



Лабораторная работа 1.1.6
по курсу «Общая физика»

ИЗУЧЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФА

Из лаборатории не выносить!
Электронная версия — на сайте кафедры общей физики
physics.mipt.ru

Долгопрудный
МФТИ
2021

Цель работы: ознакомиться с устройством и органами управления электронного и/или цифрового осциллографа; научиться измерять амплитуды и частоты произвольных сигналов; изучить основные характеристики осциллографа и их влияние на искажение сигналов.

В работе используются: осциллограф (электронный и/или цифровой), генераторы электрических сигналов, соединительные кабели.

Осциллограф — регистрирующий прибор, в котором исследуемый электрический сигнал (напряжение) преобразуется в видимый на экране график изменения величины сигнала во времени. Осциллографы широко используются в физическом эксперименте для регистрации изменения во времени любых физических величин, которые могут быть преобразованы в электрические сигналы.

В современных лабораториях используются электронно-лучевые (аналоговые) и цифровые осциллографы. В электронно-лучевом осциллографе входной сигнал подаётся на отклоняющие конденсаторные пластины, вызывающие пропорциональное отклонение пучка электронов, попадающих на люминофор электронно-лучевой трубки. В цифровых приборах аналоговый сигнал оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), который сохраняется в памяти и затем отображается дисплее. Современные цифровые приборы обладают рядом несомненных преимуществ, таких как возможность записи сигнала, математической обработки, многоканальная регистрация и т.д. При этом их основные характеристики даже у относительно недорогих моделей практически не уступают аналоговым (а у профессиональных моделей — превосходят), поэтому цифровые осциллографы постепенно вытесняют аналоговые.

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

Экраном осциллографа является покрытая флюоресцирующим веществом стенка трубки, на которую и попадает электронный пучок. Электронный пучок формируется системой электродов, называемой «электронной пушкой»: катод с нагревателем, модулятор, фокусирующий и ускоряющий аноды. С помощью ручек регулировки яркости

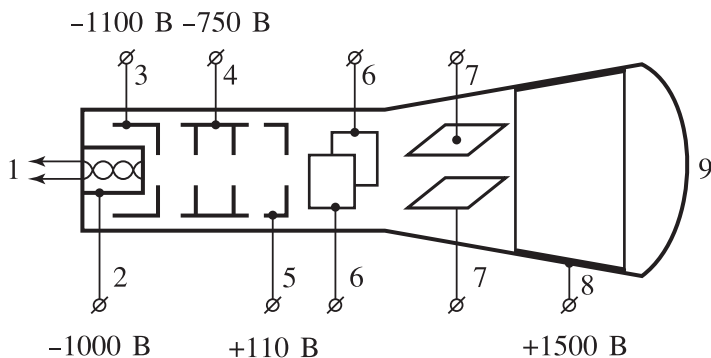


Рис. 1. Электронно-лучевая трубка

и фокуса можно изменять потенциалы фокусирующих и ускоряющих анодов, регулируя таким образом размер, чёткость и яркость пятна на экране.

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 изменяющиеся во времени напряжения, можно «нарисовать» электронным лучом на экране некоторую фигуру.

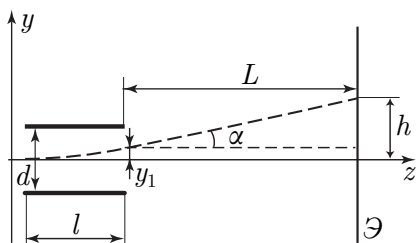


Рис. 2. Отклонение луча в электрическом поле пластин

Рассмотрим движение электронов в электрическом поле отклоняющих пластин (рис. 2). Пусть электрон со скоростью v_0 влетает в однородное электрическое поле напряжённостью E_y пары пластин и движется вдоль оси z перпендикулярно к линиям напряжённости электри-

ческого поля. Движение электрона вдоль оси z является равномерным, а вдоль оси y — равноускоренным:

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

где ускорение находится из второго закона Ньютона:

$$a = \frac{eE_y}{m}. \quad (2)$$

Исключая время пролёта, из (1) и (2) найдём

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

Видно, что траектория электрона между отклоняющими пластинами представляет собой параболу. После выхода из пластин электроны будут двигаться *по прямой*. Найдём смещение пучка y_1 и угол α между этой прямой и осью z :

$$y_1 = \frac{eE_y}{2mv_0^2} l^2, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{eE_y}{mv_0^2} l, \quad (4)$$

где l — длина пластин. Полное смещение равно:

$$h = y_1 + L \operatorname{tg} \alpha = \frac{e(l/2 + L)}{2mv_0^2} E_y, \quad (5)$$

где L — расстояние от пластин до экрана. Видно, что отклонение пучка прямо пропорционально напряжённости E_y поля между пластинами.

Воспользуемся формулой (5), чтобы получить связь положения пятна на экране с напряжениями, подаваемыми на пластины электронной пушки. Скорость электронов v_0 определяется ускоряющим напряжением U_a на ускоряющем аноде:

$$\frac{mv_0^2}{2} = eU_a. \quad (6)$$

Напряжённость E_y поля между отклоняющими пластинами

$$E_y = \frac{U_y}{d}, \quad (7)$$

где U_y — напряжение между пластинами, а d — расстояние между ними. Тогда из (4) – (7) найдём смещение луча:

$$h_y = \frac{l(l/2 + L)}{2dU_a} \cdot U_y. \quad (8)$$

Таким образом, смещение луча по оси y пропорционально соответствующему отклоняющему напряжению U_y . Коэффициент пропорциональности в (8) называется чувствительностью трубки к напряжению:

$$K_y = \frac{U_y}{h} = \frac{2dU_a}{l(l/2 + L)} \left[\frac{B}{\text{см}} \right]. \quad (9)$$

Аналогично вычисляется чувствительность трубки к напряжению на второй паре пластин.

Полоса пропускания осциллографа. Рассмотрим вопрос о применимости полученных соотношений. Формула (8) может быть использована и в том случае, когда на отклоняющие пластины подаётся *переменное* напряжение, при условии, что оно *мало изменяется* за время $\tau = l/v_0$ пролёта электрона между пластинами. Пусть T — характерное время изменения изучаемого сигнала (например, период сигнала, длительность импульса, время нарастания сигнала до некоторого уровня и т. д.). Формулу (8) можно использовать, если выполняется условие $T \gg \tau$. При типичном ускоряющем напряжении $U_a = 2$ кВ скорость электронов согласно (6) составляет $v_0 \sim 3 \cdot 10^7$ м/с (заметим, что эта скорость много меньше скорости света, поэтому справедливы законы классической физики). Полагая $l = 3$ см, найдём время пролёта: $\tau \sim 10^{-9}$ с. Таким образом, положение электронного пучка на экране осциллографа будет пропорционально *мгновенному* значению напряжения согласно выражению (8), если характерное время сигнала составляет менее $T_{\min} \sim 1$ нс, и, следовательно, частота переменного напряжения не превышает $\nu_{\max} \sim 10^9$ Гц = 1 ГГц.

Заметим, что полученная оценка максимальной частоты сохраняется и для цифровых осциллографов: для них частота регистрации сигнала ограничивается тактовой частотой интегральных схем, которая также составляет несколько гигагерц.

В реальных приборах максимальная рабочая частота оказывается существенно меньше 1 ГГц. Дело в том, что исследуемый сигнал, подаваемый на отклоняющие пластины, как правило, необходимо предварительно *усилить*. Всякий усилитель характеризуется диапазоном частот, в пределах которого его коэффициент усиления практически не меняется, а вне этого диапазона резко падает. Поэтому рабочий диапазон частот электронного осциллографа ограничивается, как правило, именно работой его усилителя. Диапазон частот, на котором осциллограф правильно отображает на экране исследуемый сигнал называется **полосой пропускания** осциллографа.

Например, полоса пропускания осциллографа GOS-620 составляет 0..20 МГц (т. е. сигналы с характерной длительностью менее $T \sim 50$ нс будут испытывать существенные искажения).

Усиление сигнала. Итак, в рабочем режиме координаты x и y точки попадания электронного луча на экран (относительно его центра) пропорциональны мгновенным значениям напряжений $U_x(t)$ и $U_y(t)$, подаваемых на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины.

Ясно, что отклонение луча должно быть, во-первых, заметным и, во-вторых, не выходить за пределы экрана. Поэтому, чтобы иметь возможность исследовать сигналы в широком диапазоне амплитуд, подаваемые на пластины сигналы нужно предварительно усиливать или ослаблять. Для усиления слабых сигналов в осциллографе имеются усилители вертикального (и горизонтального) отклонения луча. Осциллографы оснащаются соответствующими ручками регулировки («ВОЛЬТ/ДЕЛ» или «VOLTS/DIV») коэффициентов усиления/ослабления, позволяющие изменять коэффициенты пропорциональности $K_y = U_y/h_y$, $K_x = U_x/h_x$ (размерностью [вольт/см] или [вольт/деление]) — отношение величины поданного напряжения к смещению луча на экране.

Развёртка сигнала. Для получения на экране «изображения» некоторого электрического сигнала $U(t)$ сам сигнал нужно подать на вертикальные пластины:

$$U_y(t) = U_{0y} + K_y U(t), \quad (10)$$

а на горизонтальные пластины подать так называемое напряжение развёртки, прямо пропорциональное времени t :

$$U_x = U_{0x} + kt. \quad (11)$$

Здесь U_{0y} и U_{0x} — постоянные напряжения, задающие смещение графика сигнала на экране по осям Y и X соответственно (могут изменяться соответствующими ручками регулировки), K_y — коэффициент усиления сигнала по вертикальной оси, k — некоторая постоянная, зависящая от характеристик генератора развёртки. Тогда луч на экране «нарисует» график $U_y(U_x)$, пропорциональный графику функции $U(t)$.

После того, как луч в процессе развёртки дойдёт до края экрана, развёртка должна быть запущена заново. В результате напряжение на горизонтальных пластинах будет иметь *пилообразную* форму. Это

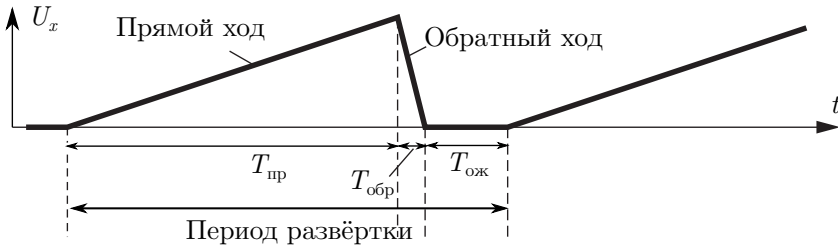


Рис. 3. Напряжение развертки

напряжение, изображённое на рис. 3, вырабатывает *генератор внутренней развертки* осциллографа. В течение времени прямого хода луча ($T_{пр}$) 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* ($T_{обр} \ll T_{пр}$), когда напряжение развертки возвращается к первоначальному уровню, а луч переходит в исходное положение в левый край экрана (заметим, что при обратном ходе луча напряжение на модуляторе «запирает» трубку, поэтому свечение экрана не возникает). Скорость изменения напряжения прямого хода развертки, т. е. масштаб по оси X , задается специальной ручкой регулировки, устанавливающей соотношение между временем и числом делений экрана («ВРЕМЯ/ДЕЛ» или «TIME/DIV»). После возврата луч может стартовать не сразу, а находиться в покое в течение *времени ожидания* $T_{ож}$, что позволяет синхронизировать отрисовку сигнала (см. ниже).

Всё сказанное здесь относится в полной мере и к цифровому осциллографу, с той лишь разницей, что реальное движение электронного пучка по экрану следует заменить на «виртуальное», приводящее к засвечиванию соответствующих пикселей на дисплее.

Синхронизация. При наблюдении периодических и, особенно, быстротекущих процессов важно получить на экране осциллографа *неподвижное* изображение сигнала. Для этого необходимо, чтобы период развертки был кратен периоду изучаемого периодического сигнала — тогда повторная «прорисовка» пройдет по тому же пути, что и предыдущая. Однако точное соотношение периодов соблудности трудно из-за нестабильности как генератора развертки, так и самого изучаемого процесса. Поэтому используют *принудительное согласование* периодов, при котором изучаемое напряжение $U(t)$ «навязывает» свой

период генератору внутренней развёртки. При этом начало прямого хода развёртки должно совпадать строго с одной и той же характерной точкой исследуемого периодического сигнала, и такой процесс называется **синхронизацией развёртки с сигналом**.

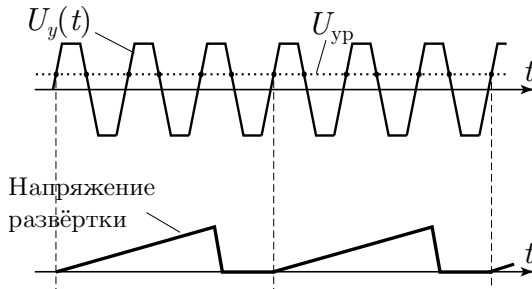


Рис. 4. Синхронизация развёртки по заданному уровню (по нарастанию)

Наиболее часто используется способ синхронизации развёртки по *уровню* сигнала. Он поясняется осциллограммами на рис. 4. Периодический сигнал произвольной формы U_y сравнивается с некоторым *пороговым* напряжением $U_{ур}$ — **уровнем синхронизации** (устанавливается ручкой «УРОВЕНЬ» или «LEVEL» блока управления синхронизацией). После попадания в режим ожидания (на интервале $T_{ож}$ на рис. 3), прямая развёртка не запускается до тех пор, пока величина сигнала U_y не достигнет порогового значения $U_{ур}$, то есть пока не произойдёт *пересечение уровня* (сверху вниз или снизу вверх, в зависимости от настроек). Таким образом, регулировка уровня синхронизации позволяет выбрать *фазу* сигнала в начале развёртки — исходя из наилучшей устойчивости синхронизации и удобства наблюдения. Если U_y не пересекает уровень $U_{ур}$, то синхронизация оказывается невозможна.

Обычно предусмотрены два режима работы генератора внутренней развёртки: автоматический и ждущий (нормальный). В автоматическом режиме длительность ожидания $T_{ож}$ не может превышать некоторое максимальное время $T_{ож, макс}$. Если на максимальном интервале ожидания не произошло пересечения U_y и $U_{ур}$, то происходит автоматический запуск прямого хода развёртки в момент, не связанный с определённой фазой исследуемого сигнала. В этом случае изображение исследуемого сигнала не будет синхронизовано, из-за чего оно «побежит» влево или вправо. При отсутствии исследуемого сигнала будет видна горизонтальная линия развёртки.

В ждущем (нормальном) режиме максимальное время ожидания неограниченно. Если пересечение уровня не произошло, экран будет

оставаться пустым (сигнала не будет видно). Наблюдение на экране малой части периода процесса (например, фронта импульса или короткого импульса, длительность которого много меньше основного периода) возможно только в *ждущем* режиме.

Кроме синхронизации развёртки исследуемым сигналом (внутренняя синхронизация), предусмотрен режим синхронизации другим внешним сигналом (вместо U_y).

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики.

Осциллограф можно рассматривать как колебательную систему, отклонение которой возбуждается внешним источником. Как у любой колебательной системы, у осциллографа есть амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики. В рабочем режиме отклонение луча на экране осциллографа прямо пропорционально приложенному напряжению, а задержки в фазе сигнала не возникает. Однако при приближении к границам полосы пропускания (см. выше), и тем более при выходе за неё, амплитуда и фаза сигнала на экране окажется отличающейся от ожидаемой.

Пусть на вход «Y» осциллографа подан гармонический сигнал $U_y = U_0 \sin 2\pi\nu t$. После «обработки» сигнала осциллографом на его экране будет изображена некоторая зависимость, которая, вообще говоря, может отличаться от исходной: у неё может оказаться другая амплитуда и другая фаза (частота, как правило, сохраняется с хорошей точностью): $y = y_0 \sin(2\pi\nu t + \varphi)$. Причём амплитуда $y_0(\nu)$ и фаза $\varphi(\nu)$ зависят от частоты сигнала ν . Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) называют отношение

$$K(\nu) = \frac{y_0(\nu)}{U_0}. \quad (12)$$

В «рабочем» режиме АЧХ постоянна $K(\nu) \equiv \text{const}$, а в общем случае АЧХ является функцией *частоты* сигнала. Фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) называют зависящую от частоты величину сдвига фаз $\varphi(\nu)$. ФЧХ осциллографа в рабочем диапазоне частот — это некоторая *константа* (в идеале — ноль). АЧХ и ФЧХ канала горизонтального отклонения определяются аналогично.

Как правило, АЧХ остаётся практически постоянной $K = K_{\max}$ в некотором широком диапазоне частот от ν_{\min} до ν_{\max} и начинает уменьшаться на частотах $\nu < \nu_{\min}$ и $\nu > \nu_{\max}$. Диапазон $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$ называется *полосой пропускания*. На практике значения граничных частот ν_{\min} и ν_{\max} принято определять по уменьшению коэффи-

циента K до уровня $1/\sqrt{2} \approx 0,7$:

$$\frac{K(\nu_{\min})}{K_{\max}} = \frac{K(\nu_{\max})}{K_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7.$$

Зависимость АЧХ и ФЧХ от частоты $K(\nu)$ и $\Delta\Phi(\nu)$ может приводить, например, к существенному искажению формы высокочастотных сигналов, а также импульсных сигналов с характерным временем $T < 1/\nu_{\max}$. На низких частотах также возможны искажения, например, при использовании «закрытого» входа (см. ниже).

Закрытый и открытый входы. Входные каналы осциллографа могут работать в **з а к р ы т о м** (маркируется как \sim или AC) и **о т к р ы т о м** режиме (\simeq или DC). В закрытом режиме ко входу последовательно подключается разделительный конденсатор, который убирает постоянную составляющую сигнала (конденсатор не пропускает постоянный ток), а на усилитель осциллографа подаётся только *переменная* составляющая U_{\sim} . В открытом режиме подаётся как постоянная, так и переменная составляющие сигнала $U = U_{=} + U_{\sim}$.

В закрытом режиме конденсатор не только не пропускает постоянную составляющую, но и сильно искажает любую медленно меняющуюся (низкочастотную) зависимость — из-за процесса зарядки/разрядки разделительного конденсатора. В связи с этим, *низкочастотные* АЧХ и ФЧХ закрытого входа могут существенно отличаться от постоянных.

Заметим, что в любом режиме осциллограф обладает большим *входным сопротивлением* (обычно, 1 МОм), что позволяет считать осциллограф практически *идеальным вольтметром* — ток через осциллограф мал и, следовательно, его наличие не искажает распределение токов в цепи.

Комбинация сигналов. Фигуры Лиссажу. Помимо наблюдение развёртки сигналов, в любом осциллографе предусмотрен режим *совместной* подачи двух сигналов $U_y(t)$ и $U_x(t)$ на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины (режим «X–Y»). В результате на экране будет наблюдаться результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний.

Если сигналы

$$\begin{aligned} U_y(t) &= U_{0y} \sin(2\pi\nu_y t + \varphi_y), \\ U_x(t) &= U_{0x} \sin(2\pi\nu_x t + \varphi_x) \end{aligned}$$

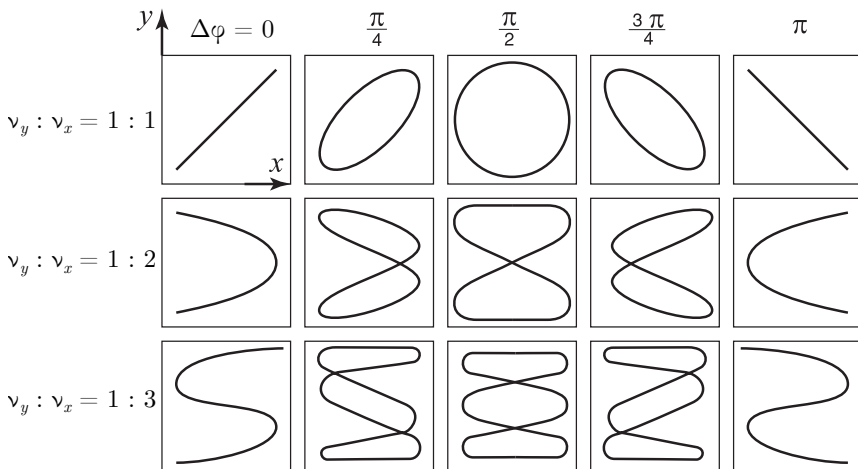


Рис. 5. Фигуры Лиссажу (для колебаний одинаковой амплитуды)

являются периодическими с *совпадающими* или *кратными* частотами, на экране возникают неподвижные замкнутые кривые, называемые **фигурами Лиссажу**. 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. При небольшом нарушении кратности частот форма фигур медленно меняется (кажется, что фигуры «вращаются»), а при большом — картина размывается.

На практике фигуры Лиссажу можно использовать, например, для *измерения частоты* некоторого колебания, если известна частота другого (эталонного) колебания. Определить отношение частот по фигуре Лиссажу можно следующим образом. На полученное изображение накладывают мысленно две линии — горизонтальную и вертикальную, не проходящие через узлы фигуры. Отношение частот ν_y/ν_x равно отношению числа пересечений фигуры горизонтальной линией n_x к числу пересечений с вертикальной линией n_y : $\nu_y/\nu_x = n_x/n_y$.

При совпадении двух частот ($\nu_x = \nu_y$) фигура Лиссажу является эллипсом. По форме и ориентации эллипса можно измерить разность фаз между двумя колебаниями. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Рассмотрим два взаимно перпендикулярных колебания одинаковой частоты, но с разными фазами и амплитудами:

$$x = A \cos(2\pi\nu t + \varphi_x), \quad y = B \cos(2\pi\nu t + \varphi_y). \quad (13)$$

Исключим из этих уравнений время t . После некоторых преобразований с использованием стандартных тригонометрических тождеств можно получить уравнение траектории движения луча на экране:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} - 2\frac{xy}{AB} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi, \quad (14)$$

где $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$.

Таким образом, фигура, которую описывает луч при сложении колебаний одинаковой частоты, представляет собой *эллипс*. В частных случаях эллипс может «вырождаться» в *окружность* ($A = B$, $\Delta\varphi = \pi/2$) или в *прямую линию* ($\Delta\varphi = 0$). Ориентация эллипса зависит от соотношения амплитуд A/B и от разности фаз $\Delta\varphi$. По форме эллипса можно измерить амплитуды и фазы сигналов. Амплитуды соответствуют максимальным отклонениям по соответствующим осям: $A = |\Delta x_{\max}|/2$ и $B = |\Delta y_{\max}|/2$. Разность фаз можно найти, например, положив в уравнении (14) $x = 0$ — тогда $|\sin \Delta\varphi| = |y_0|/B$, где $y_0 = y|_{x=0}$ (подробнее см. текст соответствующего задания).

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

ЗАДАНИЕ

Перед включением осциллографа в сеть необходимо ознакомиться с назначением ручек управления осциллографа GOS-620 (см. Приложение).

1. Подготовка к работе. Перед включением осциллографа в сеть убедитесь, что органы управления осциллографа установлены следующим образом:

- а) Блок горизонтальной развертки («HORIZONTAL»): ручка «POSITION» — в среднем положении; кнопка « $\times 10$ MAG» — отжата; ручка «SWP.VAR» — в крайнем правом положении (риска CAL).
- б) Блок вертикального отклонения («VERTICAL»): ручки «POSITION» — в среднем положении; внешние ручки «VOLTS/DIV» обоих каналов в положении 5 V/дел, а внутренние — утоплены; тумблеры «AC-GND-DC» обоих каналов — в положении «GND» (отключены); кнопки «ALT/CHOP» и «INV CH 2» — отжаты.

- в) Блок синхронизации («TRIGGER»): «TRIG.ALT» — отжата, «LEVEL» — в среднем положении; переключатель «MODE» — в положении «AUTO»; «SLOPE» — отжата.

Включите осциллограф в сеть. Поставьте регулятор развёртки «TIME/DIV» в положение «X-Y». На экране появится точка. Ручками «POSITION» расположите точку в центре экрана осциллографа. Отрегулируйте яркость и четкость изображения точки ручками «INTEN» и «FOCUS» — размер и яркость точки должны быть минимально возможными, при условии, что точка хорошо видна на экране. После регулировки включите внутреннюю развертку осциллографа, установив ручку «TIME/DIV» в положение 2 ms.

Внимание!

Во избежание прогорания люминофора не держите неподвижную точку на экране дольше 2–3 минут.

2. Наблюдение периодического сигнала и измерение его частоты. Получите на экране осциллографа устойчивую картину периодического (синусоидального) сигнала, подаваемого с генератора, и с помощью горизонтальной шкалы экрана осциллографа проведите измерение периода и частоты сигнала.

- а) Подключите звуковой генератор (ЗГ) к каналу «CH2(Y)» и настройте его на синусоидальный сигнал некоторой не слишком высокой частоты (например, $\nu \approx 1$ кГц).
- б) Убедитесь, что отображение сигнала и его синхронизация осуществляется по каналу «CH2(Y)» (тумблер «MODE» блока «VERTICAL» и тумблер «SOURCE» блока «TRIGGER» находятся в положении «CH2(Y)»). Установите режим открытого (DC) входа для канала «CH2(Y)».
- в) Получите на осциллографе устойчивую картину колебаний. Используйте ручки «VOLTS/DIV» (вольт/деление) для регулировки масштаба по вертикали, ручку «TIME/DIV» (время/деление) для регулировки масштаба по горизонтали, и ручки «POSITION» для смещения картины как целого. Настройте уровень запуска развёртки (ручка «LEVEL») для получения стационарной картины. При необходимости переключайте режим синхронизации тумблером «MODE» блока «TRIGGER» в положения «AUTO» (*автоматический режим*) или «NORM» (*режим ожидания*).

- г) Измерьте период наблюдаемого сигнала T (с учётом масштаба по горизонтальной оси, определяемого положением ручки «TIME/DIV») и найдите его частоту $\nu = 1/T$. Оцените минимальную относительную погрешность измерения периода $\delta T/T$ с помощью шкалы на экране осциллографа. Вычислите абсолютную погрешность определения частоты $\delta\nu = \nu\delta T/T$. Сравните результаты измерений с показанием $\nu_{3Г}$ встроенного в генератор частотомера.
- д) Повторите измерения для 5–7 различных частот из всего диапазона работы звукового генератора. Результаты занесите в таблицу.

$\nu_{3Г}$, Гц	T , дел	TIME/DIV	T , с	ν , Гц	$\delta\nu$, Гц	$\nu - \nu_{3Г}$, Гц

- е) Сделайте выводы о точности измерения частоты сигнала с помощью осциллографа.

3. Измерение амплитуды сигнала. С помощью вертикальной шкалы экрана осциллографа измерьте несколько значений амплитуды сигнала от звукового генератора при различном положении его ручек регулировки. В качестве примера предлагается измерить максимальную и минимальную амплитуды напряжений U_{\max} , U_{\min} , которые способен выдавать генератор, а также несколько промежуточных значений. Измерения проведите на частоте $\nu = 1$ кГц.

- а) Установите ручку регулировки амплитуды («AMPL») генератора сигналов на максимум (по часовой стрелке до упора). Убедитесь, что ручка «AMPL» не вытянута на себя, а кнопка «ATT –20dB» не нажата. С помощью осциллографа измерьте максимальную амплитуду генерируемого сигнала U_{\max} .
- б) Нажмите на генераторе кнопку кнопку «ATT –20dB» (ослабление на 20 дБ — т.е. уменьшение амплитуды в 10 раз, см. ниже). Измерьте получившееся значение амплитуды U_{-20dB} . Вытяните ручку «AMPL» на себя (дополнительное ослабление на 20 дБ) и снова измерьте получившуюся амплитуду (U_{-40dB}). Наконец, установите минимально возможную амплитуду генератора, повернув ручку «AMPL» против часовой стрелки до упора. Измерьте величину U_{\min} .

Для изменения масштаба вертикальной шкалы осциллографа используйте ручку VOLTS/DIV (вольт на деление*) канала CH2(Y). При измерении убедитесь, что серая ручка плавной регулировки VOLTS/DIV утоплена и переведена в крайнее правое положение до щелчка (*калиброванное* положение регулировки).

*Под «делением» имеется в виду большое (1 см) деление шкалы экрана.

- в) Оцените абсолютную δU и относительную $\delta U/U$ погрешности измерения амплитуды.
- г) Выразите отношения амплитуд измеренных сигналов ($U_{\max}/U_{-20\text{dB}}$, $U_{-20\text{dB}}/U_{-40\text{dB}}$, $U_{-40\text{dB}}/U_{\min}$) в *децибелах* [дБ]. Сравните получившиеся значения с расчётными.

Замечание. Децибел — логарифмическая единица ослабления или усиления, определяемая по формуле

$$\beta_{21} [\text{дБ}] = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} = 20 \log_{10} \frac{U_2}{U_1},$$

где P_2/P_1 — отношение средних мощностей, U_2/U_1 — отношение амплитуд некоторых двух сигналов (множитель 2 учитывает, что мощность пропорциональна квадрату амплитуды $P \propto U^2$). Например, уменьшение амплитуды сигнала в 10 раз соответствует его ослаблению на 20 дБ.

4. Наблюдение фигур Лиссажу и измерение частоты.

- а) Выключите внутреннюю развертку осциллографа («TIME/DIV» в положение «X-Y»). Подайте на вход каналов X и Y осциллографа сигналы с двух *разных* звуковых генераторов. Установите приблизительно одинаковые частоты генераторов (рекомендуется использовать невысокие частоты $\nu \sim 50 \div 100$ Гц). Амплитуды генераторов и положения ручек «VOLTS/DIV» осциллографа установите таким образом, чтобы фигура Лиссажу занимала большую часть экрана, не выходя за его пределы.
- б) Изменяя частоту одно из генераторов (например, ν_x), получите устойчивые фигуры для нескольких целочисленных соотношений частот, например: $\nu_y : \nu_x = 1 : 1; 2 : 1; 3 : 1; 3 : 2; 4 : 3; 5 : 2$. Зарисуйте полученные изображения в тетрадь. Как по виду фигуры Лиссажу определить отношение частот?

5. *Изучение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) осциллографа.

Данный пункт следует выполнять с использованием звукового генератора с максимальной частотой, выходящей за пределы полосы пропускания осциллографа (20 МГц для GOS-620), например АКИП-3408/3.

*Пункты, отмеченные звёздочкой, не обязательны и выполняются по указанию преподавателя.

- а) Установите частоту синусоидального сигнала генератора $\nu = 1$ кГц и амплитуду, близкую к максимальной. Получите устойчивое изображение синусоиды на экране.
- б) Подберите масштаб вертикальной шкалы осциллографа так, чтобы сигнал занял большую часть экрана, а его *размах* $2U_0$ составил некоторое целое число делений (например, $2U_0 = 6,0$ дел).

Внимание! Далее при измерениях АЧХ амплитуда сигнала с генератора U_0 (положение ручки «AMPL») и масштаб по оси Y осциллографа (положение ручек «VOLTS/DIV») *должны оставаться неизменными* (изменяется только частота).

- в) Установите максимальную частоту звукового генератора ν_{\max} . Измерьте величину амплитуды сигнала, наблюдаемого на экране осциллографа и определите коэффициент ослабления АЧХ:

$$K(\nu) = \frac{U(\nu)}{U_0}.$$

- г) Проведите измерения АЧХ ещё при 4–6 частотах в диапазоне от 20 Гц до ν_{\max} (например, 10^2 , 10^4 , 10^5 , 10^6 Гц). Убедитесь, что в пределах полосы пропускания осциллографа коэффициент K мало отличается от единицы.
- д) Изучите влияние режима работы входного канала на АЧХ при низких частотах. Установите частоту $\nu \approx 10$ Гц и измерьте величину коэффициента K при открытом (DC, \simeq) и закрытом (AC, \sim) входах. Проведите измерения ещё при 2–3 малых частотах. Почему АЧХ открытого и закрытого каналов различаются?

6. *Изучение влияния АЧХ на искажение сигнала.

- а) Установите на генераторе переключатель вида сигнала в положение «Г» — прямоугольные импульсы (*меандр*). Получите на экране устойчивую картину прямоугольных импульсов на частоте $\nu = 1$ кГц.
- б) Изменяя частоту генератора во всём диапазоне, наблюдайте как меняется вид отображаемого на осциллографе сигнала для открытого (DC) и закрытого (AC) входов канала CH2(Y). При изменении частоты используйте ручку осциллографа TIME/DIV для регулировки масштаба по горизонтали (по времени). Зарисуйте характерный вид полученных осциллограмм для частот ν , при которых форма прямоугольных импульсов существенно искажается.

- в) Предложите объяснение полученных результатов на основе измерений АЧХ, выполненных в предыдущем пункте.

7. *Измерение разности фазо-частотных характеристик (ФЧХ) 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. В данном пункте предлагается провести измерение разности фаз, возникающей при подаче одного и того же сигнала на разные каналы осциллографа, в зависимости от их частоты.

- а) Выключите переведите переключатель «TIME/DIV» в положение «X-Y». Подайте один и тот же синусоидальный сигнал частоты $\nu = 1$ кГц с выхода звукового генератора через разветвитель на каналы CH1(X) и CH2(Y).

В режиме «X-Y» отклонение луча на экране пропорционально подаваемым на каналы напряжениям $y(t) = K_y U_y(t)$, $x(t) = K_x U_x(t)$, где коэффициенты масштаба K_x , K_y определяются положениями ручек «VOLTS/DIV».

- б) Установите переключатели режимов каналов X и Y в положение «GND» (выключены) и ручками «POSITION» установите точку в центр экрана.
- в) Установите переключатели режимов каналов X и Y в положения «AC» (закрытые входы). Используя ручки «VOLTS/DIV» обоих каналов, получите на экране отрезок прямой (вырожденный эллипс) под углом 45° к горизонтали, занимающий большую часть экрана.
- г) Изменяя частоту генератора ν во всем доступном диапазоне, найдите участки, на которых изображение на экране переходит из отрезка в невырожденный эллипс. Определите диапазон частот, в котором разность ФЧХ отсутствует.
- д) На участках, где разность фаз ФЧХ каналов X и Y отлична от нуля (фигура Лиссажу — невырожденный эллипс), измерьте величину этой разности $\Delta\varphi$ при нескольких частотах сигналов ν (5–7 точек).

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

$$x(t) = A_x \sin(\omega t + \varphi_x), \quad y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi_y). \quad (15)$$

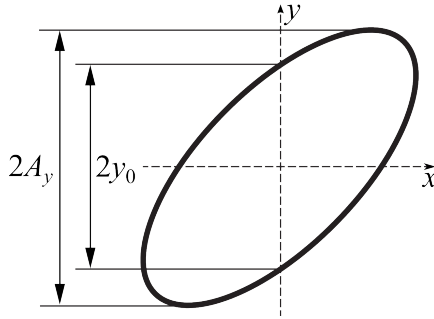


Рис. 6. К определению разности фаз сигналов

Разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ можно выразить, например, положив в (15) $\omega t = -\varphi_x$ (то есть, $x = 0$), после чего нетрудно получить

$$\sin |\Delta\varphi| = \left| \frac{y_0}{A_y} \right|,$$

где $y_0 = y|_{x=0}$ — отклонение луча по вертикали в момент, когда его абсцисса равна нулю; A_y — амплитуда колебаний по оси y (см. рис. 6). Тогда возможные значения модуля разности фаз:

$$|\Delta\varphi| = \arcsin \left| \frac{y_0}{A_y} \right| \quad (16)$$

или

$$|\Delta\varphi| = \pi - \arcsin \left| \frac{y_0}{A_y} \right|. \quad (17)$$

При этом, если эллипс наклонён вправо (как на рис. 6), то угол $\Delta\varphi$ лежит в интервале $[-\pi/2; \pi/2]$ — имеет место формула (16); если эллипс наклонён влево, то $\Delta\varphi \in [\pi/2; \pi] \cup [-\pi; -\pi/2]$ — необходимо использовать формулу (17).*

*Знак $\Delta\varphi$ можно было бы определить по направлению прорисовки эллипса (по/против часовой стрелки), однако визуально это можно сделать только при частотах, меньших 20 Гц. В данной работе предлагается ограничиться измерением модуля разности фаз $|\Delta\varphi|$.

Кроме того, может показаться, что разность фаз каналов можно измерить в режиме двухканального осциллографа, когда сигналы с каналов CH1 и CH2 выводятся на экран одновременно (MODE в положении DUAL). Однако нетрудно убедиться, что в этом случае осциллограф не вносит в них дополнительной разности фаз — сигналы проходят полностью одинаковый путь и подаются на одни и те же отклоняющие пластины. То есть разность фаз возникает только при выводе сигналов на *разные* пластины осциллографа (вертикальные и горизонтальные), что имеет место только в режиме X-Y.

е) Результаты измерений занесите в таблицу.

ν , Гц	10	...	10^3	...	10^6	...
$\lg \nu$	1,0	...	3,0	...	6,0	...
$ 2y_0 $, дел			0			
$ 2A_y $, дел						
$\arcsin \frac{y_0}{A_y}$, рад			0			
$ \Delta\varphi $, рад			0			

ж) Постройте график зависимости разности ФЧХ каналов осциллографа от частоты в логарифмическом масштабе по частоте $\Delta\varphi(\lg f)$. При каких частотах осциллограф может быть использован для измерения разности фаз подаваемых на него сигналов?

Примеры контрольных заданий

Для получения оценки за выполнение работы выполните одно или несколько заданий по указанию преподавателя.

1. Получите на экране осциллографа устойчивую картину некоторого сигнала с неизвестными параметрами (устанавливаются преподавателем) и проведите измерение его амплитуды, периода и частоты. Исходное положение ручек управления осциллографом устанавливается преподавателем.

2. Повторите на своей установке изображение на экране осциллографа, заданное преподавателем (например, определённую фигуру Лиссажу). Положение ручек управления осциллографа и генераторов не известно.

3. Измерьте разность фаз между двумя сигналами одинаковой частоты. Измерения проведите в двухканальном режиме и в режиме «X-Y».

4. Проведите подробные измерения АЧХ осциллографа вблизи максимальной частоты генератора. Экспериментально определите границу полосы пропускания осциллографа (по падению коэффициента ослабления K до уровня $\approx 0,7$).

5. Проведите подробные измерения разности ФЧХ каналов «X» и «Y» осциллографа на высоких частотах. Экспериментально определите полосу пропускания осциллографа при работе в режиме «X-Y».

6. *Измерьте максимальное время ожидания $T_{\text{ож}}^{\text{max}}$ в автоматическом режиме развёртки.

Указания по выполнению: а) подайте на осциллограф синусоидальный сигнал частотой $100 \text{ Гц} \div 1 \text{ кГц}$; добейтесь, чтобы на осциллограмме отображалось несколько периодов сигнала; б) сбейте синхронизацию ручкой регулировки уровня («бегущая синусоида») и подберите такую частоту сигнала на генераторе, чтобы осциллограмма снова остановилась; в) повышая частоту сигнала добейтесь следующей остановки осциллограммы; г) по измеренным значениям частот определите величину $T_{\text{ож}}^{\text{max}}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Назначение органов управления осциллографа GOS-620.

1. Экран осциллографа показан на рис. 7.



Рис. 7. Экран осциллографа

POWER (сеть) — при включении загорается индикатор под кнопкой «POWER».

INTEN (яркость) — регулировка яркости изображения.

FOCUS (фокус) — регулировка фокуса изображения.

TRACE ROTATION (поворот) — регулировка угла наклона линии развертки изображения относительно линий шкалы экрана.

2. Органы управления развёрткой расположены в блоке «HORIZONTAL» передней панели осциллографа (рис 8).

TIME/DIV (время/деление) — устанавливает коэффициент развёртки от $0,2 \mu\text{с}/\text{дел}$ (микросекунд на деление) до $0,5 \text{ с}/\text{дел}$ (секунд на деление) 20 ступенями. При переводе в положение X-Y (крайнее левое) обеспечивается наблюдение фигур Лиссажу.

POSITION (положение) — перемещает изображение по горизонтали.

SWP.VAR (развертка плавно) — обеспечивает плавную регулировку коэффициента развёртки с перекрытием 2,5 раза в каждом положении переключателя время/дел. При измерении промежутков времени по расстоянию на экране осциллографа эта ручка должна находиться в крайнем правом положении (риска CAL).

×10 MAG (увеличение в 10 раз) — при нажатой кнопке скорость развёртки увеличивается в 10 раз.

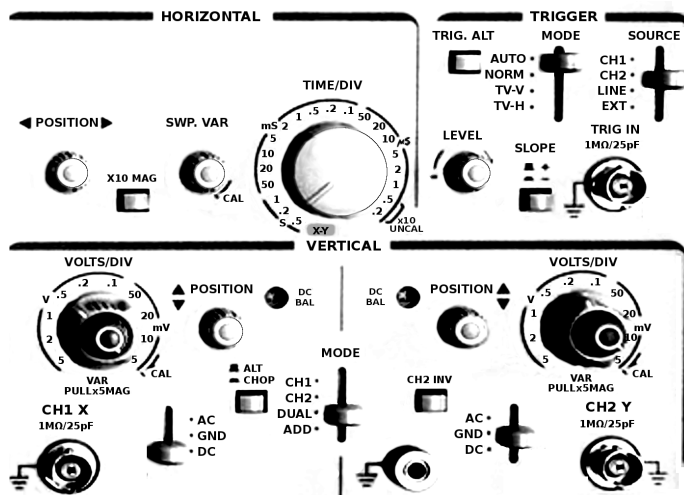


Рис. 8. Органы управления передней панели осциллографа

3. Органы управления тракта вертикального отклонения (блок VERTICAL на рис. 8):

CH 1(X) (канал 1) — вход канала 1. В режиме X-Y — входной канал x -оси.

CH 2(Y) (канал 2) — вход канала 2. В режиме X-Y — входной канал y -оси.

AC-DC-GND — переключатели режима входов усилителя:

- DC: открытый вход (на вход усилителя пропускается весь сигнал, включая постоянную составляющую);
- AC: закрытый вход (на вход пропускается только переменная составляющая сигнала благодаря тому, что последовательно с источником сигнала и осциллографом включается конденсатор емкостью ~ 1 мкФ).

GND: вход усилителя отключается от источника сигнала и заземляется.

VERTICAL-MODE — устанавливает режим работы для наблюдения двух сигналов одновременно или по очереди:

CH 1: на экране наблюдается сигнал канала 1.

CH 2: на экране наблюдается сигнал канала 2.

DUAL: на экране наблюдаются изображения сигналов обоих каналов.

ADD: на экране наблюдается алгебраическая сумма или разность (при нажатии кнопки CH 2 INV) сигналов каналов 1 и 2.

POSITION (положение) — регулировка положения лучей обоих каналов по вертикали.

VOLTS/DIV (вольт/деление) — дискретные переключатели, устанавливающие коэффициенты отклонения каналов от 5 мВ/дел до 5 В/дел в 10 диапазонах. В середине — ручка плавного изменения коэффициентов отклонения каналов с перекрытием не менее, чем в 2,5 раза в каждом положении переключателей В/дел. Когда ручка вытянута (режим $\times 5$), происходит увеличение размера изображения (чувствительности усилителя) в 5 раз. *Для измерения амплитуд ручка плавной регулировки должна находиться в крайнем правом положении (до щелчка).*

ALT/CHOP — при нажатии на кнопку коммутатор принудительно переключается в режим «попеременный». Происходит одновременная прорисовка обоих каналов — эффект двухлучевого осциллографа. Когда кнопка отжата в двухканальном режиме, режим работы коммутатора выбирается автоматически, исходя из положения ручки время/дел.

CH 2 INV — инвертирование сигнала в канале 2 (для наблюдения разности сигналов).

4. Органы управления синхронизации (блок TRIGGER на рис. 8).

TRIGGER MODE — выбор режима работы запуска развертки:

AUTO: автоматический режим запуска развертки; используется, если нет сигнала синхронизации, или его частота меньше 25 Гц;

- NORM: ждущий режим: развертка запускается только при наличии входного сигнала;
- TV-V: синхронизация по вертикали (по кадрам, в работе не используется);
- TV-H: синхронизация по горизонтали (по строкам, в работе не используется).

SOURCE (источник) — выбирает режим внутренней/внешней синхронизации:

- CH 1: развертка синхронизируется сигналом с первого канала CH1(X).
- CH 2: развертка синхронизируется сигналом со второго канала CH2(Y).
- LINE (сеть): синхронизация от питающей сети переменного напряжения.
- EXT (внешний): развёртка синхронизируется внешним сигналом.

TRIG.ALT — при нажатии развертка поочередно синхронизируется сигналом с 1-го и 2-го каналов. В результате на экране осциллографа появляется устойчивая картина 1-го и 2-го каналов.

LEVEL (уровень) — выбирает уровень исследуемого сигнала, при котором происходит запуск развёртки.

SLOPE (наклон) — переключатель режима синхронизации развертки:

- «+»: по нарастанию (положительному перепаду) сигнала;
- «-»: по убыванию (отрицательному перепаду) сигнала.