

## Работа 1.1.6.

Изучение электронного осциллографа

*Kорнеев Е.С.*

# Изучение электронного осциллографа

**Цель работы:** ознакомление с устройством и работой осциллографа и изучение его основных характеристик.

**В работе используются:** осциллограф, генераторы электрических сигналов, соединительные кабели.

Осциллограф — регистрирующий прибор, в котором исследуемое напряжение (сигнал) преобразуется в видимый на экране график изменения напряжения во времени. Осциллограф широко используется в физическом эксперименте. С его помощью можно исследовать изменение во времени любых физических величин, которые могут быть преобразованы в электрические сигналы.

Лабораторная работа проводится с использованием учебного осциллографа, разработанного на основе осциллографов С1-94 и С1-1.

**Электронно-лучевая трубка.** Основной частью электронного осциллографа, определяющей его важнейшие технические характеристики, является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ). Трубка представляет собой стеклянную откаченную до высокого вакуума колбу, в которой расположены (рис. 1): подогреватель катода 1, катод 2, модулятор 3 (электрод, управляющий яркостью изображения), первый (фокусирующий) анод 4, второй (ускоряющий) анод 5, горизонтально и вертикально отклоняющие пластины 6 и 7, третий (ускоряющий) анод 8, экран 9.



Рис. 1: Электронно-лучевая трубка

Электронный пучок формируется системой электродов, называемых «электронной пушкой»: катод с нагревателем, модулятор, фокусирующий и ускоряющий

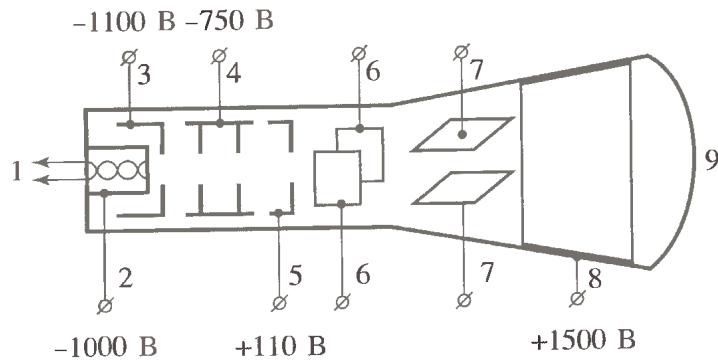


Рис. 2: Электронно-лучевая трубка

аноды. Форма, размер, и расположение электродов подобраны таким образом, чтобы разгонять электроны и фокусировать пучок на экране. Потенциал первого (фокусирующего) анода относительно катода можно изменять ручкой «ФОКУС». Размер пятна на экране в значительной степени определяется качеством фокусирующей системы, его диаметр обычно не превышает 1мм. Яркость пятна на экране осциллографа определяется током электронного луча, который может регулироваться изменением напряжения на модуляторе ручкой «ЯРКОСТЬ». Экраном осциллографа является покрытая флюоресцирующим веществом стенка трубы, на которую попадает электронный пучок.

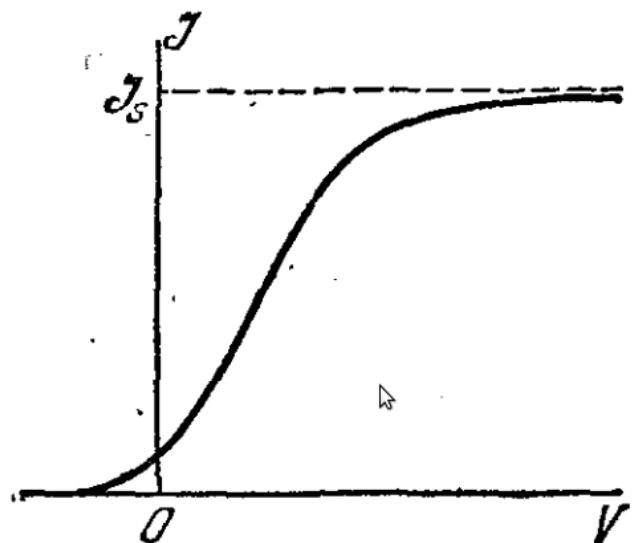
На пути к экрану сформированный пучок электронов проходит две пары отклоняющих пластин. Две вертикально расположенные пластины образуют плоский конденсатор, электрическое поле которого способно отклонять пучок в горизонтальном направлении (горизонтально отклоняющие пластины). Аналогично поле горизонтально расположенных пластин вызывает вертикальное отклонение пучка (вертикально отклоняющие пластины). Подавая на пластины соответствующие напряжения, можно «нарисовать» электронным лучом на экране некоторую фигуру.

Рассмотрим процесс образования пучка электронов. Для начала стоит отметить, что из себя представляет металл. Металл - это кристаллическая решетка, связанная силами электростатики. В узлах решетки находятся ионы металла, между ними - «электронный газ», т.е. большое количество «свободных электронов», свободно перемещающихся внутри решетки. То обстоятельство, что «свободные электроны»держиваются внутри металла, указывает на то, что в поверхностном слое возникает электрическое поле, препятствующее электронам выходить в окружающий вакуум. Чтобы покинуть металл, электрон должен совершить так называемую *работу выхода*. Одна из причин возникновения этой работы состоит в следующем. При выходе из металла электрон индуцирует на поверхности заряды противоположного знака (эффект «электростатического изображения»), в результате чего возникает сила, стремящаяся вернуть электрон в металл. Можно указать другую причину. В результате теплового движения электроны могут выходить за поверхность металла на расстояния порядка атомных, возникает «электронная ат-

мосфера». Под ней у поверхности металла образуется слой положительно заряженных ионов. В результате образуется двойной заряженный слой, действующий подобно конденсатору, на преодоление электрического поля которого требуется производство работы. Вероятно, есть и другие причины, однако пока можно остановиться на этих. Основная идея - наличие работы выхода, которую мы будем учитывать.

При повышении температуры металла увеличивается кинетическая энергия электронов, и она может становиться настолько большой, что некоторые электроны станут покидать металл. Если при этом вокруг металла существует электрическое поле, направленное к металлу, то оно станет увлекать электроны, и в вакууме потечет ток. Этот ток называется термоэлектронным, а явление - термоэлектронной эмиссией. Оно было открыто Эдисоном в 1883 году.

При этом ток не пропорционален приложенному напряжению (напряжение между анодом и нагреваемым катодом пропорционально напряженности электрического поля) и зависимость тока от напряжения имеет такой вид:



Плотность термоэлектронного тока насыщения зависит от материала катода и увеличивается с повышением температуры. При вычислении будем пользоваться моделью идеального электронного газа и применим к нему статистику Ферми-Дирака. Число квантовых состояний в единице объема металла с импульсами электронов внутри элемента объема импульсного пространства  $d\mathbf{p}_x d\mathbf{p}_y d\mathbf{p}_z$  с центром в точке  $(p_x, p_y, p_z)$  будет  $dZ = \frac{2}{h^3} d\mathbf{p}_x d\mathbf{p}_y d\mathbf{p}_z$ , где коэффициент 2 учитывает спин электрона. Средняя концентрация электронов с таким импульсом определяется выражением

$$dn = \frac{2}{h^3} \frac{d\mathbf{p}_x d\mathbf{p}_y d\mathbf{p}_z}{\exp\left(\frac{\epsilon - \mu}{kT}\right) + 1}$$

Уточним теперь понятие работы выхода. Условимся называть этой величиной

работу  $b$ , которую должен совершить электрон чтобы выйти за пределы металла. Для этого минимальная кинетическая энергия должна быть  $\epsilon > \epsilon_{min} = \mu + b$ . В дальнейшем будем рассматривать именно их.

Чтобы решетка не разрушалась, из металла должна выходить ничтожная часть энергии:  $\epsilon - \mu \ll kT$ . Тогда

$$dn = \left( \frac{2}{h^3} \exp\left(\frac{\mu}{kT}\right) \right) \exp\left(-\frac{\epsilon}{kT}\right) dp_x dp_y dp_z$$

Найдем долю электронов  $dn_z$ ,  $z$ -составляющая которых заключена между  $p_z$  и  $p_z + dp_z$ .

$$dn_z = \frac{4}{h^3} \pi m k T \exp\left(-\frac{p_z^2/2m - \mu}{kT}\right) dp_z$$

Уход электронов, конечно, нарушает равновесие, однако при нулевом приближении этим можно пренебречь, что мы и сделаем. Число электронов, рассматриваемой группы, падающих в единицу времени на единицу площади поверхности металла, определяется интегралом

$$\int v_z dn_z = \frac{1}{m} \int p_z dn_z$$

где интегрирование ведется по всем электронам, для которых  $p_x^2/(2m) \geq \mu + b$ . В результате получим

$$j_s = AT^2 e^{-\frac{b}{kT}}$$

где  $A$

$$A = \frac{4\pi me k^2}{h^3} = 120 A / (\text{см}^2 * K)$$

и постоянна для всех металлов.

Теперь рассмотрим движение электронов в электрическом поле отклоняющих пластин (рис. 2). Пусть электрон со скоростью  $v_0$  влетает в однородное электрическое поле пары пластин и движется вдоль оси  $z$ , т.е. перпендикулярно к линиям напряженности электрического поля. Движение электрона вдоль оси  $z$  является равномерным, а вдоль оси  $y$  — равноускоренным:

$$z = v_0 t, \quad y = \frac{at^2}{2} \tag{1}$$

Ускорение можно найти с помощью второго закона Ньютона:

$$a = \frac{eE_y}{m} \tag{2}$$

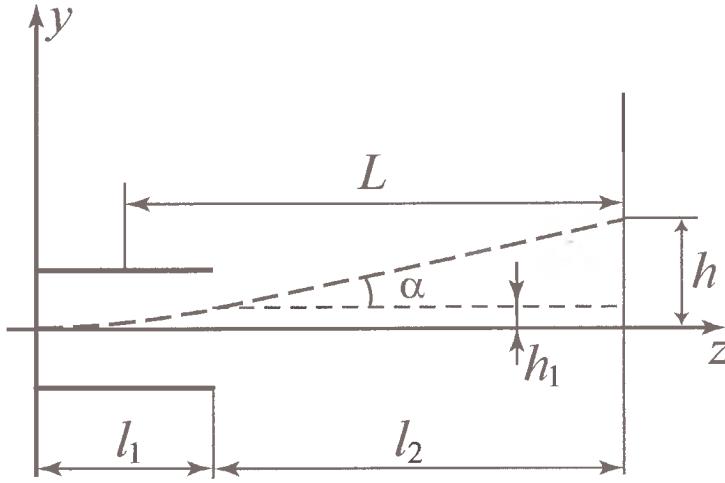


Рис. 3: Отклонение луча в электрическом поле пластин

Из (1) и (2) найдем:

$$y = \frac{eE_y}{2mv_0^2} z^2 \quad (3)$$

Как следует из (3), траектория электрона между отклоняющими пластинами представляет собой параболу. На выходе из пластин электрон отклоняется от первоначального направления на расстояние  $h_1$  и летит под углом  $\alpha$  к оси  $z$ :

$$h_1 = \frac{eE_y}{2mv_0^2} l_1^2, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{eE_y}{mv_0^2} l_1 \quad (4)$$

где  $l_1$  - длина пластин. Выйдя из пластин, электрон движется по прямой. Смещение  $h$  электронного пятна на экране осциллографа получим из рис. 2:

$$h = h_1 + l_2 \operatorname{tg} \alpha = \frac{eE_y l_1}{mv_0^2} \left( \frac{l_1}{2} + l_2 \right) \quad (5)$$

Обозначим расстояние от середины пластин до экрана через  $L$ . Тогда

$$h = \frac{eE_y l_1 L}{mv_0^2} \quad (6)$$

Скорость  $v_0$ , которую имеют электроны, проходящие между пластинами, определяется ускоряющим напряжением  $U_a$  на втором аноде:

$$\frac{mv_0^2}{2} = eU_a \quad (7)$$

Напряженность  $E_y$  электрического поля между отклоняющими пластинами

$$E_y = \frac{U_y}{d} \quad (8)$$

где  $U_y$  — разность потенциалов между пластинами, а  $d$  — расстояние между ними. Окончательно из (6) — (8) получим

$$h = \frac{l_1 L}{2dU_a} U_y \quad (9)$$

Таким образом, смещение луча пропорционально отклоняющему напряжению  $U_y$ . Коэффициент пропорциональности в (9) называется чувствительность  $k$  трубки к напряжению:

$$k = \frac{h}{U_y} = \frac{l_1 L}{2dU_a} \left[ \frac{\text{см}}{\text{В}} \right] \quad (10)$$

Аналогично вычисляется чувствительность трубки к напряжению на второй паре пластин.

Формула (9) применима и в том случае, когда на отклоняющие пластины подается переменное напряжение, но при условии, что оно мало изменяется за время  $\tau$  пролета электрона между пластинами. Характерными интервалами времени  $T$ , которое определяет скорость изменения переменного сигнала, могут быть: период сигнала, длительность импульса, время нарастания сигнала до некоторого уровня и т.д. Оценим минимальное значение  $T_{min}$  времени  $T$ , при котором выполняется условие:  $T_{min} \ll \tau$ . Скорость электронов после вылета из «электронной пушки» составляет примерно  $2 * 10^{-7}$  м/с (при  $U_a \approx 10^3$  В). Полагая  $l = 3$  см, для времени пролета  $\tau$  получим:  $\tau = 1.5 * 10^{-9}$  с. Тогда, выбирая условие  $T_{min}/\tau \geq 10$  в качестве критерия применимости формулы (9) для переменного сигнала, имеем  $T_{min} = 15 * 10^{-9}$  с. Таким образом, выражение (9) будет определять точки попадания электрона на экран ЭЛТ, если частота синусоидального сигнала, подаваемого на отклоняющие пластины, не превышает  $\sim 10^8$  Гц = 0.1 ГГц.

На практике, однако, максимальная частота оказывается существенно меньше. Чувствительность трубки к напряжению составляет доли мм/В, поэтому исследуемый сигнал, подаваемый на отклоняющие пластины, приходится предварительно усиливать. Всякий усилитель характеризуется диапазоном частот, в пределах которого его коэффициент практически не меняется, а вне этого диапазона резко падает. Границная (максимальная) частота усилителя определяется постоянной времени электрической схемы осциллографа. Как правило, рабочий диапазон частот осциллографа ограничивается именно рабочим диапазоном частот усилителя, на который подается исследуемый сигнал.

Таким образом, в рабочем диапазоне частот осциллографа (для учебного осциллографа 0-1 МГц) смещение луча по вертикали (или горизонтали) на экране ЭЛТ можно считать пропорциональным мгновенному значению напряжения на соответствующих отклоняющих пластинах.

**Развертка.** Из формулы (9) следует, что координаты  $x$  и  $y$  точки попадания электронного луча на ЭЛТ (относительно ее центра) пропорциональны мгновен-

ным значениям напряжений  $U_x(t)$  и  $U_y(t)$ , подаваемых на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины.

Так как величина исследуемых сигналов лежит в достаточно широком диапазоне (от десятка микровольт до сотен вольт), а чувствительность отклоняющих пластин ЭЛТ по напряжению сравнительно невелика (доли мм/В), то в зависимости от величины подаваемого на вход сигнала его необходимо усиливать или, в случае большого сигнала, предварительно ослаблять.

Для усиления слабых сигналов в осциллографе имеются усилители вертикального отклонения луча (усилитель «Y») и горизонтального — усилитель «X». На входе усилителя «Y» установлен аттенюатор (делитель), позволяющий ослаблять входной сигнал в заданное число раз.

Для получения на экране ЭЛТ «изображения» периодического электрического сигнала  $U_c(t)$  необходимо выполнение двух условий:

- Подаваемое на вертикально отклоняющие пластины напряжение  $U_y$  должно линейно зависеть от самого сигнала  $U_c$ :

$$U_y(t) = U_{0y} + k_{yu}U_c(t) \quad (11)$$

Здесь  $U_{0y}$  — постоянное напряжение, определяющее расположение графика сигнала по оси Y на экране ЭЛТ,  $k_{yu}$  — коэффициент преобразования входного сигнала каналом вертикального отклонения.

- Подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины напряжение  $U_x$  должно линейно зависеть от времени  $t$ :

$$U_x = U_{0x} + k_{xu}(t) \quad (12)$$

Здесь  $U_{0x}$  — постоянное напряжение, определяющее расположение графика сигнала по оси X на экране ЭЛТ,  $k_{xu}$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от рабочих характеристик генератора развертки и усилителя «X».

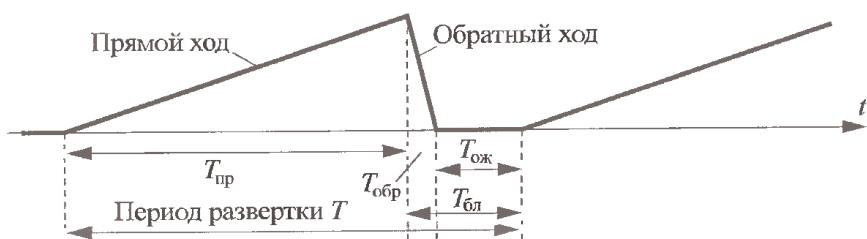


Рис. 4: Напряжение развертки

Напряжение пилообразной формы, которое вырабатывает генератор развертки осциллографа, называемое также напряжением развертки, изображено на рис. 3. В течение прямого хода луча ( $T_{\text{пр}}$ ) напряжение изменяется до максимального значения так, что луч с постоянной скоростью проходит весь экран слева направо. После завершения прямого хода луча начинается процесс обратного хода луча

$(T_{\text{обр}})$ , когда напряжение развертки возвращается к первоначальному уровню, и луч переходит в исходное положение в левый край экрана. Скорость изменения напряжения прямого хода развертки, т. е. масштаб по оси  $X$ , задается расположенным на передней панели осциллографа переключателем «ВРЕМЯ/ДЕЛ», проградуированным во времени, за которое луч проходит одно большое деление сетки экрана. Наличие интервала ожидания  $T_{\text{ож}}$  позволяет изменять масштаб по оси  $X$  независимо от периода развертки.

Во время «прямого» хода пилы на модулятор «электронной пушки» подается положительное относительно катода напряжение, при этом на экране виден свящающийся след электронного луча. Во время «обратного» хода пилы (т.е. на интервале блокировки  $T_{\text{бл}}$ ) напряжение на модуляторе «запирает» трубку. В результате электронный луч на интервале блокировки не вызывает свечения экрана.

**Синхронизация.** При наблюдении периодических и особенно быстропротекающих процессов важно получить на экране осциллографа неподвижное изображение сигнала. Для этого нужно, чтобы период развертки был кратен периоду изучаемого сигнала. Однако, как правило, точное соотношение периодов соблюсти трудно из-за нестабильности генератора развертки или самого изучаемого процесса. Поэтому используют принудительное согласование периодов, при котором изучаемое напряжение «навязывает» свой период генератору развертки. При этом начало прямого хода развертки должно совпадать строго с одной и той же характерной точкой исследуемого периодического сигнала. Процесс привязки начала развертки к характерным точкам сигнала называется синхронизацией развертки с сигналом. Этот способ синхронизации поясняется осциллограммами, изображенными на рис. 4.

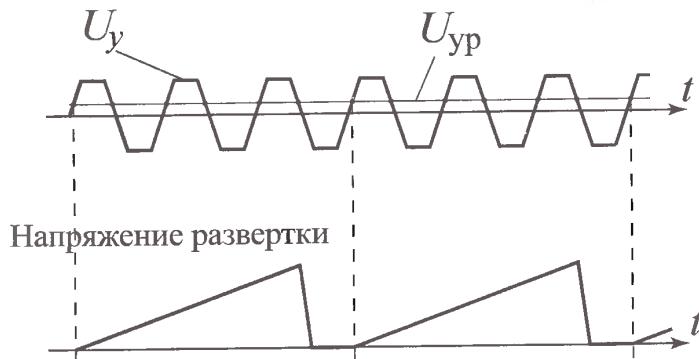


Рис. 5: Процесс синхронизации генератора развертки

Сигнал произвольной формы  $U_y$  (на рисунке — сигнал трапециевидной формы) сравнивается с пороговым напряжением  $U_{\text{ур}}$  (уровнем синхронизации), устанавливаемым ручкой «УРОВЕНЬ». В момент пересечения сигналом  $U_y$  уровня  $U_{\text{ур}}$  снизу вверх запускается прямой ход развертки («пила»), при условии, что это произошло на интервале ожидания  $T_{\text{ож}}$  (рис. 3 и 4). Запуск «пилы» может произво-

диться при пересечении сигнала  $U_y$  уровня  $U_{\text{ур}}$  как снизу вверх (как на рис. 4), так и сверху вниз в зависимости от выбранного положения переключателя режимов синхронизации развертки на передней панели осциллографа («ЗАПУСК +» или «ЗАПУСК -»). Напряжение  $U_{\text{ур}}$  изменяется при вращении ручки «УРОВЕНЬ» на передней панели осциллографа, что позволяет совместно с переключателем «ЗАПУСК +, -» выбрать фазу сигнала в начале развертки, исходя из наилучшей устойчивости синхронизации и удобства наблюдения. Если  $U_{\text{ур}}$  не пересекает  $U_y$ , то синхронизация невозможна.

Генератор развертки может работать в автоматическом или ждущем режимах, выбираемых тумблером «АВТ/ЖДУЩ». В автоматическом режиме время ожидания  $T_{\text{ож}}$  не может быть больше некоторого максимального времени ожидания  $T_{\text{ож, max}}$ . Если на максимальном интервале ожидания не произошло пересечения  $U_y$  и  $U_{\text{ур}}$ , то происходит автоматический запуск прямого хода развертки в момент, не связанный с определенной фазой исследуемого сигнала, а пилообразный сигнал будет иметь период  $T_{\text{п, авт}}$ , определяемый только внутренними параметрами осциллографа. В этом случае изображение исследуемого сигнала на экране перемещается влево или вправо («бежит»), а при отсутствии исследуемого сигнала видна горизонтальная линия развертки.

При пересечении  $U_y$  и  $U_{\text{ур}}$  на интервале ожидания происходит запуск прямого хода развертки в момент, связанный с определенной фазой исследуемого сигнала. На экране при этом наблюдается неподвижное изображение сигнала.

Синхронизация в автоматическом режиме возможна лишь в случае, когда собственный период генератора развертки больше периода исследуемого сигнала  $T_{\text{п, авт}} > T_c$ . В противном случае за первым циклом запуска сигнала развертки будет следовать один или несколько автоматических запусков прямого хода «пилы» в моменты времени, не привязанные к определенной фазе исследуемого сигнала, т.е. произойдет наложение друг на друга различных изображений сигнала.

В ждущем режиме запуск прямого хода развертки происходит только при наличии пересечения  $U_y$  и  $U_{\text{ур}}$  на интервале ожидания  $T_{\text{ож}}$ , причем интервал ожидания  $T_{\text{ож}}$  в этом режиме может быть сколь угодно большим, а синхронизация осуществляется при любом периоде исследуемого сигнала  $U_c(t)$ . Наблюдение на экране малой части периода процесса (например, фронта импульса или короткого импульса, длительность которого много меньше периода следования импульсов) возможно только в ждущем режиме.

Кроме синхронизации развертки исследуемым сигналом, предусмотрен режим синхронизации внешним сигналом (вместо  $U_y$ ), синхронным по отношению к исследуемому сигналу. Этот сигнал подается на гнездо «ВНЕШ. ЗАП» на передней панели осциллографа. Переключатель «ЗАПУСК» при этом должен находиться в положении «ВНЕШ». Работа элементов схемы синхронизации и развертки в этом случае аналогична описанной выше.

Выбор диапазона (масштаба) развертки осуществляется переключателем «ВРЕМЯ/ДЕЛ».

Удобный для наблюдения на экране размер изображения по вертикали устанавливается переключателем «V/ДЕЛ», проградуированным в величине напряжения, приводящего к перемещению луча по вертикали на одно большое деление (эта величина называется коэффициентом отклонения). Для смещения изображения по вертикали предусмотрен потенциометр «↑», который изменяет постоянную составляющую  $U_{0y}$  (см. формулу (11)).

В процессе работы с осциллографом всегда следует учитывать характеристики каналов вертикального и горизонтального отклонения: амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазово-частотную характеристику (ФЧХ). Если на вход «Y» осциллографа подается синусоидальное напряжение  $U_y = U_0 \sin(2\pi ft)$  амплитудой  $U_0$  и частотой  $f$ , то для перемещения луча на экране ЭЛТ можно записать:  $y = y_0(f) \sin(2\pi ft + \Delta\Phi_y(f))$ . Здесь  $y_0(f)$  — амплитуда перемещения луча на частоте  $f$ ,  $\Delta\Phi_y(f)$  — разность между фазой колебаний перемещения луча  $y$  и фазой колебаний входного сигнала  $U_y$  на частоте  $f$  (сдвиг фаз).

Тогда АЧХ канала вертикального отклонения есть зависимость

$$K_y(f) = \frac{y_0(f)}{U_0}$$

а ФЧХ — зависимость  $\Delta\Phi_y(f)$ . АЧХ и ФЧХ канала горизонтального отклонения определяются аналогично.

Как правило, АЧХ  $K_y(f)$  остается практически постоянной  $K_y = K_{y,max}$  в диапазоне частот от  $f_{min}$  до  $f_{max}$  и уменьшается на частотах  $f < f_{min}$  и  $f > f_{max}$ . Диапазон частот от  $f_{min}$  до  $f_{max}$  называется полосой пропускания. Значения частот  $f_{min}$  и  $f_{max}$  определяют из условий

$$\frac{K_y(f_{min})}{K_{y,min}} = \frac{K_y(f_{max})}{K_{y,max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.7$$

Непостоянство характеристик  $K_y(f)$  и  $\Delta\Phi(f)$  во всем диапазоне частот приводит, например, к искажению формы импульсного сигнала высокой частоты при его преобразовании в канале вертикального отклонения осциллографа.

Канал «Y» может быть использован с открытым или закрытым входом. В первом случае передается как переменная  $U_\sim$ , так и постоянная  $U_=$  составляющие сигнала, во втором — только переменная. При работе в режиме с закрытым входом постоянная составляющая сигнала задерживается включенным на входе делительным конденсатором. Путем переключения тумблера « $\sim / \simeq$ » на передней панели осциллографа можно выбрать необходимый ВХОД усилителя «Y». Канал горизонтального отклонения имеет аналогичный усилитель «X». При наблюдении зависимости  $U_y = F(U_x)$  сигнал  $U_x$  подается на закрытый вход « $\rightarrow \subset X$ ». В учебном осциллографе размер изображения по горизонтали не регулируется. Для смещения изображения по горизонтали предусмотрен потенциометр « $\leftrightarrow$ », изменяющий постоянную составляющую  $U_{0x}$  (см. формулу (12)).

**Фигуры Лиссажу.** При сложении двух взаимно перпендикулярных колебаний с равными или кратными частотами, поданных на входы осциллографа, луч описывает на экране неподвижные замкнутые кривые, которые называются кривыми Лиссажу. При небольшом нарушении кратности частот форма фигур медленно меняется, а при большом — картина размывается.

Пусть на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ подается сигнал  $U_x = U_a \cos(2\pi ft + \varphi_1)$  (при этом собственный генератор развертки осциллографа должен быть, конечно, выключен), а на вертикально отклоняющие пластины поступает смещенный по фазе сигнал той же частоты  $U_y = U_b \cos(2\pi ft + \varphi_2)$ ,  $\varphi_1 \neq \varphi_2$ .

При чувствительностях пластин  $k_x$  и  $k_y$  координаты  $x, y$  светящегося пятна на экране будут определяться выражениями

$$x = A \cos(2\pi ft + \varphi_1)$$

$$y = B \cos(2\pi ft + \varphi_2)$$

$$A = k_x U_a$$

$$B = k_y U_b$$

Исключив из этих уравнений время  $t$ , нетрудно получить уравнение траектории движения луча:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - 2 \frac{xy}{AB} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Таким образом, фигура, которую описывает луч при сложении колебаний, имеющих одинаковую частоту, представляет собой эллипс. Ориентация этого эллипса зависит от разности фаз колебаний ( $\varphi_2 - \varphi_1$ )

В общем случае вид фигуры Лиссажу зависит от соотношений между периодами (частотами), фазами, и амплитудами складываемых колебаний. Некоторые частные случаи фигур Лиссажу для разных периодов и фаз показаны на рис. 5. Зная параметры одного колебания, например,  $f_x$ , можно по фигуре Лиссажу определить параметры другого колебания —  $f_y$ . На полученное изображение накладывают мысленно две линии — горизонтальную и вертикальную, не проходящие через узлы фигуры. Фиксируют число пересечений с горизонтальной линией  $n_x$  и вертикальной  $n_y$ , тогда отношение частот  $f_y/f_x = n_x/n_y$ .

Если одно или оба колебания происходят не по гармоническому, а по более сложному закону, то получаются траектории более сложной формы.

**Калибратор.** Для проверки коэффициентов отклонения и развертки в осциллографе формируется внутренний калибровочный сигнал — прямоугольные импульсы напряжения с частотой повторения 50 Гц и фиксированной амплитудой.

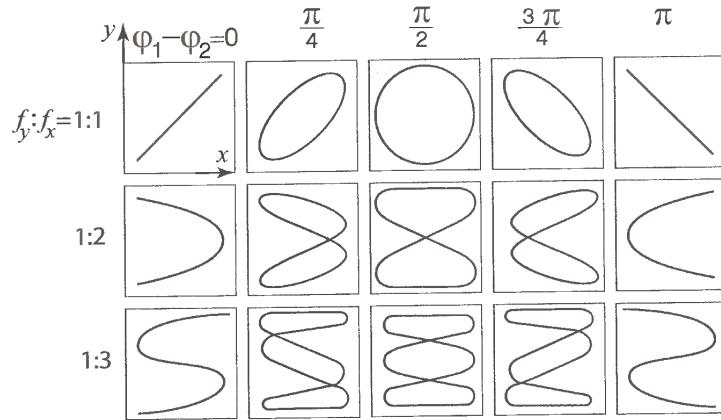


Рис. 6: Фигуры Лиссажу для колебаний одинаковой амплитуды

При поступлении этих импульсов на вход «Y» (переключатель «V/ДЕЛ» — в положении K) отклонение луча по оси Y должно составлять 4.5-5.0 делений, а период колебаний - 20 мс по оси X.

## Приступаем к работе

### 1. Наблюдение периодического сигнала от генератора и измерение его частоты.

Получим на экране осциллографа устойчивую картину периодического (синусоидального) сигнала, подаваемого с генератора, и с помощью горизонтальной шкалы экрана осциллографа проведем измерение периода и частоты сигнала.

Измерим период наблюдаемого сигнала  $T$  и рассчитайте его частоту  $f$ . Оцените погрешность измерения периода  $\Delta T$  и частоты  $\Delta f$  с помощью осциллографа.

Повторим измерения для 3—5 частот из всего диапазона работы звукового генератора. Результаты занесем в таблицу.

| $f_{\text{ген}}$ , кГц | T, дел | $dT$ , дел | мс,дел        | T, мс          | $dT$ , мс      | $f$ , кГц       | $df$ , кГц    |
|------------------------|--------|------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|
| $20*10^{-3}$           | 5.0    | 0.1        | 10.0          | 50.0           | 1.0            | $20.0*10^{-3}$  | $0.4*10^{-3}$ |
| $100*10^{-3}$          | 5.0    | 0.1        | 2.0           | 10.0           | 0.2            | $100.0*10^{-3}$ | $2.0*10^{-3}$ |
| 1.0055                 | 5.0    | 0.1        | 0.2           | 1.0            | 0.02           | 1.00            | 0.02          |
| 10.015                 | 5.0    | 0.1        | $20*10^{-3}$  | 0.1            | $2*10^{-3}$    | 10.0            | 0.2           |
| 100.68                 | 5.1    | 0.1        | $2*10^{-3}$   | $10.2*10^{-3}$ | $0.2*10^{-3}$  | 98.0            | 2.0           |
| $1.0004*10^3$          | 5.0    | 0.1        | $0.2*10^{-3}$ | $1*10^{-3}$    | $0.02*10^{-3}$ | 1000.0          | 20.0          |

Погрешность  $df$  найдем по ф-ле:

$$\frac{df}{f} = \frac{dT}{T}$$

Видно, что мы получили значения, очень близкие к тем, что наблюдаются на экране генератора.

## 2. Измерение амплитуды сигнала.

С помощью вертикальной шкалы экрана осциллографа измерим отношение максимальной и минимальной амплитуд напряжений  $U_{max}/U_{min}$ , которые способен выдавать генератор. Измерения проведем на частоте  $f = 1$  кГц.

Выразим отношение максимального и минимального уровней сигнала  $\beta_{21}$  в децибелах [dB]. Определим по формуле:

$$\beta_{21} = 10 \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = 20 \ln \left( \frac{U_2}{U_1} \right)$$

где  $P_2/P_1$  — отношение средних мощностей,  $U_2/U_1$  — отношение амплитуд некоторых двух сигналов (здесь учтено, что мощность пропорциональна квадрату амплитуды  $P \propto U^2$ ).

| $\beta$ | $U_1$ , дел | В/дел | $U_1$ , дел | $U_2$ , дел | В/дел | $U_2$ , дел |
|---------|-------------|-------|-------------|-------------|-------|-------------|
| 25.8    | 5.4         | 0.2   | 1.08        | 4.20        | 5.0   | 21.0        |
| 25.8    | 5.4         | 0.2   | 1.08        | 4.20        | 5.0   | 21.0        |
| 25.8    | 5.4         | 0.2   | 1.08        | 4.20        | 5.0   | 21.0        |

Измерения повторим трижды, выкручивая ручку до упора.

## 3. Измерение амплитудно-частотной характеристики осциллографа.

Проведем измерение АЧХ используемого в работе осциллографа во всём диапазоне рабочих частот генератора. Для этого установим частоту сигнала генератора  $f = 1$  кГц и получим устойчивое изображение синусоиды на экране. Установим амплитуду генератора, близкую к максимальной и подберем масштаб вертикальной шкалы осциллографа так, чтобы размах сигнала на экране составил  $2U_0 = 6$  дел. Далее при измерениях по данному пункту амплитуда сигнала на генераторе  $U_0$  будет оставаться неизменной. Изменяя частоту  $f$  звукового генератора во всем доступном диапазоне исследуем зависимость отношения амплитуды сигнала на осциллографе  $U(f)$  к исходной  $U_0$  в зависимости от частоты:

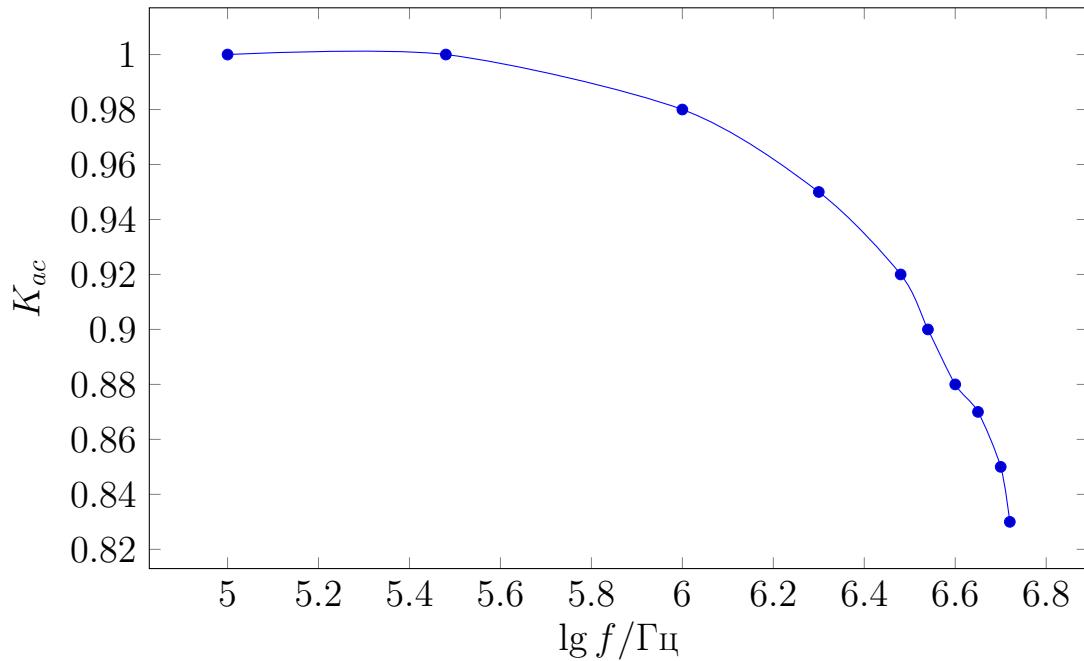
$$K(f) = \frac{U(f)}{U_0}$$

В области частот, где  $K$  отличается от единицы, проведем подробные измерения  $K(f)$ . Измерения АЧХ  $K(f)$  проведем для одного из каналов осциллографа при открытом ( $DC, \simeq$ ) и при закрытом ( $AC, \sim$ ) входе. Результаты занесем в таблицу.

При измерениях наблюдалось, что  $U_{ac} = U_{dc}$ , в связи с чем не станем дублировать колонки и укажем только  $U_{ac}$ .

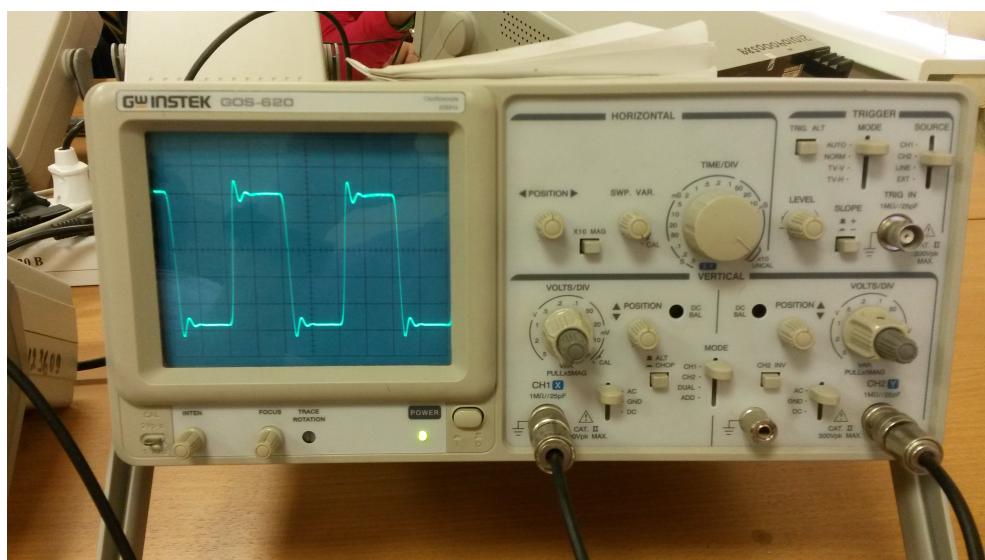
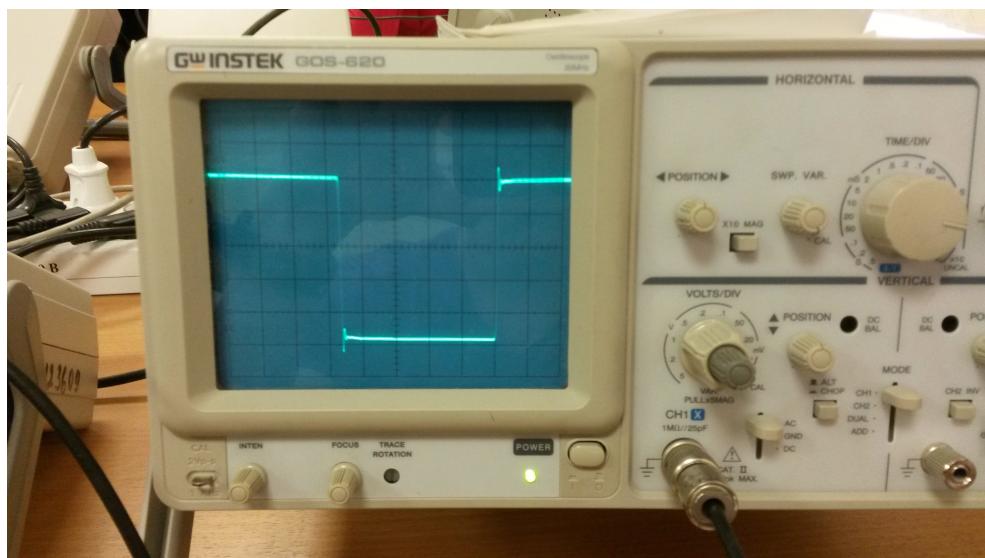
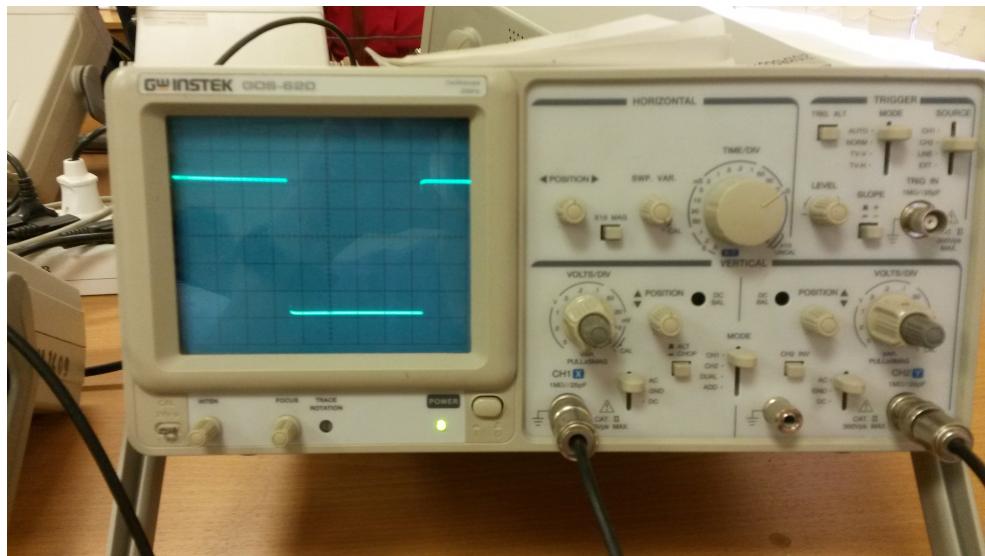
| $f$ , Гц     | $\lg \frac{f}{\Gamma_\text{ц}}$ | $2U_{ac}$ , дел | $K_{ac} = K_{dc}$ |
|--------------|---------------------------------|-----------------|-------------------|
| $0.1 * 10^6$ | 5.00                            | 6.0             | 1.00              |
| $0.3 * 10^6$ | 5.48                            | 6.0             | 1.00              |
| $1.0 * 10^6$ | 6.00                            | 5.9             | 0.98              |
| $2.0 * 10^6$ | 6.30                            | 5.7             | 0.95              |
| $3.0 * 10^6$ | 6.48                            | 5.5             | 0.92              |
| $3.5 * 10^6$ | 6.54                            | 5.4             | 0.90              |
| $4.0 * 10^6$ | 6.60                            | 5.3             | 0.88              |
| $4.5 * 10^6$ | 6.65                            | 5.2             | 0.87              |
| $5.0 * 10^6$ | 6.70                            | 5.1             | 0.85              |
| $5.2 * 10^6$ | 6.72                            | 5.0             | 0.83              |

$2U_0 = 6.0$  дел.,  $U_{max} = 5.2$  МГц.



#### 4. Изучение влияния АЧХ на искажение сигнала.

Установим на генераторе прямоугольные импульсы, получим на экране устойчивую картину прямоугольных импульсов на частоте  $f = 1$  кГц. Изменяя частоту генератора во всём диапазоне, пронаблюдаем, как меняется вид отображаемого на осциллографе сигнала для открытого и закрытого входов. Зарисуем характерный вид полученных осцилограмм для частот  $f$ , при которых форма прямоугольных импульсов существенно искажается.



Скорее всего, искажение сигнала вызвано тем, что прямоугольный сигнал является суммой синусоид разных частот, при этом коэффициент  $K$ , исследуемый в предыдущем пункте, сильно уменьшается при больших частотах. В связи с сильной отличностью  $K$  от единицы часть сигналов отображается неверно.

## 5. Измерение разности фазово-частотных характеристик каналов осциллографа.

Осциллограф может быть использован для измерения разности фаз между подаваемыми на него сигналами, при этом однако необходимо учитывать, что каналы X и Y могут иметь разные ФЧХ. Проведем измерения разности фаз, возникающей при подаче одного и того же сигнала на разные каналы осциллографа, в зависимости от частоты сигнала.

Подадим напряжение  $f = 1$  КГц на входы осциллографа и включим развертку  $X - Y$ . В этом режиме отклонение луча на экране пропорционально подаваемым на каналы напряжениям  $Y(t) = k_y U_y(t)$ ,  $X(t) = k_x U_x(t)$ . Выключим каналы и установим точку в центр экрана, затем получим изображение отрезка, наклоненного под углом  $45^\circ$ . Изменяя частоту генератора  $f$  во всем доступном диапазоне, найдем участки, на которых изображение на экране переходит из отрезка в невырожденный эллипс (рис. 6). На этих участках проведем подробное измерение разности фаз  $\Delta\varphi(t)$  между каналами  $X$  и  $Y$  в зависимости от частоты.

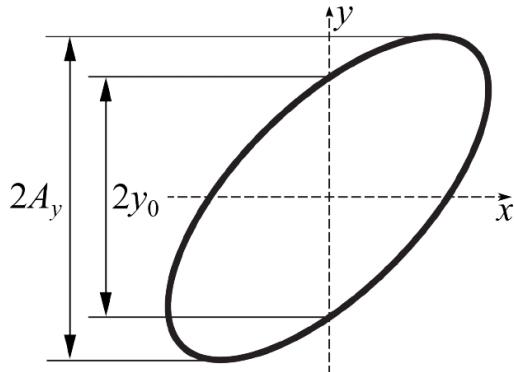


Рис. 7: Разность фаз сигналов

При подаче на взаимно перпендикулярные отклоняющие пластины двух синусоидальных сигналов траектория луча на экране осциллографа представляет собой эллипс и может быть в общем виде описана уравнениями

$$x(t) = A_x \sin(\omega t + \varphi_x), \quad y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi_y) \quad (1)$$

Разность фаз  $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  можно выразить, например, положив в (1)  $\omega t = -\Delta x$ , после чего нетрудно получить

$$\sin \Delta |\varphi| = \left| \frac{y_0}{A_y} \right| \quad (2)$$

где  $y_0$  — отклонение луча по вертикали в тот момент, когда его абсцисса равна 0;  $A_y$  — амплитуда колебаний по оси  $y$  (рис. 6). Тогда возможные значения разности фаз:

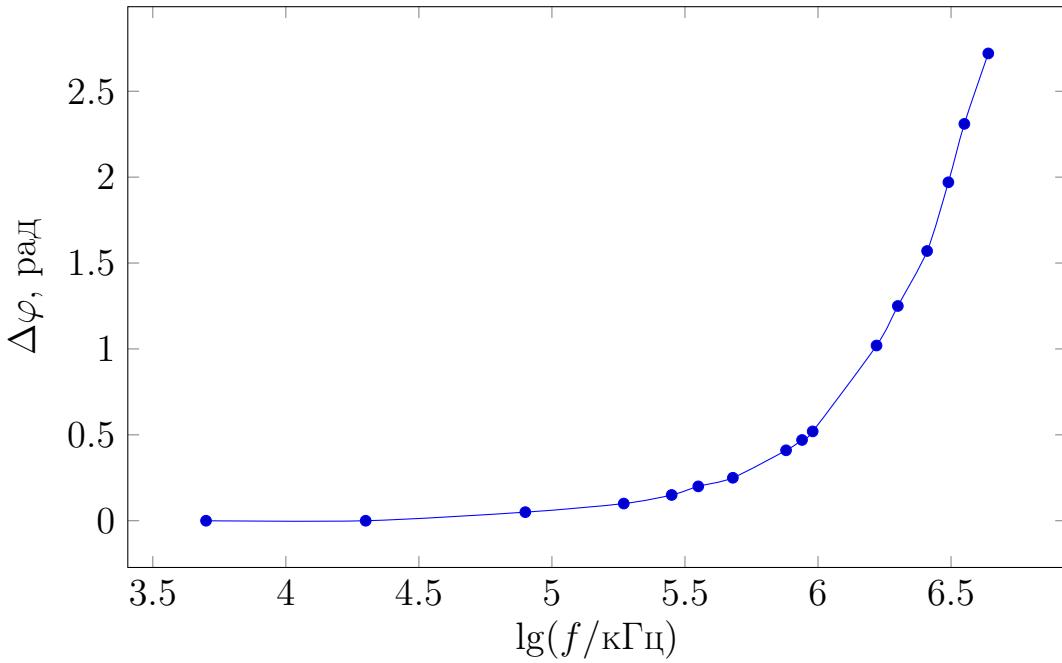
$$|\Delta\varphi| = \arcsin \left| \frac{y_0}{A_y} \right| \quad (3)$$

или

$$|\Delta\varphi| = \pi - \arcsin \left| \frac{y_0}{A_y} \right| \quad (4)$$

При этом, если эллипс наклонён вправо (как на рис. 6), то угол  $\Delta\varphi$  лежит в интервале  $[-\pi/2; \pi/2]$  — имеет место формула (2); если эллипс наклонён влево, то  $\Delta\varphi \in [\pi/2; \pi] \cup [-\pi; -\pi/2]$  — необходимо использовать формулу (3).

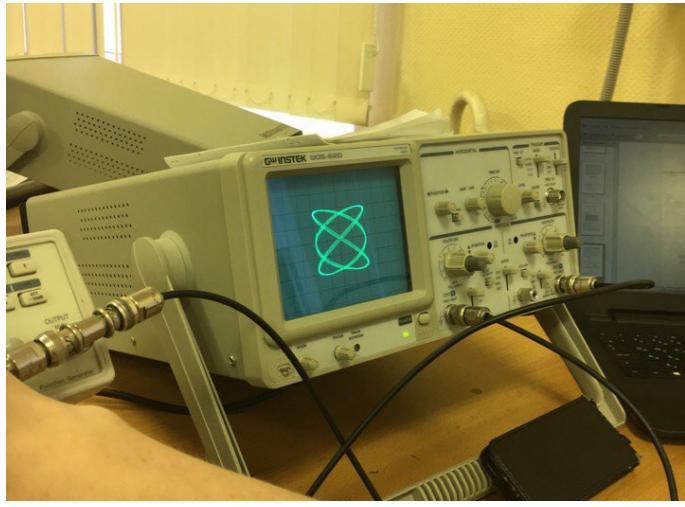
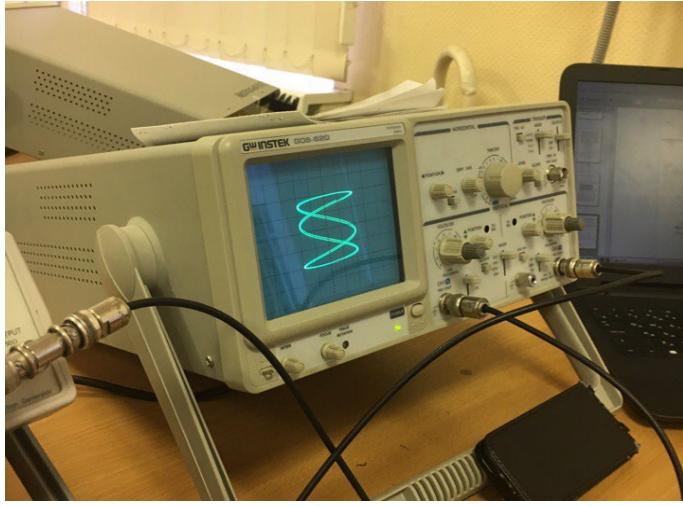
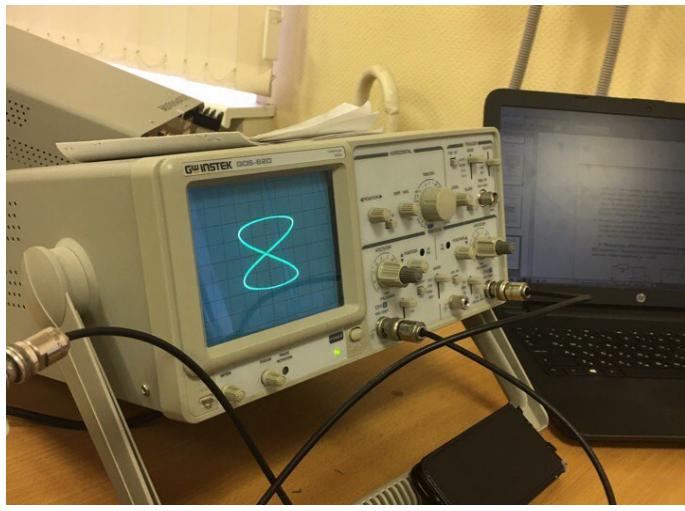
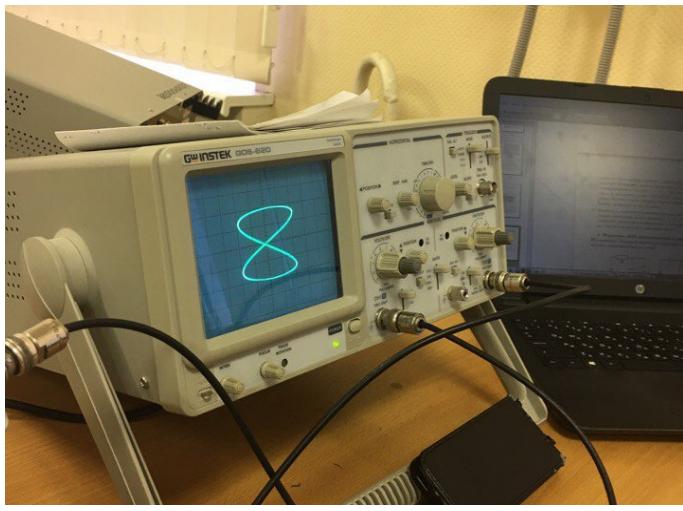
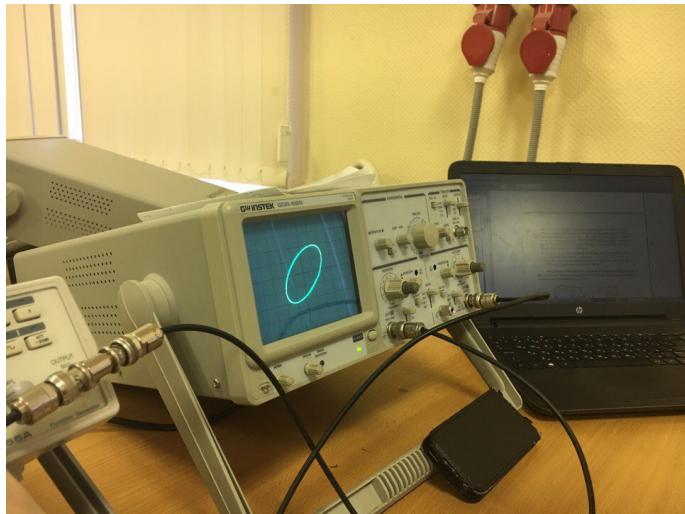
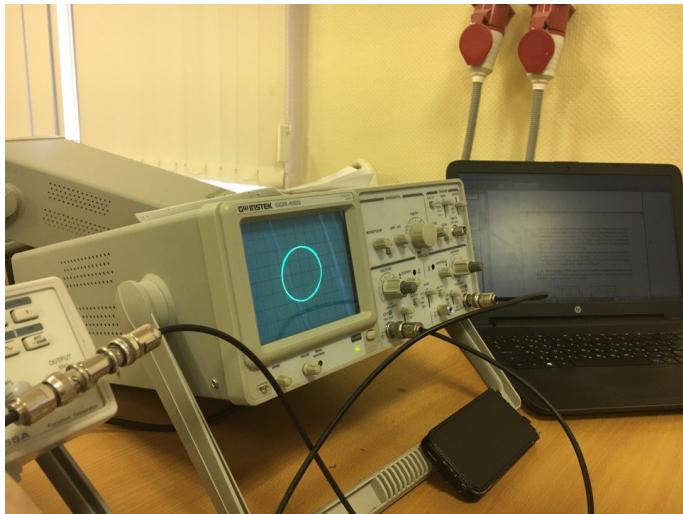
| $f$ , кГц         | $\lg \frac{f}{\text{кГц}}$ | $ 2y_0 $ , дел | $ 2A_y $ , дел | $\Delta\varphi = \arcsin(y_0/A_y)$ , рад |
|-------------------|----------------------------|----------------|----------------|--|
| 5.00              | 3.70                       | 0              | 4.0            | 0  |
| 20.00             | 4.30                       | 0              | 4.0            | 0  |
| 80.00             | 4.90                       | 0.2            | 4.0            | 0.05                                     |
| 185.61            | 5.27                       | 0.4            | 4.0            | 0.10                                     |
| 283.44            | 5.45                       | 0.6            | 4.0            | 0.15                                     |
| 358.30            | 5.55                       | 0.8            | 4.0            | 0.20                                     |
| 475.66            | 5.68                       | 1.0            | 4.0            | 0.25                                     |
| 762.34            | 5.88                       | 1.6            | 4.0            | 0.41                                     |
| 880.50            | 5.94                       | 1.8            | 4.0            | 0.47                                     |
| 960.00            | 5.98                       | 2.0            | 4.0            | 0.52                                     |
| 1655.5            | 6.22                       | 3.4            | 4.0            | 1.02                                     |
| 2000.4            | 6.30                       | 3.8            | 4.0            | 1.25                                     |
| 2600.0            | 6.41                       | 3.9            | 3.9            | 1.57                                     |
| «Обратный» элиипс |                            |                |                |  |
| 3060.4            | 6.49                       | 3.6            | 3.9            | 1.97                                     |
| 3567.5            | 6.55                       | 2.8            | 3.8            | 2.31                                     |
| 4367.6            | 6.64                       | 1.6            | 3.8            | 2.72                                     |



Основываясь на полученных результатах, можно считать разность фаз постоянной и "доверять" показаниям осциллографа при частотах не выше  $\sim 6$  кГц.

### Наблюдение фигур Лиссажу и измерение частоты.

Включим развертку  $X - Y$  осциллографа и подадим на входы сигналы с двух разных звуковых генераторов. Установим приблизительно одинаковые частоты генераторов. Изменяя  $f_x$ , получим устойчивые фигуры для нескольких целочисленных отношений частот. Определить отношение частот можно "заключив" фигуру в воображаемый прямоугольник и посчитать число касаний боковой и верхней граней.



## Измерение АЧХ интегрирующей и дифференцирующей RC-цепочек.

Измерим АЧХ RC-цепочек, представленных на схемах

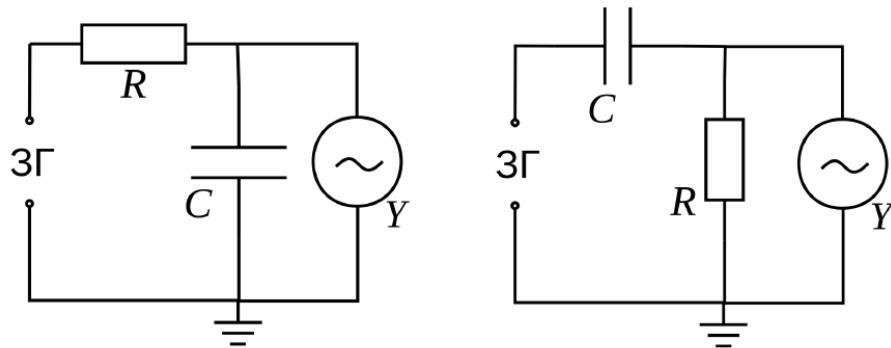


Рис. 8: а) «Интегрирующая» б) «Дифференцирующая» цепочка

Сравним полученные зависимости с теоретическими:

$$K_a(f) = \frac{1}{\sqrt{(\omega t)^2 + 1}}$$

$$K_b(f) = \frac{1}{\sqrt{(\omega t)^{-2} + 1}}$$

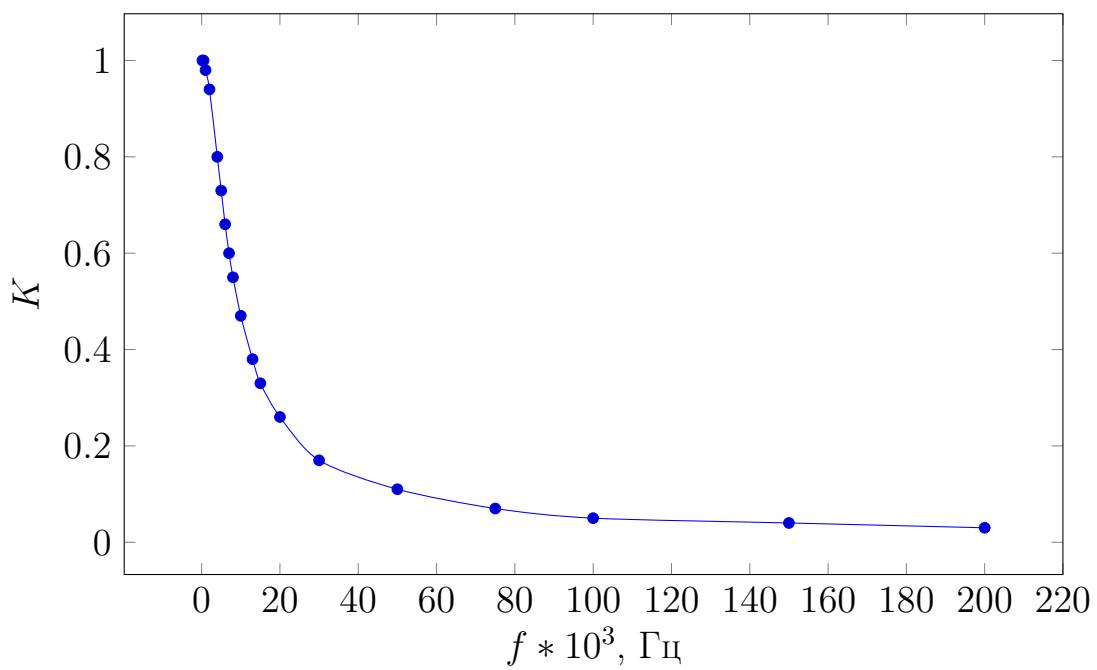
где  $\tau = RC$  — постоянная времени RC-цепочки,  $\omega = 2\pi f$  — циклическая частота.



Рис. 9: «Интегрирующая/Дифференцирующая» цепь

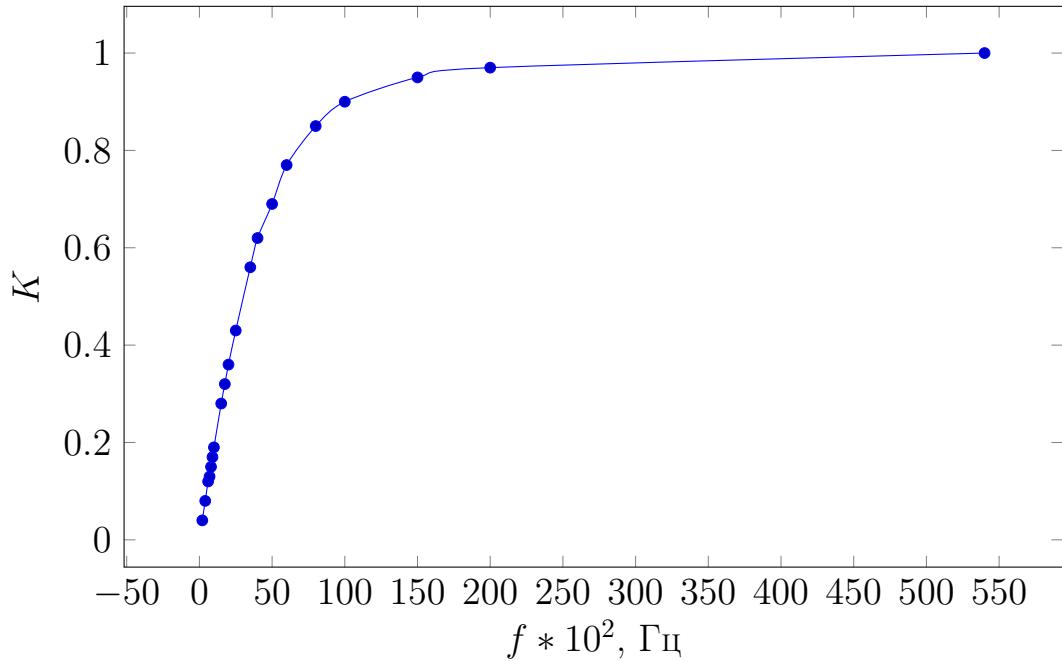
«Интегрирующая» схема.

| $f$ , Гц | $U$ , дел | В/дел | $U$ , В | $K$  |
|----------|-----------|-------|---------|------|
| 200      | 4.0       | 5     | 20.0    | 1.00 |
| 500      | 4.0       | 5     | 20.0    | 1.00 |
| 1000     | 3.9       | 5     | 19.5    | 0.98 |
| 2000     | 3.8       | 5     | 19.0    | 0.94 |
| 4000     | 3.2       | 5     | 16.0    | 0.80 |
| 5000     | 2.9       | 5     | 14.5    | 0.73 |
| 6000     | 2.6       | 5     | 13.0    | 0.66 |
| 7000     | 2.4       | 5     | 12.0    | 0.60 |
| 8000     | 2.2       | 5     | 11.0    | 0.55 |
| 10000    | 4.8       | 2     | 9.6     | 0.47 |
| 13000    | 3.8       | 2     | 7.6     | 0.38 |
| 15000    | 3.3       | 2     | 6.6     | 0.33 |
| 20000    | 2.6       | 2     | 5.2     | 0.26 |
| 30000    | 3.4       | 1     | 3.4     | 0.17 |
| 50000    | 2.2       | 1     | 2.2     | 0.11 |
| 75000    | 1.4       | 1     | 1.4     | 0.07 |
| 100000   | 1.0       | 1     | 1.0     | 0.05 |
| 150000   | 0.7       | 1     | 0.7     | 0.04 |
| 200000   | 0.6       | 1     | 0.6     | 0.03 |



«Дифференцирующая» схема.

| $f$ , Гц | $U$ , дел | В/дел | $U$ , В | $K$  |
|----------|-----------|-------|---------|------|
| 200      | 0.8       | 1     | 0.8     | 0.04 |
| 400      | 1.6       | 1     | 1.6     | 0.08 |
| 600      | 2.3       | 1     | 2.3     | 0.12 |
| 700      | 2.6       | 1     | 2.6     | 0.13 |
| 800      | 3.0       | 1     | 3.0     | 0.15 |
| 900      | 3.4       | 1     | 3.4     | 0.17 |
| 1000     | 3.7       | 1     | 3.7     | 0.19 |
| 1500     | 5.5       | 1     | 5.5     | 0.28 |
| 1750     | 6.3       | 1     | 6.3     | 0.32 |
| 2000     | 7.0       | 1     | 7.0     | 0.36 |
| 2500     | 4.2       | 2     | 8.4     | 0.43 |
| 3500     | 5.5       | 2     | 11.0    | 0.56 |
| 4000     | 6.0       | 2     | 12.0    | 0.62 |
| 5000     | 2.7       | 5     | 13.5    | 0.69 |
| 6000     | 3.0       | 5     | 15.0    | 0.77 |
| 8000     | 3.3       | 5     | 16.5    | 0.85 |
| 10000    | 3.5       | 5     | 17.5    | 0.90 |
| 15000    | 3.7       | 5     | 18.5    | 0.95 |
| 20000    | 3.8       | 5     | 19.0    | 0.97 |
| 54000    | 3.9       | 5     | 19.5    | 1.00 |



Определим  $\tau$ :  $\tau = RC = 0.01 * 10^{-6} * 3 * 10^3 = 3 * 10^{-5}$  с. Тогда из формул следует, что при  $K_0 = 1/\sqrt{2}$   $f_0 = 1/(2\pi\tau)$ :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC} = 5.3 * 10^3 \text{ Гц}$$

что с высокой точностью подтверждается измерениями.

Стоит отметить, что при больших частотах (порядка МГц) амплитуда сигнала, снимаемого с «дифференциальной» схемы, начинает уменьшаться, на основании чего можно сделать вывод, что предложенная зависимость хорошо выполняется лишь в некотором диапазоне частот, при выходе за его границы наблюдаются заметные отклонения (порядка 0.1 дел при амплитуде сигнала 4.0 дел, т.е.  $\sim 2.5\%$ ).

Таким образом, мы изучили внутреннее устройство осциллографа и использовали прибор на практике. Была определена "область применимости" данного осциллографа, т.е. диапазон частот, корректно обрабатываемых прибором и фазочастотную характеристику входов осциллографа. В качестве примера использования осциллографа были изучены «дифференцирующая» и «интегрирующая» RC-цепи, их поведение при включении в цепь переменного тока.

Список использованной литературы:

1. "Лабораторный практикум по общей физике: Учебное пособие. В трех томах. Т1. Механика"/А.Д.Гладун, Д.А.Александров, Ф.Ф.Игошин и др.; Под редакцией А.Д.Гладуна. — МФТИ, 2004.
2. "Общий курс физики. Электричество. Том III."/Д.В.Сивухин — 1997.
3. "Набор и верстка в системе L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X"/С.М.Львовский. — 2003.