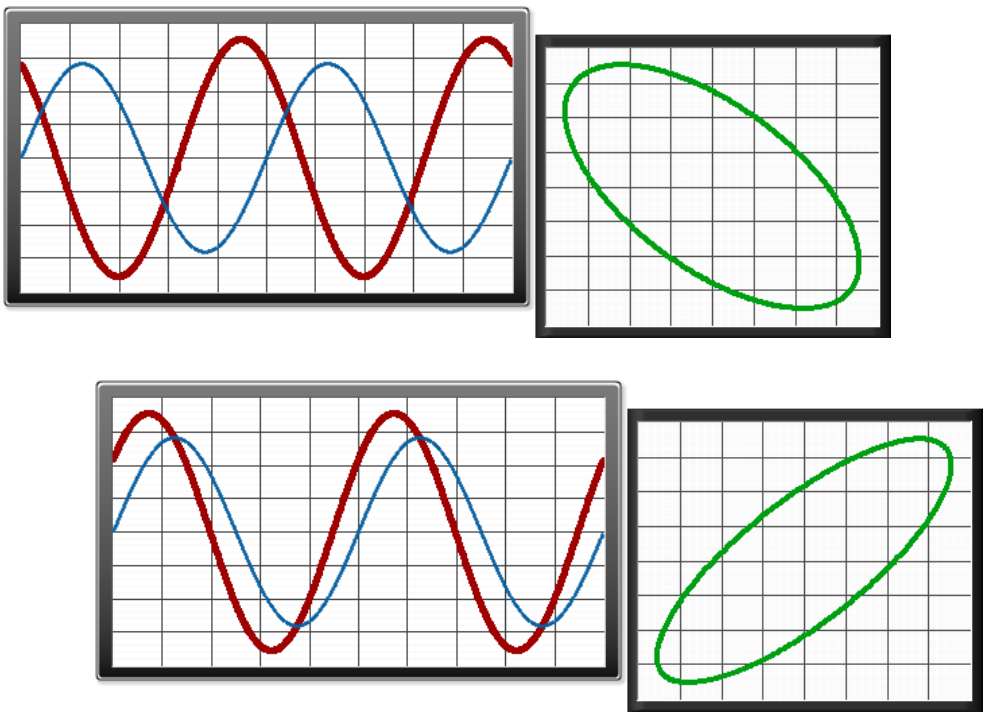
Физический факультет МГУ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Практикум
ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ананьева Н.Г., Самойлов В.Н., Киров С.А.

Лабораторная работа 4
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ



Москва 2012

Электронно-лучевой осциллограф.

Лабораторная работа 4 (практикум “Введение в технику эксперимента”). Учебное пособие / Н.Г. Ананьева, В.Н. Самойлов, С.А. Киров – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2012. 23 с.

Учебное пособие написано на основании многолетнего опыта проведения занятий в практикуме “Введение в технику эксперимента” на физическом факультете МГУ. Оно включает описание принципов работы осциллографа и его основных узлов; методов измерения параметров синусоидальных и импульсных сигналов (напряжения, временных интервалов, частоты сигнала, фазовых сдвигов) с помощью осциллографа.

Пособие предназначено для студентов физического факультета МГУ и для преподавателей, ведущих занятия в практикуме. Излагаемый материал может быть использован также для подготовки к выполнению задач раздела “Электричество и магнетизм” общего физического практикума.

Рецензенты: д.ф.-м.н., профессор *О.С. Колотов*,
д.ф.-м.н., профессор *А.М. Шипилин.*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... **4**

1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА. **4**

1.1 Электронная пушка 5
1.2 Принцип образования осциллограммы 6

2. БЛОК-СХЕМА ОСЦИЛЛОГРАФА **9**

2.1. Канал вертикального отклонения 9
2.2. Канал горизонтального отклонения 10
2.3 Калибратор 11

3. ТЕХНИКА ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.. **11**

3.1. Измерение напряжения 11
Метод калиброванных шкал 11
Метод сравнения 12
3.2. Измерение интервалов времени 12
Метод калиброванной развертки. 13
3.3. Измерение частоты сигнала 13
3.4. Измерение фазовых сдвигов. 14

4. АНАЛИЗ СИГНАЛОВ. **17**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. **17**

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ **17**

Упражнение 1. Контроль правильности измерений. 19
Упражнение 2. Измерение частоты неизвестного синусоидального сигнала……..... 20
Упражнение 3. Измерение параметров импульсного сигнала…. ……..21
Упражнение 4. Измерение фазового сдвига синусоидальных сигналов .. 21

Литература:…….. **22**

ВВЕДЕНИЕ

Осциллограф – это прибор, который позволяет наблюдать на экране форму электрических сигналов (то есть зависимость напряжения от времени) и измерять их параметры. Это – один из основных приборов физической лаборатории. Его преимуществами по сравнению с другими измерительными приборами являются наглядность восприятия информации и универсальность – можно измерять сразу несколько параметров сигнала. К недостаткам можно отнести небольшую точность (до 2–5%) и относительно большую трудоемкость измерений. С помощью осциллографа можно измерять все параметры любых сигналов, в то время как более точные специализированные приборы измеряют обычно какой-то один параметр, и, главное, рассчитаны только на сигнал определенной формы (наиболее распространены приборы для измерения параметров гармонических сигналов). Поэтому они могут давать большие и неконтролируемые погрешности при отклонении сигнала от "стандартного" вида. Таким образом, наличие осциллографа как контролирующего прибора необходимо и при использовании других, более точных измерительных приборов, особенно, если форма сигнала не известна и может изменяться в процессе измерений.

По назначению и принципу действия осциллографы разделяются на аналоговые (универсальные, запоминающие, стробоскопические, скоростные, специальные) и цифровые.

В последнее время широко используются цифровые измерительные приборы, выполненные в формате стандартных плат расширения персональных ЭВМ или сопряженные с ЭВМ по шине USB, которые могут выполнять и функцию осциллографа с выдачей осциллограммы на монитор ЭВМ. Большим удобством таких устройств является их полная интеграция с ЭВМ, что облегчает регистрацию результатов и их обработку в реальном времени.

Данная задача посвящена ознакомлению с **универсальным аналоговым осциллографом.**

Прежде, чем приступать к работе с любым прибором, необходимо изучить его техническое описание и инструкцию по эксплуатации. Задача облегчается тем, что у аналоговых осциллографов различных типов есть много общего: общие принципы построения и работы, изучив которые, можно значительно быстрее разобраться в работе конкретного прибора. И при переходе в работе от одного типа осциллографа к другому не должны возникать серьезные затруднения.

1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА.

Главным узлом любого аналогового осциллографа является электронно-лучевая трубка – ЭЛТ, поэтому осциллограф и называется электроннолучевым. Схематически устройство ЭЛТ показано на ***рис. 1***.

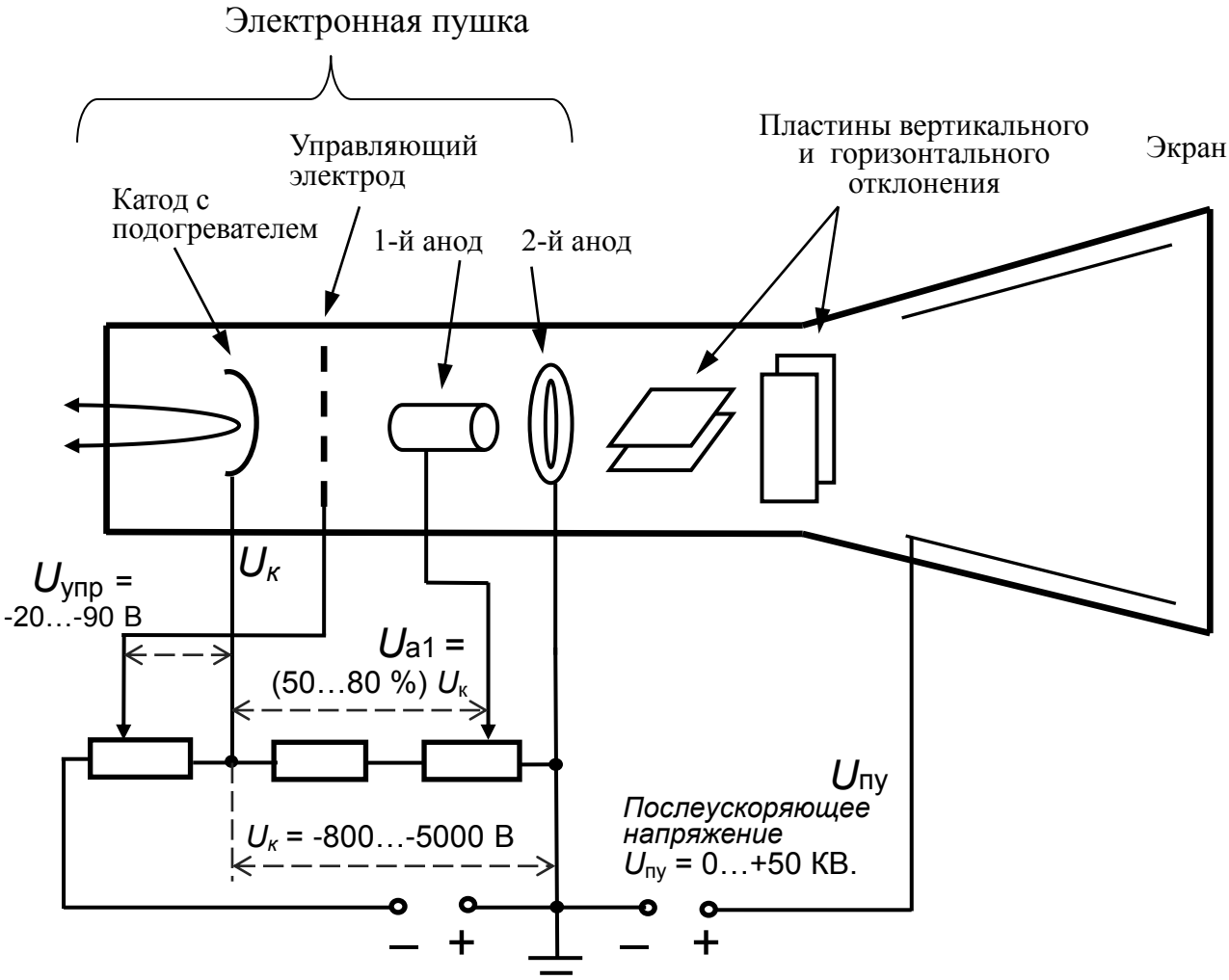


Рис. 1. *Упрощенная схема электронно-лучевой трубки и схема ее питания.*

1.1 Электронная пушка

Электронная пушка создает и фокусирует электронный луч. Электроны испускаются из ***катода***, подогреваемого до температуры, достаточной для термоэлектронной эмиссии, и затем ускоряются в электрическом поле между катодом и ***анодом***. И затем, до экрана, они пролетают в области почти постоянного потенциала *($U_{пу}$)*. В конечном итоге, пролетев по всей трубке, электроны соударяются с флюоресцирующим слоем на внутренней поверхности экрана – люминофором, и вызывают его свечение. Яркость свечения определяется количеством энергии в единицу времени, сообщенной электронами люминофору (т.е. кинетической энергией электронов и их плотностью в электронном луче). С экрана электроны "стекают" на положительный полюс источника питания (люминофор не токопроводен, поэтому на экран наносится тонкий токопроводящий слой, обычно из алюминия, прозрачный для быстрых электронов).

Катод помещен внутрь цилиндра с отверстием – это ***управляющий электрод***, на него подается отрицательный (по отношению к катоду) потенциал. Изменяя его величину, можно регулировать число электронов в пучке, а значит, ***яркость*** свечения пятна на экране (с помощью ручки, обозначенной на лицевой панели

словом "яркость" или значком "☼"). Фокусировка луча осуществляется электростатическим полем, создаваемым анодами. Регулируя напряжение на 1-м аноде, можно изменять электростатическое поле и фокусировать изображение электронного луча на экране ЭЛТ (с помощью ручки "фокус" или "⦿").

1.2 Принцип образования осциллограммы

Положение светового пятна на экране зависит от напряжений, приложенных к горизонтально – (X) и вертикально – (Y) отклоняющим пластинам. Отклонение световой точки на экране прямо пропорционально напряжению, приложенному к соответствующей паре отклоняющих пластин. Если на Y-пластины подать переменное напряжение U_y, например, синусоидальное, то электронный луч начнет колебаться в вертикальном направлении. При достаточно большой частоте колебаний U_y (более 20–50 Гц) электронный луч на экране трубки "прочертит" светящуюся вертикальную линию (***рис. 2а***). Аналогично, переменное напряжение, подаваемое только на горизонтально отклоняющие пластины X – U_x, даст горизонтальную линию.

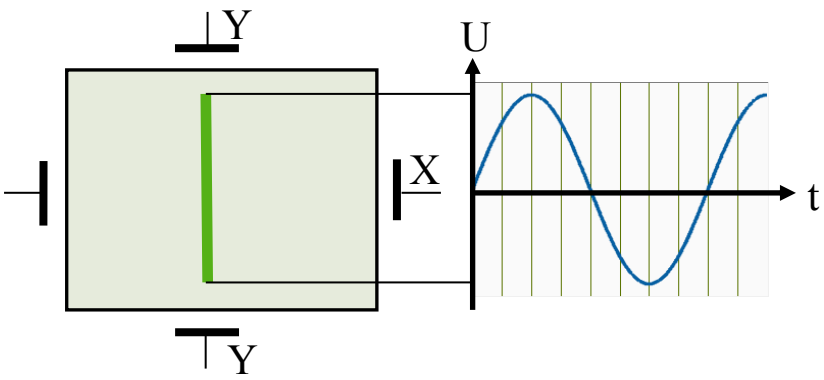


Рис. 2а. *Принцип образования осциллограммы.*

Если одновременно подать переменные напряжения U_y и U_x на обе пары пластин, можно получить различные осциллограммы. Например, подавая на пластины X и Y два синусоидальных сигнала с определенными соотношениями частот и фаз, можно наблюдать неподвижные замкнутые кривые, фигуры Лиссажу́ (некоторые из которых изображены на ***рис. 2б*** и ***рис. 3***). Если не соблюдается строгое соответствие частот, фигура Лиссажу не будет неподвижной, и по скорости ее эволюции можно оценить расстройку частот.

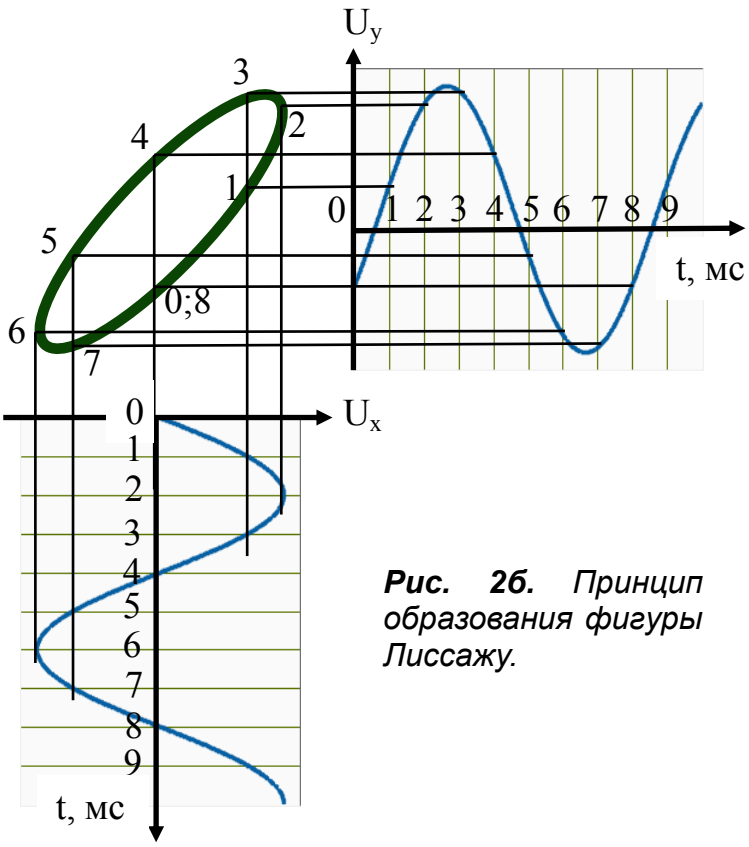


Рис. 2б. *Принцип образования фигуры Лиссажу.*

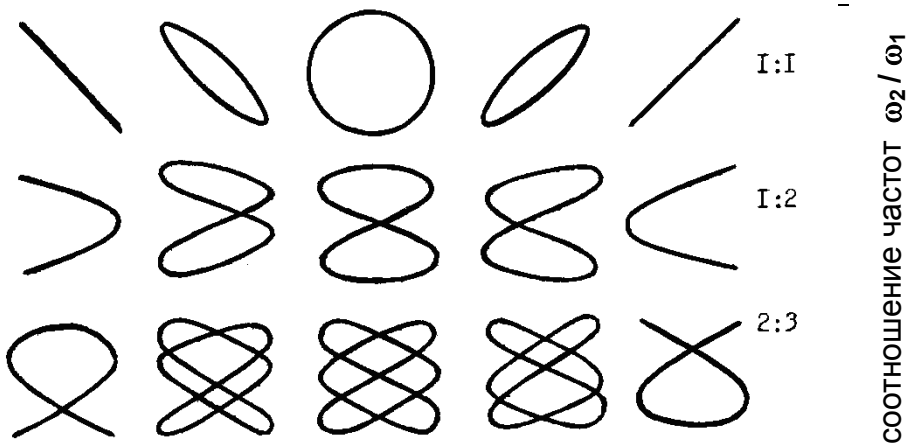


Рис. 3. *Фигуры Лиссажу́ для двух синусоидальных сигналов с различными соотношениями частот и фаз.*

В большинстве случаев нужно наблюдать какой-либо периодический сигнал в зависимости от времени. Для получения его действительной формы $U_y = f(t)$ напряжение U_x должно быть пропорционально времени. Например, на ***рис. 4***: за время $t = 9$ мсек точка один раз "пробежала" по синусоиде по экрану – получили однократную осциллограмму.

Существуют запоминающие осциллографы – способные фиксировать однократную осциллограмму. В обычных осциллографах для того, чтобы получить неподвижную картину, необходимо, чтобы однократная осциллограмма не менее 10-50 раз в секунду повторялась (это связано с временем послесвечения люминофора и временем релаксации глаза) – и каждый раз приходилась на одни и те же точки экрана. Для этого нужно:

1 – чтобы линейно нарастающее напряжение периодически повторялось – такое напряжение называется пилообразным (***рис. 5***). Оно вырабатывается специальным генератором напряжения развертки, который встроен в осциллограф (см. блок-схему осциллографа, ***рис. 7***);

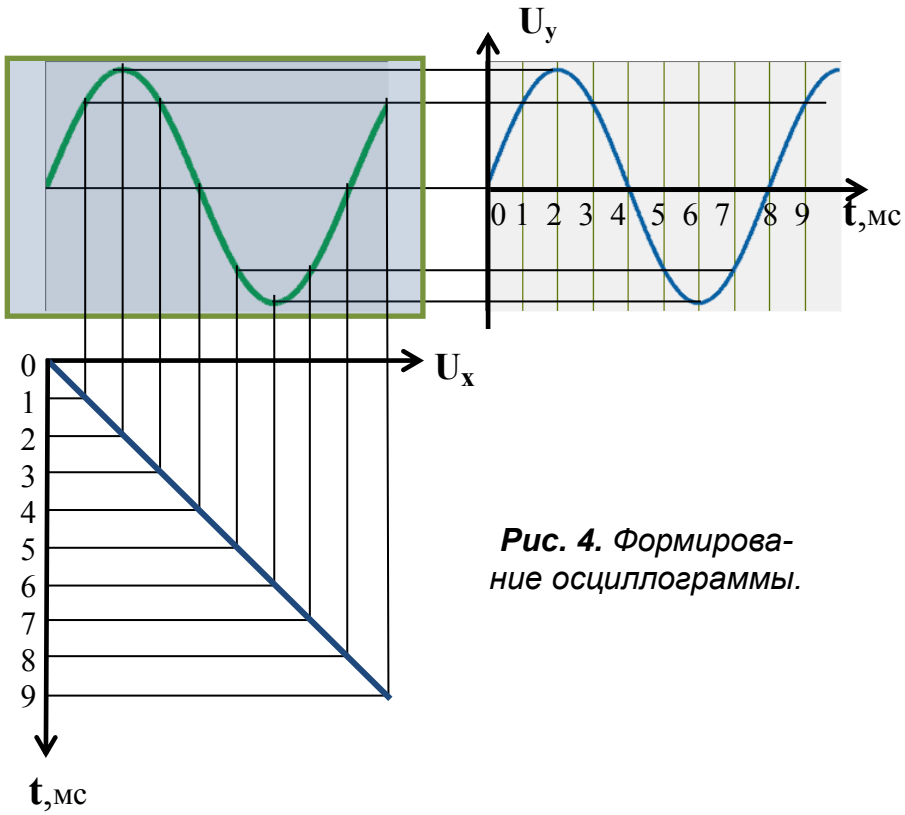


Рис. 4. *Формирование осциллограммы.*

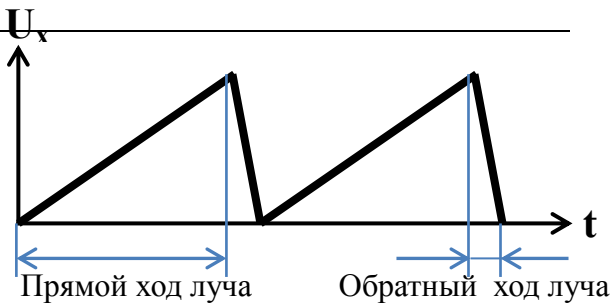


Рис. 5. *Пилообразное напряжение. Во время обратного хода луч гасится.*

2 – чтобы период пилообразного напряжения был равен или кратен периоду исследуемого сигнала (***рис. 6***). Добиться этого ручной установкой периода практически невозможно из-за неизбежной нестабильности как периода развертки, так и периода сигнала. Поэтому в осциллографе имеется **БЛОК СИНХРОНИЗАЦИИ**, выполняющий автоматическую подстройку периода развертки. **Процесс подстройки частоты повторения пилообразного напряжения до значения, равного или кратного частоте сигнала U_y, называется синхронизацией.** В зависимости от

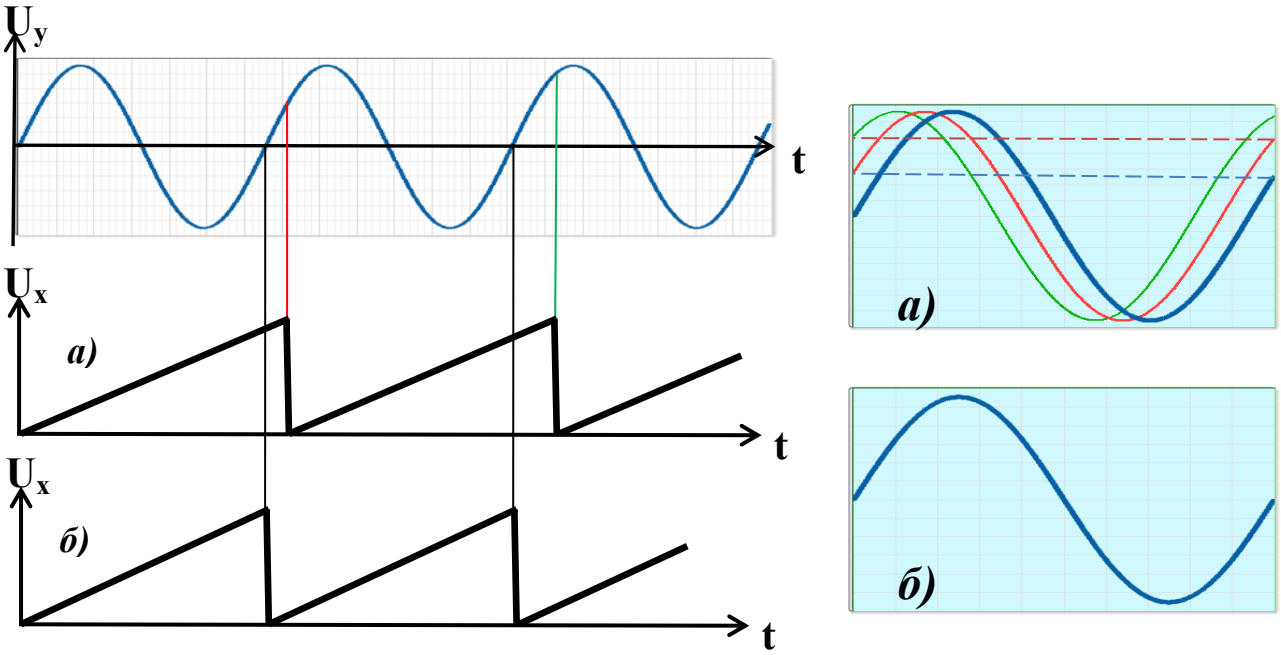


Рис. 6. *а) Образование "бегущей синусоиды": период сигнала U_y отличен от периода повторения пилообразного напряжения U_x.*
б) *Неподвижная* картина: периоды сигналов U_y и U_x равны.

того, какой сигнал управляет схемой синхронизации, различают три вида синхронизации: внутреннюю, внешнюю и от сети (***рис.*** *7*).

При **внутренней синхронизации** исследуемый сигнал поступает на вход "**Y**" и уже внутри осциллографа разделяется: часть его идет на вертикально отклоняющие пластины, часть - в блок синхронизации. Таким образом, исследуемый сигнал сам управляет разверткой осциллографа.

При **внешней синхронизации** исследуемый сигнал с входа "**Y**" идет только на пластины вертикального отклонения, а в блок синхронизации сигнал пойдет с входа "**X**" – его нужно специально подать на вход "**X**" извне. Для получения неподвижной картинки частоты сигналов с входов "**X**" и "**Y**" должны быть точно равны или кратны друг другу! Поэтому сигналы с входов "**X**" и "**Y**" должны

быть жестко связаны: например, если исследуемый сигнал подвергся каким-то преобразованиям и стал недостаточен по амплитуде или непригоден по форме для синхронизации (например, содержит шумы), то в блок синхронизации целесообразно подать «хороший» непреобразованный сигнал. Режим **внешней синхронизации** – основной при исследовании импульсных систем, например, блоков ЭВМ.

Синхронизация от сети обычно используется для проверки узлов приборов, связанных с преобразованием питающего напряжения от силовой сети (трансформаторов, выпрямителей, стабилизаторов и т.д.). На вход "**X**" ничего подавать не надо (часть напряжения от промышленной сети 50 Гц будет выделена и подана в блок синхронизации).

2. БЛОК-СХЕМА ОСЦИЛЛОГРАФА

2.1. Канал вертикального отклонения

– усиливает или ослабляет сигнал до значения, удобного для изучения (ручки управления: "**В/дел**" или "**мВ/дел**", где **деление – это большая клетка на**

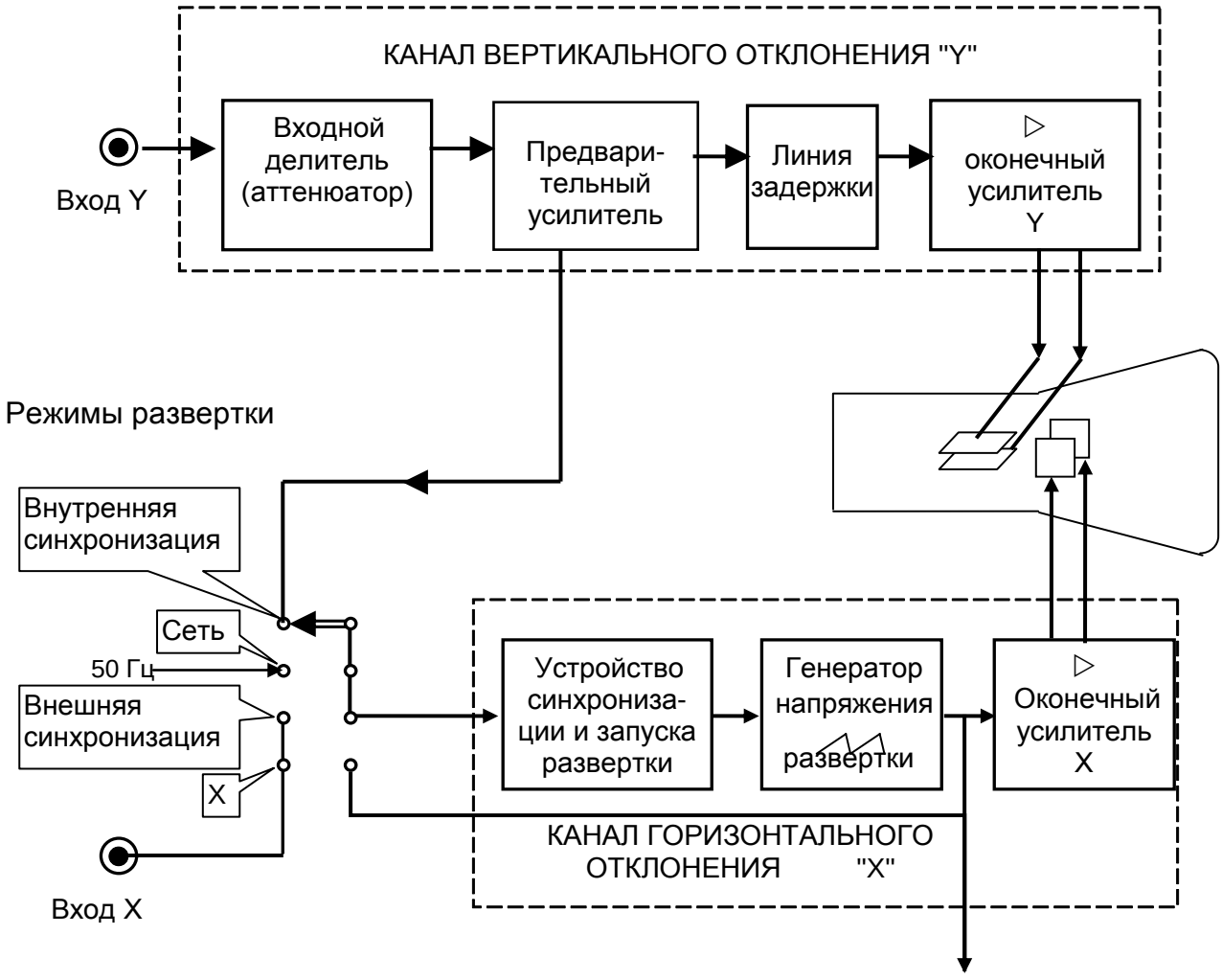


Рис. 7. *Блок-схема осциллографа.*

шкале экрана трубки). Линия задержки задерживает сигнал на некоторое время (обычно около 0,25 мкс), необходимое для запуска генератора горизонтальной развертки схемой синхронизации – это позволяет наблюдать начальный участок сигнала.

2.2. Канал горизонтального отклонения

– обеспечивает формирование напряжения развертки для перемещения луча по горизонтали или регулировку напряжения, поданного на вход "**X**" извне (например, при получении фигур Лиссажу).

ГЕНЕРАТОР РАЗВЕРТКИ – основной узел канала **X**. Он формирует пилообразное напряжение. Генератор может работать в автоколебательном или ждущем режиме.

В автоколебательном режиме генератор непрерывно вырабатывает пилообразное напряжение. Этот режим используется для наблюдения гармонических, а также периодических импульсных сигналов с небольшой скважностью (т.е. когда импульс занимает значительную часть периода сигнала: скважность – это отношение периода сигнала к длительности импульса, см. ***рис. 17***) .

В **ждущем режиме** генератор вырабатывает единичный линейно нарастающий «зубец» пилы только тогда, когда приходит сигнал запуска (сигнал синхронизации). Запуск следующего «зубца» осуществляется следующим импульсом синхронизации, но *только после того, как закончился ранее начатый ход развертки.* Этот режим оптимален для наблюдения непериодических сигналов или сигналов с очень большим периодом.

Генератор развертки, кроме пилообразного напряжения для отклонения луча, вырабатывает отрицательный гасящий импульс, который подается на модулятор ЭЛТ и запирает ее на время обратного хода луча, чтобы на экране не прочерчивалась линия возврата луча.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СИНХРОНИЗАЦИИ. Устройство синхронизации и запуска развертки формирует импульс запуска, форма и амплитуда которого не зависят от формы и амплитуды исследуемого сигнала. Импульс запуска в ждущем режиме «осуществляет» запуск развертки, в автоколебательном – ее синхронизацию. Причем в автоколебательном режиме пилообразное напряжение вырабатывается непрерывно, даже при отсутствии импульса запуска, однако изображение в этом случае получается неустойчивое ввиду возможного несоответствия периодов сигнала и развертки.

Коррекция развертки происходит за счет изменения периода развертки и происходит в этом случае ***только за счет изменения точки начала обратного хода «пилы»***, т.е. без изменения наклона прямого хода "пилы" развертки.

Параметры прямого хода напряжения «зубца пилы» – его длительность, наклон и амплитуда "пилы" – не должны меняться, так как это привело бы к нарушению масштаба сетки по оси времени – X (определяется наклоном «зубца пилы») и горизонтального размера изображения (определяется амплитудой «зубца пилы»).

Формирование импульса запуска происходит в тот момент времени, когда напряжение исследуемого входного сигнала становится равным заданному уровню напряжения $U_{ур}$ (***рис. 8***). Таким образом, начало развертки "привязывается" к определенной точке исследуемого сигнала. Регулировать уровень запуска $U_{ур}$ можно ручкой управления "**уровень**". Импульс запуска может формироваться как при пересечении уровнем запуска переднего (возрастающего) фронта сигнала (переключатель режима синхронизации "⎍"или "+"), так и при пересечении спадающей части сигнала ("⎏" или "–").

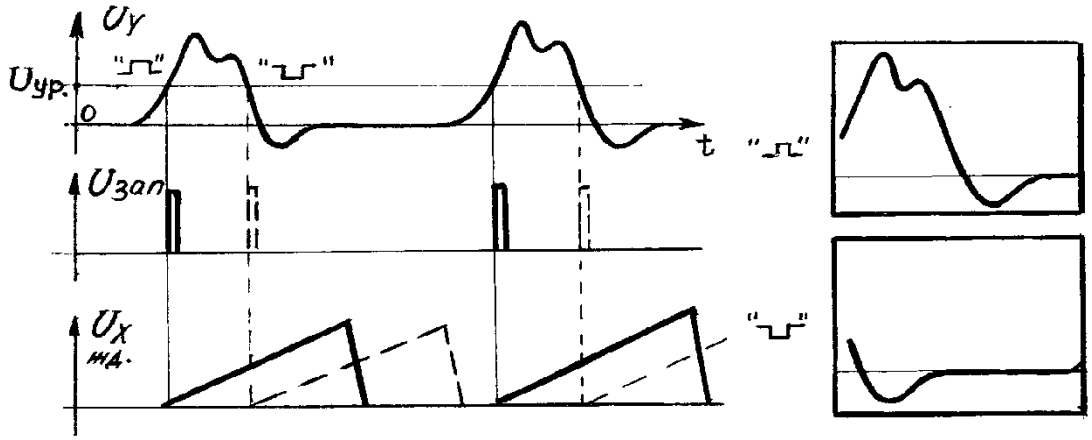


Рис. 8. *Формирование импульса запуска. Ждущий режим развертки.*

2.3 Калибратор

Встроенный в осциллограф **КАЛИБРАТОР** (набор высокостабильных эталонных генераторов сигналов) позволяет с достаточной точностью калибровать масштабную сетку по оси Y (напряжение сигнала) и по оси X (напряжение развертки, определяющее масштаб времени).

3. ТЕХНИКА ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Измерение напряжения

1. Измерение напряжения с помощью калиброванных шкал

Это основной метод измерения. Напряжение сигнала измеряется по калиброванной масштабной сетке на экране осциллографа. Цена деления сетки в вольтах на деление указывается на переключателе чувствительности осциллографа. При наличии ручки плавной регулировки чувствительности указанный масштаб получается лишь при **одном ее положении, фиксируемом при повороте** (это положение обычно обозначается специальной меткой у ручки). Из-за влияния ряда факторов – погрешностей калибровки, визуального отсчета, нелинейной амплитудной характеристики канала вертикального отклонения и т.д. – этот метод дает **погрешность измерения напряжения** около 5% (**конкретные значения приведены в техническом описании конкретного прибора**).

Погрешность отсчета включает в себя две составляющие:
погрешность совмещения линий осциллограммы с линиями шкалы и погрешность отсчета из-за конечной ширины линии. Погрешность совмещения принимается равной $b/5$, погрешность отсчета – $b/3$, где b – ширина луча. Поскольку они независимы, то относительная погрешность отсчета составляет $\sigma_{отн} = \frac{1}{H}\sqrt{\left(\frac{b}{5}\right)^2 + \left(\frac{b}{3}\right)^2} \approx 0.4\frac{b}{H}$, где H – размер измеряемого участка изображения на экране. Относительная погрешность уменьшается с увеличением размеров изображения H. **Чтобы относительная погрешность измерения была минимальна, изображение измеряемой части исследуемого сигнала должно занимать 80–90% рабочей площади экрана.** На экране многих осциллографов есть две пунктирные горизонтальные линии, которые ограничивают область, в которой гарантируется указанная в описании точность измерения напряжений. Измеряемая часть сигнала не должна выходить за ее границы.

2. Измерение напряжения путем сравнения

Этот метод позволяет увеличить точность измерений за счет исключения погрешностей, связанных с нелинейностью амплитудной характеристики и геометрическими искажениями ЭЛТ. Осциллограф используется лишь как устройство сравнения исследуемого сигнала с эталонным, а изображение – как индикатор сравнения. Этот метод имеет два варианта.

***Способ замещения**. Сначала получают на экране осциллографа изображение исследуемого сигнала и по шкале замеряют необходимую характеристику. Затем, вместо этого сигнала подают на вход Y регулируемое образцовое напряжение (усиление Y не изменять!). Меняя его величину, добиваются совмещения его с измеряемой характеристикой сигнала и считывают его величину с источника образцового напряжения. Погрешность измерения определяется, в основном, погрешностью образцового напряжения и погрешностью совмещения линий, и может быть не хуже 1–2%.*

***Компенсационный способ** обеспечивает компенсацию исследуемого сигнала с помощью образцового (постоянного) напряжения, подаваемого на вход **"Y"** в сумме с исследуемым сигналом. Регулируя образцовое напряжение, обеспечивают смещение положения сигнала до тех пор, пока измеряемая точка сигнала не совместиться с нулевой линией. Погрешность метода определяется аналогично предыдущему способу.*

3.2. Измерение интервалов времени

*Раньше в осциллографах для измерения длительности сигнала использовались яркостные метки. Эти метки можно получить, модулируя электронный луч ЭЛТ по яркости переменным сигналом (**рис.9**). Зная период модулирующего сигнала и подсчитав число меток, можно найти длительность исследуемого сигнала. Погрешность измерения данным методом обычно составляет 2%. Однако при увеличении диапазонов развертки (при исследовании сигналов*

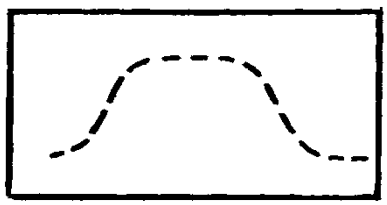


***Рис. 9.** Определение длительности импульса с помощью меток времени.*

все большей частоты) необходимо усложнять калибраторы. Кроме того, подсчет большого числа мелких меток на экране трудоемок и неудобен. Поэтому сейчас более распространены осциллографы с ***калиброванной разверткой*** *(хотя точность измерения при этом ниже – порядка 5%).*

Метод калиброванной развертки

Определение временного интервала T осуществляется по размеру исследуемого участка M (в делениях) на экране и значению установленного масштаба развертки k (время/деление): $T = k \cdot M$. В этом случае сетка по оси X является шкалой, цена деления которой k (большая клетка на шкале) указывается на переключателе диапазона развертки осциллографа. Погрешность измерения складывается из **инструментальной погрешности прибора** (неточность начальной калибровки осциллографа, нелинейность канала X) – она обычно дается в техническом описании, и **ошибки считывания** по шкале (дискретность шкалы, конечная ширина луча).

Для повышения точности измерения можно использовать ***МЕТОД СРАВНЕНИЯ****. Этот метод предусматривает использование осциллографа в качестве устройства сравнения измеряемого интервала времени с эталонным сигналом известного периода (аналогично измерению амплитуды). Погрешность этого метода определяется погрешностью эталонного генератора и погрешностью считывания. Измерения методом сравнения наиболее удобно проводить на двухлучевом осциллографе при одновременном наблюдении на экране обоих сигналов.*

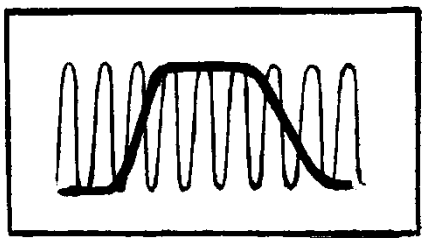


Рис. 10. *Определение длительности импульса методом сравнения.*

3.3. Измерение частоты сигнала

Существует довольно много методов измерения частоты сигналов с помощью осциллографа. Рассмотрим два наиболее простых.

1. Частоту сигнала f можно вычислить ***из его периода T*** по формуле $f = 1/T$. Погрешность измерения соответствует погрешности измерения периода.

2. Можно определить частоту синусоидального сигнала ***с помощью фигур Лиссажу*** (см. раздел 1.2, ***рис. 3***). Для определения соотношения частот нужно сосчитать, сколько колебаний совершает луч по одной и другой оси при полном обходе всей фигуры (сколько максимумов по вертикали и горизонтали на картине) (см. ***рис. 11***). Если за время t полного обхода лучом всей фигуры луч совершил n колебаний по вертикали (канал Y) и m колебаний по горизонтали (канал X), значит: $t = nT_y = mT_x$ и $\frac{n}{f_y} = \frac{m}{f_x}$ или $f_y = \frac{n}{m} f_x$.

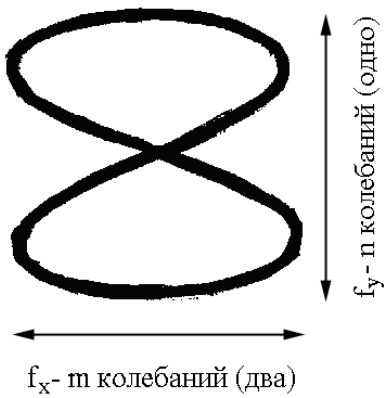


Рис. 11. *Определение частоты по фигурам Лиссажу.*

Погрешность при строгом выполнении кратности частот (когда картина абсолютно неподвижна) определяется погрешностью установки частоты эталонного сигнала. Эталонный сигнал целесообразно подать на ось X, поскольку обычно удобный для измерений горизонтальный размер фигуры можно подобрать изменением амплитуды эталонного сигнала.

3.4. Измерение фазовых сдвигов

Для гармонического сигнала $U(t) = U_0 \sin(\omega t+\varphi_0)$ фазой называют аргумент синуса $(\omega t+\varphi_0)$, где φ_0 – начальная фаза колебаний. Значение фазы зависит от выбранного начала отсчета времени, поэтому физический смысл имеет сдвиг фаз $\Delta\varphi$ или разность фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ двух сигналов с **одинаковыми частотами**. Измеряется фаза в угловых единицах – радианах или градусах.

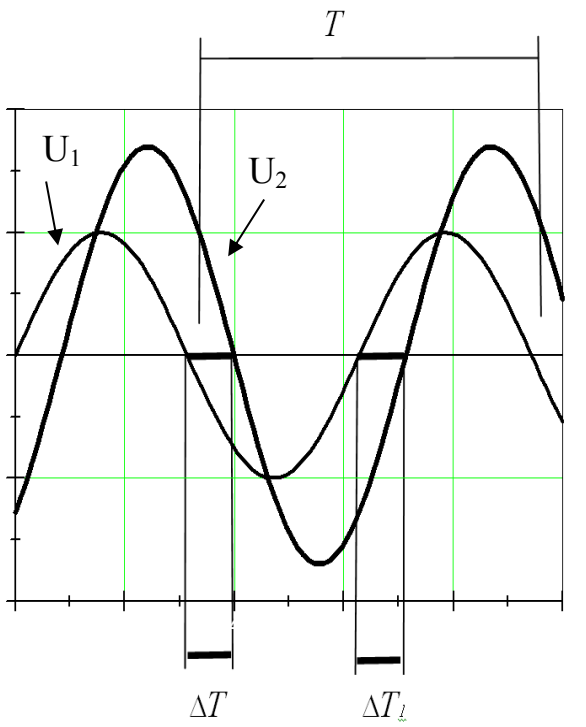


Рис. 12. *Измерение разности фаз из временного сдвига синусоид.*

Нахождение фазового сдвига из временного интервала.

Временной сдвиг двух сигналов легче всего наблюдать ***на двухлучевых или двухканальных осциллографах***[1]**.** На экране получают неподвижную картину двух осциллограмм (***рис. 12***). Поскольку весь период T соответствует углу 360°, разность фаз определяется из соотношения: $\Delta\varphi = 360° \cdot \Delta T/T$.

Как по картине на экране осциллографа определить, какой из сигналов опережает "по фазе" другой сигнал? Поскольку сигналы периодичны, фазовый сдвиг приводится в интервале $-180° < \Delta\varphi < +180°$. Сигнал U_1 опережает по фазе сигнал U_2 на $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi > 0$, если соответствующие точки сигнала U_1 (например, максимум, или нулевая точка) достигаются раньше, чем у сигнала U_2 (***рис.12***).

При измерении сдвига фаз на осциллографе надо внимательно следить, чтобы сигналы были строго симметричны оси X (Y=0). Например, на ***рис. 13*** сигнал

[1]В двухлучевом осциллографе две электронных пушки и по две пары отклоняющих пластин по «X» и по «Y»; в двухканальном – одна электронная пушка и по паре отклоняющих пластин по «X» и по «Y», два сигнала формируются по очереди.

U_2 несколько смещен по вертикали вниз, как это может реально получится на экране осциллографа во время проведения измерений, и измерение сдвига фаз по временному сдвигу ΔT_1 будет неверным. Это становится очевидным, если обратить внимание, что отрезки между синусоидами по оси X по переднему фронту и срезу не равны. Поэтому для проверки правильности расположения сигналов надо промерить временные интервалы между сигналами по переднему фронту и по срезу (***рис.12***). Удобно проводить измерения, когда амплитуды сигналов одинаковы. Выровнять амплитуды сигналов можно, используя ручку плавной регулировки усилителей каналов Y.

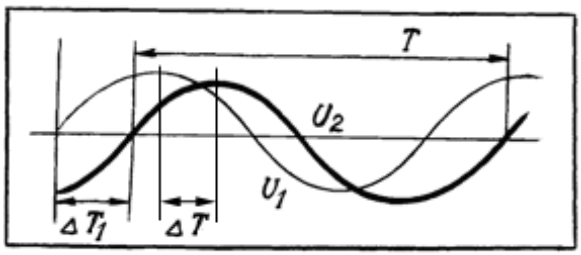


Рис. 13. *Неверное измерение разности фаз из временного сдвига синусоид ΔT_1.*

На ***однолучевом осциллографе*** процедура измерения сложнее и содержит два этапа:

а) Получают устойчивое изображение одного из сигналов U_1 в режиме **ВНЕШНЕЙ** синхронизации *самим сигналом*, то есть подавая его одновременно на вход **Y** и на вход синхронизации **X**. Регулируют уровень синхронизации таким образом, чтобы какая-либо характерная точка (например, $y = 0$) попала на начало развертки (***рис. 12,*** *сигнал* U_1);

б) Подают на вход Y осциллографа второй сигнал U_2, сохраняя синхронизацию от ***первого сигнала*** U_1 (регулировку УРОВЕНЬ не изменять!). Поскольку начало развертки по-прежнему определяется *первым сигналом*, второй сигнал будет сдвинут от начала. Временной сдвиг ΔT определяется по сдвигу от начала развертки до аналогичной характерной точки ($y = 0$) второго сигнала.

Таким образом, мы по очереди получаем на экране синусоидальные сигналы, аналогичные ***рис. 12***. Измерения целесообразно провести дважды: используя внешнюю синхронизацию по переднему фронту и срезу.

В методе ЭЛЛИПСА фазовый сдвиг определяется по фигуре Лиссажу.

Движение луча по горизонтали и вертикали в параметрическом виде описывается уравнениями:

$x = x_o \sin\omega t$; $\quad y = y_o \sin(\omega t+\varphi)$.

Для вертикального отклонения луча имеем

$y = y_o (\sin\omega t \cos\varphi + \cos\omega t \sin\varphi)$.

Подставляем в это равенство

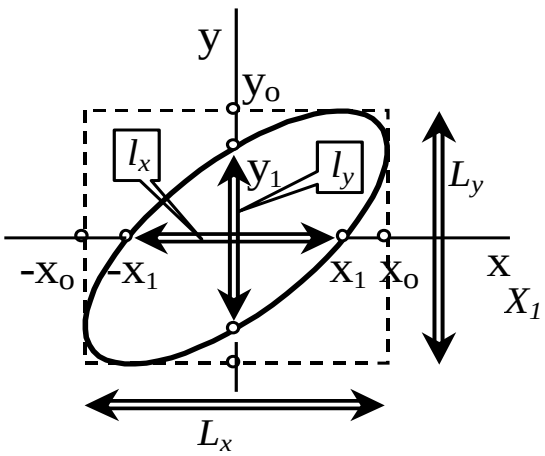


Рис. 14. *Определение фазового сдвига методом эллипса.*

$$\sin\omega t = \frac{x}{x_0} \quad (\text{и} \quad \cos\omega t = \sqrt{1-\left(\frac{x}{x_0}\right)^2}\ ),$$

получим уравнение движения точки:

$$\left(\frac{y}{y_0}\right)^2 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^2 - 2\left(\frac{y}{y_0}\right)\left(\frac{x}{x_0}\right)\cos\varphi = \sin^2\varphi.$$

Это – уравнение эллипса, главные оси которого повернуты относительно осей x и y на некоторый угол (***рис. 14***). Координаты пересечений эллипса с осью ox определяются из условия $y = 0$, откуда следует

$(x_1/x_0)^2 = \sin^2\varphi$, т.е. $\sin\varphi = \pm x_1/x_0 = \pm l_x/L_x$.

Аналогично, рассматривая координаты пересечений эллипса с осью oy, легко получить $\pm y_1/y_0 = \sin\varphi$. Таким образом, угол сдвига фаз можно найти из характерных размеров эллипса

$$\sin\varphi = \pm l_x/L_x = \pm l_y/L_y.$$

При определении φ нужно учесть направление движения луча и наклон эллипса (***рис. 15***). Погрешность метода резко возрастает при углах, близких к 90°, когда размеры l_x и L_x сближаются. Поэтому методом эллипса целесообразно измерять сдвиги фаз до 40°–50°. Точность измерений определяется точностью измерения размеров эллипсов, и для малых углов не превышает 2–3 %. Систематическую

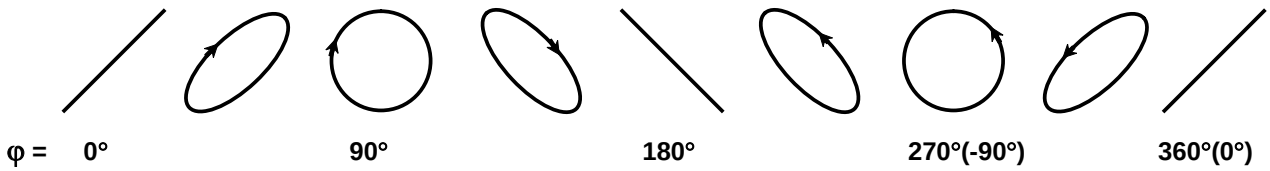


Рис. 15. *Форма эллипса в зависимости от фазового сдвига.*

ошибку, возникающую из-за неодинаковости фазовых сдвигов в каналах X и Y осциллографа, можно легко учесть. Для этого на оба канала одновременно подают один и тот же сигнал. Если на экране наблюдается не прямая линия, а эллипс, значит, в осциллографе имеется постоянный фазовый сдвиг, величину которого можно определить по параметрам получившегося эллипса. Этот сдвиг представляет систематическую ошибку, которую нужно вычитать из полученного результата.

Недостатком данного метода является его неоднозначность. Эволюция эллипса с ростом сдвига фаз показана на ***рис. 15***. Поскольку на частотах, превышающих 5–10 Гц, направление движения луча на экране не видно, эллипс выглядит одинаково для двух разных значений углов $\varphi_{1,2} = \pm\varphi$. Для разрешения данной неоднозначности в один из сигналов можно ввести дополнительный известный фазовый сдвиг и по характеру изменения эллипса определить исходный сдвиг фаз.

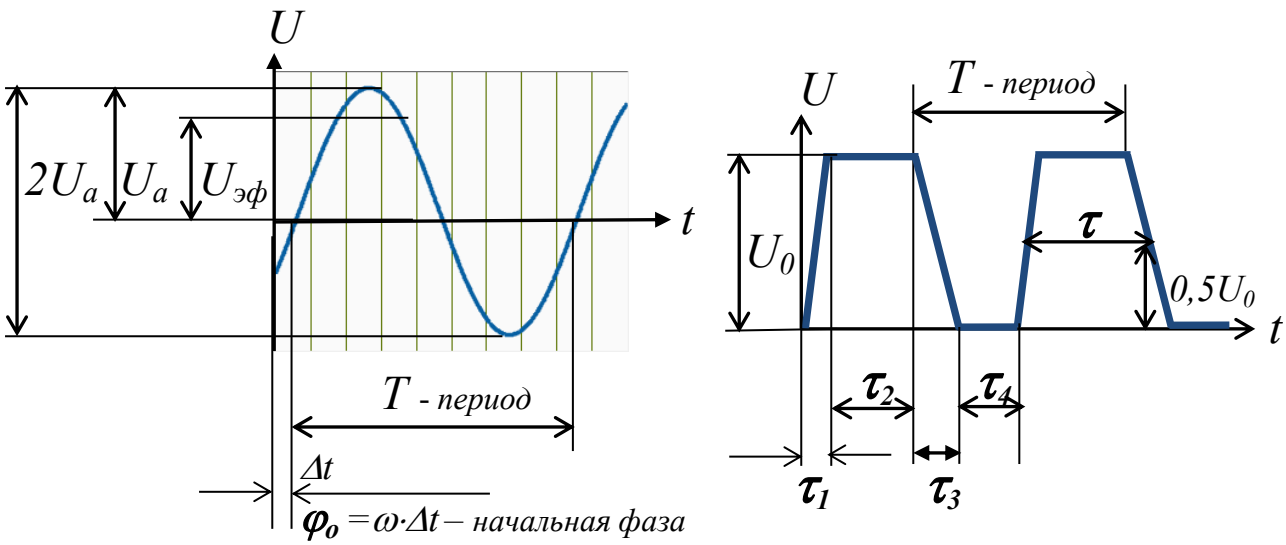
4. АНАЛИЗ СИГНАЛОВ

При измерении переменного напряжения различными приборами необходимо знать, какова форма сигнала (закон изменения $U(t)$) и какое именно значение напряжения измеряется – амплитудное, эффективное и т.д. и как они между собой связаны для конкретного сигнала. В общем случае – для произвольного периодического сигнала $U(t)$ эффективное значение напряжения определяется как среднеквадратичное значение напряжения за период T:

$$U_{\text{эфф}} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t)dt \right)^{1/2} .$$

Для синусоидального сигнала $U(t) = U_a \sin\omega t$, $U_{\text{эфф}} = U_a / \sqrt{2}$. Для сигналов другой формы это соотношение будет другим.

Для импульсных сигналов амплитуду U_0 обычно определяют как полный размах напряжения от минимального до максимального значения (***рис. 16***).



U_a – амплитуда синусоидального сигнала;
U_0 – амплитуда импульса.

Длительность: τ – импульса; τ_1 – переднего фронта; τ_3 –среза; τ_2 – плато; τ_4 – паузы;
$\theta = T/\tau$ – скважность.

Рис. 16. *Характеристики синусоидального и прямоугольного сигналов.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Ознакомьтесь с выдержками из технического описания осциллографа, входящего в комплект установки. Сопоставьте ручки регулировки, расположенные на лицевой панели прибора с его блок-схемой (***рис.7***).

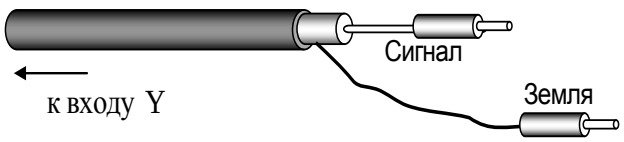
Приведите ручки в исходное положение:

– ручку, регулирующую **усиление сигнала** дискретно, поставьте на максимальное ослабление сигнала (это соответствует самому "грубому" диапазону измерений – максимальному значению "В/дел"); плавную регулировку усиления сигнала выключите: ручку, плавной регулировки поверните по часовой стрелки до щелчка (до упора).

– ручки управления **яркостью, фокусировкой, смещением луча** по вертикали и горизонтали, **уровень синхронизации** – в средние положения, **переключатель рода работы** генератора пилообразного напряжения – в автоколебательный режим – режим непрерывной развертки, **переключатель рода синхронизации** – в положение внутренней синхронизации (вход **X** – отключен).

После включения осциллографа (сигнал на вход Y еще не подан), на экране должна появиться горизонтальная линия (линия развертки). Если линии нет, проверьте регулировку яркости луча, положения луча на экране и режим работы генератора пилообразного напряжения – он должен работать в автоколебательном режиме. Подберите оптимальную яркость, фокусировку, ручками **смещение луча** по вертикали и горизонтали установите линию посередине экрана.

Для подключения осциллографа к исследуемой цепи обычно используют коаксиальный кабель для ослабления электромагнитных наводок (помех), дающих "размытое" изображение (особенно на высоких частотах). Провод для подключения к "земле" делают более длинным и более темным, по сравнению с сигнальным.



После подачи сигнала на вход Y подберите удобный вертикальный размер его изображения. После этого приступайте к синхронизации. Для начала используйте режим внутренней синхронизации. Обратите внимание, как зависит картина от уровня синхронизации (на экране должно быть видно начало осциллограммы). Получите неподвижную картину для автоколебательного и ждущего режимов работы генератора пилообразного напряжения. Обратите внимание на полярности сигнала запуска ("⎍"или "+" и "⎏" или "–"). При работе со ждущим режимом убедитесь, что развертка действительно "ждет" запуска: временно отсоедините сигнал от входа **Y** – линия развертки должна исчезнуть.

Получите неподвижную картинку в режиме внешней синхронизации. В качестве сигнала синхронизации можно использовать тот же сигнал, который подан на вход **Y** (подвести исследуемый сигнал отдельными проводами к входной клемме внешней синхронизации **X)**.

Если необходима максимальная точность измерений, то после прогрева осциллографа целесообразно проверить калибровку и балансировку (согласно техническому описанию прибора). Суть их состоит в том, что усилители каналов X и Y в процессе эксплуатации могут слегка "расстроиться", так что их надо перио-

дически проверять и, если необходимо, подстраивать с помощью генератора калиброванных сигналов, имеющегося внутри осциллографа, или дополнительных приборов. Если они не нарушены, не стоит их расстраивать: настройка прибора требует довольно много времени и терпения.

После того, как Вы познакомились с различными режимами работы осциллографа и научились получать неподвижную картинку на экране, можно приступать к измерениям.

При работе с приборами и оценке их точности пользуйтесь выдержками из их заводских описаний, входящих в комплект документации задачи.

Оценки погрешностей измерения обязательны для всех результатов!

Упражнение 1. Контроль правильности измерений

– Запишите в рабочей тетради названия и типы приборов, используемые в работе (*например: осциллограф С1-65А; генератор Г3-102*)

– Установите на заводском генераторе низкочастотных синусоидальных сигналов (Г3-102, Г3-120 или другой) любые произвольные значение частоты f и напряжения $U_{эфф}$ и запишите в таблицу 1.

– Подайте данный синусоидальный сигнал на вход Y осциллографа и получите на экране неподвижное изображение сигнала в режиме «*Непрерывная (автоколебательная) развертка / Внутренняя синхронизация*».

– Измерьте амплитуду U_a и период T сигнала по масштабной сетке экрана. (используйте ручки управления: "**В/дел**" и "**время/дел**", где **деление – это большая клетка на шкале** экрана трубки). Рассчитайте $U_{эфф}$ и f. При расхождениях свыше 10% с установленными на генераторе значениями не переходите к следующим упражнениям до выяснения причины (обычно это неправильное положение ручек плавной регулировки масштабов осциллографа).

Пример оформления:

Табл. 1. Измерение частоты и амплитуды известного сигнала.

	f, kHz	T, μS	U_a, V	$U_{эфф}$, V
Установлено	…±…	–	–	…±…
Измерено	–	…±…	…±…	–
Рассчитано по эксперим. значениям	…±…	–	–	…±…

В рабочей тетради, кроме итоговой таблицы, должны присутствовать расчеты:

1. Измерения по масштабной сетке осциллографа:

   T= K *дел* · M *μS/ дел* = …

   U_a= N *дел* · L *В/ дел* = …

2. Расчеты косвенных измерений (расчетная формула, числа, подставленные в нее, ответ).
3. Погрешности результатов:
   - Погрешность считывания (по шкале).
   - Приборная погрешность – указана в техническом описании прибора (выписать в тетрадь расчетные формулы для каждой из измеряемых величин для каждого прибора, провести расчеты для своих измерений).
   - Полная погрешность результата (с учетом погрешности считывания и приборной).
   - Погрешности косвенных измерений.

Последующие упражнения 2–4 проводятся с использованием специального генератора сигналов различной формы (цифрового синтезатора сигналов) - "неизвестный генератор". Запишите номер выполняемого варианта, который **задается преподавателем**: Номер варианта устанавливается верхним рядом из четырех тумблеров в двоичном коде: 0 – вниз, 1 – вверх. Например, на рисунке показано положение 0011.

Упражнение 2. Измерение частоты неизвестного синусоидального сигнала

Включите питание синтезатора тумблером Вкл. Должна загореться красная лампочка. Напряжение с **выхода 1** подайте на вход осциллографа, тумблерами на синтезаторе выберите синусоидальный сигнал (тумблеры “выбор формы сигнала” – в положении «00»).

– Измерьте амплитудное значение напряжения U_a.

– Измерьте период T и частоту f_x, используя:
  а) масштабную сетку экрана, как в упражнении 1;
  б) фигуры Лиссажу (не менее трех).

Тип фигур n:m можно выбирать произвольно в разумных пределах (n, m ≤ 4). Все полученные фигуры нужно ***зарисовать*** (при домашней подготовке начертить таблицы, оставить свободное место для рисунков).

Пример оформления:

Табл. 2. Измерение частоты синусоидального сигнала.

	T, мс	Тип фигур	$f_{эт}$, Гц	f_x, Гц (расчет)
По масштабной сетке	…±…	–	–	… ± …
По фигурам Лиссажу	–	1:1 2:1 1:3 и т.д.	…±… …±… …±…	… ± … … ±… … ± …

Упражнение 3. Измерение параметров импульсного сигнала

Тумблерами на синтезаторе включите импульсный сигнал – "трапецию" – тумблеры “выбор формы сигнала” – в положении «11» (или "треугольник", по указанию преподавателя). Напряжение на осциллограф подаем с **выхода 1.**

– Получите на экране осциллографа неподвижную картину сигнала в режиме «*Непрерывная развертка / Внутренняя синхронизация*» и **зарисуйте** ее.

– Измерьте период T, длительности: переднего фронта t_1, плато t_2, среза t_3 и паузы t_4, амплитуду U_0 импульса. При отсутствии четких границ между участками сигнала протяженностью фронта (среза) считается интервал, на котором напряжение меняется в пределах от 0.1 до 0.9 от амплитудного значения U_0.

Каждый из временных интервалов, в том числе и малые интервалы времени фронта и среза $t_{1,3}$**,** при измерениях нужно растянуть примерно на 2/3 размера экрана для получения максимальной точности измерений.

Пример оформления:

Рисунок сигнала «трапеция» (срисовать с экрана осциллографа) с обозначением измеряемых величин.

Табл. 3. Измерение параметров импульсного сигнала "трапеция".

U_0, В	T, мс	t_1, мкс	t_2, мс	t_3, мс	t_4, мс
N дел · *L* В/дел	*K* дел ·*M* mS/дел	*P*дел · *S* μS/дел	…	…	…
… ± . …	… ± …	… ± …	… ± …	… ± …	… ± …

Упражнение 4. Измерение фазового сдвига синусоидальных сигналов

Включите на синтезаторе синусоидальный сигнал (тумблеры “выбор формы сигнала” – в положении «00»).

– Измерьте сдвиг фаз Δφ между сигналами на выходах 1 и 2.

Описать суть методов, схемы соединения приборов, зарисовать картины с экрана осциллографа.

Все измеряемые величины должны быть максимально растянуты, по возможности от 8 до 2 делений (больших клеток), для получения максимальной точности измерений. Поэтому эллипс на экране осциллографа должен быть максимально растянут и по вертикали и по горизонтали: пользуйтесь для этого регулировкой усиления по каналу «Y» (дискретной и плавной) и растяжкой по каналу «X». Если не удается получить приемлемый для измерения эллипс, поменяйте местами сигналы на каналах «X» и «Y».

Пример оформления результатов:

Метод эллипса: Суть метода, схема соединения приборов. Рисунок с экрана осциллографа с обозначением измеряемых величин.

Метод **Δt** : Суть метода, схема соединения приборов. Рисунки с экрана осциллографа с обозначением измеряемых величин.

Табл. 4. Измерение сдвига фаз.

Метод эллипса				**Метод Δ*t***			
по оси X		по оси Y		по переднему фронту		по спаду	
l_x, делений	2.0±0.1	l_y, дел	…	Δ*t*, мкс	1.0±0.1	Δ*t*, мс	…
L_x, делений	4.0±0.1	L_y, дел.	…	*T*, мс	12±1	*T*, мс	…
Δφ, °	30±2	Δφ, °	…	Δφ, °	30±1	Δφ, °	…

Расчеты:

1. Измерения по масштабной сетке осциллографа:

   T= K *дел* · M *mS/ дел* = …; Δ t = P*дел* · S *μS/ дел* = …

2. Расчеты Δφ.
3. Погрешности результатов: считывания, приборная, полная. Погрешности косвенных результатов.

Литература

1. Тронин Ю.В. Осциллограф. Учебное пособие по курсу "Электричество и радиотехнические измерения". Москва. 1977.
2. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. Москва: Мир, 1990. 535 с. Гл. 12.
3. Новопольский В.А. Работа с электронно-лучевым осциллографом. Москва: "Радио и связь", "Горячая линия – Телеком", 1999. 176 с.