим кабелем вход основного осциллографа с выходом генератора развертки вспомогательного осциллографа, используя гнезда « $\ominus$ » «V» и «L».

Включите тумблер «сеть» вспомогательного осциллографа. Установите переключатель «время/дел» этого осциллографа в положение «0,2 мс».

Включите развёртку основного осциллографа установив соответствующий переключатель в положение «x1», а переключатель вида синхронизации в положение "внутр".

Получите устойчивое изображение пилообразного напряжения. Зарисуйте осциллограмму. Измерьте период наблюдаемого напряжения. Величину, обратную длительности прямого хода луча, принято называть частотой развертки. Рассчитайте ее и запишите в тетради как  $f_{\Pi} = \dots$ .

Переведите переключатель «время/дел» в положение «0,5мс» и повторите

измерения. Вы должны получить такое же значение частоты  $f_n$ .

Запишите заголовок: «**Задание 5. Наблюдение сложения синусоидального сигнала по вертикальной и пилообразного по горизонтальной осям**».

Переключите кабель, идущий от генератора развертки вспомогательного осциллографа, со входа Y основного осциллографа на его вход X.

В качестве источника синусоидального напряжения используйте низкочастотный (звуковой) генератор **ГЗ-33**. Подключите выход генератора ко входу Y основного осциллографа так, чтобы "сигнальный" штырек был подключен к верхней клемме генератора, а "земляной" - к средней, которая должна быть соединена перемычкой с клеммой "земля" (нижней). Установите на панели генератора ручку переключателя "шкала прибора" в положение "x2", ручку "пределы шкал" в положение "АТТ", ручку "расстройка" в положение "0", тумблер "внутр. нагрузка" в положение "вкл".

Включите генератор тумблером "сеть" на его панели. Через 1-2 минуты, необходимые для прогрева прибора, установите при помощи ручки "частота Hz" значение частоты  $f_n$ , определенное ранее в **Задании 4**. Отсчет частоты проводится на вращающейся шкале генератора напротив неподвижной красной риски с учетом положения переключателя "множитель".

Установите величину выходного напряжения генератора ручкой "рег. выхода" такой, чтобы размах **B** изображения по вертикали (см. пример **B** для «пилы» на рис. 4.1) составлял примерно половину экрана. Полученная осциллограмма должна представлять собой один период синусоиды. При необходимости подстройте частоту звукового генератора для получения неподвижного изображения.

Отключите кабель, соединяющий вход X основного осциллографа и выход генератора развертки вспомогательного.

Включите развертку основного осциллографа.

Получите устойчивое изображение на экране идентичное изображению при работе от внешнего генератора развертки. При необходимости подстройте частоту звукового генератора.

Подготовьте табл. 3 для записи параметров синусоиды.

Таблица 3

Размах синусоиды	дел	
Амплитуда синусоиды	дел	
Амплитуда синусоиды	В	
Период синусоиды	дел	
Период синусоиды	мс (мкс)	
Частота синусоиды	Гц	

Зарисуйте осциллограмму. Укажите на ней размах синусоиды, равный удвоенной амплитуде. Измерьте его в делениях и запишите в табл. 3. Рассчитайте



величину амплитуды синусоиды в единицах напряжения и запишите в таблицу. Укажите на осциллограмме интервал по оси X, соответствующий периоду синусоиды, и запишите в табл. 3 его величину в делениях. Рассчитайте период синусоиды в единицах времени и ее частоту, запишите их значения в табл. 3 и сравните с частотой выходного напряжения генератора.

Запишите заголовок: **«Задание 6. Наблюдение действия схемы синхронизации»**.

Подготовьте табл. 4.

Таблица 4.

Кол-во периодов синусоиды	Частота генератора $f_i$ , Гц	Отношение $f_i/f_n$
1		
2		
3		
4		

Соедините выход генератора развертки основного осциллографа с входом Y вспомогательного осциллографа.

Получите на экране вспомогательного осциллографа изображение пилообразного напряжения, аналогичное приведенному на рис. 4.1.

Так как при выполнении предыдущего задания вы добились совпадения длительности развертки и периода исследуемого напряжения, то время задержки запуска генератора развертки (это длина горизонтального участка на осциллограмме) должно быть равно нулю. При необходимости подстройте частоту звукового генератора и запишите значение частоты по шкале генератора в 1-ю строку табл. 4.

Медленно увеличивая частоту звукового генератора, наблюдайте за появлением и изменением горизонтального участка на изображении напряжения развертки. Поскольку фаза сигнала в конце развертки изменяется, то длина горизонтального участка вначале скачком увеличится, так как «ожидать» совпадения фаз сигнала в начале каждого прямого хода приходится почти весь следующий период синусоиды.

При дальнейшем увеличении частоты сигнала время задержки будет уменьшаться и, когда длительность развертки будет соответствовать 2-м периодам сигнала, горизонтальный участок на осциллограмме вновь станет равным нулю. Запишите соответствующее значение частоты сигнала во второй строке табл. 4.

Примечание. В данной модели осциллографа изображение гасится несколько ранее конца прямого хода развертки (слева направо) и второй период будет виден не полностью, так же как и последний период пилообразного сигнала на втором осциллографе (см. рис.4.1). Поэтому число периодов в этом измерении и последующих этого задания следует считать равным числу целых синусоид плюс один.

Аналогичным образом получите на экране изображение 3-х и 4-х периодов синусоиды, наблюдая за изменением формы напряжения развертки и записывая значения частоты, соответствующие нулевому значению длины горизонтального участка «пилы».

Разделив значения частоты сигнала на  $f_{\Gamma}$ , полученное в *Задании 4*, убедитесь в том, что они кратны частоте развертки.

Запишите заголовок: «*Задание 7. Измерение частоты биений*».

Биения (колебания с периодически меняющейся амплитудой) являются результатом прямого сложения двух напряжений с близкими частотами. Чтобы понять причину их появления, можно воспользоваться аналогией со сложением двух волн. Предположим, что в какой-то момент времени фазы этих волн совпали. Тогда общая амплитуда колебаний равна сумме амплитуд и максимальна. Затем одна из волн начинает отставать. Со временем разность фаз между ними, равная  $\omega_1 t - \omega_2 t = (\omega_1 - \omega_2)t$ , будет возрастать и в какой-то момент времени фазы колебаний станут противоположными. Тогда общая амплитуда станет равной разности амплитуд, то есть минимальной. Далее отставание продолжится и в какой-то момент времени разность фаз станет равной  $2\pi$ . То есть снова общая амплитуда будет равна сумме амплитуд и т. д. Очевидно, что частота повторения максимумов (или минимумов) биений будет равна разности частот суммируемых колебаний.

Подготовьте табл. 5.

Таблица 5.

Частота напряжения на выходе основного генератора	Гц	
Частота напряжения на выходе второго генератора	Гц	
Разность частот генераторов	Гц	
Период биений	дел	
Цена деления переключателя развертки «время/дел»	мс	
Период биений	мс	
Частота биений	Гц	

Для наблюдения биений нужно отключить кабель от входа Y основного осциллографа, закрепить в этом гнезде тройник и подключить к нему вначале этот же кабель, а затем – второй кабель, соединив его с выходом «600Ω» второго

низкочастотного генератора ГЗ-118.

Установите частоту напряжения на выходе основного генератора, равную 3 КГц или близкую к ней.

Получите устойчивое изображение синусоиды от основного генератора с большим количеством периодов (20-30) и размахом 3-4 деления, после чего установите ручку «уровень выхода» в крайнее левое (нулевое) положение.

Установите частоту напряжения на выходе второго генератора, равную 2,5 КГц. В генераторе ГЗ-118 отсчет частоты производится по цифрам, появляющимся в «окошках» над переключателями «частота» с учетом «запятой» на лицевой панели и положения переключателя «множитель». Проверьте, чтобы ручка «расстройка» генератора находилась в положении «0», а ручка «ослабление» - в положении «10».

Включите второй генератор и после его прогрева наблюдайте на экране синусоиду. Установите величину выходного напряжения второго генератора на уровне амплитуды в 3-4 деления.

Ручкой «уровень выхода» основного генератора увеличивайте напряжение до появления на экране биений. Зарисуйте осциллограмму. Измерьте период биений в делениях, рассчитайте его в единицах времени, а также частоту биений с записью данных в табл. 5.

Выключите все приборы и разберите установку.

### Дополнительный материал к теме 2

Схематически устройство электроннолучевой трубки показано на рис 4.3.

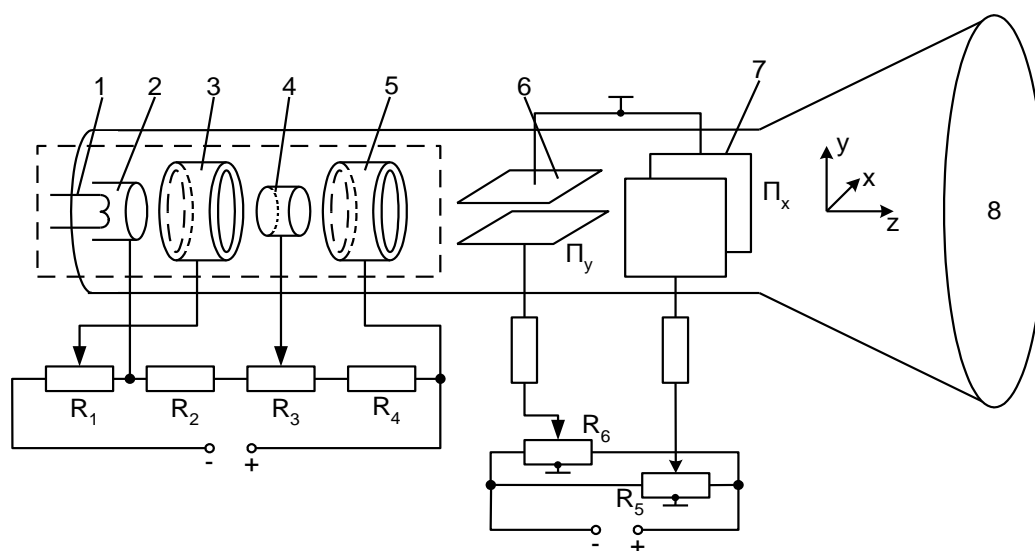


Рис. 4.3.

В горловине трубки находится электронная пушка. Нить накала 1 служит для нагрева катода 2 до температуры, необходимой для того, чтобы он испускал электроны вследствие термоэлектронной эмиссии.

Остальные электроды пушки выполнены в виде полых цилиндров, внутри которых пролетают электроны.

Электрод 5 является анодом, так как он находится под большим положительным потенциалом относительно катода. Двигаясь от катода к аноду, электроны под действием этого потенциала ускоряются до энергии, достаточной, чтобы вызвать свечение люминофора нанесенного на внутреннюю сторону экрана.

Управляющий электрод 3 служит для регулировки яркости изображения. Вместе с катодом он подключен к потенциометру  $R_1$  таким образом, что его потенциал всегда отрицателен по отношению к катоду. При перемещении движка потенциометра влево электроны тормозятся полем управляющего электрода. Их количество в пучке, а следовательно, яркость изображения на экране, уменьшается.

Электрод 4 служит для фокусировки потока электронов, прошедшего через отверстие в управляющем электроде. (Необходимость фокусировки очевидна, так как электроны, имея одинаковый знак заряда, отталкиваются друг от друга, и пучок размывается). Управляющий электрод подключен к движку потенциометра  $R_3$ , от положения которого зависит, таким образом, распределение потенциала в пространстве между электродами 3 - 4 и 4 - 5.

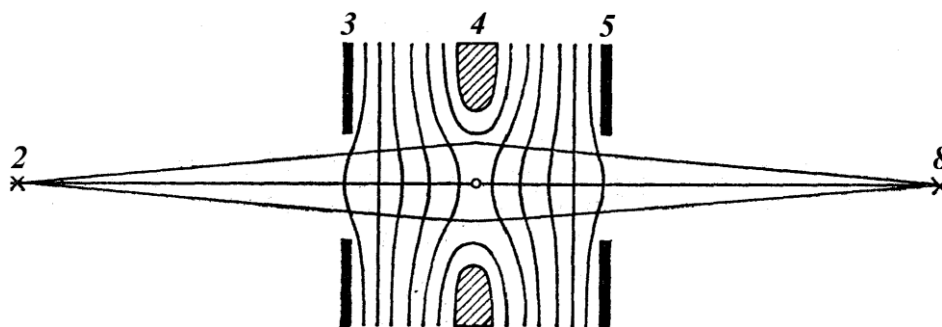


Рис. 4.4.

Эквипотенциальные линии в этих областях имеют форму, аналогичную поверхности выпуклой оптической линзы (рис. 4.4). Такие линзы называются электростатическими. Изменение направления движения электронов через такие линзы связано с изменением как величины, так и направления их скорости, аналогично тому, что происходит со светом на границе оптических линз.

Рис. 4.4 соответствует случаю, когда источник электронов и его изображение находятся на одинаковых расстояниях от линзы. В реальной электронной пушке на рис. 4.3 напряжение на фокусирующем электроде обычно подбирается таким образом, чтобы электрическое поле между электродами 3 и 4 образовывало короткофокусную линзу, сжимающую пучок электронов, а поле между электродами 4 и 5 - длиннофокусную линзу, формируя светящуюся точку на экране.

На рис 4.3 также показаны цепи питания отклоняющих пластин, обеспечивающие перемещение всей «картинки» на экране. Постоянное

напряжение на отклоняющие пластины поступает от соответствующего источника через потенциометры  $R_5$  и  $R_6$ . Движки этих потенциометров соединены с одной из пластин каждой пары, ручки управления движками выведены на лицевую панель осциллографа (см. рис. 4.2).

В конструкции потенциометров предусмотрена средняя точка, которая обозначена значком « $\perp$ » (рис. 4.5). Таким же значком обозначено соединение «верхней» пластины 6 и «дальней» пластины 7. Это означает, что средние точки потенциометров и соответствующие отклоняющие пластины соединены между собой через корпус осциллографа. При перемещении движков потенциометров знаки потенциалов на пластинах после прохождения этой средней точки меняются на противоположные. Это позволяет смещать изображение на экране как вверх, так и вниз, как влево, так и вправо.

Электронный осциллограф, как и обычный вольтметр, можно использовать для изучения формы силы тока. Для этого необходимо включить последовательно в исследуемую цепь дополнительный, так называемый измерительный резистор, а вход  $Y$  осциллографа подключить параллельно этому резистору. После соответствующей калибровки осциллограф можно использовать и для измерений силы тока.

Если на вход  $X$  при отключенной развертке подать напряжение на каком-либо элементе электрической цепи, а на вход  $Y$  – напряжение с измерительного резистора, то на экране осциллографа можно наблюдать вольтамперную характеристику исследуемого элемента.

### **Рекомендуемая литература:**

1. Е.М. Гершензон, Н.Н. Малов, А.Н. Мансуров. Курс общей физики. Электродинамика. §§ 1.2, 1.3, 1.6, 1.7, 2.2, 5.11. – М., Академия, 2001.
2. С.Г. Калашников. Электричество. §§ 8-13, 23, 24, 178, 187, 188. 7-е изд., стереот. - М.: Физматлит, 2008.
3. Д.В. Сивухин. Общий курс физики, т.3, § 47. Электричество. М.: Физматлит, 2006.

### ***Вопросы к защите работ по теме «Электростатика»***

1. Что называют напряженностью и потенциалом электрического поля? Какова размерность этих величин? Как они соотносятся друг с другом?
2. Что такое силовые и эквипотенциальные линии? Как они отражают свойства поля? Как они ориентируются относительно друг друга?
3. Поясните принцип моделирования электрического поля (в котором совсем необязательным является наличие движущихся зарядов) полем тока в электролите.

4. Объясните, почему при моделировании электростатического поля в работе 3 не упоминается закон Кулона?

5. Как поверхностная плотность заряда электродов связана с напряженностью создаваемого ими электрического поля?

6. Укажите на Ваших рисунках области, где поле однородно и где оно сильнее или слабее.

7. На каждом рисунке укажите в любой точке направление силы, действующей на электрон, если его поместить в эту точку.

8. Чему равна напряженность поля в направлении, перпендикулярном плоскости ванны?

9. Чему равна напряженность поля внутри малого кольцевого электрода? Обоснуйте Ваш ответ.

10. Чему равна напряженность электрического поля внутри плоского конденсатора?

11. Что называют диэлектрической проницаемостью вещества?

12. Что называют электрической емкостью? В каких единицах она измеряется?

13. Как устроена электронно-лучевая трубка?

14. Используя рис. 4.3, объясните действие ручек регулировки яркости, фокусировки и положением пятна.

15. Опишите характер движения электрона, если он влетает с некоторой скоростью в пространство между электродами плоского или цилиндрического конденсатора либо внутрь цилиндрического электрода.

16. Что называется чувствительностью осциллографа?

17. Как оптимальным образом выбрать положение переключателя «В/дел»?

18. Объясните, почему напряжение на рис. 4.1 называется пилообразным?

19. Как можно использовать осциллограф для измерения силы тока?