Работа 1.1.6

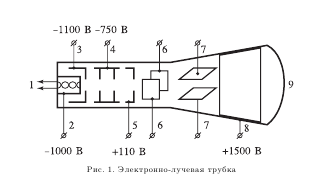
1. Аннотация

**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.

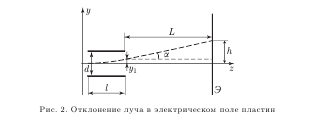
**В работе используются**: осциллограф (электронный и/или цифровой), генераторы электрических сигналов, соединительные кабели.

1. Теоретические сведения

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

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.



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

[Привлеките внимание читателя с помощью яркой цитаты из документа или используйте это место, чтобы выделить ключевой момент. Чтобы поместить это текстовое поле в любой части страницы, просто перетащите его.]

,. (1)

где ускорение находится из второго закона Ньютона:

. (2)

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

. (3)

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

, , (4)

где l — длина пластин. Полное смещение равно:

. (5)

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

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

*.*

(6)

Напряжённость поля между отклоняющими пластинами

(7)

,

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

(8)

.

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

(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 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 >> τ. При типичном ускоряющем напряжении = 2 кВ скорость электронов согласно (6) составляет ∼ м/с (заметим, что эта скорость много меньше скорости света, поэтому справедливы законы классической физики). Полагая l = 3 см, найдём время пролёта: τ ∼ с. Таким образом, положение электронного пучка на экране осциллографа будет пропорционально *мгновенному* значению напряжения согласно выражению (8), если характерное время сигнала составляет менее Tmin ∼ 1 нс, и, следовательно, частота переменного напряжения не превышает νmax ∼ 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 *усиливать*. 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 ∼ 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 и , 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 Ky = Uy/hy, Kx = Ux/hx (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:

(10)

.

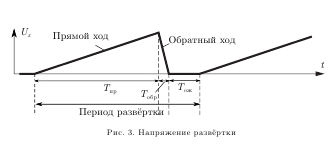
а на горизонтальные пластины подать так называемое *напряжение* *развёртки*, прямо пропорциональное времени t:

(11)

.

Здесь U0y и U0x — постоянные напряжения, задающие смещение графика сигнала на экране по осям Y и X соответственно (могут изменяться соответствующими ручками регулировки), Ky — коэффициент усиления сигнала по вертикальной оси, k — некоторая постоянная, зависящая от характеристик генератора развёртки. Тогда луч на экране «нарисует» график Uy(Ux), пропорциональный графику функции U(t).

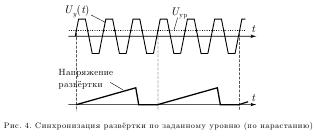
После того, как луч в процессе развёртки дойдёт до края экрана, развёртка должна быть запущена заново. В результате напряжение на горизонтальных пластинах будет иметь *пилообразную* форму. Это



напряжение, изображённое на рис. 3, вырабатывает *генератор* *внутренней* *развёртки* осциллографа. В течение времени *прямого хода луча* (Tпр) 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* (Tобр << Tпр), когда напряжение развёртки 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 развёртки, т.е. масштаб по оси X, задаётся 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* Tож, 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, быстропротекающих процессов важно получить на экране осциллографа *неподвижное* изображение сигнала. Для этого необходимо, чтобы период развёртки был кратен периоду изучаемого периодического сигнала — тогда повторная «прорисовка» пройдёт по тому же пути, что и предыдущая. Однако точное соотношение периодов соблюсти 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.



Наиболее часто используется способ синхронизации развёртки по уровню сигнала. Он поясняется осциллограммами на рис. 4. Периодический сигнал произвольной формы Uy сравнивается с некоторым *пороговым* напряжением Uур — *уровнем* *синхронизации* (устанавливается ручкой «УРОВЕНЬ» или «LEVEL» блока управления синхронизацией). После попадания в режим ожидания (на интервале Tож на рис. 3), прямая развёртка не запускается до тех пор, пока величина сигнала Uy не достигнет порогового значения Uур, 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 Uy не пересекает уровень Uур, то синхронизация оказывается невозможна.

Обычно предусмотрены два режима работы генератора внутренней развёртки: автоматический и ждущий (нормальный). В автоматическом режиме длительность ожидания Tож не может превышать некоторое максимальное время Tож,max. Если на максимальном интервале ожидания не произошло пересечения Uy и Uур, 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 Uy).

**Амплитудно-частотная и фазо-частоnная характеристики**. Осциллограф можно рассматривать как колебательную систему, отклонение которой возбуждается внешним источником. Как у любой колебательной системы, у осциллографа есть амплитудно-частная (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 . 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): . Причём амплитуда y0(ν) и фаза ϕ(ν) зависят от частоты сигнала ν. *Амплитудно – частотной* *характеристикой* (АЧХ) называют отношение

(12)

*.*

В «рабочем» режиме АЧХ постоянна K(ν) ≡ const, а в общем случае АЧХ является функцией *частоты* сигнала. *Фазо-частотной характеристикой* (ФЧХ) называют зависящую от частоты величину сдвига фаз ϕ(ν). 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 = Kmax в некотором широком диапазоне частот от νmin до νmax и начинает уменьшаться на частотах ν < νmin и ν > νmax. Диапазон [νmin,νmax] называется *полосой* *пропускания*. На практике значения граничных частот νmin и νmax принято определять по уменьшению коэффициента K до уровня :

.

Зависимость АЧХ и ФЧХ от частоты K(ν) и ∆Φ(ν) может приводить, например, к существенному искажению формы высокочастотных сигналов, а также импульсных сигналов с характерным временем T < 1/νmax. На низких частотах также возможны искажения, например, при использовании «закрытого» входа (см. ниже).

**Закрытый и открытый входы.** Входные каналы осциллографа могут работать в *закрытом* (маркируется как ∼ или AC) и *открытом* режиме ( 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∼. В открытом режиме подаётся как постоянная, так и *переменная* составляющие сигнала U = U= + U∼.

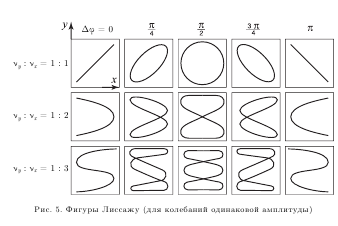
В закрытом режиме конденсатор не только не пропускает постоянную составляющую, но и сильно искажает любую медленно меняющуюся (низкочастотную) зависимость — из-за процесса зарядки/разрядки разделительного конденсатора. В связи с этим, *низкочастотные* АЧХ и ФЧХ закрытого входа могут существенно отличаться 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 наблюдения развёртки сигналов, в любом осциллографе предусмотрен режим совместной подачи двух сигналов Uy(t) и Ux(t) на вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины (режим «X–Y»). В результате на экране будет наблюдаться результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний.

Если сигналы

,



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 νy/νx равно отношению числа пересечений фигуры горизонтальной линией nx к числу пересечений с вертикальной линией ny: νy/νx = nx/ny.

При совпадении двух частот (νx = νy) 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:

(13)

)

, .

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

(14)

,

где .

Таким образом, фигура, которую описывает луч при сложении колебаний одинаковой частоту, представляет собой *эллипс*. В частных случаях эллипс может «вырождаться» в *окружность* (A = B, ∆ϕ = π/2) или в *прямую* *линию* (∆ϕ = 0). Ориентация эллипса зависит от соотношения амплитуд A/B и от разности фаз ∆ϕ. По форме эллипса можно измерить амплитуды и фазы сигналов. Амплитуды соответствуют максимальным отклонениям по соответствующим осям: A = |∆xmax|/2 и B = |∆ymax|/2. Разность фаз можно найти, например, положив в уравнении (14) x = 0 — тогда |sin∆ϕ| = |y0|/B, где y0 = 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.

1. Результаты измерений и обработка данных
2. Результаты измерения частоты наблюдаемого сигнала.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| , Гц | T, дел | TIME/DIV | T, мс | , Гц | , Гц | , Гц |
| 1061 | 1,8 | 0,5 ms | 0,9 | 1111 | 62 | 50 |
| 1305 | 3,8 | 0,2 ms | 0,76 | 1315 | 35 | 10 |
| 1714 | 2,8 | 0,2 ms | 0,56 | 1785 | 64 | 71 |
| 2007 | 5 | 0,1 ms | 0,5 | 2000 | 40 | 7 |
| 2528 | 2 | 0,2 ms | 0,4 | 2500 | 125 | 28 |
| 2334 | 4,2 | 0,1 ms | 0,42 | 2381 | 57 | 47 |
| 3008 | 3,3 | 0,1 ms | 0,33 | 3030 | 92 | 22 |

Относительная погрешность измерения частоты составила 4%. Данный результат свидетельствует о высокой точности измерений.

1. Результаты измерения максимальной и минимальной амплитуды измерений.

,

,

,

.

,

,

,

Полученные значения отношений амплитуд соответствуют расчётным.