

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.А. БУНИНА»

И.Н. Зайцева, Э.И. Исакович, Н.А. Ярлыкова

**РАДИОИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ:**

***ОСЦИЛЛОГРАФЫ.
ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ***

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ
ПОСОБИЕ**

Елец – 2017

УДК 621.396.61

ББК 32.842-5

3 12

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина
от 31. 01. 2017 г., протокол № 1

Рецензенты:

С.Ю. Радин, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических процессов в машиностроении и агроинженерии;
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина);

Ю.М. Чаплыгин, главный метролог АО «Энергия» (г. Елец)

И.Н. Зайцева, Э.И. Исакович, Н.А. Ярлыкова

3 12 Радиоизмерения и измерительные приборы: осциллографы. Осциллографические измерения: учебно-методическое пособие. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2017. – 96 с.

Учебно-методическое пособие включает теоретический материал о принципах построения и работы электронных и цифровых осциллографов, а также подробное описание лабораторного практикума по осциллографическим измерениям. В каждой лабораторной работе даются методические рекомендации по подготовке к лабораторному занятию, основные теоретические положения и порядок выполнения экспериментальных исследований, а также контрольные вопросы.

Учебно-методическое пособие будет полезно студентам ВУЗа и СПО, получающим навыки практической работы с современными радиоизмерительными приборами.

УДК 621.396.61
ББК 32.842-5

© Елецкий государственный
университет им. И.А. Бунина, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ	4
1.1. Классификация осциллографов	4
1.2. Структурная схема универсального осциллографа	6
1.3. Принцип действия осциллографа и режимы его работы	11
1.4. Параметры и характеристики осциллографа	17
1.5. Классификация методов осциллографических измерений ...	21
1.6. Метод калиброванных шкал	23
1.7. Компенсационный метод измерения (метод замещения)	25
1.8. Метод сравнения с эталоном	27
2. ЦИФРОВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ	32
2.1. Принцип действия и структурная схема цифрового осциллографа	32
2.2. Режимы работы цифрового осциллографа	41
3. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	49
Лабораторная работа № 1. Измерение параметров переменных напряжений и токов с помощью осциллографа ОСУ-10В	49
Лабораторная работа № 2. Измерения фазы и частоты с помощью осциллографа ОСУ-10В	58
Лабораторная работа № 3. Изучение электронного осциллографа С1-55	65
Лабораторная работа № 4. Измерение параметров сигналов осциллографом С1-55	79
Лабораторная работа № 5. Изучение цифрового осциллографа ADS-2111М	85
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96

1. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

1.1. Классификация осциллографов

Осциллограф – радиоизмерительный прибор, предназначенный для наблюдения временных зависимостей сложных сигналов и измерения их параметров – напряжения и временных интервалов. Название «осциллограф» произошло от двух слов: от лат. «осцилло» – качаюсь + от греч. «графо» – пишу). Исторически название связано с приборами, фиксирующими форму колебаний на светочувствительную пленку (световые самописцы). В отечественной литературе это определение перешло на электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО), а затем и на цифровые (ЦО). В англоязычной литературе для этих приборов используют более точный термин – осцилоскоп («осцилло» + от греч. «скопео» – смотреть).

Осциллограф позволяет получить график (осциллограмму) сигнала в декартовой системе координат «время-напряжение» и измерить параметры этого сигнала. Прибор используется как для визуального анализа осциллограмм, так и для измерения параметров исследуемых сигналов. С помощью осциллографа прямым способом измеряют мгновенные значения напряжения и временные интервалы. Косвенные способы позволяют использовать осциллограф для измерения частоты, тока, фазового сдвига, сопротивления, АЧХ и пр.

Существуют три основных группы таких приборов. Это универсальные аналоговые электронно-лучевые осциллографы, аналоговые ЭЛО с цифровыми измерительными блоками и цифровые осциллографы (рис.1).

Основным узлом универсального осциллографа является электроннолучевая трубка (ЭЛТ) с электростатическим управлением и фокусировкой луча. ЭЛТ содержит электронный прожектор, создающий узкий пучок электронов, которые, попадая на люминесцентный экран, вызывают его свечение. Осциллограмма на экране создаётся отклонением луча по горизонтали и вертикали. Это делается двумя парами отклоняющих пластин. Смещение по горизонтали делают равномерным, подавая на пластины линейно-изменяющееся напряжение развёртки. Исследуемый сигнал после усиления подают на вертикально-отклоняющие пластины ЭЛТ.

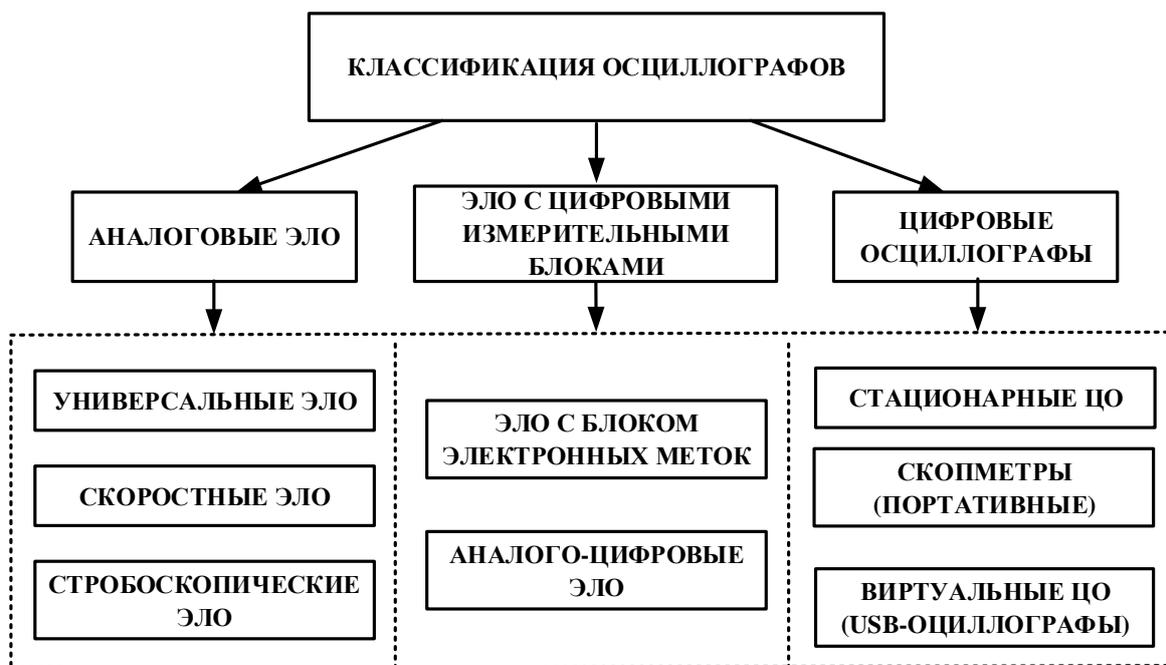


Рис.1. Классификация осциллографов

Универсальные и скоростные осциллографы позволяют исследовать сигналы в реальном времени и не имеют режима запоминания, поэтому они пригодны только для наблюдения повторяющихся процессов (периодических и непериодических). Однократные и неповторяющиеся процессы исследуют такими осциллографами в режиме фиксации изображения на фотоплёнку или цифровую фотокамеру. В скоростных осциллографах используют специальную ЭЛТ «бегущей волны» с отклоняющей системой в виде широкополосной замедляющей структуры. В других типах осциллографов используют трансформацию временного масштаба для исследования повторяющихся сигналов малой длительности (стробоскопические осциллографы) и аналого-цифровое преобразование мгновенных значений сигнала (цифровые запоминающие осциллографы). Они будут рассмотрены далее.

Различают несколько видов универсальных осциллографов. Наиболее простые конструкции содержат один канал усиления с ограниченным частотным диапазоном. Такие осциллографы часто выпускаются в портативном исполнении с автономным питанием. Более сложные универсальные осциллографы имеют один или два широкополосных канала усиления сигнала (до 200...400 МГц). Двухканальные осциллографы с электронной коммутацией каналов

позволяют наблюдать на экране два синхронных сигнала. Аналогичную задачу решают и двухлучевые осциллографы. Они содержат специальную двухлучевую ЭЛТ, которая фактически представляет собой две электронно-оптические и отклоняющие системы, собранные в одной колбе и работающие на общий экран. Двухлучевой осциллограф имеет два идентичных канала усиления сигнала и позволяет регулировать параметры изображений (яркость, фокус, положение по вертикали и горизонтали) для каждого канала отдельно.

Ряд осциллографов имеют канал горизонтального отклонения с двумя генераторами развёртки (система двойной развёртки), что позволяет реализовать режим «временного окна». Этот режим даёт возможность последовательно просматривать отдельные фрагменты осциллограммы в крупном масштабе по оси времени, а также измерять параметры изображения с повышенной точностью.

Согласно ГОСТ 15094-86 аналоговые осциллографы делят на универсальные (группа **C1**), скоростные и стробоскопические (**C7**). Цифровые осциллографы относят к группе специальных (**C9**) или запоминающих (**C8**).

1.2. Структурная схема универсального осциллографа

Рассмотрим структурную схему типичного универсального двухканального осциллографа с электронной коммутацией каналов (рис. 2). Его основными блоками являются электронно-лучевая трубка с устройством ускорения и фокусировки электронов, каналы вертикального (**Y**) и горизонтального (**X**) отклонений луча, блок синхронизации и запуска, канал модуляции луча по яркости (**Z**) и калибратор. Органы управления этих блоков на передней панели осциллографа обычно объединяют в группы, что упрощает регулировку и управление прибором.

В осциллографах применяют ЭЛТ с электростатическим управлением и фокусировкой луча. Такая трубка содержит две пары пластин для отклонения электронного луча по вертикали и горизонтали, ускоряющие и фокусирующие электроды (**A1, A2, A3**), модулятор (**M**) для управления плотностью луча (а следовательно, и яркостью изображения) и катод с подогревателем (**K**). Изображение сигнала

образуется на плоском экране с люминесцентным покрытием, обеспечивающем небольшое послесвечение (порядка нескольких десятков миллисекунд). Цвет свечения экрана, как правило, желто-зелёный. Он наиболее благоприятен для визуального наблюдения. Непосредственно на внутреннюю поверхность экрана ЭЛТ наносят шкалу (прямоугольную сетку). В пределах шкалы гарантируются основные метрологические параметры осциллографа (погрешности измерения напряжения и временных интервалов).

Масштаб осциллограммы устанавливают относительно деления шкалы. Поэтому размер шкалы и цена её деления определяют минимальную погрешность дискретности при измерениях методом калиброванных шкал. Для удобства наблюдения шкала может быть подсвечена, что позволяет скрыть её разметку.

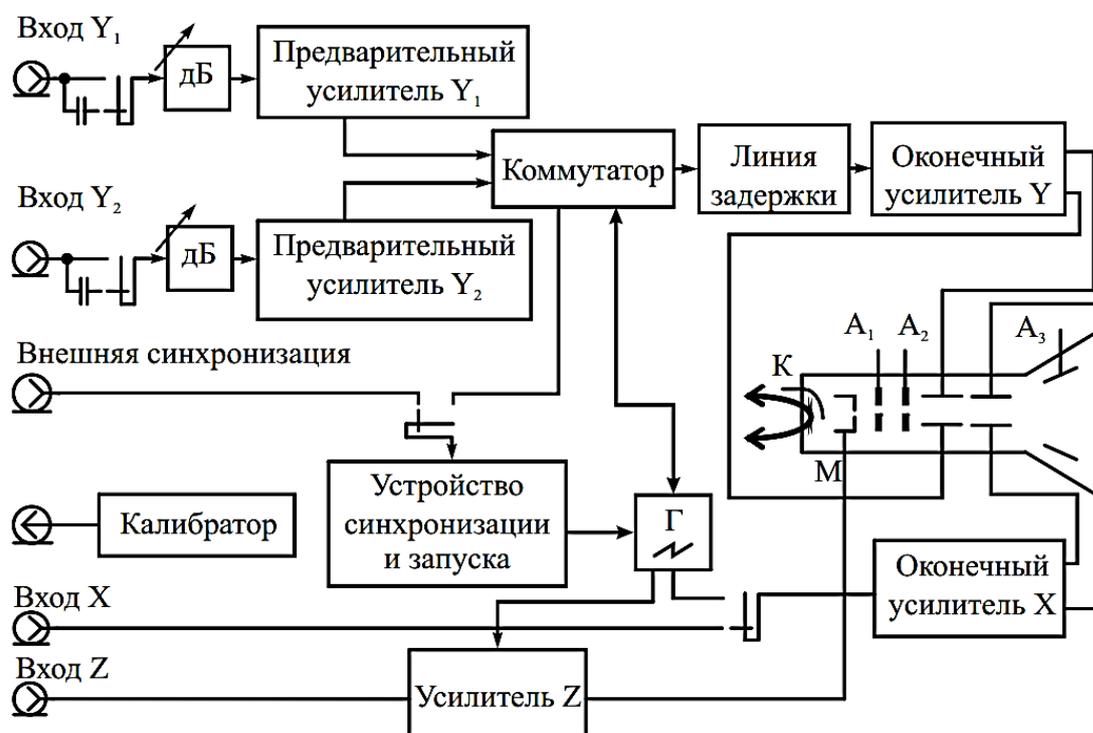


Рис.2. Структурная схема двухканального осциллографа

Канал Y служит для усиления исследуемого сигнала. Он включает в себя входное устройство, калиброванный аттенюатор, предварительный усилитель, линию задержки и окончательный усилитель. Входное устройство представляет собой коммутируемый разделительный конденсатор, позволяющий при необходимости исключить постоянную составляющую сигнала («закрытый вход»).

Часто предусматривают нулевое (нейтральное) положение переключателя, при котором вход канала соединяется с общим проводом.

Калиброванный аттенюатор и предварительный усилитель обеспечивают регулировку уровня исследуемого сигнала. В усилителе обычно предусматривают возможность плавной некалиброванной регулировки коэффициента передачи (вертикального размера изображения) и смещения изображения по вертикали. В двухканальном осциллографе присутствуют два блока усиления по вертикали, содержащих идентичные входные устройства, аттенюаторы и предварительные усилители. Сигнал на оконечные каскады и ЭЛТ подают через электронный коммутатор каналов. Он обеспечивает как независимое наблюдение сигналов в канале **1** и **2**, так и наблюдение суммы (разности) этих сигналов. В режиме коммутации переключение каналов с большой частотой позволяет видеть на экране изображение двух сигналов. Обычно используют поочерёдный режим переключения, сигналов, за другой – изображение второго сигнала. Этот режим неудобен при медленных развёртках, так как при этом возникает мелькание изображения. В таком случае применяют прерывистый режим переключения каналов с достаточно высокой частотой (сотни килогерц), не связанной с частотой работы развёртки.

Линия задержки обеспечивает небольшой временной сдвиг сигнала, подаваемого на отклоняющие пластины **Y**. Это позволяет на осциллограмме сдвинуть фронт исследуемого импульса относительно начала развёртки при запуске генератора развёртки от входного сигнала (внутренняя синхронизация и запуск). Таким образом, возможно наблюдение переднего фронта исследуемого импульса.

Оконечный усилитель канала **Y** увеличивает амплитуду сигнала до значения, необходимого для отклонения луча в пределах рабочей части экрана. Кроме того, малое выходное сопротивление усилителя позволяет уменьшить частотную зависимость канала, возникающую из-за паразитной ёмкости отклоняющих пластин. Оконечный усилитель имеет симметричный выход относительно общего провода, что также уменьшает искажения осциллограммы.

Канал X служит для отклонения луча по горизонтали. Он содержит генератор развёртки (Γ) и окончательный усилитель. Генератор развёртки вырабатывает линейно-изменяющееся (пилообразное) напряжение (рис. 3). Оно имеет участок прямого хода развёртки $t_{\text{пр.х}}$, участок обратного хода $t_{\text{обр.х}}$ и интервал блокировки $t_{\text{бл}}$, дополняющий напряжение развёртки до его периода повторения T_p :

$$T_p = t_{\text{пр.х}} + t_{\text{обр.х}} + t_{\text{бл}}$$

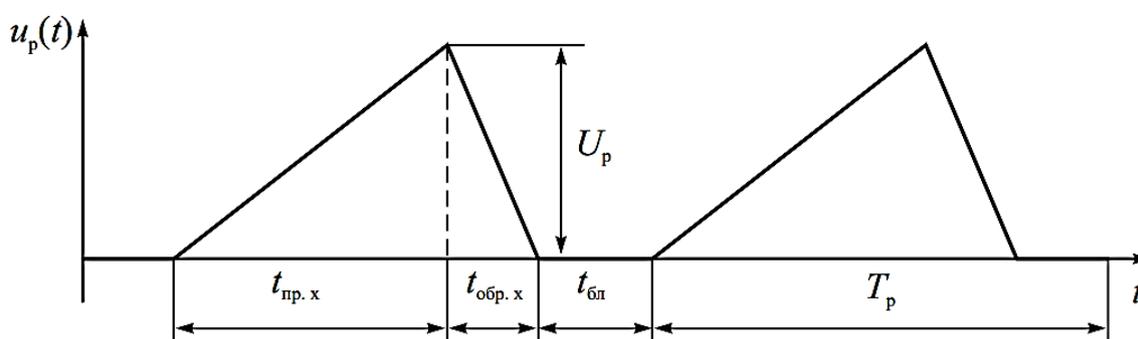


Рис.3. Пилообразное напряжение непрерывной развёртки

Длительность прямого хода определяет временной масштаб осциллограммы по оси X и приближённо равна цене деления (коэффициенту развёртки), умноженной на 10 делений всей шкалы. Время обратного хода определяется быстродействием канала X . Его стараются делать минимальным.

Генератор развёртки имеет три режима работы: автоколебательный (непрерывный), ждущий и однократный. Автоколебательный режим — основной режим работы канала X . Он применяется для исследования периодических сигналов. Напряжение развёртки вырабатывается всё время вне зависимости от наличия сигнала синхронизации (запуска). Поэтому на экране постоянно присутствует осциллограмма линии развёртки. Ждущий режим применяется для исследования непериодических сигналов и импульсов большой скважности. Однократный режим работы осциллографа применяют редко: обычно он используется при фотографировании осциллограмм одиночных или неповторяющихся процессов (шумов,

случайных сигналов). Напряжение развёртки и кадр изображения создаются при нажатии кнопки на передней панели осциллографа или при подаче импульса запуска на вход внешней синхронизации.

В ряде случаев (при измерении частоты, фазового сдвига и пр.) генератор развёртки отключают, а на оконечный усилитель канала X подают сигналы от внешнего источника развёртывающего напряжения (X - Y -режим).

Оконечный усилитель канала X выполняет те же функции, что и усилитель канала Y . Он используется в режиме X - Y для усиления входного сигнала при отключённой развёртке. Для получения более крупного масштаба осциллограммы используют режим растяжки изображения по горизонтали. При этом масштаб меняют не плавной регулировкой длительности пилообразного напряжения генератора развёртки, а дискретным (обычно в 10 раз) увеличением скорости развёртки канала X .

Улучшить функциональные возможности осциллографа позволяет канал X с блоком двойной развёртки. В канале X таких осциллографов предусматривают два генератора развёртки – основной (A) и задержанной (B). Оба генератора могут работать независимо. Однако наибольший интерес представляет случай, когда запуск развёртки B осуществляется от генератора развёртки A с некоторой задержкой, которая может плавно регулироваться. Задержку запуска B часто делают калиброванной, что позволяет проводить измерения временных интервалов методом замещения.

Устройство синхронизации и запуска (УСЗ) обеспечивает получение неподвижного изображения на экране. Это устройство вырабатывает импульсы синхронизации (запуска), которые привязаны к одной и той же характерной точке сигнала (например, фронт, срез импульса и др.). Для периодических сигналов устройство синхронизации вырабатывает импульсы с периодом, равным периоду входного сигнала. В автоколебательном режиме эти импульсы воздействуют на генератор развёртки, синхронизируя его с исследуемым сигналом и обеспечивая тем самым неподвижность

осциллограммы. В ждущем режиме УСЗ вырабатывает импульсы запуска развёртки только при наличии на входе осциллографа сигнала.

В устройстве синхронизации используют регулировку уровня срабатывания, по которому вырабатывается сигнал запуска генератора развёртки. Кроме этого, применяют переключение полярности синхронизации, что позволяет выбрать точку образования импульса запуска на фронте (нарастании) или на срезе (убывании) сигнала. Используют режимы синхронизации от отдельных видов сигналов, например от напряжения питающей сети 50 Гц или от телевизионных сигналов (выделение синхроимпульсов по кадрам или строкам). Часто на входе УСЗ предусматривают возможность фильтрации сигнала синхронизации для устранения влияния помех и шумов.

Канал Z служит для модуляции яркости изображения на экране. Основное назначение канала – подсвет прямого хода развёртки. Во время обратного хода и блокировки трубка запирается отрицательным напряжением на модуляторе. Канал Z иногда используют для создания на осциллограмме временных меток и подсветки части изображения сигналом, подаваемым на вход Z .

Калибратор служит для точной установки и корректировки масштабных коэффициентов по горизонтали и вертикали. Он представляет собой генератор образцового сигнала с известными амплитудой и частотой.

1.3. Принцип действия осциллографа и режимы его работы

Для калибровки осциллографа обычно используют сигнал типа «меандр». Универсальный осциллограф используется как для визуального анализа осциллограмм, так и для измерения параметров исследуемых сигналов. Визуальный анализ осциллограмм – начальный этап использования осциллографа. Для исследования сигнала необходимо получить на экране ЭЛТ неподвижную осциллограмму в удобных для наблюдения масштабах по осям X и Y . Чёткость изображения обеспечивают регулировкой яркости, фокусировки и астигматизма луча ЭЛТ. Неподвижность изображения в автоколебательном режиме работы канала X достигают синхронизацией генератора развёртки от исследуемого сигнала (внутренняя синхронизация) или от специально подаваемых на осциллограф

синхроимпульсов (внешняя синхронизация). От устройства синхронизации на генератор развёртки подают импульсы, период которых равен периоду входного сигнала. Эти импульсы, воздействуя на генератор развёртки, подстраивают его частоту так, чтобы обеспечить условие неподвижности изображения на экране осциллографа – точное равенство или кратность периода развёртки T_p периоду входного сигнала T_c :

$$T_p = nT_c, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots$$

На рис. 4,а представлены графики напряжений развёртки для двух масштабов по оси X . В случае нарушения кратности каждый новый кадр изображения будет смещён по горизонтали. Изображение перемещается по экрану («бежит»). Для выполнения условия неподвижности изображения регулируют опорное напряжение устройства синхронизации (эта регулировка обычно обозначается «УРОВЕНЬ»). При этом подбирают оптимальный уровень срабатывания схемы УСЗ, чтобы получить только один синхроимпульс от каждой копии сигнала.

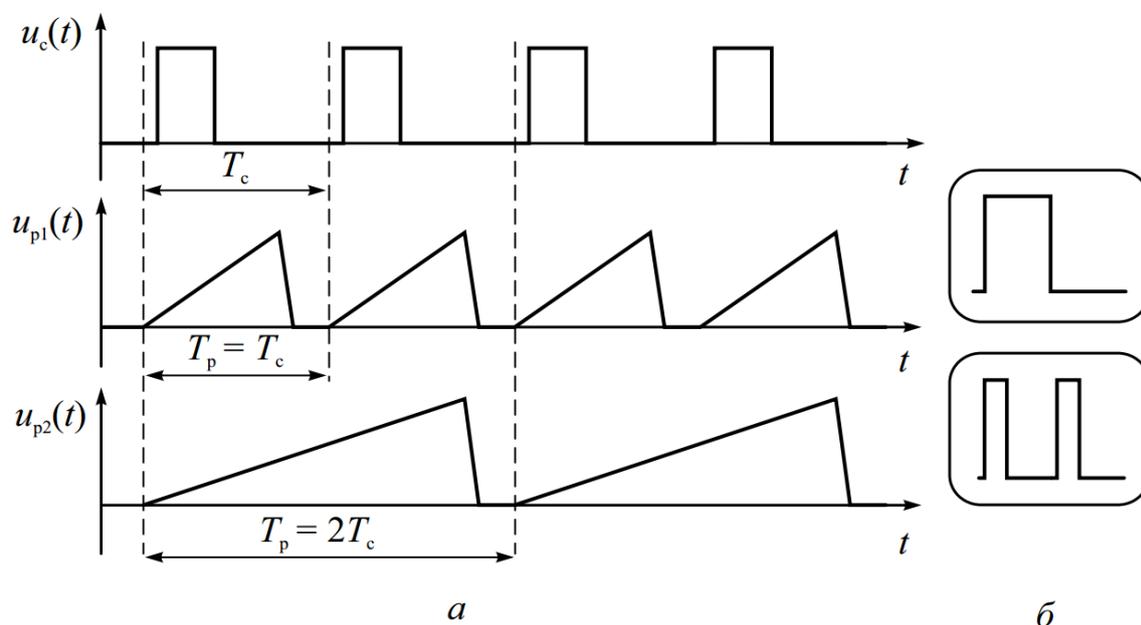


Рис.4. Синхронный запуск генератора развёртки:
а – напряжения непрерывной развёртки; *б* – осциллограммы сигналов.

При исследовании импульсных сигналов с большой скважностью для получения удобного масштаба по оси X можно установить период развёртки T_p меньше периода повторения сигнала T_c :

$$T_p = \frac{T_c}{k}, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots$$

Напомним, что скважность (q) – это отношение периода повторения импульсной последовательности (T_c) сигнала к его длительности (τ_i):

$$q = \frac{T_c}{\tau_i}.$$

Это позволяет обеспечить неподвижность осциллограммы, но приводит к многократным прохождением луча по линии нулевого уровня (рис.5).

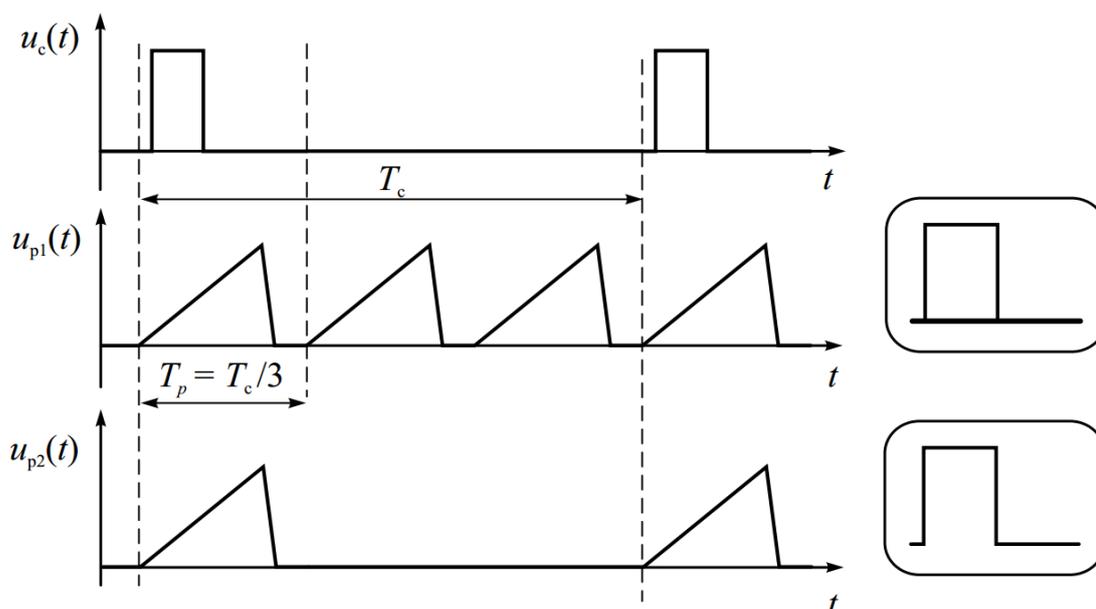


Рис. 5. Напряжения развёртки: u_{p1} – автоколебательный режим;
 u_{p2} – ждущий режим

Яркость этой линии может существенно превышать яркость изображения импульса, что затрудняет анализ осциллограммы. Поэтому для наблюдения коротких импульсов с большим периодом повторения используют ждущий режим работы генератора развёртки. Генератор запускается только при наличии на его входе импульса запуска. Его

получают в УСЗ из исследуемого сигнала (внутренний запуск) или из внешнего синхронизирующего импульса (внешний запуск) аналогично режиму непрерывной развёртки. При этом ликвидируются проходы луча по линии нулевого уровня, яркость осциллограммы становится однородной. Ждущий режим незаменим для исследования непериодических повторяющихся сигналов, где синхронизация невозможна.

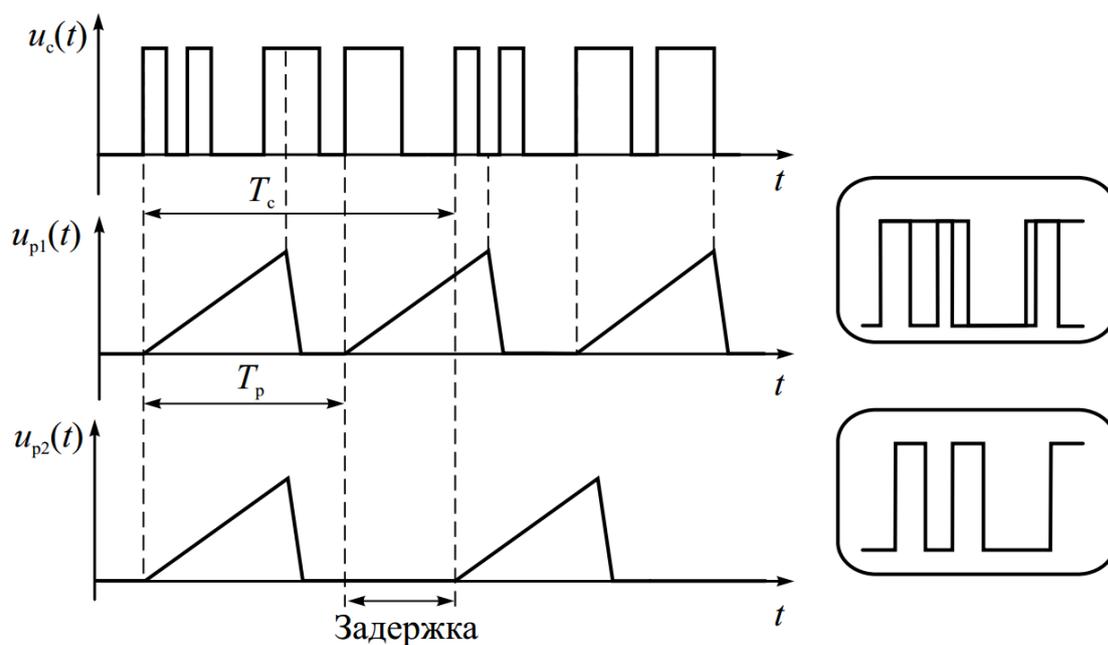


Рис.6. Регулировка задержки запуска

В ряде случаев исследуемый периодический сигнал имеет сложную форму с множеством переходов через нуль в пределах периода (рис.6). Возможна ситуация, когда не удаётся обеспечить устойчивое изображение сигнала (верхняя осциллограмма на рис.6). Это происходит за счёт срабатывания УСЗ в разных точках сигнала внутри его периода. Кадр изображения может начинаться с разных фрагментов сигнала, поэтому на экране наблюдается перекрытие осциллограмм. Регулировкой задержки запуска можно исключить ложное срабатывание и получить устойчивое изображение без перекрытия (нижняя осциллограмма на рис.6).

Когда необходимо укрупнение масштаба по оси X без изменения параметров генератора развёртки, используют растяжку изображения в

усилителе X (рис.7). Для этого дискретно увеличивают коэффициент передачи конечного усилителя канала X (обычно в 10 раз), что приводит к визуальному «растягиванию» осциллограммы по горизонтальной оси. Большую часть прямого хода луч на экране будет отсутствовать (электроны попадают на отклоняющие пластины или стенки ЭЛТ). Видимая часть осциллограммы при этом соответствует «временному окну», которое можно перемещать по оси времени в пределах прямого хода развёртки регулировкой горизонтального положения луча. Важно, что при этом режимы развёртки и синхронизации не меняются и условие неподвижности изображения сохраняется. Растяжка имеет недостатки – уменьшается яркость осциллограммы и возрастают искажения, связанные с нелинейностью напряжения развёртки. Поэтому данный режим канала X является вспомогательным.

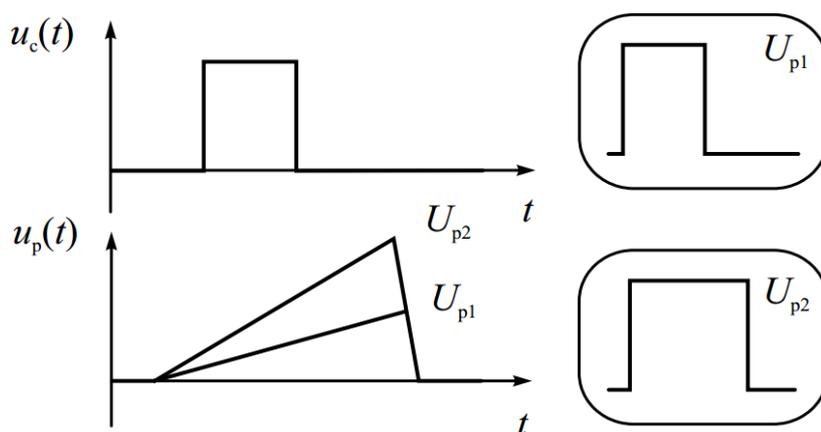


Рис.7. Растяжка осциллограммы по горизонтали

«Временное окно» с произвольным временным масштабom реализуют в осциллографах с двойной развёрткой. В канале X таких осциллографов, как уже указывалось, предусматривают два генератора развёртки – основной (A) и задержанной (B), а запуск развёртки B осуществляют от генератора развёртки A с задержкой, которая может регулироваться (рис.8).

Импульс запуска развёртки B формируется компаратором (схемой сравнения) в момент равенства напряжения развёртки A и порогового

напряжения $U_{\text{пор}}$, которое меняют вручную потенциометром в пределах от нуля до величины, равной амплитуде развёртки A . При этом задержка меняется в пределах прямого хода развёртки A . Задержанная развёртка используется в режиме «временного окна» для наблюдения фрагментов сигнала в крупном масштабе по оси времени. Для удобства установки задержки предусматривают режим « B подсвечивает A », при котором область действия развёртки B выделяется на осциллограмме яркостной отметкой. Это осуществляют подачей дополнительного импульса подсвета в канал Z с генератора развёртки B . Осциллографы с двойной развёрткой удобны для наблюдения сигналов большой длительности. При синхронизации осциллографа по развёртке A переключение на развёртку B даёт возможность просмотреть фрагменты сигнала в крупном масштабе.

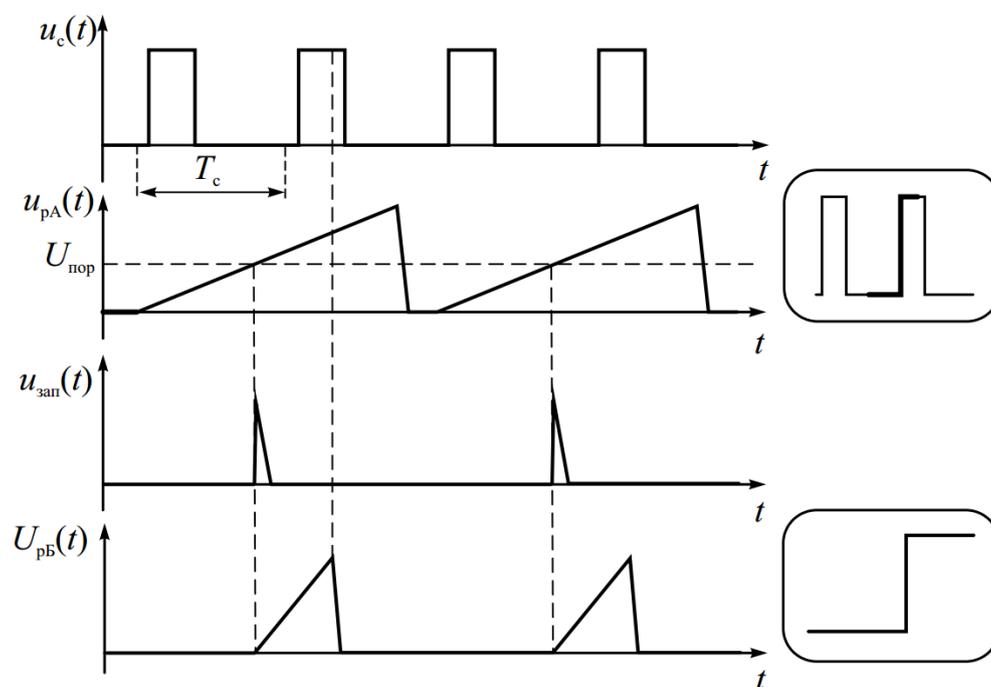


Рис.8. Работа системы двойной развёртки

Потенциометр задержки («МНОЖИТЕЛЬ ЗАДЕРЖКИ») в некоторых осциллографах градуируют в долях коэффициента развёртки A , что позволяет получить калиброванную задержку. В этом случае осциллограф можно использовать для точных измерений временных интервалов методом замещения.

1.4. Параметры и характеристики осциллографа

Осциллограф, согласно ГОСТ 22737-77, имеет две группы параметров (основные и дополнительные), связанных с измерением напряжения и времени и определяющих степень искажения осциллограммы.

К основным параметрам ЭЛО относятся:

1. Диапазон установки коэффициента отклонения. Коэффициент отклонения показывает значение входного напряжения, необходимое для отклонения луча на одно деление по вертикали.

2. Погрешность установки коэффициента отклонения или связанная с ним погрешность измерения напряжения. У большинства аналоговых осциллографов эта погрешность для метода калиброванных шкал составляет (3 – 5)%.

3. Диапазон установки коэффициента развёртки. Коэффициент развёртки соответствует времени, за которое луч смещается по горизонтали на одно деление шкалы.

4. Погрешность установки коэффициента развёртки или связанная с ним погрешность измерения временных интервалов. У большинства аналоговых осциллографов погрешность коэффициента развёртки и, соответственно, погрешности измерения временных интервалов составляют также (3 – 5)%.

5. Параметры переходной характеристики (ПХ) осциллографа: время нарастания, выброс, неравномерность вершины, время установления.

6. Параметры входа канала вертикального отклонения: активное входное сопротивление и входная ёмкость. Эти параметры определяют влияние осциллографа на исследуемую цепь. Чем больше входное сопротивление $R_{вх}$ и меньше входная ёмкость $C_{вх}$, тем меньше проявится влияние подключения осциллографа к измеряемой цепи. Обычно $R_{вх}$ составляет 1 МОм, $C_{вх} = 20...40$ пФ. При использовании выносного пробника входная ёмкость может быть уменьшена до единиц пикофард.

7. Параметры синхронизации: диапазон частот, предельные уровни, нестабильность.

К дополнительным параметрам ЭЛО относятся:

1. Коэффициент развязки между каналами Y двухканального ЭЛО.
2. Параметры амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) осциллографа: полоса пропускания, нормальный диапазон АЧХ, расширенный диапазон АЧХ.

Переходной характеристикой осциллографа называют осциллограмму скачка напряжения с пренебрежимо малым фронтом. В зависимости от вида частотной характеристики канала Y эта осциллограмма имеет вид ПХ апериодического (рис. 9,а) или колебательного (рис. 9, б) звена.

В первом случае, характерном для широкополосных осциллографов, главный параметр ПХ – время нарастания τ_n . Во втором случае, когда на ПХ наблюдается выброс, вводят дополнительные параметры – время установления τ_y и величину выброса (рис.9, б). Время нарастания измеряют по осциллограмме между точками уровней 0.1 и 0.9 от установившегося значения осциллограммы сигнала. Если входной сигнал имеет конечное время фронта $\tau_{фр}$, то время нарастания τ_n рассчитывают по формуле:

$$\tau_n = \sqrt{\tau_{изм}^2 - \tau_{фр}^2},$$

где $\tau_{изм}$ – величина, измеренная по шкале осциллографа. Время установления отсчитывают между уровнем 0.1 и моментом, когда осцилляции на вершине ПХ станут пренебрежимо малы (обычно 1 % от начальной амплитуды колебательного процесса). Выброс оценивают в процентах от амплитуды ПХ.

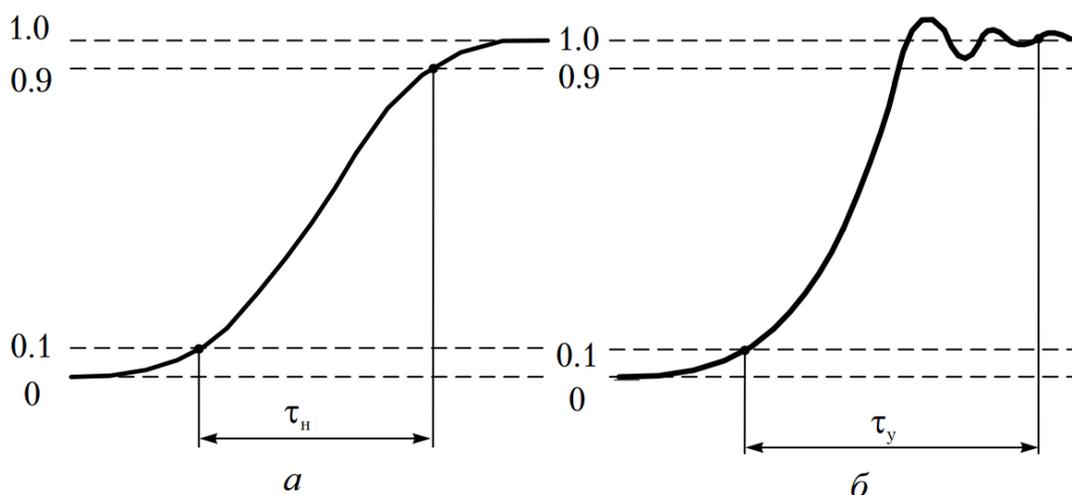


Рис.9. Переходная характеристика осциллографа:
 a – аperiodического типа; b – колебательного типа (с выбросом)

Для измерения ПХ широкополосных осциллографов используют генераторы импульсов с очень малой (доли нс) длительностью фронтов. Ряд фирм выпускает такие генераторы – тестеры осциллографов. Например, *Scope Tester HZ60 – 3*, выпускаемый фирмой *HAMEG*, генерирует прямоугольные импульсы (меандр) с временем нарастания менее **1 нс** и с семью высокостабильными значениями частоты для калибровки развёрток: **1 – 10 – 100 Гц**; **1 – 10 – 100 кГц** и **1 МГц**.

Переходная характеристика показывает степень искажения сигналов с резкими перепадами (например, импульсных и цифровых сигналов). Для узкополосных сигналов важнее частотные свойства осциллографа, которые описываются формой его АЧХ. АЧХ осциллографа – это зависимость вертикального размера изображения гармонического сигнала от его частоты. Измеряется АЧХ при подаче гармонического сигнала от перестраиваемого генератора путём измерения размера изображения по вертикали на разных частотах при постоянном напряжении гармонического сигнала, подаваемого на вход вертикального усилителя.

Важнейшим параметром АЧХ является верхняя граничная частота осциллографа f_B . Её определяют по спаду АЧХ до уровня **0.707** от максимального значения на низкой (опорной) частоте. Верхняя граничная частота определяет полосу пропускания осциллографа, в пределах которой искажения спектра сложного сигнала считаются

допустимыми. Верхнюю граничную частоту и время нарастания ПХ согласно ГОСТ принято связывать между собой соотношением:

$$\tau_{\text{н}} = \frac{350}{f_{\text{в}}},$$

где частота $f_{\text{в}}$ выражена в мегагерцах, а время – в наносекундах. Это соотношение хорошо аппроксимирует связь временных и частотных параметров каналов Y современных ЭЛО.

Очевидно, что измерение амплитуды гармонического сигнала на границе полосы пропускания приводит к значительным погрешностям (до **30 %** навольт). Поэтому осциллограф характеризуют также нормальным диапазоном АЧХ. Это полоса частот, в пределах которой неравномерность АЧХ не превышает погрешности коэффициента отклонения, заявленной для данного осциллографа. Используют и расширенный диапазон АЧХ – это интервал частот, в котором неравномерность АЧХ (а следовательно, и точность измерения амплитуды) не превышает **10 %**. Для узкополосных осциллографов (с полосой пропускания вертикального усилителя менее **1 МГц**) параметры АЧХ являются основными параметрами канала Y .

От формы АЧХ зависит и вид ПХ. Оптимальной формой, которая обеспечивает наименьшее время нарастания, обладает характеристика, близкая к АЧХ фильтра Гаусса:

$$A(f) = \exp\left(-0,35 \frac{f}{f_{\text{в}}}\right).$$

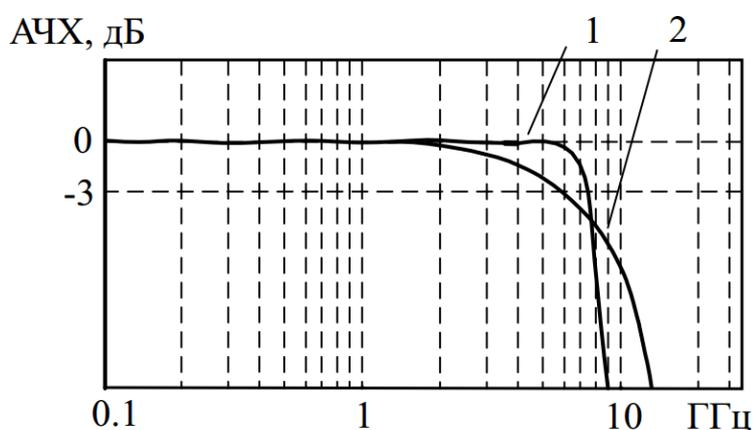


Рис.10. АЧХ осциллографа:
1 – максимально плоская, 2 – близкая к гауссовской

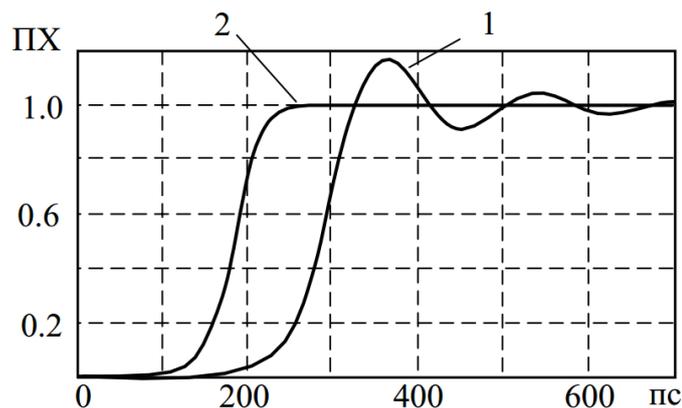


Рис.11. Переходная характеристика осциллографа:
 1 – при максимально плоской АЧХ; 2 – при АЧХ, близкой к гауссовской

На рис. 10 приведены гауссова и максимально плоская АЧХ осциллографа с верхней граничной частотой 6 ГГц.

На рис. 11 приведены переходные характеристики, соответствующие двум типам амплитудно-частотных характеристик осциллографа:

- максимально плоской (характеристика Баттерворта высокого порядка) – время нарастания $\tau_n = 82$ пс;
- близкой к гауссовой – $\tau_n = 58$ пс.

Видно, что форма ПХ при плоской АЧХ может вызвать искажения осциллограмм импульсных сигналов. Однако АЧХ, близкая к гауссовой, трудно реализуется на практике. Максимально плоская АЧХ позволяет приблизить нормальный диапазон АЧХ к верхней граничной частоте и несколько увеличить точность измерения амплитуд высокочастотных радиосигналов.

1.5. Классификация методов осциллографических измерений

Классификация осциллографических методов измерения напряжения приведена на рис.12.

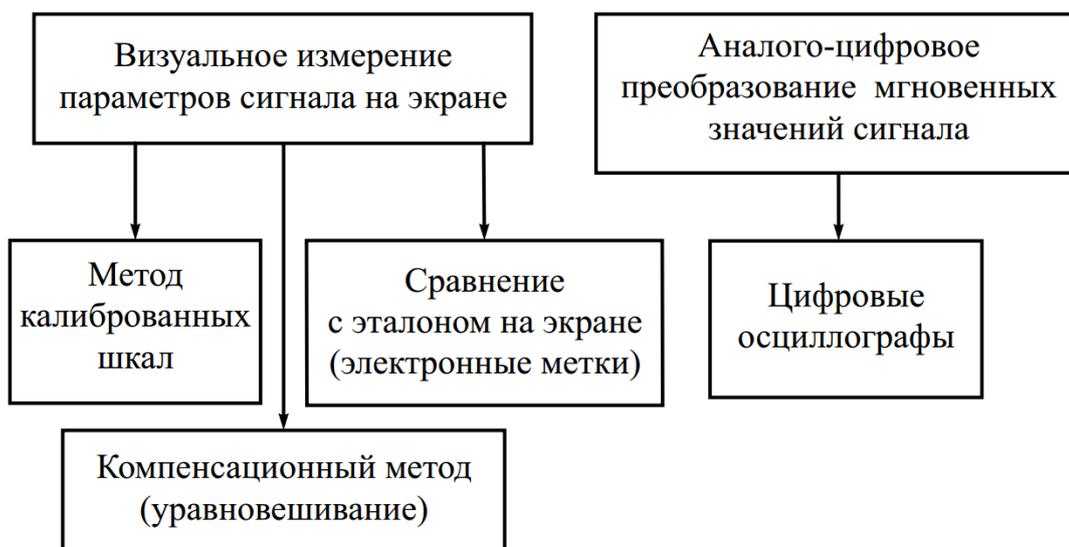


Рис.12. Классификация осциллографических методов измерения напряжения

Эти методы можно разделить на две группы. Первая группа – традиционные методы визуального наблюдения сигнала на экране и измерения его параметров по калиброванной сетке (метод калиброванных шкал), а также методом сравнения с эталонным сигналом. В последнем случае используют либо метод замещения (уравнивания), либо прямое сравнение с эталонным напряжением. Вторая группа методов предполагает прямое аналого-цифровое преобразование мгновенных значений входного сигнала в цифровых осциллографах. Результат измерения получают выбором нужного значения сигнала из массива отсчётов. Классификация осциллографических методов измерения временных интервалов представлена на рис. 13.

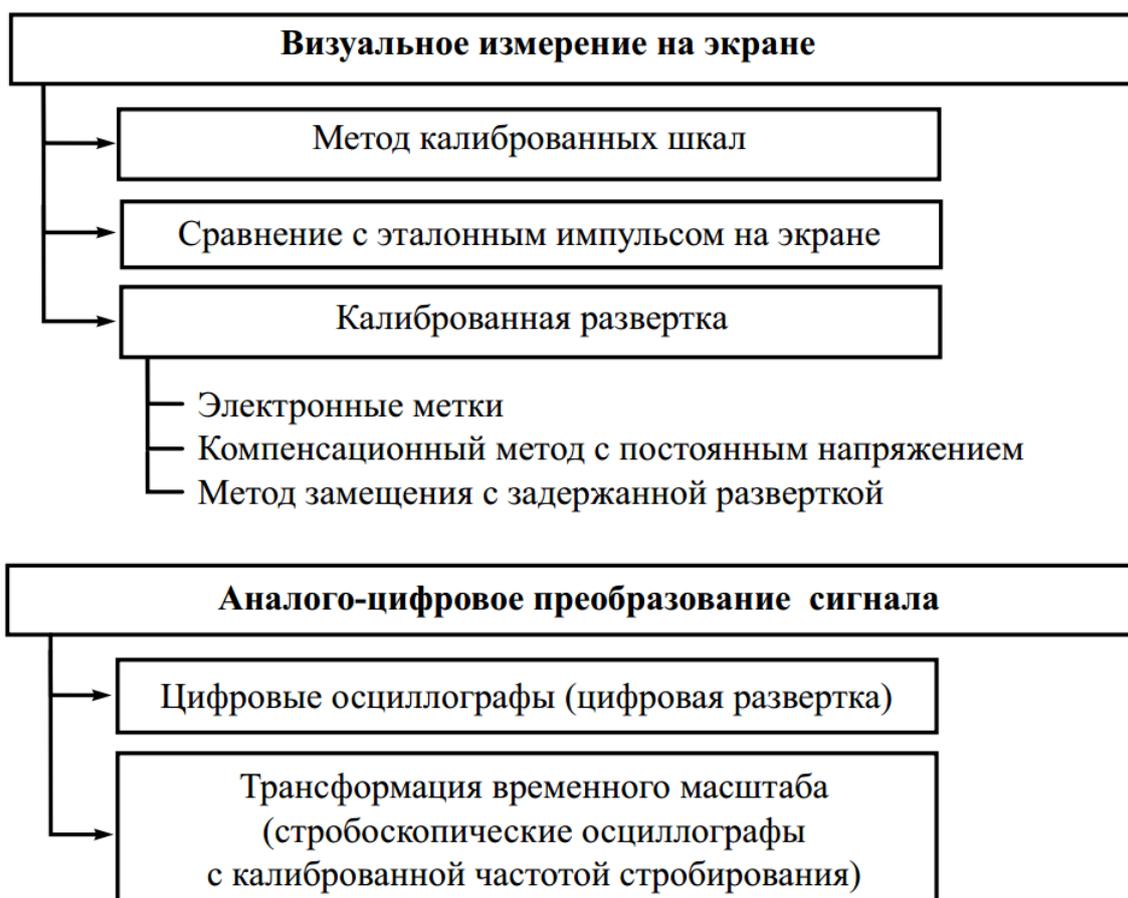


Рис.13. Классификация осциллографических методов измерения временных интервалов

Визуальные методы измерения временных интервалов включают метод калиброванных шкал, метод сравнения измеряемого временного интервала с длительностью образцового импульса. Точная калибровка развёртки даёт возможность использовать электронные курсоры или метки. При этом используют метод сравнения с эталонным напряжением, пересчитанным в длительность. В ряде случаев применяют также метод замещения (компенсационный метод) – смещение изображения по горизонтали образцовым напряжением с последующим пересчётом его в длительность. В осциллографах с двойной развёрткой применяют метод замещения с использованием задержанной развёртки, который будет рассмотрен далее.

1.6. Метод калиброванных шкал

Измерение напряжений с помощью осциллографа производят, как правило, методом калиброванных шкал. Перед измерениями осциллограф должен быть откалиброван по вертикали, для чего на вход

Y подают сигнал калибратора с известными параметрами. Обычно калибратор осциллографа вырабатывает последовательность сигналов прямоугольной формы («меандр») с точно известной амплитудой. Плавной регулировкой усиления канала Y добиваются соответствия вертикального размера изображения сигнала калибратора установленному коэффициенту отклонения (K_0) осциллографа (значения K_0 нанесены на шкалу калиброванного аттенюатора осциллографа). Плавная регулировка данного коэффициента при этом не используется (ручка плавного изменения K_0 должна находиться в фиксированном положении, обозначаемом обычно «КАЛИБР»).

Подавая исследуемый сигнал на вход осциллографа и регулируя уровень синхронизации и запуска, добиваются неподвижного изображения на экране. Желательно выбирать коэффициент отклонения так, чтобы размер изображения составлял (80 – 90) % от вертикального размера шкалы осциллографа. При этом относительная погрешность дискретности шкалы минимальна. Далее измеряют интересующий размер изображения по вертикали в делениях шкалы. Умножив число делений на установленный коэффициент отклонения, получают искомое значение напряжения.

Измерение временных интервалов проводят также методом калиброванных шкал. Калибровку осциллографа по оси X производят по образцовому меандру с известным периодом повторения плавной подстройкой длительности прямого хода развёртки. Измеренный интервал (в делениях шкалы) умножают на коэффициент развёртки K_p , нанесённый на регулятор длительности развёртки осциллографа. При использовании растяжки развёртки его необходимо умножить на коэффициент растяжки (обычно 0.1).

Метод калиброванных шкал прост, не требует дополнительных устройств, поэтому является основным методом измерений для осциллографа. К данному методу привязаны основные метрологические параметры осциллографа. Точность метода определяется погрешностью установки коэффициентов отклонения и развёртки, конечными размерами светового пятна и дискретностью шкалы, нелинейностью масштаба по вертикали и горизонтали. Для увеличения точности

используют разнообразные методы измерения, реализуемые с помощью дополнительных устройств и схем.

1.7. Компенсационный метод измерения (метод замещения)

Для измерения напряжения методом замещения применяют двухканальный осциллограф в режиме сложения (вычитания) входных сигналов. Возможно также использование осциллографа с дифференциальным входом канала Y . На рис.14, *а* представлена структурная схема подключения сигналов к осциллографу.

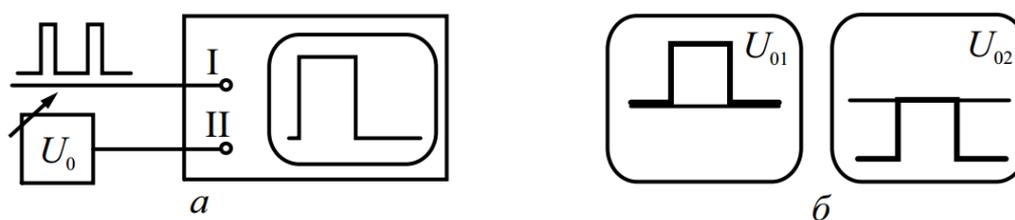


Рис.14. Метод замещения: *а* – структурная схема; *б* – вид экрана

На первый вход подают исследуемый сигнал (например, последовательность прямоугольных импульсов). опорное напряжение, поданное на второй вход, регулируют таким образом, чтобы пьедестал импульса совместился с выбранной горизонтальной линией шкалы (рис. 14, *б*). Фиксируют значение опорного напряжения U_{01} (например, измеряя его с помощью цифрового вольтметра). Затем устанавливают такое значение опорного напряжения U_{02} , чтобы с этой же линией шкалы совместилась вершина импульса (рис. 14, *б*). Разность напряжений $U_{02} - U_{01}$ пропорциональна амплитуде импульса. Коэффициент пропорциональности найдём, приравняв размер импульса на экране U_m/K_{01} и величину перемещения изображения $(U_{02} - U_{01}) / K_{02}$:

$$\frac{U_m}{K_{01}} = \frac{U_{02} - U_{01}}{K_{02}},$$

где K_{01} и K_{02} – коэффициенты отклонения по первому и второму входам.

Отсюда следует расчётная формула:

$$U_m = \frac{(U_{02} - U_{01})K_{01}}{K_{02}}$$

Источниками погрешностей данного метода являются точность установки опорного напряжения (погрешность меры), точность совмещения точек изображения с линией шкалы (погрешность сравнения) и погрешность установки отношения коэффициентов отклонения (то есть погрешность дискретной шкалы аттенуаторов осциллографа). Как видим, исключены погрешности, связанные с нелинейностью отклонения по вертикали и с дискретностью шкалы осциллографа. Метод не требует предварительной калибровки осциллографа. К недостаткам метода следует отнести необходимость иметь источник опорного напряжения с плавной перестройкой частоты и высокой точностью установки напряжения, а также большое время измерения.

Реализовать метод замещения для измерения временных интервалов можно в осциллографах с двойной развёрткой. Для этого используют режим, когда задержанная развёртка **Б** запускается от основной развёртки **А**.

Развёртку **А** регулирую так, чтобы получилось неподвижное изображение сигнала в удобном масштабе. Коэффициент развёртки **Б** устанавливают меньше, чем развёртки **А**, режим работы – ждущий. Соответственно масштаб изображения, соответствующий развёртке **Б**, получается крупнее. Регулируя задержку («МНОЖИТЕЛЬ ЗАДЕРЖКИ»), совмещают начало измеряемого временного интервала с заранее выбранной вертикальной линией шкалы и фиксируют значение задержки t_{31} (рис. 15).

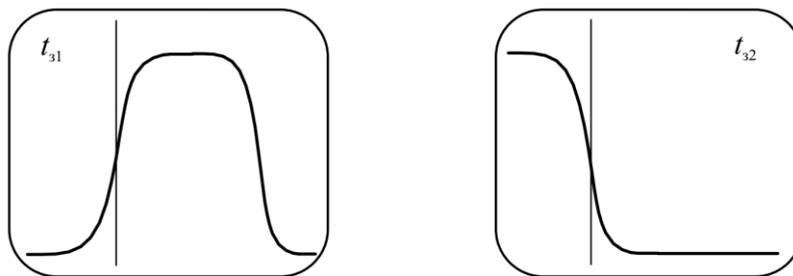


Рис.15. Осциллограммы при измерении длительности методом замещения

Затем с той же линией совмещают конец измеряемого временного интервала и фиксируют задержку t_{32} . Измеренный временной интервал равен:

$$t_{\text{изм}} = (t_{32} - t_{31}) \cdot K_{pA},$$

где K_{pA} – установленный коэффициент развёртки A .

Источники погрешности метода – неточность калибровки развёртки A , нелинейность развёртки A , погрешность градуировки шкалы задержки, неточность совмещения точек осциллограммы с вертикальной линией шкалы. Остальные причины погрешностей, характерные для метода калиброванных шкал (дискретность шкалы, субъективные погрешности, конечная толщина луча и пр.), здесь исключены.

1.8. Метод сравнения с эталоном

Значительное увеличение точности осциллографических измерений достигается при использовании метода сравнения с эталоном. Суть метода – создание на экране одновременно с сигналом эталонного изображения в виде линий (курсоров) или точек (электронных меток) и совмещение их с измеряемыми фрагментами сигнала. Расстояние между метками по уровню и длительности отсчитывается по шкалам измерительного блока осциллографа. Электронные метки используют в аналоговых осциллографах с цифровыми измерительными блоками.

Рассмотрим вариант реализации метода для измерения напряжения, представленный на рис. 16, *а*.

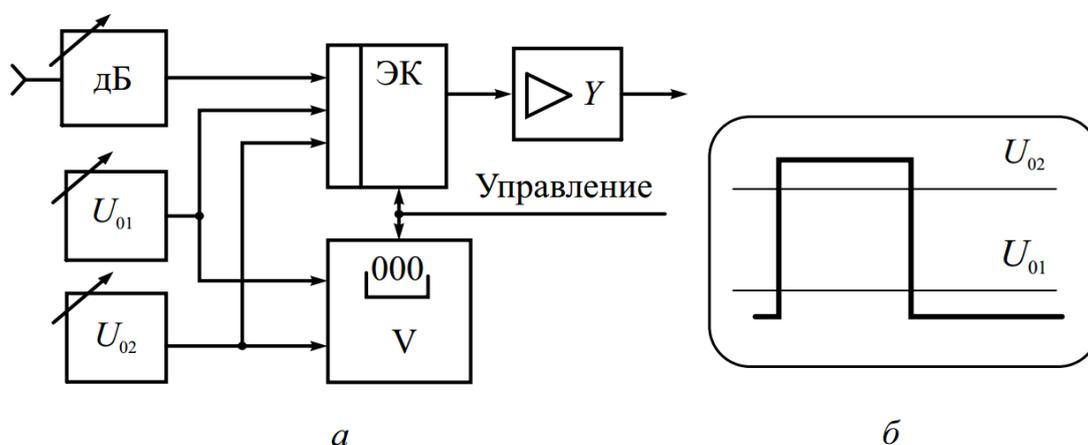


Рис.16. Вариант схемы создания курсоров уровня:
а – структурная схема; *б* – вид экрана.

Электронный коммутатор (ЭК) поочередно подключает к каналу Y измеряемый сигнал и два образцовых постоянных напряжения U_{01} и U_{02} . Значения этих напряжений можно плавно регулировать. Их разность измеряется встроенным цифровым вольтметром. На экране образуется изображение сигнала и двух горизонтальных линий – курсоров эталонных уровней (рис.16, б). Процесс измерения сводится к перемещению этих курсоров к нужным точкам изображения и отсчёту значения измеряемого интервала напряжения по вольтметру. При индикации учитывается установленный коэффициент отклонения в канале исследуемого сигнала, что позволяет реализовать прямо показывающий измерительный прибор. Погрешность измерения зависит от точности измерения разности эталонных напряжений и погрешности совмещения курсоров с выбранными точками сигнала.

Похожим способом измеряют временные интервалы. Временные метки-маркёры можно создать с помощью схемы, представленной на рис.17, а. Опорные напряжения сравниваются с напряжением развёртки двумя компараторами. На один подают напряжение U_{01} на второй – сумму $U_{01} + U_{02}$. На выходе компараторов образуются импульсы, формирующие с помощью триггера прямоугольный импульс, длительность которого соответствует расстоянию между точками пересечения линии развёртки и опорных напряжений (рис.17, б). Длительность импульса измеряется электронно-счётным частотомером (ЭСЧ).

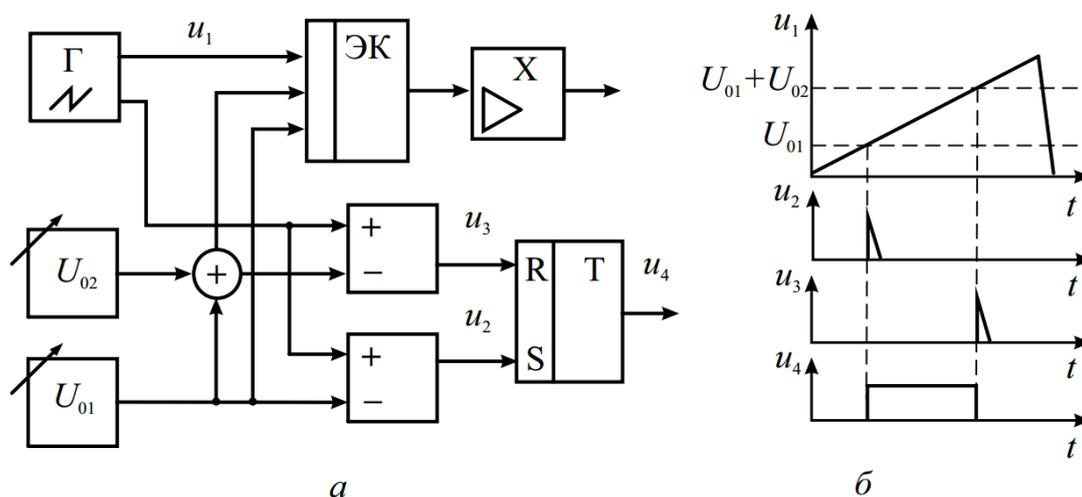


Рис.17. Создание электронных курсоров по оси времени:
а – структурная схема; б – вид экрана

Опорные напряжения и напряжение развёртки через электронный коммутатор поочерёдно подключаются к усилителю канала X . При подаче развёртки высвечивается исследуемый сигнал, при подаче напряжений луч находится в двух точках, соответствующих границам измеряемого интервала. Таким образом, формируются две точки – маркёры длительности. Совмещая маркёры с границами интересующего интервала, на табло ЭСЧ получаем его измеренное значение. Погрешность метода включает погрешность измерения временного интервала (погрешность частотомера), неточность срабатывания компараторов, неточность совмещения меток с точками изображения.

В автоматизированных осциллографах с цифровыми измерительными блоками схемы, подобные рассмотренным выше, совмещены. Эталонные сигналы воспроизводятся в виде двух ярких точек – электронных меток (маркёров). Эти метки размещают на нужных точках изображения. Интервалы напряжения и времени, соответствующие расстоянию между метками, отображаются на индикаторе. Весьма популярным в таких осциллографах является вывод буквенно-цифровой информации меток по углам экрана. Кроме того, цифровой блок обычно обеспечивает индикацию информации об установленных масштабных коэффициентах, режимах работы развёртки и пр.

В осциллографах с цифровыми блоками применяют различные способы автоматизации измерений. Кроме определения интервалов напряжений и времени, используют процентные измерения – осциллограф показывает результат измерения в процентах от заранее измеренного значения (например, в долях амплитуды или периода, принимаемых за **100 %**). Часто предусматривают автоматическую установку требуемых уровней отсчёта длительности. Сначала устанавливают метки на точки, соответствующие амплитуде импульса U_m , затем включают режим, при котором метки автоматически устанавливаются на уровень **0.5** или **0.1...0.9** от зафиксированной ранее U_m . Задача оператора в этом случае – только совместить метки с сигналом по горизонтали.

В осциллографах с цифровым блоком часто используют режим автоматического измерения частоты и периода исследуемых сигналов.

Учитывается то обстоятельство, что при неподвижном изображении устройство синхронизации осциллографа вырабатывает импульсы с частотой, равной частоте входного сигнала. Частота или период синхроимпульсов измеряются в цифровом блоке осциллографа методом дискретного счёта. Возможно также измерение длительности импульсов и скважности. Такие возможности упрощают проведение измерений и сокращают их трудоёмкость.

Отметим, что осциллографы с цифровыми измерительными блоками для исследуемого сигнала остаются обычными аналоговыми универсальными ЭЛО. Цифровая обработка сигнала в них не предусмотрена, она реализована в цифровых осциллографах.

Контрольные вопросы

1. Что такое «электронно-лучевой осциллограф»? Какие измерительные задачи решают с помощью электронно-лучевого осциллографа?

2. Объясните назначение основных узлов канала вертикального отклонения осциллографа.

3. Для чего нужна линия задержки в канале Y ? Какие требования предъявляются к её параметрам? Как будет выглядеть осциллограмма сигнала, если линия задержки будет отсутствовать?

4. Для чего в канале Y осциллографа предусматривают режим "закрытого входа"?

5. Какие дополнительные возможности обеспечивает двухканальный осциллограф по сравнению с одноканальным?

6. Назовите режимы работы электронного коммутатора осциллографа. В каких случаях используют прерывистый режим?

7. Почему электронный коммутатор связан с генератором развёртки осциллографа?

8. Для чего нужна связь канала развёртки с каналом модуляции луча по яркости?

9. Какие режимы работы генератора развёртки используют в осциллографах?

10. Как выглядит напряжение развёртки в автоколебательном режиме? Для чего нужен участок блокировки?

11. Как, зная форму напряжения развёртки, оценить установленный коэффициент развёртки ЭЛО?
12. В каких случаях применяют ждущую развёртку?
13. Укажите условие неподвижности осциллограммы в автоколебательном режиме работы развёртки. Нарисуйте график напряжения развёртки при получении на экране устойчивого изображения одного периода сигнала (двух периодов сигнала).
14. Назовите режимы синхронизации осциллографа. В каких случаях используются эти режимы?
15. Какой сигнал вырабатывает устройство синхронизации и запуска? Как он связан с входным сигналом осциллографа?
16. Для чего используют регулировку уровня в блоке синхронизации и запуска осциллографа? В каких случаях используют переключение полярности синхронизации и запуска?
17. Укажите достоинства и недостатки использования режима «растяжки» в канале X осциллографа. Почему этот режим является дополнительным для осциллографа?
18. Что такое «двойная развёртка» осциллографа? В чём преимущества осциллографов с двойной развёрткой?
19. Какие параметры канала вертикального отклонения характеризуют его быстродействие? Укажите способы их измерения.
20. Дайте определение переходной характеристики и амплитудно-частотной характеристики осциллографа.
21. Как связаны время нарастания переходной характеристики и верхняя граничная частота АЧХ осциллографа?
22. Почему нормальный диапазон АЧХ осциллографа меньше полосы пропускания, отсчитываемой по уровню 0,707?
23. Укажите основные источники погрешностей метода калиброванных шкал. Каковы пути их уменьшения?
24. Каково назначение калибратора осциллографа? Какова форма его сигнала?
25. Как используют метод замещения для измерения напряжения с помощью осциллографа?
26. Как реализуют метод электронных меток (метод сравнения с эталоном) в осциллографах с цифровыми измерительными блоками?
27. Как измерить с помощью осциллографа постоянное напряжение (при отсутствии вольтметра)?

2. ЦИФРОВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

2.1 Принцип действия и структурная схема цифрового осциллографа

В электронно-лучевом осциллографе использован аналоговый способ создания изображения исследуемого сигнала на экране ЭЛТ. В осциллографах с цифровыми измерительными блоками этот принцип не меняется – цифровая часть выполняет только функции создания эталонного изображения (электронных меток). Принцип осциллографирования, основанный на преобразовании аналогового сигнала в поток цифровых данных, запоминаемый в ОЗУ и отображаемый на экране в виде массива светящихся точек, получил название цифровой осциллографии, а соответствующие ему приборы – цифровыми осциллографами (ЦО). Преобразование мгновенных значений сигнала в цифровые коды и сохранение их в блоке памяти позволяет решить ряд задач, недоступных аналоговым осциллографам:

- Возможность работы ЦО с одиночными и случайными сигналами, которые запоминаются и затем выводятся на экран. Именно поэтому ЦО часто называют цифровыми запоминающими осциллографами – *Digital Storage Oscilloscope (DSO)*.

- Достижение высокой точности измерения напряжения и временных интервалов, характерной для цифровых приборов;

- Увеличение полосы пропускания путём использования современных быстродействующих АЦП;

- Расширение возможностей синхронизации и запуска;

- Проведение косвенных измерений с индикацией результатов на экране;

- Подключение к измерительным системам.

Особенностью построения ЦО является разделение блоков оцифровки входного сигнала и блоков построения изображения на экране. В них отсутствует сквозной тракт прохождения сигнала от входа до индикатора. При этом упрощается построение широкополосных входных усилителей, так как от них не требуется больших выходных напряжений, что необходимо в традиционном ЭЛО. Построение изображения производят программным способом. Быстродействие ЦО

ограничивается, в основном, возможностями АЦП. Для его повышения приходится использовать АЦП с небольшой разрядностью, что приводит к появлению на экране заметных шумов квантования.

Обобщенная структурная схема цифрового осциллографа представлена на рис. 18.

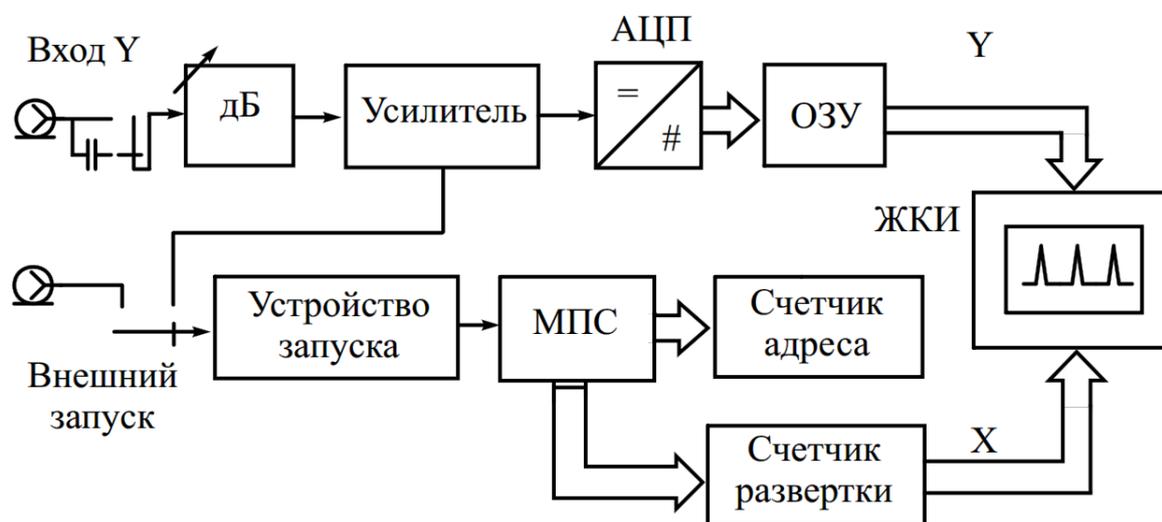


Рис.18. Структурная схема цифрового осциллографа

Входной аналоговый блок выполняет обычные для любого осциллографа функции – регулировку чувствительности, переключение «открытый/закрытый» вход, усиление сигнала. Далее сигнал поступает на быстродействующий аналого-цифровой преобразователь. Моменты выборки значений сигнала определяются тактовой частотой АЦП (дискретизация по времени). Квантование сигнала по уровню задаётся разрядностью АЦП. Как правило, используют равномерную дискретизацию – мгновенные отсчёты сигнала берутся через равные отрезки времени (интервалы дискретизации) и им присваивается цифровой код, соответствующий ближайшему уровню квантования. Разность между соседними уровнями называется интервалом квантования – он определяет разрешающую способность цифрового осциллографа по уровню. Интервал дискретизации определяет быстродействие осциллографа – чем меньше этот интервал, тем более быстрые процессы можно наблюдать на экране без искажения. Массив цифровых данных с АЦП поступает в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ).

При формировании изображения данные сигнала последовательно извлекаются из ОЗУ. Для управления выборкой из ОЗУ используют счётчик адресов. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) канала Y преобразует поток цифровых данных в аналоговый сигнал, который поступает на вход Y осциллографического индикатора. Одновременно с помощью счётчика развёртки вырабатываются линейно-нарастающие коды, имитирующие ход осциллографической развёртки. Эти коды подают на вход канала X . Аналоговый сигнал развёртки формируют с помощью ЦАП и подают его на вход X индикатора.

Наиболее часто в цифровых осциллографах применяют матричные дисплеи (монохромные и цветные), не требующие обратного цифроаналогового преобразования. Электровакуумные растровые дисплеи в настоящее время заменены матричными индикаторами на жидкокристаллических панелях. Такие дисплеи компактны, не требуют высоковольтных источников питания, обеспечивают равномерную яркость изображения и лёгкость оцифровки осциллограммы. Традиционные ЭЛТ в сочетании с ЦАП в каналах X и Y используют только в комбинированных аналого-цифровых осциллографах.

Момент начала формирования изображения, как и в аналоговом осциллографе, определяется устройством запуска. С этого устройства на микропроцессор поступает импульс, соответствующий началу входного сигнала (или сигналу внешнего запуска). Дополнительно в ЦО предусматривают большое количество программных способов запуска на основе анализа всего преобразованного сигнала.

Для оцифровки мгновенных значений сигнала в ЦО используют быстродействующие АЦП мгновенных значений невысокой разрядности (8, реже – 10..12 бит). Частоту дискретизации выбирают в пределах от 10 – 100 МГц (в недорогих моделях) до единиц и даже десятков ГГц (в быстродействующих ЦО).

Рассмотрим работу параллельного АЦП, который часто применяют в ЦО. Он имеет высокую скорость преобразования – от единиц ГГц (10⁹ отсчётов/сек) для стандартных устройств до 10 – 20 ГГц для специальных разработок. На рис. 19 показана упрощённая схема трёхразрядного параллельного АЦП.

Он содержит линейку компараторов, делитель напряжения и дешифратор. Каждый компаратор сравнивает входное напряжение U_x с последовательно увеличивающимися порогами квантования $U_n = U_n - 1 + \Delta U$.

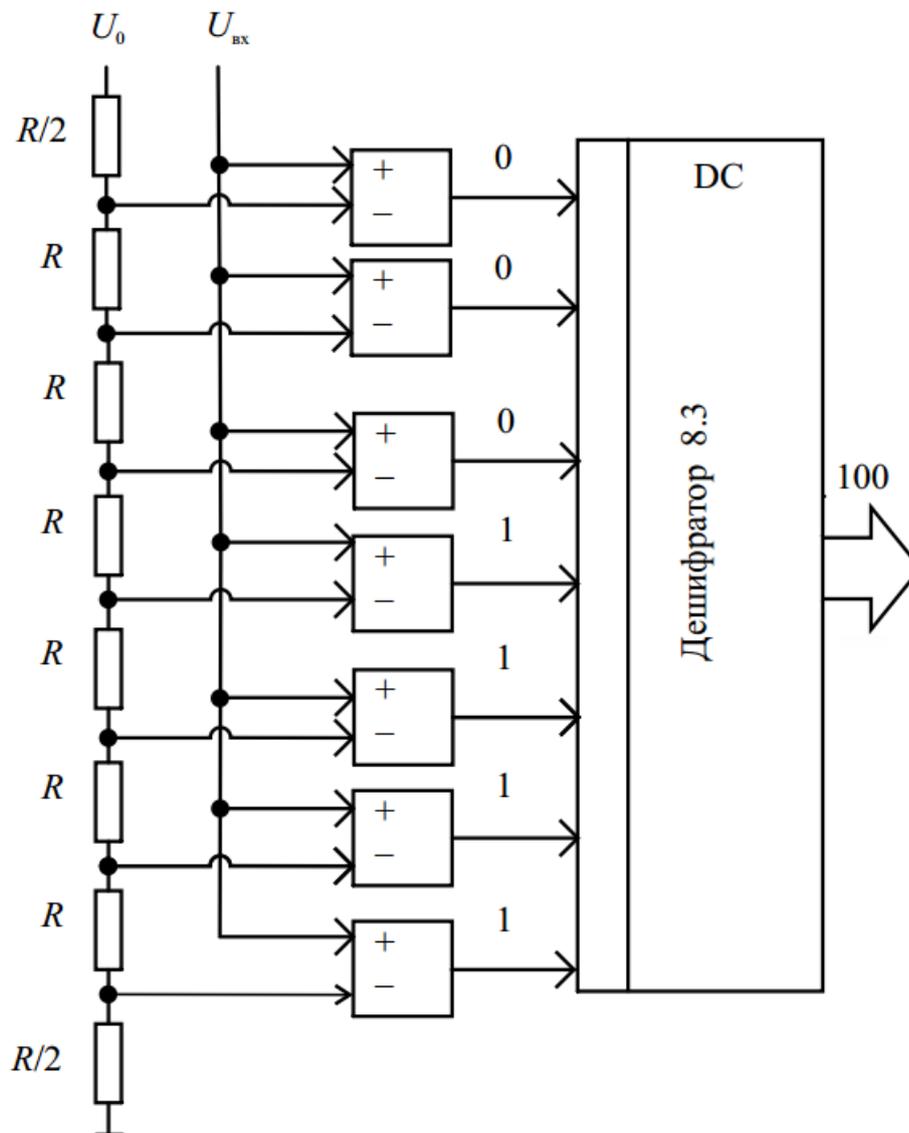


Рис. 19. Трёхразрядный АЦП параллельного типа

Эти пороги формируются из опорного напряжения U_0 прецизионным резистивным делителем. Значения опорных напряжений начинаются со значения, равного половине младшего значащего разряда, и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным $\Delta U = U_0/2k$, где k – двоичная разрядность АЦП. В результате для приведённого на рисунке 3-х

разрядного АЦП требуется $2^3 - 1 = 7$ компараторов. Но для 8-разрядного параллельного АЦП их потребуется уже **255!**

Каждый компаратор устанавливает на выходе логическую единицу, если напряжение входного сигнала больше опорного напряжения на втором входе. В противном случае на выходе компаратора сохраняется логический нуль. С увеличением входного напряжения компараторы последовательно, начиная с компаратора младшего разряда, устанавливают на своих выходах логическую единицу. Точка переключения единицы на нуль соответствует мгновенному уровню входного сигнала. Таким образом, логические сигналы на выходе линейки компараторов ведут себя аналогично столбику ртутного термометра при изменении температуры. Поэтому выходной код линейки компараторов называют термометрическим кодом. Для приведения его к более компактному двоичному виду используют преобразователь кодов (дешифратор).

Быстродействие параллельных АЦП ограничено, в основном, скоростью сравнения напряжений в компараторах. Из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность и довольно громоздки. Комбинация нескольких таких АЦП, работающих с сдвигом по времени («конвейерные АЦП»), позволяет значительно увеличить эффективную частоту дискретизации сигнала. Когда не требуется высокая скорость преобразования, а определяющими факторами являются невысокая цена и низкое энергопотребление, то обычно применяют более компактные АЦП поразрядного уравнивания и последовательного приближения, рассмотренные ранее в главе, посвящённой цифровым вольтметрам. Используют также комбинированные параллельно-последовательные схемы.

Блок памяти ЦО состоит из двух частей: быстрое буферное ОЗУ (БОЗУ) и медленное ОЗУ (МОЗУ). БОЗУ осуществляет приём данных от АЦП в реальном времени с частотой дискретизации входного сигнала. БОЗУ в обычном режиме работы непрерывно пополняется от АЦП. Оно построено по принципу *FIFO* (первым вошёл – первым вышел), то есть при записи нового отсчёта исчезает самый «старый». Быстродействующее устройство памяти достаточно дорого, поэтому в

бюджетных моделях ЦО ёмкость БОЗУ невелика (1...64 Кслов). В дорогих ЦО её делают существенно больше. Например, в современных моделях фирмы *Tektronix TDS – 6604* ёмкость БОЗУ составляет 250 Кслов, в *TDS – 7704B– 64* Мслова), при этом скорость записи-чтения достаточна для синхронизации его работы с частотой дискретизации АЦП.

Объём БОЗУ («глубина памяти» ЦО) – важнейший параметр осциллографа. Он определяет максимальное количество точек, которыми может быть представлен исследуемый сигнал. Глубина памяти связана с установленным на осциллографе коэффициентом развёртки K_p (временным масштабом изображения) и частотой дискретизации f соотношением $K_p \cdot 0 \cdot f_d$ (длина шкалы осциллографа обычно 10 делений). Для больших коэффициентов развёртки (например, при наблюдении медленных сигналов) объём памяти может оказаться недостаточным. В этом случае приходится уменьшать частоту дискретизации сигнала.

Как правило, для изображения сигнала на обычном матричном индикаторе достаточно 500 – 1000 точек. Поэтому на экран обычно выводится не все содержимое памяти, а его часть. Часто возникает ситуация, когда на одну точку изображения приходится несколько отсчётов, количество которых задаётся выбранным временным масштабом и частотой дискретизации. Алгоритмы построения изображения в этом случае рассмотрены далее. В ряде осциллографов изображение строят для бóльшего количества точек, чем выводится на экран (скрытый экран). Это позволяет, просматривая изображение, смещать экран влево и вправо, анализируя начальные и конечные фрагменты сигнала.

Второй блок памяти (медленное ОЗУ) представляет собой фактически оперативное запоминающее устройство микропроцессорной системы. МОЗУ имеет большую ёмкость и используется микропроцессором для хранения результатов вычислений и обработки входных отсчётов, данных изображения (видеопамять) и пр.

Цифровые осциллографы обычно делают многоканальными (как минимум, двухканальными). Преобразованные сигналы распределяются

по имеющейся памяти, поэтому обычно глубина памяти на один канал в два раза меньше, чем в одноканальном режиме.

Всей работой ЦО управляет встроенный микропроцессор. Различают два класса ЦО: с открытой и закрытой архитектурой. Последние содержат специализированные микропроцессорные системы, достаточно простые и дешёвые, со специальным программным обеспечением работы прибора. Приборы с открытой архитектурой построены на основе персонального компьютера со стандартной операционной системой. Последнее обстоятельство упрощает обработку универсальными программами для персональных компьютеров, позволяет использовать большой объём стандартного программного обеспечения и пр.

Подключение цифрового осциллографа к исследуемому устройству осуществляют выносным пробником. Кроме пассивных пробников-делителей, используемых в аналоговых ЭЛО, применяют более сложные активные пробники, позволяющие повысить чувствительность и уменьшить паразитную входную ёмкость. Несмотря на довольно высокую стоимость, активные пробники наилучшим образом подходят для измерений, для которых требуется широкая полоса пропускания (до единиц ГГц). Как правило, такие пробники дороже пассивных и имеют более узкий диапазон входных напряжений. Однако благодаря значительно меньшей входной ёмкости (порядка **1 пФ** и менее!) они обеспечивают более точные измерения быстрых сигналов.

Для работы активного пробника необходим источник питания, которое подают через «интеллектуальный интерфейс» на входном разъёме ЦО. Он также служит каналом связи между пробником и осциллографом. Как правило, через такой интерфейс ЦО способен определить тип подключенного пробника, установить нужные значения входного импеданса, коэффициента ослабления и диапазона смещения. Отметим, что некоторые осциллографы способны распознавать коэффициенты деления и обычных пассивных пробников, у которых конструкция разъёма предусматривает выдачу информации о коэффициенте деления.

В ряде измерительных задач используют специализированные активные пробники. Это, прежде всего, дифференциальные пробники,

предназначены для исследования разницы сигналов между точками схемы, изолированных от общего провода. Такие сигналы можно исследовать двухканальным осциллографом в режиме вычитания каналов, однако этот метод на высоких частотах даёт погрешности из-за неидентичности каналов осциллографа. Дифференциальный пробник преобразует два сигнала в один, который и поступает на вход канала Y для измерения. Применение дифференциального пробника позволяет подавить синфазную помеху, которая наводится на оба входа пробника («синфазный шум»). Использование дифференциальных пробников позволяет упростить подключение ЦО к схемам, выполненным по технологии поверхностного монтажа с планарным расположением элементов (*SMT – Surface Mount Technology*).

Для использования ЦО на сверхвысоких частотах применяют пассивные пробники согласованного типа («согласованная линия передачи»). Он представляет собой линию передачи с волновым сопротивлением **50 Ом**, подключенную на 50-омный вход осциллографа. На входе пробника установлен резисторный делитель, обеспечивающий ослабление **10:1** или **20:1** и входное сопротивление **500** или **1000 Ом**. Важнейшее преимущество низкоомных пассивных пробников – крайне малая (доли пФ) входная ёмкость и широкая полоса пропускания (порядка нескольких гигагерц), что позволяет выполнять точные измерения временных характеристик. Кроме того, такие пробники имеют относительно невысокую стоимость по сравнению с активными пробниками с такой же полосой пропускания. Следует помнить, что для использования этого типа пробников осциллограф обязательно должен иметь входное сопротивление **50 Ом**.

Большинство осциллографических пробников представляют собой датчики напряжения. Однако существуют пробники, которые позволяют регистрировать и другие физические величины. Например, для регистрации тока, протекающего через проводник, используются бесконтактные токовые пробники. Такой пробник преобразует ток в соответствующий сигнал напряжения и подаёт его на вход осциллографа. Головка пробника выполняется в виде многовиткового токового трансформатора, напоминающего токовые клещи цифровых мультиметров. Осциллографические токовые пробники

имеют чувствительность порядка десятков мА/дел, максимальное значение измеряемого тока – десятки и даже сотни ампер в полосе частот до сотен МГц.

Особым видом пробников являются «оптические» пробники. Они применяются для гальванической развязки исследуемого устройства от общего провода («земли») осциллографа. Выносной пробник с оптронным изолятором (оптрон – комбинация светодиода и фотодиода) делает гальванически развязанным только сам пробник, а осциллограф остается заземлённым. Исследуемый сигнал подаётся на входные контакты изолированного пробника. Схема развязки пробника передаёт сигнал через изолятор на приёмник, который создаёт сигнал относительно «земли», пропорциональный входному дифференциальному сигналу. Другой вид оптических пробников – это преобразователи оптического излучения (например, сигналов волоконно-оптических линий связи) в сигнал напряжения для последующего исследования осциллографом.

Представленные на рынке цифровые осциллографы можно условно разбить на несколько видов:

– Бюджетные модели ЦО с полосой рабочих частот до **100 – 500 МГц**. Это относительно недорогие, компактные приборы широкого применения. В основном, они предназначены для замены универсальных аналоговых осциллографов.

– Комбинированные портативные ЦО в сочетании с мультиметром. Их называют скопметры (*Scopemeter*). Эти переносные приборы имеют компактную конструкцию с жидкокристаллическим дисплеем небольшого размера, автономное питание (время работы без подзарядки до нескольких часов). Они предназначены для работы в производственных и полевых условиях.

– Многофункциональные вычислительные ЦО с мощными встроенными микропроцессорами и компьютерами. Имеют повышенную частоту дискретизации (так, частота **20 ГГц** и выше в реальном масштабе времени уже достигнута в современных моделях осциллографов класса *high – end* фирм *Textronix, LeCroy* и *Keysight*).

– Виртуальные ЦО, выполняемые в виде приставок к персональному компьютеру. Приставка содержит аналоговую часть ЦО и АЦП. Для связи с компьютером используют интерфейс *USB*, поэтому такие приборы носят название «*USB – осциллографы*». Программное обеспечение виртуального осциллографа позволяет получить на экране ПК переднюю панель виртуального прибора и наблюдать результат его работы.

2.2. Режимы работы цифрового осциллографа

Рассмотрим основные режимы работы блока развёртки ЦО. Он преобразует коды, вырабатываемые микропроцессором, в напряжение развёртки. Для матричных дисплеев коды развёртки преобразуются в номер столбца, соответствующего отображаемой точке. Номер строки дисплея определяется кодом преобразованного значения сигнала. Наиболее простой режим работы блока развёртки имитирует работу самописца (режим самописца – *ROLL mode*). Он заключается в следующем. Входной сигнал непрерывно записывается в БОЗУ. Одновременно отсчёт сигнала выводится в правом краю экрана. При поступлении следующего отсчёта осциллограмма сдвигается на один столбец влево. Процесс повторяется с каждым новым отсчётом. Таким образом, осциллограмма на экране плавно смещается справа налево, имитируя движение ленты самописца. При достижении левой части экрана самый старый отсчёт теряется. Очевидно, что такое изображение можно наблюдать только при медленных развёртках, в противном случае изображение будет смещаться слишком быстро.

В любой момент «самописец» можно остановить и зафиксировать изображение сигнала. Режим самописца в сочетании с запуском ЦО по событию позволяет наблюдать редко происходящие события.

Для быстрых сигналов режим самописца применять сложно, так как скорость перемещения изображения становится слишком велика. В этом случае используют одиночный режим развёртки (*single shot mode*). В нём отсутствует непрерывный вывод отсчётов на экран. Кадр изображения строится последовательно (в реальном времени) по отсчётам входного сигнала при возникновении события запуска (например, ручного нажатия кнопки ПУСК, подачи внешнего сигнала запуска) (рис. 20).

Скорость вывода осциллограммы не обязательно совпадает со скоростью оцифровки сигнала. Это позволяет реализовать режим растяжки изображения с сохранением его параметров (точности, яркости и пр.) даже для одиночного режима развёртки.

Для наблюдения повторяющихся сигналов используют непрерывный режим развёртки (*refresh mode*). Этот режим аналогичен автоколебательному или ждущему режимам аналогового осциллографа. В автоколебательном режиме запуски кадры изображения непрерывно строятся даже в отсутствие события запуска. В ждущем режиме кадр строится только при появлении события запуска. Однако в ЦО между событиями запуска на экране сохраняется предыдущий кадр изображения (в аналоговом осциллографе изображение в этом случае отсутствует).

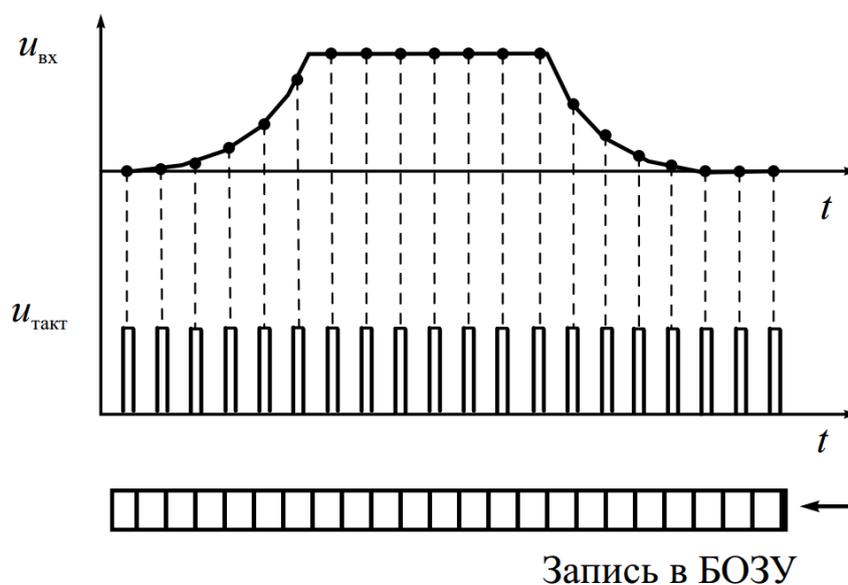


Рис.20. Построение осциллограммы сигнала в режиме реального времени

Режим эквивалентного времени (*equivalent time mode*) применяют для наблюдения коротких сигналов (при малых коэффициентах развёртки), когда количество отсчётов от одной копии сигнала на экране в режиме реального времени становится слишком малым. В этом режиме кадр строится на основе данных оцифровки нескольких копий сигнала. На рис. 21 показано изображение,

полученное при наложении отсчётов нескольких циклов регистрации сигнала.

Этот режим напоминает принцип преобразования временно́го масштаба, используемый в аналоговых стробоскопических осциллографах, но там от каждой копии сигнала образуется только один отсчёт. В режиме эквивалентного времени можно наблюдать осциллограмму сигнала в масштабе, соответствующем значительно бо́льшей частоте дискретизации (до единиц и даже десятков ГГц). Однако это возможно только при исследовании повторяющихся сигналов.

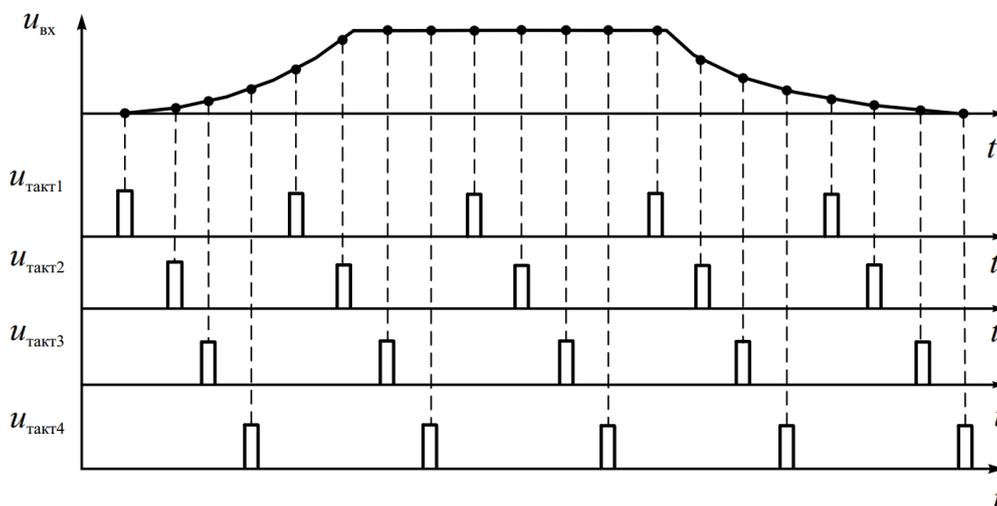


Рис.21. Построение осциллограммы сигнала в режиме эквивалентного времени

При построении изображения сигнала используется только часть БОЗУ, поэтому в ЦО возможны режимы «предзапуска» и «послезапуска». Эти режимы специфичны для ЦО и заключаются в следующем.

Напомним, что аналоговый ЭЛО воспроизводит на экране входной сигнал только после импульса запуска. Информация о других частях сигнала (до запуска и через некоторое время после запуска) отсутствует. В цифровых осциллографах АЦП непрерывно пополняет информацию в БОЗУ. Событие запуска (например, фронт входного сигнала, приход внешнего импульса запуска) делит содержимое БОЗУ на две части – буфер предпусковых данных (предзапись) и буфер послепусковых

данных (послезапись). Если при построении изображения осуществить сдвиг адресов БОЗУ (например, считать данные, предшествующие событию запуска), то на экране воспроизводится форма сигнала, предшествующая запуску. Сдвиг адресов в другую сторону позволяет получить задержанный относительно события запуска сигнал. Таким образом, режим предзапуска позволяет «заглянуть в прошлое» на ту часть сигнала, которая предшествовала запускающему импульсу. Режим послезапуска обеспечивает задержку изображения относительно момента запуска. Стандартный режим запуска ЦО: **50%** предзапись и **50%** послезапись. При этом точка запуска строится в центре экрана индикатора (рис. 22). В этом проявляется отличие запуска ЦО от запуска ЭЛО – у последнего точка запуска располагается всегда в начале экрана. Наличие режимов предзапуска и послезапуска – важное преимущество ЦО, отсутствующее в аналоговых ЭЛО.

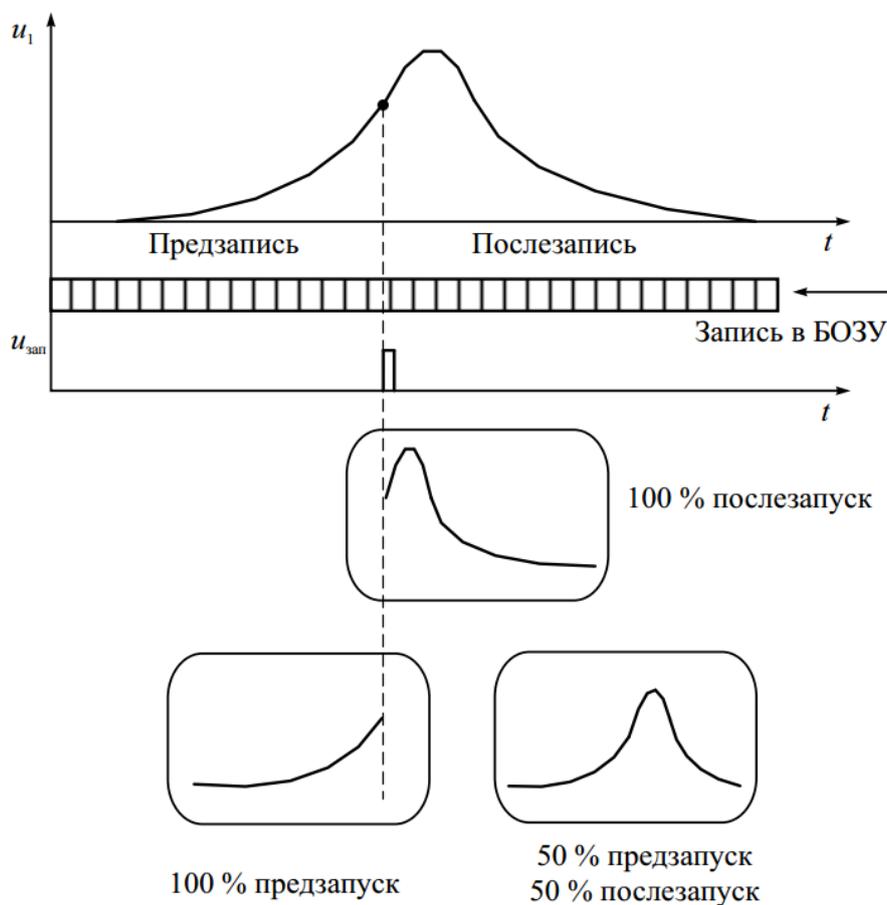


Рис.22. Режимы предзапуска и после запуска цифрового осциллографа

Рассмотрим условия неискажённого воспроизведения формы сигнала на экране. В ЦО осуществляется дискретизация исследуемого сигнала во времени. Частота дискретизации f_d (по теореме Котельникова) связана с верхней граничной частотой спектра сигнала f_B , форму которого можно восстановить без искажения, следующим соотношением $f_d \geq 2f_B$. При выводе на экран отсчётов сигнала в виде точек реконструкция его формы происходит визуально, путём мысленного соединения ближайших точек. При малом количестве отсчётов даже при выполнении условия Котельникова возможен эффект «наложения», когда глаз оператора конструирует ложное изображение (*alias*). На рис. 23 демонстрируется эффект наложения при наблюдении гармонического сигнала, на период которого попадает 2 отсчёта.

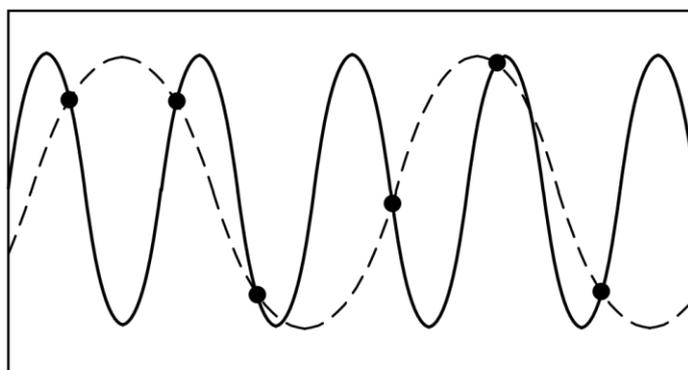


Рис.23. Эффект наложения при недостаточной частоте дискретизации сигнала

Чтобы избежать эффекта наложения, следует придерживаться правила: частота дискретизации должна быть по крайней мере в **10** раз выше частоты сигнала. Это касается любого цифрового осциллографа в режиме поточечного (*dots*) построения изображения.

В случае недостаточного количества точек необходимо использовать режим интерполяции (иногда называемый векторным режимом построения изображения). Чаще всего в ЦО применяются два типа интерполяции – линейная и синусоидальная. При линейной интерполяции добавляются точки, расположенные на прямой линии между отсчётами сигнала. При этом для получения качественного изображения достаточно выполнять условие $f_d \geq 2f_B$. Линейная интерполяция больше подходит к импульсным сигналам. Для «гладких»

сигналов лучше использовать синусоидальную интерполяцию типа « $\sin(x)/x$ », которая позволяет получить приемлемое качество изображения уже при $f_d \geq (3 \dots 4) f_v$. Для проведения интерполяции необходимо проводить расчёты с большим массивом данных, что снижает скорость вывода осциллограмм на экран.

Рассмотрим теперь режимы построения изображения при достаточно большом количестве отсчётов сигнала. Как уже говорилось ранее, для матричного индикатора достаточно **500 – 1000** точек, соответствующих разрешающей способности экрана. В то же время часто возникает ситуация, когда количество отсчётов, попадающее на выбранный для наблюдения временной интервал (заданный коэффициентом развёртки и числом делений шкалы), существенно превышает количество точек изображения. То есть, на каждую точку изображения приходится выборка отсчётов, размер которой зависит от временного масштаба и частоты дискретизации. Возникает задача «прореживания» этой выборки (децимация), которая в известном смысле обратна задаче интерполяции. Прореживание данных производится при выводе изображения и выполняется по различным алгоритмам. Так, в стандартном режиме выводится на экран только одна точка из выборки (например, последняя). В режиме усреднения соседних точек на экран выводится точка, представляющая собой среднее арифметическое отсчётов выборки. Этот режим позволяет эффективно снижать шумы квантования АЦП, однако на экране будут представлены не мгновенные значения оцифрованного сигнала, а результаты его обработки (усреднения). В ряде измерительных задач это нежелательно. В режиме пик-детектора каждая нечётная точка строится по отсчёту с максимальным значением в выборке; следующая (чётная) – по отсчёту с минимальным значением в выборке. Режим пик-детектора не позволяет пропустить короткие выбросы в сигнале. Наличие в сигнале коротких импульсных помех остаётся скрытым в стандартном режиме, но они хорошо наблюдаются в режиме пик-детектора. Применение этого режима позволяет использовать максимальную частоту дискретизации прибора на длинных развёртках.

Цифровые осциллографы имеют широкий выбор режимов синхронизации и запуска. Событие запуска в ЦО имеет смысл начала

построения осциллограммы – по фронту, срезу, по определённой длительности сигнала, по заданному численно уровню сигнала. Синхронизация по длительности импульса (или по выбросу) – это запуск развёртки по длительности импульса, меньшей или бóльшей выбранного значения, равной или не равной выбранному.

ЦО, как правило, имеют режим синхронизации и запуска телевизионным сигналом по выбранным строкам, по нечётным и чётным полям, по всем полям композитного видеосигнала или телевещательных стандартов (*NTSC, PAL, SECAM*). Для исследования цифровых сигналов применяют запуск по кодовому слову, по заданному количеству импульсов, по сигналам шин интерфейсов (например, *USB, CAN, I2C* и др.). Это могут быть стартовые биты кадра данных, состояния начала и конца пакета данных и др.

В цифровых осциллографах режим записи/воспроизведения сигнала реализуется при однократном запуске АЦП. Буфер данных полностью заполняется и после этого сбор данных прекращается (отключается АЦП). Весь буфер БОЗУ при этом доступен для просмотра в произвольном масштабе (с растяжкой, сжатием, со смещением по времени и пр.).

Контрольные вопросы

1. Опишите принцип действия цифрового осциллографа. В чём отличие его от аналогового электронно-лучевого осциллографа?
2. Какие измерительные задачи, недоступные аналоговому ЭЛО, можно решать с помощью цифрового осциллографа?
3. В чём отличие структурной схемы цифрового осциллографа от аналогового ЭЛО? Какие общие блоки используются в ЦО и ЭЛО?
4. Какие особенности имеют АЦП цифровых осциллографов? Опишите работу быстродействующего параллельного АЦП цифрового осциллографа.
5. Как выполняют блок памяти в ЦО? Что такое «глубина памяти» ЦО? Как размер памяти связан с частотой дискретизации АЦП и максимальным коэффициентом развёртки осциллографа?
6. Перечислите режимы работы развёртки ЦО. Что такое режим «самописца»? В каких случаях его используют?

7. Что такое одиночный и непрерывный режим развёртки ЦО? Для каких случаев используют режим эквивалентного времени?
8. Как реализуют в ЦО режимы «предзапуска» и «послезапуска», какие дополнительные возможности они дают?
9. Каковы условия неискажённого воспроизведения формы сигнала ЦО? Как выбрать частоту дискретизации и разрядность АЦП?
10. Для чего в ЦО применяют режимы интерполяции? Какие типы интерполяции используют для исследования гладких и импульсных сигналов?
11. Как строится изображение сигнала на экране ЦО при большом количестве отсчётов? Как проводят прореживание отсчётов? Что такое режимы усреднения и пик-детектора?
12. Какие виды синхронизации и запуска предусматривают в ЦО? Как реализуют режим запоминания в ЦО?
13. В чём состоят недостатки ЦО, которые приводят к необходимости в ряде случаев использовать аналоговые ЭЛО?

3. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Лабораторная работа № 1

Измерение параметров переменных напряжений и токов с помощью осциллографа ОСУ-10В

Цель работы: формирование навыков работы с аналоговым осциллографом при измерении параметров переменных напряжений и токов.

Теоретическая часть

Осциллограф ОСУ-10В (далее осциллограф) – однолучевой аналоговый электронный осциллограф. Подробные характеристики прибора, порядок проверки его работоспособности и выполнения измерений подробно описаны в руководстве «Осциллограф сервисный универсальный ОСУ10А/ОСУ10В».

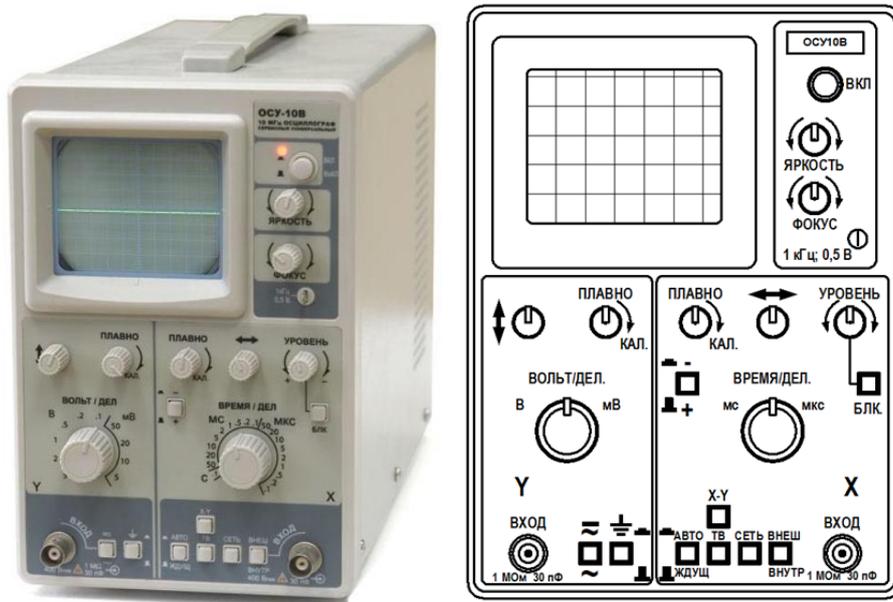


Рис. 1.1. Лицевая панель осциллографа ОСУ-10В.

Перед выполнением экспериментов лабораторных работ № 1 и № 2 необходимо ознакомиться с назначением органов управления осциллографом.

Все органы управления осциллографа расположены на лицевой панели прибора (рис. 1.1). Лицевая панель осциллографа разделена на 4 зоны:

- экран электронно-лучевой трубки;

- зона управления параметрами луча на экране осциллографа и включения питания («зона ВКЛ») – расположена справа от экрана;
- зона управления усилителем вертикального отклонения луча («зона Y ») – слева в нижней части лицевой панели. На расположенный в этой зоне разъём «Вход Y » подаётся исследуемый сигнал;
- зона управления генератором развёртки и усилителем горизонтального отклонения луча («зона X » – справа в нижней части лицевой панели).

Разъём «Вход X » используется для подключения внешнего сигнала синхронизации или сигнала развёртки луча вдоль оси X экрана в режиме « $Y - X$ ».

Включение осциллографа

Перед использованием осциллографа необходимо проверить его подключение к розетке сети **220 В** блока однофазного источника питания (блок **218**).

Входы осциллографа должны быть отключены от любых источников сигнала.

Проверить исходное положение органов управления осциллографа:

- установить в среднее положение ручки «ЯРКОСТЬ», «ФОКУС» («зона ВКЛ»), ручки вертикального (\updownarrow – «зона Y ») и горизонтального (\leftrightarrow – «зона X ») смещения луча на экране, ручку «УРОВЕНЬ», т.е. уровень напряжения запуска развёртки («зона X »);
- ручки «Плавно» в зонах « X » и « Y » повернуть по часовой стрелке до упора;
- переключатель чувствительности канала « Y » («ВОЛЬТ/ДЕЛ.») установить в положение «5 В/дел»;
- отжать все кнопки в зонах « X » и « Y », кроме кнопки «АВТО/ЖДУЩ.» и кнопки « \approx/\sim ». Кнопку «АВТО/ЖДУЩ.» необходимо установить в положение «АВТО» (нажать), что соответствует автозапуску развёртки. Кнопку « \approx/\sim » необходимо установить в положение « \approx » (нажать). При этом на экране

осциллографа исследуемый сигнал отображается полностью вместе с постоянной составляющей.

- Для включения прибора нажать кнопку «Вкл.» в правом верхнем углу лицевой панели. Должен включиться индикатор питания рядом с кнопкой «Вкл.». Прогреть прибор не менее 5 мин.

- После появления луча на экране, ручками вертикального (\updownarrow – «зона Y ») и горизонтального (\leftrightarrow – «зона X ») смещения луча установить луч на среднюю линию экрана.

Проверка исправности осциллографа

- Выполнить указания пункта «Включение осциллографа».
- Подключить щуп к входу « Y » осциллографа.
- Установить переключатель на корпусе щупа в положение « $x1$ », т. е. щуп не ослабляет входной сигнал.
- Вторым концом щупа присоединить к выходу калиброванного сигнала « $1 \text{ кГц}, 0,5 \text{ В}$ » (расположен в нижней части «зоны ВКЛ»).

- Переключатель чувствительности «ВОЛЬТ/ДЕЛ.» установить в положение $0,5 \text{ В/дел.}$

- Переключатель развёртки («ВРЕМЯ/ДЕЛ») установить в положение $0,5 \text{ мс/дел.}$

- Проверить положение ручек «Плавно» в зонах « X » и « Y » – они должны быть установлены по часовой стрелке до упора. В этом случае чувствительность и развёртка осциллографа, соответствуют значениям, установленным переключателями «ВОЛЬТ/ДЕЛ.» и «ВРЕМЯ/ДЕЛ.»

На экране должны появиться прямоугольные импульсы калиброванного сигнала. Высота импульсов амплитудой $0,5 \text{ В}$ должна быть равна одному вертикальному делению сетки на экране осциллографа, т.е. соответствовать чувствительности канала вертикального отклонения $0,5 \text{ В/дел.}$

Длительность периода калиброванного сигнала 1 мс , частотой следования 1000 Гц , должна быть равна двум делениям сетки осциллографа, т. е. соответствовать развёртке $0,5 \text{ мс/дел.}$

Работа с осциллографом в режиме линейной развёртки « $Y - t$ »

- Выполнить операции, описанные выше в пунктах «Включение осциллографа» и «Проверка исправности осциллографа».

- Подключить щуп к «входу Y » осциллографа.

- Установить переключатели «ВОЛЬТ/ДЕЛ.» и «ВРЕМЯ/ДЕЛ.» в положения, примерно соответствующие уровням исследуемого сигнала. Если амплитуда исследуемого сигнала превышает **20 В**, то переключатель на корпусе щупа необходимо установить в положение « $\times 10$ », т. е. включить делитель, ослабляющий входной сигнал в **10** раз.

- Подключить оба конца щупа к исследуемому сигналу.

- Используя ручки регулировки чувствительности («ВОЛЬТ/ДЕЛ.», «ПЛАВНО») и ручку вертикального (\updownarrow – «зона Y ») смещения луча установить удобный для наблюдения диапазон вертикального отклонения луча.

- Кнопку « \sim/\sim » установить в положении « \sim ». При этом на экране должен отображаться полный сигнал с постоянной составляющей. В положении « \sim » из исследуемого сигнала постоянная составляющая исключается.

При нажатии кнопки « $\frac{1}{2}$ » вход усилителя « Y » отключается от гнезда на лицевой панели и замыкается на корпус прибора. При этом положение линии развёртки на экране соответствует нулевому уровню входного сигнала.

- Ручками регулировки развёртки («ВРЕМЯ/ДЕЛ.», «ПЛАВНО») и горизонтального (\leftrightarrow – «зона X ») смещения луча установить на экране желаемое число периодов исследуемого сигнала. Если сигнал не синхронизирован с развёрткой (изображение «бежит» вдоль оси X), необходимо ручкой «УРОВЕНЬ» добиться неподвижного изображения сигнала на экране. В этом случае развёртка запускается в момент времени, когда исследуемый сигнал превышает напряжение, заданное регулировкой «УРОВЕНЬ». Кнопка « $+/-$ » позволяет выбрать полярность исследуемого сигнала в момент запуска развёртки: « $+$ » – полярность положительная, « $-$ » – полярность отрицательная.

Кнопки управления в нижней части «зоны X » позволяют выбрать дополнительные режимы запуска развёртки:

✓ кнопка «АВТО-ЖДУЩ.» в положении «ЖДУЩ.» – развёртка запускается однократно только при превышении амплитуды исследуемого сигнала уровня запуска;

✓ «ТВ» – используется для синхронизации развёртки телевизионным сигналом;

✓ «СЕТЬ» – синхронизация развёртки от питающей сети 220 В. Этот режим синхронизации используется при исследовании цепей, питающихся от сетевого напряжения.

✓ «ВНЕШ.*/«ВНУТР.» – в положении «ВНЕШ.». При этом сигнал синхронизации развёртки необходимо подать от внешней цепи через щуп на разъём «ВХОД X ». В положении «ВНУТР.» для синхронизации развёртки используется исследуемый сигнал, подключённый к входу « Y ».

Работа с осциллографом в режиме « $Y - X$ »

В данном режиме развёртка вдоль оси X осуществляется сигналом, подключённым к входу X осциллографа.

Перед выполнением измерений в режиме « $Y - X$ » необходимо выполнить операции, описанные выше в пунктах «Включение осциллографа» и «Проверка исправности осциллографа».

- Подключить щупы к входам X и Y осциллографа.
- Нажать кнопку « $X - Y$ » в нижней части «зоны X ». При этом осциллограф перейдёт в режим « $Y - X$ ».

- Установить переключатели «ВОЛЬТ/ДЕЛ.» в положение, примерно соответствующие уровню сигнала на «входе Y ». Если амплитуда исследуемого сигнала превышает 20 В, то переключатель на корпусе щупа необходимо установить в положение « $\times 10$ », т.е. включить делитель, ослабляющий входной сигнал в 10 раз.

- Подключить оба щупа к исследуемой цепи.

Внимание! Выводы общего провода щупов (зажимы «крокодил») соединены через корпус осциллографа. Для исключения коротких замыканий в исследуемой цепи через общие провода щупов и корпус осциллографа рекомендуется подключать к цепи общий провод только одного из щупов, а общий провод второго щупа оставлять не подключённым.

- Используя ручки регулировки чувствительности («ВОЛЬТ/ДЕЛ.», «ПЛАВНО») и ручку вертикального (\updownarrow – «зона Y») смещения луча установить удобный для наблюдения диапазон вертикального отклонения луча.

- Выбрать режим кнопки « \sim/\sim ». В положении « \sim » («открытый вход») на экране отображается полный сигнал, состоящий из переменной и постоянной составляющих. В положении « \sim » («закрытый вход») из исследуемого сигнала исключается постоянная составляющая.

- Выбрать режим кнопки « \perp ». При нажатии этой кнопки вход усилителя «Y» отключается от гнезда на лицевой панели и замыкается на корпус прибора, при этом положение линии развертки на экране соответствует нулевому уровню входного сигнала.

Регулировка чувствительности «входа X» может осуществляться в небольших пределах ручкой «ПЛАВНО», расположенной в «зоне X». Ослабить сигнал на входе X в 10 раз можно установкой переключателя на корпусе щупа в положение «x10». Ручкой регулировки горизонтального смещения луча (\leftrightarrow – «зона X») установить желаемое положение изображения на экране.

Остальные ручки и кнопки регулировки развертки в зоне X в режиме «Y – X» не работают.

Приборы и оборудование

(комплект типового лабораторного оборудования «Основы метрологии и электрические измерения»)

Обознач.	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
A1	Блок генераторов напряжения	212.2	Частота 0,2...20 кГц Напряжение 0...10 В Ток нагрузки не более 0,2А
A2	Мультиметр	534	Sanwa PC5000
A11	Осциллограф	1402	ОСУ-10В
	Щуп из комплекта осциллографа		Переключатель делителя напряжения x1 (1:1) или x10 (1:10)

Схема электрическая соединений эксперимента по измерению параметров переменного напряжения приведена на рис. 1.2.

Однофазный источник питания **G1** предназначен для безопасного питания блоков генератора напряжений **A1 (212.2)**, осциллографа **A11 (1402)** и мультиметра **A2 (534)**.

Вход **Y** осциллографа **A11** подключён к выходу генератора напряжений специальной формы (блок **A1**) с помощью щупа из комплекта осциллографа. К выходным гнездам генератора напряжений специальной формы (блок **A1**) подключён и мультиметр **A2**. После включения питания всех блоков цепь готова к работе.

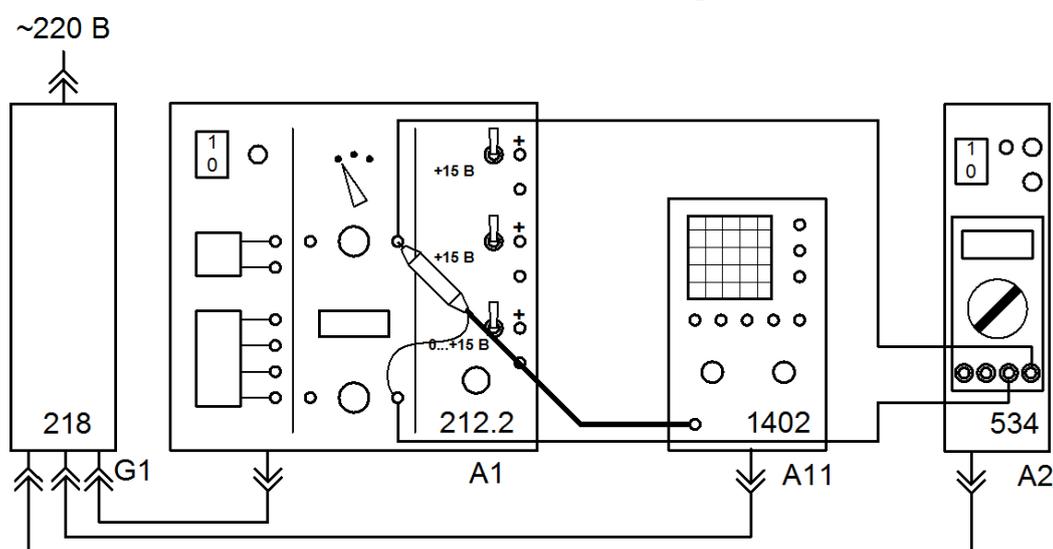


Рис. 1.2. Схема электрическая соединений для измерения параметров переменного напряжения

Экспериментальная часть

1. Убедиться, что переключатели «Сеть» блоков выключены.
2. Подготовить осциллограф к работе в режиме « $Y - t$ ».
3. Ручку «АМПЛИТУДА» генератора напряжений специальной формы блока **A1** повернуть до упора против часовой стрелки (минимальное выходное напряжение).
4. Переключатель мультиметра **A2** установить в режим измерения переменного напряжения.
5. Собрать цепь в соответствии с электрической схемой соединений эксперимента рис. 1.2. К выходу генератора напряжений специальной формы целесообразно подключить сначала мультиметр

A2, а затем в гнёзда на штырях стандартных проводников вставить штыри для подключения щупа осциллографа.

6. Включить устройство защитного отключения: автоматический выключатель в однофазном источнике питания **G1** и выключатели «СЕТЬ» всех блоков **A1, A2, A11**. Прогреть приборы в течение не менее 5 минут.

Измерение параметров синусоидального напряжения

1. Установить переключатель «ФОРМА» генератора напряжений специальной формы (блок **A1**) в положение, соответствующее синусоидальному напряжению.

2. Ручками регулировки «АМПЛИТУДА» и «ЧАСТОТА» установить некоторую произвольную амплитуду и частоту синусоидального сигнала на выходе генератора.

3. Ручками настройки осциллографа «ВОЛЬТ/ДЕЛ.», «ВРЕМЯ/ДЕЛ.» и «УРОВЕНЬ» получить неподвижное изображение **1 ... 2** периодов синусоидального сигнала на экране осциллографа. Необходимо установить максимальный размах сигнала по вертикали, но так, чтобы сигнал ещё не выходил за границы экрана. Обе ручки «ПЛАВНО» (в зонах **X** и **Y**) должны быть повернуты по часовой стрелке до упора (положение «КАЛ.»).

4. Используя сетку на экране осциллографа, измерить размах сигнала от минимума до максимума l_{Am} (т.е. двойную амплитуду сигнала) в миллиметрах и длительность периода сигнала l_T , также в миллиметрах.

5. По положению переключателя «ВОЛЬТ/ДЕЛ.» вычислить величину двойной амплитуды сигнала $2U_m$, амплитуды сигнала U_m и его действующее значение $U_{осц}$. Необходимо учесть, что чувствительность k_y , определённая по переключателю «ВОЛЬТ/ДЕЛ.», соответствует большому делению шкалы на экране осциллографа, т. е. **5 мм**. Расчётные формулы:

$$2U_m = l_{Am} \frac{k_y}{5}, \quad U_m = \frac{2U_m}{2}.$$

Действующее значение синусоидального напряжения

$$U_{\text{осц}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

6. Действующее значение прямоугольного напряжения

$$U_{\text{осц}} = U_m.$$

7. Вычислить период T и частоту сигнала f . Масштаб изображения по оси $X(k_x)$ определить по положению переключателя «ВРЕМЯ/ДЕЛ». Масштаб, определённый по положению переключателя, соответствует одному большому делению шкалы, т.е. 5 мм. Расчётные соотношения

$$T = l_T \frac{k_x}{5}; \quad f_{\text{осц}} = \frac{1}{T}.$$

8. Сравнить полученную величину частоты сигнала и действующее значение напряжения сигнала с показаниями мультиметра А2. На мультиметре необходимо последовательно установить предел измерения переменного напряжения и предел измерения частоты сигнала (положение переключателя пределов – «Hz»).

Внимание: переключение пределов можно выполнять только при отсутствии сигнала на входе мультиметра. Перед переключением пределов необходимо временно отключить, по крайней мере, один из проводов от входа мультиметра.

9. Повторить измерения при других частотах, напряжениях и формах сигнала. Результаты измерения занести в табл. 1.1. Вычислить относительную погрешность определения напряжения и частоты сигналов.

Таблица 1.1

Измерения осциллографом	Параметр	Синусоидальное напряжение			Прямоугольное напряжение		
	l_{Am} , мм						
	k_y , В/дел.						
	l_T , мм						
	k_x , мс/дел.						
	$2U_m$, В						
	U_m , В						
	$U_{\text{осц}}$, В						
	T , мс						
$f_{\text{осц}}$, кГц							

Измерения мультиметром	$U, В$						
	$f, кГц$						
	$\delta_U = \frac{U_{осц} - U}{U} 100\%$						
	$\delta_f = \frac{f_{осц} - f}{f} 100\%$						

10. По окончании эксперимента отключить питание всех блоков.

Лабораторная работа № 2

Измерения фазы и частоты с помощью осциллографа ОСУ-10В

Цель работы: приобретение навыков измерения частоты и фазы сигнала с помощью осциллографа, работающего в режиме «Y – X».

Приборы и оборудование

(комплект типового лабораторного оборудования
«Основы метрологии и электрические измерения»)

Обознач.	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~220 В/ 16 А
A1	Блок генераторов напряжения	212.2	Частота 0,2...20 кГц Напряжение 0...10 В Ток нагрузки не более 0,2 А
A7	Блок резисторов	2330	Переменные резисторы 10 Ом; 330 Ом; 10 кОм – 2 шт.
A8	Блок элементов измерительных цепей	2332	Набор катушек индуктивности, конденсаторов, диодов, резисторов
A11	Осциллограф	1402	ОСУ-10В или аналогичный
	Щуп из комплекта осциллографа (2 шт.)		Переключатель делителя напряжения x1 (1:1) или x10 (1:10)

Для формирования сдвига фаз между двумя синусоидальными сигналами используется схема фазовращателя рис. 2.1.

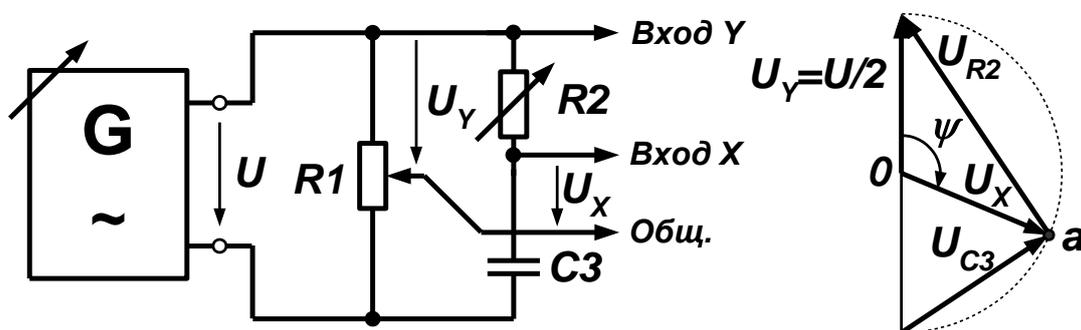


Рис. 2.1. Принципиальная схема фазовращателя и векторная диаграмма, поясняющая принцип её работы

На один из входов осциллографа (например, Y) подаётся напряжение U_y , равное $\frac{1}{2}$ напряжения U на выходе генератора синусоидального напряжения G . Напряжение U_y формируется делителем напряжения на резисторе $R1$. На вход X осциллографа подаётся напряжение U_x между средними точками цепи $R2, C3$ и средней точкой резистора $R1$. При изменении сопротивления $R2$ точка « a » на векторной диаграмме перемещается по окружности с диаметром, равным напряжению генератора U . При этом фаза ψ напряжения U_x (вектор $0a$ на диаграмме) изменяется относительно напряжения U_y . Величина напряжения U_x остаётся неизменной.

Схема электрическая соединений лабораторной установки для измерения сдвига фаз приведена на рис. 2.2.

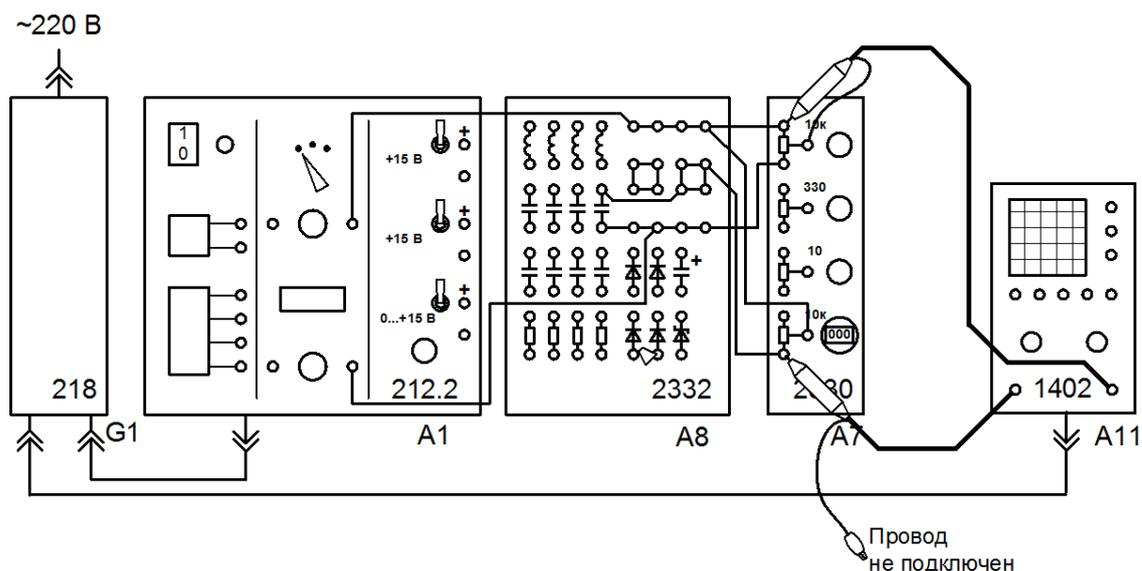


Рис. 2.2. Схема электрическая соединений установки для измерения разности фаз

Фазовращающая цепь собрана из резисторов блока А7. В качестве резистора $R1$ (схема рис. 2.1) используется резистор 10 кОм . Подвижный контакт этого резистора устанавливается в среднее положение. В качестве регулирующего фазу резистора $R2$ (рис. 2.1) используется многооборотный переменный резистор 10 кОм с цифровой шкалой (блок А7). В качестве конденсатора $C3$ (рис. 2.1) использован конденсатор ёмкостью 1 мкФ блока А8.

Фазовращающая цепь питается от синусоидального напряжения генератора напряжений специальной формы блока 212.2. Подключение входов X и Y осциллографа к фазовращателю показано на рис. 2.2. Поскольку общие точки обоих входов соединены вместе и подключены к корпусу осциллографа, общий провод одного из входов можно не подключать.

Разность фаз измеряется методом эллипса (рис. 2.3). Используя сетку на экране осциллографа, необходимо измерить отрезки Y и $Y_{\text{ср}}$ или X и $X_{\text{ср}}$. Обе пары равноценны и результат измерения фазы будет одинаков.

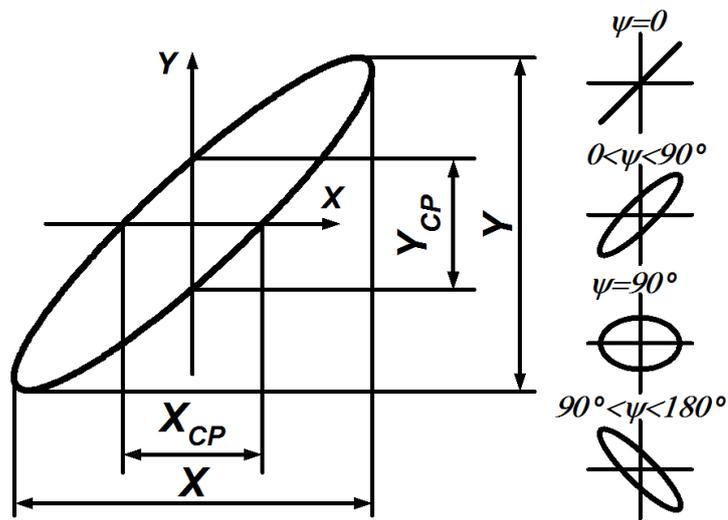


Рис. 2.3. Измерение разности фаз методом эллипса.

Разность фаз вычисляется по формуле

$$\psi = \arcsin \frac{Y_{CP}}{Y} = \arcsin \frac{X_{CP}}{X}$$

На рис. 2.3 показаны варианты формы эллипса при различных значениях разности фаз.

Схема электрическая соединений установки для измерения частоты приведена на рис. 2.4. В ходе эксперимента измеряется частота синусоидального напряжения одной из фаз трёхфазного генератора блока **A1** (напряжение подключено к входу **Y** осциллографа). Частота измеряемого напряжения сравнивается с частотой синусоидального напряжения генератора напряжений специальной формы блока **A1** (частота этого напряжения измеряется цифровым частотомером блока генератора **A1** или мультиметром **PC5000** блока **A2**).

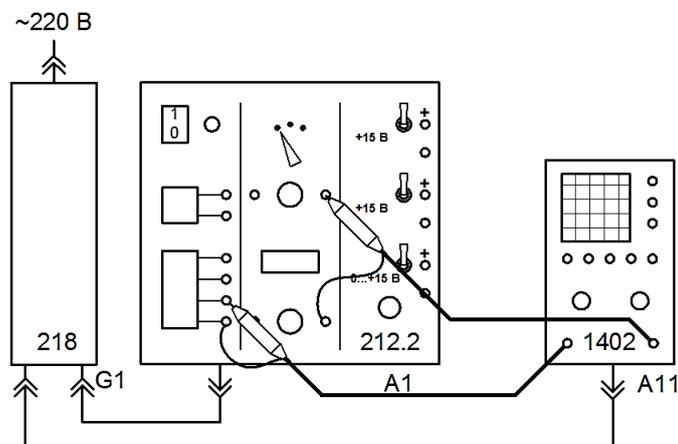


Рис. 2.4. Схема электрическая соединений установки для измерения частоты

При целочисленном отношении частот измеряемого сигнала и известной частоты генератора на экране осциллографа возникают неподвижные фигуры Лиссажу. По форме полученных фигур Лиссажу определяется отношение частот измеряемого сигнала и известной (эталонной) частоты генератора рис. 2.5.

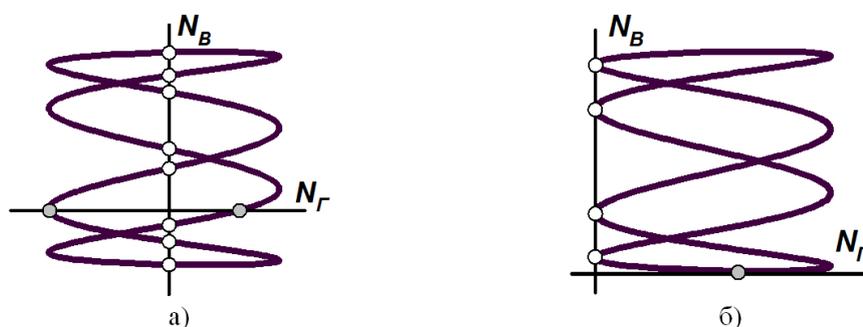


Рис. 2.5. Определение отношения частот сигналов по форме фигур Лиссажу.

Для определения отношения частот сигналов по фигуре Лиссажу используется два метода (рис. 2.5, а и б). В методе, основанном на определении числа точек пересечения (рис. 2.5, а), проводятся две взаимно-перпендикулярные линии, параллельные осям экрана осциллографа. Число точек пересечения каждой из этих линий с линиями фигуры Лиссажу должно быть максимально. Отношение частот сигналов равно

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_G}{N_B}, \quad (2.1)$$

где f_y , f_x – частоты сигналов на входах Y и X ;

N_G , N_B – число точек пересечения фигуры Лиссажу, соответственно, горизонтальной и вертикальной линиями.

В методе, основанном на определении числа точек касания (рис. 2.5, б), проводятся две взаимно-перпендикулярные линии, параллельные осям экрана осциллографа и касающиеся фигуры Лиссажу. Отношение частот сигналов также определяется по формуле (2.1), но значения N_G , N_B равны соответственно числу точек касания с фигурой Лиссажу горизонтальной и вертикальной линий.

Экспериментальная часть

Измерение разности фаз

1. Убедиться, что переключатели «Сеть» блоков выключены.
2. Установить ручки генератора напряжений специальной формы (блок **A1**) в исходное положение:
 - ✓ переключатель «Форма» – в положение синусоидального выходного напряжения;
 - ✓ ручку «Амплитуда» – повернуть до упора против часовой стрелки;
 - ✓ ручку «Частота» – повернуть до упора против часовой стрелки (минимальная частота).
3. Подготовить осциллограф к работе в режиме « $Y - X$ », как указано во введении к данной главе.
4. Соединить аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений рис. 2.2.
5. Установить ручку переменного резистора **10 кОм** (расположен сверху лицевой панели блока **A7**) в среднее положение, используя шкалу резистора и риску на его ручке.
6. Повернуть ручку переменного резистора с цифровой шкалой (расположен внизу лицевой панели блока **A7**) до упора против часовой стрелки и установить на индикаторе «000».
7. Включить устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания **G1**.
8. Включить выключатель «СЕТЬ» блока генераторов напряжений **A1** и осциллографа **A11** и прогреть эти блоки не менее 5 минут.
9. Увеличить амплитуду напряжения на выходе генератора напряжений специальной формы, установив ручку «Амплитуда» примерно в среднее положение.
10. Регулировкой чувствительности каналов **X** и **Y** осциллографа (переключатель «ВОЛЬТ/ДЕЛ», ручки «ПЛАВНО») и ручками смещения луча вдоль осей экрана добиться изображения, занимающего не менее $\frac{3}{4}$ экрана. При необходимости изменить напряжение на выходе генератора **A1** (ручка «Амплитуда»).
11. Вращая ручку переменного резистора с цифровой шкалой, установить несколько произвольных значений разности фаз и измерить величину этой разности.
12. По окончании эксперимента выключить питание блока генераторов **A1**.

Измерение частоты переменного напряжения

1. Убедиться, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
2. Установить ручки генератора напряжений специальной формы (блок А1) в исходное положение:
 - ✓ переключатель «Форма» – в положение синусоидального выходного напряжения;
 - ✓ ручку «Амплитуда» повернуть до упора против часовой стрелки;
 - ✓ ручку «Частота» повернуть до упора против часовой стрелки (минимальная частота).
3. Подготовить осциллограф к работе в режиме « $Y - X$ », как указано во введении к данной главе.
4. Собрать схему в соответствии с рис. 2.4.
5. Включить устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания $G1$.
6. Включить тумблер «СЕТЬ» блока генераторов напряжений $A1$ и осциллографа $A11$ и дать им прогреться в течение не менее 5 минут.
7. Увеличить амплитуду напряжения на выходе генератора напряжений специальной формы до такой величины, чтобы размер фигуры Лиссажу по горизонтали не выходил за пределы экрана.
8. Регулировкой чувствительности канала Y осциллографа (переключатель «ВОЛЬТ/ДЕЛ», ручка «ПЛАВНО») и ручками смещения луча вдоль осей экрана добиться размера изображения фигуры Лиссажу, занимающего не менее $\frac{3}{4}$ экрана.
9. Вращая ручку «ЧАСТОТА» блока $A1$, добиться неподвижного изображения фигуры Лиссажу на экране (допускается медленное вращение фигуры – один «оборот» за несколько секунд).
10. По индикатору «ЧАСТОТА» (блок $A1$) определить частоту генератора. По форме фигуры Лиссажу – отношение измеряемой частоты к частоте генератора (рис. 2.5). По формуле (2.1) вычислить измеряемую частоту.
11. По окончании эксперимента выключить питание всех блоков ($A1, A11, G1$).

Лабораторная работа № 3

Изучение электронного осциллографа С1-55

Цель работы: сформировать навыки работы с двухлучевым осциллографом; научиться выполнять исходную настройку осциллографа; научиться выполнять калибровку осциллографа

Приборы: двухлучевой осциллограф С1 – 55, генератор низкочастотный ГЗ-118.

Теоретическая часть

Осциллограф С1-55 – малогабаритный полупроводниковый двухлучевой осциллограф. Предназначен для одновременного визуального наблюдения и исследования форм двух электрических процессов путём измерения их временных и амплитудных значений.

Внешний вид осциллографа представлен на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Внешний вид осциллографа С1-55

Технические характеристики прибора, порядок проверки его работоспособности и выполнения измерений подробно описаны в руководстве «Осциллограф С1-55. Техническое описание и инструкция по эксплуатации».

Перед выполнением экспериментов лабораторных работ № 3 и № 4, необходимо ознакомиться с назначением органов управления осциллографа.

Основная функция осциллографа заключается в воспроизведении в графическом виде различных электрических колебаний

(осциллограмм). При помощи осциллографа можно измерять различные параметры сигнала: амплитуду, частоту, длительность сигнала, длительность фронта, коэффициент модуляции и др.

Рассмотрим лицевую панель осциллографа (рис. 3.2).

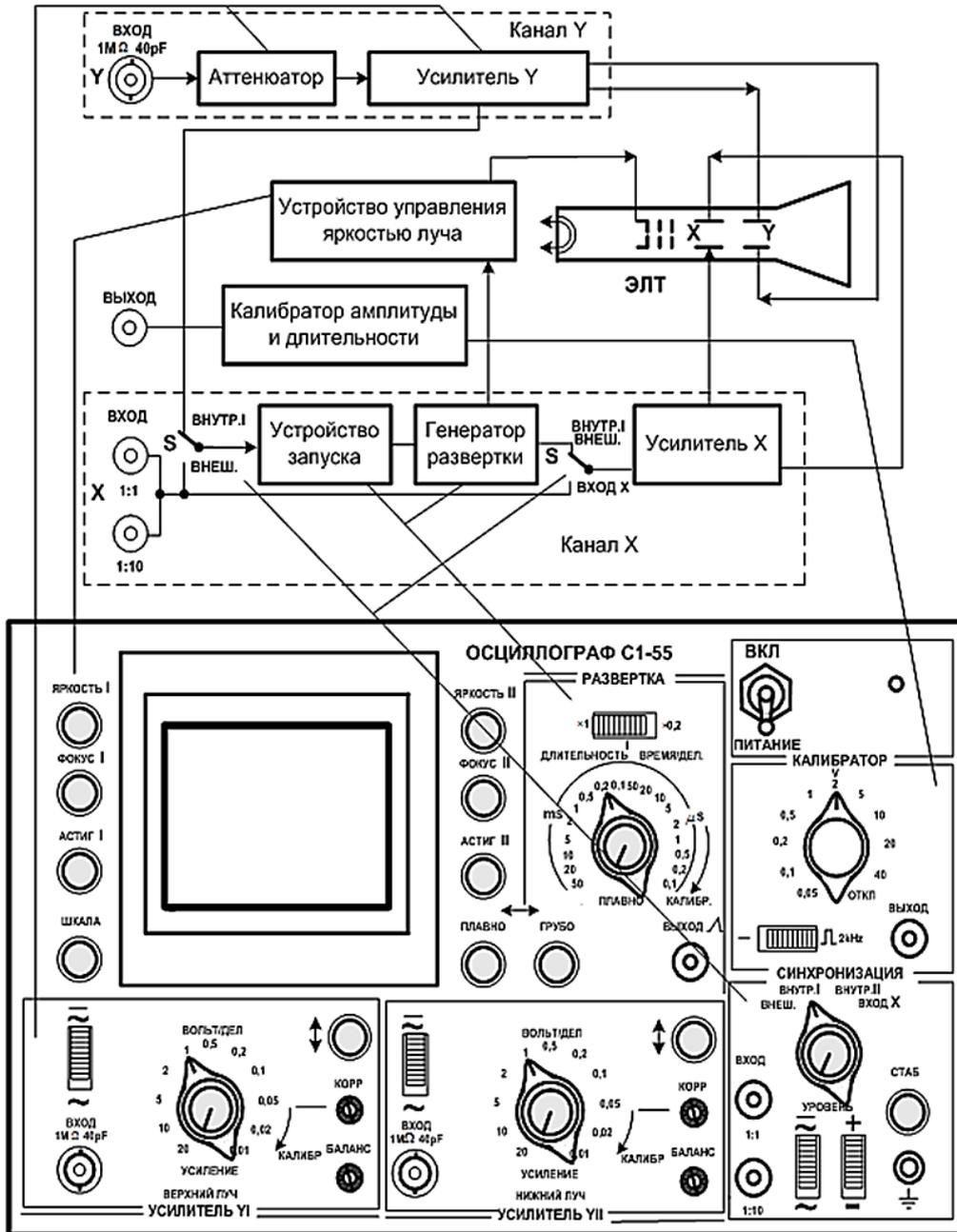


Рис. 3.2. Упрощённая структурная схема и лицевая панель осциллографа C1-55

Осциллограф имеет два канала вертикального отклонения луча – канал Y (по оси Y откладывается напряжение U), и канал горизонтального отклонения – канал X (по оси X откладывается время t).

Канал вертикального отклонения Y состоит из аттенюатора и усилителя. Исследуемый сигнал подаётся на вход канала Y и далее через аттенюатор и усилитель на пластины Y вертикального отклонения луча ЭЛТ.

Аттенюатор (делитель напряжения) обеспечивает ослабление исследуемого сигнала; он необходим для расширения пределов измерения в сторону больших значений. Кроме того, он обеспечивает большое входное сопротивление (**0,5–1,0 МОм**) и малую входную ёмкость (**10–40 пФ**) канала вертикального усиления.

Усилитель Y канала вертикального отклонения предназначен для расширения динамического диапазона исследуемых напряжений в область малых значений, а также усиливает сигнал до значений, достаточных для создания электрического поля между вертикально-отклоняющими пластинами канала Y .

Величина ослабления или усиления сигнала задаётся в виде цены одного деления масштабной сетки экрана ЭЛТ по оси Y , имеет размерность «вольт на деление» (**В/дел, мВ/дел, В/см, мВ/см**), где «дел» – деление масштабной сетки, которое устанавливается переключателем «**В/дел.**» Цифровой отсчёт напряжений измеряемого сигнала осуществляется путём умножения числа делений, занимаемых сигналом по оси Y , на величину единицы масштаба.

Для удобства просмотра осциллограмм возможно плавное изменение цены деления по оси Y регулировкой «УСИЛЕНИЕ», расположенным перед переключателем «**В/дел.**» Но при измерениях эта регулировка должна быть повернута против часовой стрелки до упора, что сопровождается характерным щелчком.

Канал горизонтального отклонения X содержит переключатель входа («ВНЕШ» – «ВНУТР. I» – «ВНУТР. II» – «ВХОД X »), генератор развёртки, усилитель X .

Переключатель входа синхронизации обеспечивает подключение сигнала с усилителя Y к устройству запуска (положение переключателя – «ВНУТР. I»), либо подачу внешнего сигнала с входного зажима X (положение переключателя «ВНЕШ.»). Из этих сигналов в устройстве запуска формируются импульсы синхронизации с длительностью, кратной периоду исследуемого сигнала, запускающие генератор развёртки в моменты времени, соответствующие одной и той же фазе исследуемого сигнала. На «Вход X » может также подаваться сигнал внешней развёртки («ВХОД X »), который используется для получения развёртки вдоль оси X . В последнем случае собственный генератор развёртки осциллографа отключается.

Генератор развёртки вырабатывает разнополярные напряжения пилообразной формы и служит для управления линейным перемещением луча в горизонтальном направлении, напряжение с него поступает на пластины горизонтального отклонения через усилитель X .

Генератор развёртки отключается, когда переключатель входа установлен в положение «ВХОД X ». Тогда перемещение луча в направлении оси X будет осуществляться по закону изменения сигнала, поданного на «Вход X ».

Принцип работы осциллографа

Для получения осциллограммы исследуемого сигнала необходимо управлять движением светового пятна на экране ЭЛТ в горизонтальном и вертикальном направлениях. Смещение пятна в вертикальном направлении осуществляется исследуемым сигналом, а в горизонтальном – напряжением развёртки. Генератор развёртки вырабатывает линейные колебания пилообразной формы (рис. 3.3).

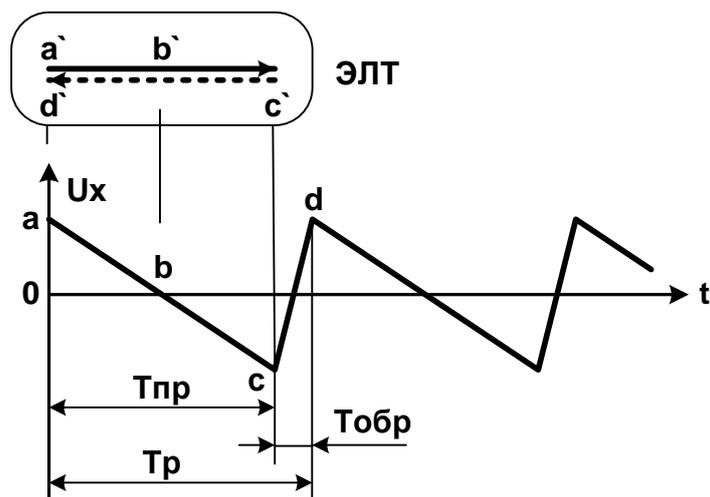


Рис. 3.3. Сигнал на выходе генератора развёртки

На участке ac графика $U_x(t)$ напряжение развёртки линейно убывает. Время $T_{пр}$, в течение которого U_x изменяется от максимального значения до минимального, называется временем прямого хода развёртки. Участок cd , который длится в течение времени $T_{обр}$, соответствует обратному ходу развёртки. Время $T_{пр}$ и $T_{обр}$ в сумме составляет период развёртки T_p .

Если приложить U_x к горизонтально-отклоняющим пластинам, отключив сигнал от пластин вертикального отклонения, электронный пучок ЭЛТ будет отклоняться только в горизонтальной плоскости. При этом светящееся пятно на экране будет перемещаться в определённой последовательности.

При максимальном положительном напряжении U_x (точка a на рис. 3.3) светящееся пятно займёт крайнее левое положение (точка a') на экране. При линейном убывании U_x пятно постепенно перемещается в точку b' и после перемены полярности U_x – в точку c' . На участке $a'c'$ скорость движения пятна будет постоянной.

Поскольку U_x нарастает по линейному закону, то зависимость между смещением пятна на экране и напряжением, приложенным к пластинам, также линейная. После достижения точки c' светящееся пятно начинает перемещаться по той же траектории в обратном направлении (пунктирная линия). Обратный ход осуществляется за

время $T_{обр} \ll T_{пр}$, поэтому скорость движения пятна в обратном направлении существенно выше.

Линия $c'd'$ соответствует обратному ходу луча на экране ЭЛТ. Для того чтобы в это время луч не засвечивал экран, создавая помеху, с генератора развёртки на устройство управления яркостью луча трубки (рис. 3.2) подаются специальные гасящие импульсы, предназначенные для запираания электронного пучка на время обратного хода развёртки cd (рис. 3.3). Таким образом, при подаче напряжения развёртки U_x на горизонтальные пластины ось X выполняет роль оси времени.

Образование осциллограммы на экране ЭЛТ при воздействии двух напряжений – развёртки (U_x) и сигнала (U_c) – соответственно на пластинах X и Y показано на рис. 3.4.

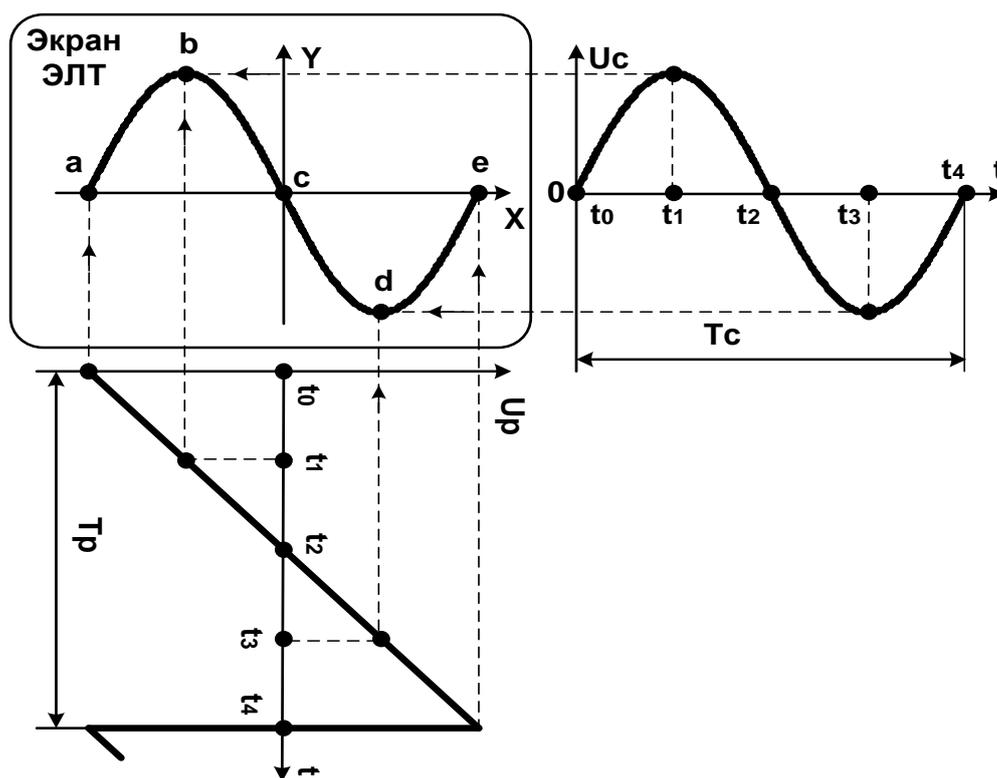


Рис. 3.4. Формирование осциллограммы на экране ЭЛТ

Период развёртки условно разбит на четыре равных интервала с границами, отмеченными на рис. 3.4 через t_0, t_1, t_2, t_3 и t_4 . Каждому моменту времени соответствует своё значение напряжения сигнала и

генератора развёртки, которые приводят к смещению светового пятна соответственно в направлении Y и X , а значит формированию требуемого изображения на экране ЭЛТ.

Осциллограммы, полученные при первом, втором и т.д. периодах работы генератора развёртки, накладываются друг на друга. Но образование неподвижного изображения возможно при выполнении условия, принятого при построении рис. 3.4, а именно $T_p = T_c$. В этом случае любой периодический сигнал делится на временные интервалы, в пределах которых «отрезки» сигнала полностью идентичны, и при наложении осциллограмм образуется единое неподвижное изображение.

Аналогично образуется изображение осциллограммы, когда $T_p = nT_c$. При этом если n – целое число, то в одном периоде развёртки укладывается ровно n периодов сигнала. Осциллограмма будет отличаться от изображённой на рис. 3.4 числом периодов сигнала (2, 3 и более), отложенным вдоль оси X .

Условие $T_p = nT_c$ устанавливает необходимость выбора периода развёртки T_p , равным целому числу периодов сигнала, путём подбора периода генератора развёртки и уровня сигнала синхронизации.

Формирование осциллограммы на экране осциллографа при нарушении кратности периодов сигнала и генератора развёртки иллюстрирует рис. 3.5.

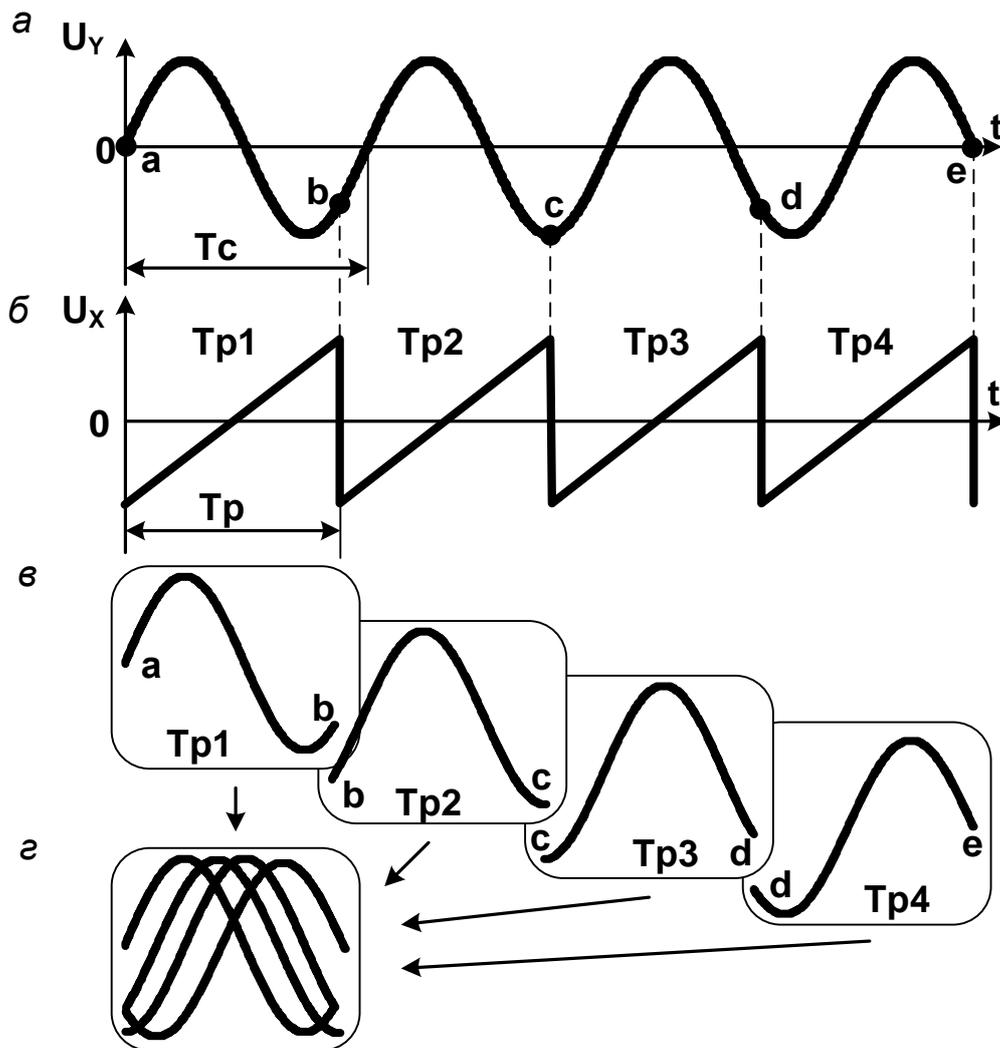


Рис. 3.5. Формирование осциллограммы в случае неравенства периодов сигнала и генератора развёртки.

Период сигнала, представляющего собой колебание синусоидальной формы (рис. 3.5, а), больше периода развёртки, т.е. $T_c > T_p$. При первом цикле развёртки T_{p1} (рис. 3.5, б) на экране отображается осциллограмма в виде отрезка синусоиды между точками **ab** (рис. 3.5, в), при втором – отрезок **bc**, при третьем – **cd** и т.д.

Последовательное появление осциллограмм приводит к их наложению со смещением, что создаёт ощущение движения изображения слева направо (рис. 3.5, г). Скорость движения осциллограммы тем выше, чем больше отличается период развёртки от периода сигнала. Можно показать, что при $T_c < T_p$, осциллограмма будет перемещаться в противоположном направлении, т.е. справа налево.

Синхронизация генератора развёртки

Для получения неподвижной осциллограммы необходимо подобрать период (частоту) развёртки луча по оси X , кратным периоду (частоте) исследуемого сигнала $T_p = n T_c$. В конструкции осциллографа предусматривается такая возможность. Однако простого подбора периода развёртки T_p недостаточно. Поскольку сигнал и напряжение развёртки поступают от разных источников, через некоторое время из-за нестабильности генераторов установленная кратность периодов будет нарушена. Решение задачи возможно лишь при синхронизации генератора развёртки осциллографа исследуемым сигналом или специально сформированным сигналом, частота которого равна (или кратна) частоте исследуемого сигнала, путём подбора периода генератора развёртки и уровня сигнала синхронизации. Этим самым обеспечивается синхронная работа генератора развёртки и источника сигнала, т. е. генератор развёртки запускается в строго определённое время, соответствующее одной и той же фазе сигнала.

Операции по синхронизации генератора развёртки проводятся в три этапа путём подбора периода генератора развёртки и уровня сигнала синхронизации. На первом этапе регулятор «УРОВЕНЬ» (рис. 3.2), расположенный на блоке синхронизации, необходимо повернуть против часовой стрелки до упора. Далее, вращая регулятор «СТАБ», добиться начального момента срыва изображения. На третьем этапе, поворачивая по часовой стрелке регулятор «УРОВЕНЬ», добиться устойчивости осциллограммы на экране ЭЛТ.

Синусоидальная развёртка

Если на отклоняющие пластины Y и X подать соответственно напряжения U_c и U_p синусоидальной формы с одинаковой амплитудой со сдвигом фаз 90° или 270° , то на экране за один период колебаний получится изображение окружности (рис. 3.6).

Моментам времени t_0, t_1 и т.д. будут соответствовать напряжения сигналов U_c и U_p , отмеченные точками $0, 1$, и одноименные точки на экране осциллографа. Таким образом,

светящаяся точка будет перемещаться на экране против часовой стрелки, описывая окружность.

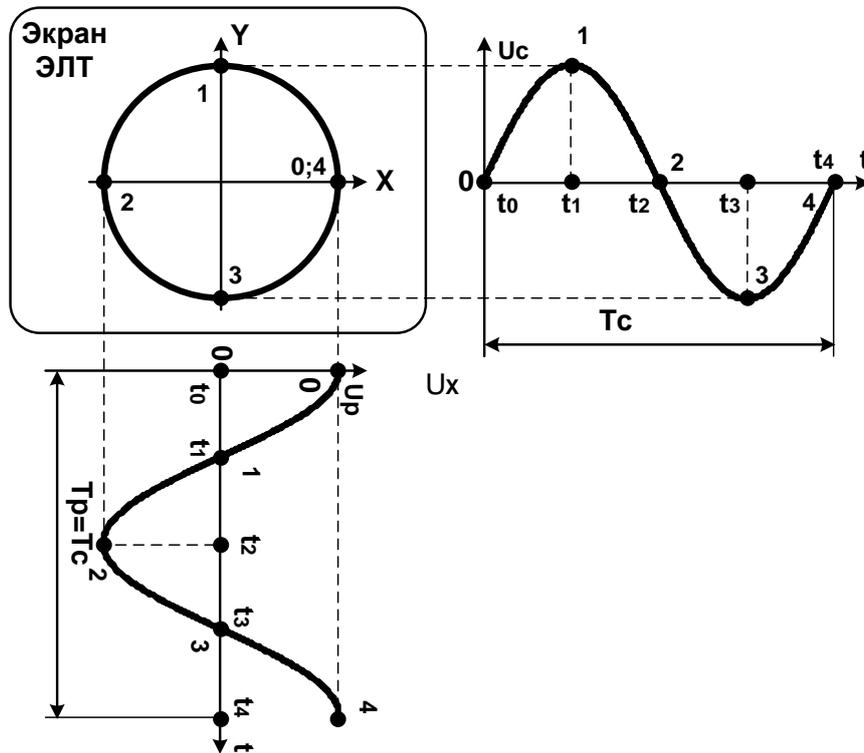


Рис. 3.6. Получение фигур Лиссажу.

Если на вход отклоняющих пластин одновременно подать напряжения одинаковой частоты, совпадающие по фазе, то на экране получится изображение прямой линии с наклоном 45° . При сдвиге фаз в 180° получится такая же линия, но с наклоном в противоположную сторону. При сдвиге фаз в 45° или 135° на экране получится изображение эллипса, большая ось которого наклонена по отношению к горизонтальной оси.

Изображения на экране осциллографа, получаемые при разных соотношениях фаз и частот исследуемых синусоидальных напряжений, называют фигурами Лиссажу.

По фигуре, полученной на экране, определяют соотношения частот. Допустим, что на экране получена фигура, показанная на рис. 3.7, а.

Для определения соотношения частот проводят горизонтальную и вертикальную прямые, которые пересекают фигуру. При этом через точки пересечения линий самой фигуры эти

прямые проходить не должны. Количество точек пересечения линий фигуры с горизонтальной прямой соответствует количеству изменений напряжения U_c , а с вертикальной – количеству изменений напряжения U_p . В данном случае отношение частот $4:6 = 2:3$.

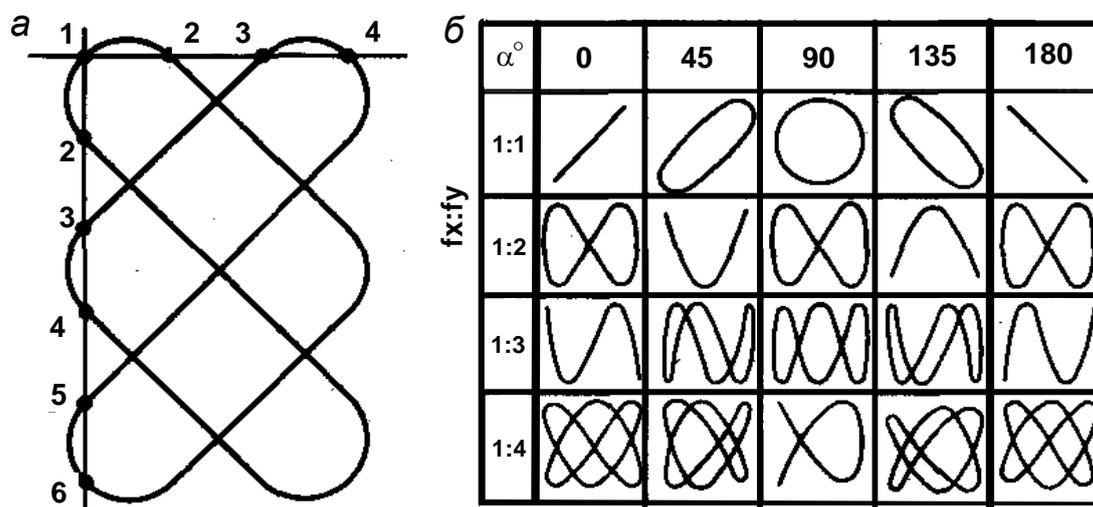


Рис. 3.7. Фигуры Лиссажу при различных соотношениях частот

Формы некоторых фигур Лиссажу для разных соотношений сдвига фаз α и частот показаны на рис. 3.7, б. По известной частоте одного из сигналов можно определить неизвестную частоту другого сигнала.

С помощью осциллографа можно исследовать многие зависимости: вольт-амперные характеристики полупроводниковых приборов, магнитную индукцию, функции напряжённости магнитного поля (петли гистерезиса).

Калибратор

Калибратор предназначен для проверки (и при необходимости установки) правильности цены деления по оси Y и длительности развёртки (цены деления по оси X). Калибраторы могут быть отдельными по амплитуде и по длительности или объединёнными. В качестве калибратора используется генератор прямоугольных импульсов с высокостабильными частотой следования импульсов $1-2$ кГц и амплитудой, которая может быть постоянной или дискретно изменяемой.

В режиме калибровки на вход канала вертикального отклонения подаётся сигнал с выхода калибратора. С помощью переключателя «ВОЛЬТ/ДЕЛ» устанавливается заданная цена деления канала вертикального отклонения, при котором размах осциллограммы по оси Y должен быть равен определённому, обычно отмеченному на масштабной сетке экрана, значению.

Пусть переключатель формы сигнала калибратора установлен в правом положении (см. рис. 3.2), переключатель амплитуды сигнала – в положении $2V$. Таким образом, калибратор будет вырабатывать сигнал в виде импульсов прямоугольной формы с амплитудой 2 В и частотой 2 кГц (периодом $0,5\text{ мс}$).

Подадим сигнал с калибратора на «вход YI ». Установим на блоке «УСИЛИТЕЛЬ YI » цену деления по вертикали $0,5\text{ В/дел.}$, на блоке «РАЗВЁРТКА» цену деления по горизонтали $50\text{ }\mu\text{S/дел.}$, переключатель « $\times 1 - \times 0,2$ » в положение $\times 1$.

Сигнал на экране ЭЛТ должен занимать по вертикали четыре полных деления, по горизонтали – 10 полных делений (рис. 3.8).

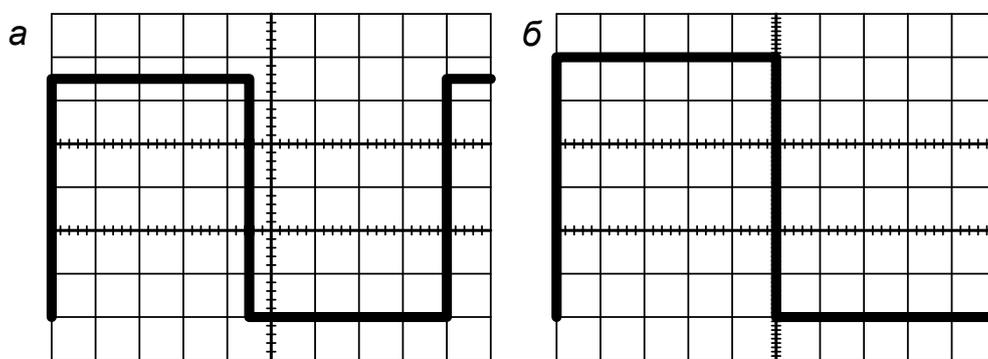


Рис. 3.8. Осциллограммы сигналов калибровки осциллографа:
а – осциллограф не откалиброван ни по амплитуде, ни по длительности; *б* – осциллограф откалиброван

В случае несовпадения сигнала и числа делений необходимо корректировать коэффициент усиления усилителя Y и период работы генератора развёртки соответственно регуляторами «КОРР» на блоке «УСИЛИТЕЛЬ YI » и $\times 0,2$ на боковой стенке осциллографа.

Экспериментальная часть

Предварительная подготовка осциллографа

Установить переключатели и ручки на лицевой панели осциллографа, а также выполнить действия в соответствии с табл. 3.1., затем включить питание измерительного генератора и генератора ГЗ-118.

Таблица 3.1. Предварительная подготовка осциллографа

№	Блок	Переключатель, ручка	Положение переключателя или ручки, выполняемое действие
1	ПИТАНИЕ	ПИТАНИЕ / ВКЛ	ВКЛ
2	РАЗВЁРТКА	ПЛАВНО	Повернуть по часовой стрелке до характерного щелчка
3	УСИЛИТЕЛЬ <i>YI</i> , УСИЛИТЕЛЬ <i>YII</i>	\approx/\sim	\approx
		УСИЛЕНИЕ	Повернуть по часовой стрелке до характерного щелчка
5	СИНХРОНИЗАЦИЯ	ВНЕШ/ ВНУТР I ВНУТР II/ ВХОД X	ВНУТР I
6	СИНХРОНИЗАЦИЯ	СТАБИЛЬНОСТЬ, УРОВЕНЬ	Добиться появления на экране двух светящихся линий («лучей») соответственно каналов <i>YI, YII</i>
7	УСИЛИТЕЛЬ <i>YI</i>	ЯРКОСТЬ I, « \updownarrow »	
	УСИЛИТЕЛЬ <i>YII</i>	ЯРКОСТЬ II, « \updownarrow »	
		ФОКУС I, ФОКУС II, АСТИГ I, АСТИГ II	Установить толщину линий и четкость изображения соответственно каналов <i>YI, YII</i>
	УСИЛИТЕЛЬ <i>YI</i>	« \updownarrow »	Луч <i>YI</i> разместить в центре экрана, совместив его с одной из горизонтальных линий шкалы экрана
	УСИЛИТЕЛЬ <i>YII</i>	« \updownarrow »	Луч <i>YII</i> сместить в нижнюю часть экрана (или за пределы экрана)
		ПЛАВНО ↔ ГРУБО	Сместить луч (лучи) таким образом, чтобы начало развёртки совпадало с первой вертикальной линией шкалы экрана

Калибровка осциллографа

1. Соединить «ВХОД» блока «УСИЛИТЕЛЬ *YI*» с «ВЫХОДОМ» блока «КАЛИБРАТОР».

2. На блоке «КАЛИБРАТОР» переключатель «-/ $\square_{2\text{ kHz}}$ » установить в положение « $\square_{2\text{ kHz}}$ ». На выходе калибратора будет сформирован сигнал в виде импульсной последовательности с частотой **2 кГц**.
3. Амплитуду импульсов установить переключателем « V » по заданию преподавателя.
4. Выполнить синхронизацию осциллографа.
5. Ручками «ВОЛЬТ/ДЕЛ», «ВРЕМЯ/ДЕЛ» установить такие параметры развёртки сигнала по Y и X , чтобы на экране наблюдался целый период сигнала, а размах сигнала занимал как можно большую часть экрана. Осциллограмма должна иметь примерно такой же вид, как показано на рис. 3.8, *a*.
6. Зарисовать осциллограмму, используя шаблон рис. 3.9, *a*. Записать значения параметров сигнала калибратора и значения цены делений по Y и X .
7. С разрешения преподавателя выполнить калибровку осциллографа (установить номинальные значения периода развёртки и коэффициента усиления «усилителя YI »).
8. Для построения графика сигнала в декартовой системе координат необходимо определить положение оси t на экране ЭЛТ (см. рис. 3.9, *б*). Для этого следует подать на «Вход Y » сигнал с амплитудой **0 В**. Это можно сделать, соединив сигнальный и общий провода, подключенные к «Входу Y ».
9. Рассчитать относительные погрешности измерения амплитуды и периода сигнала до калибровки осциллографа. Погрешности рассчитываются по формулам:

$$\delta_U = \frac{U_{\text{осц}} - U_{\text{калибр}}}{U_{\text{калибр}}} 100\% , \quad \delta_T = \frac{T_{\text{осц}} - T_{\text{калибр}}}{T_{\text{калибр}}} 100\%$$

10. По окончании эксперимента отключить питание всех блоков.

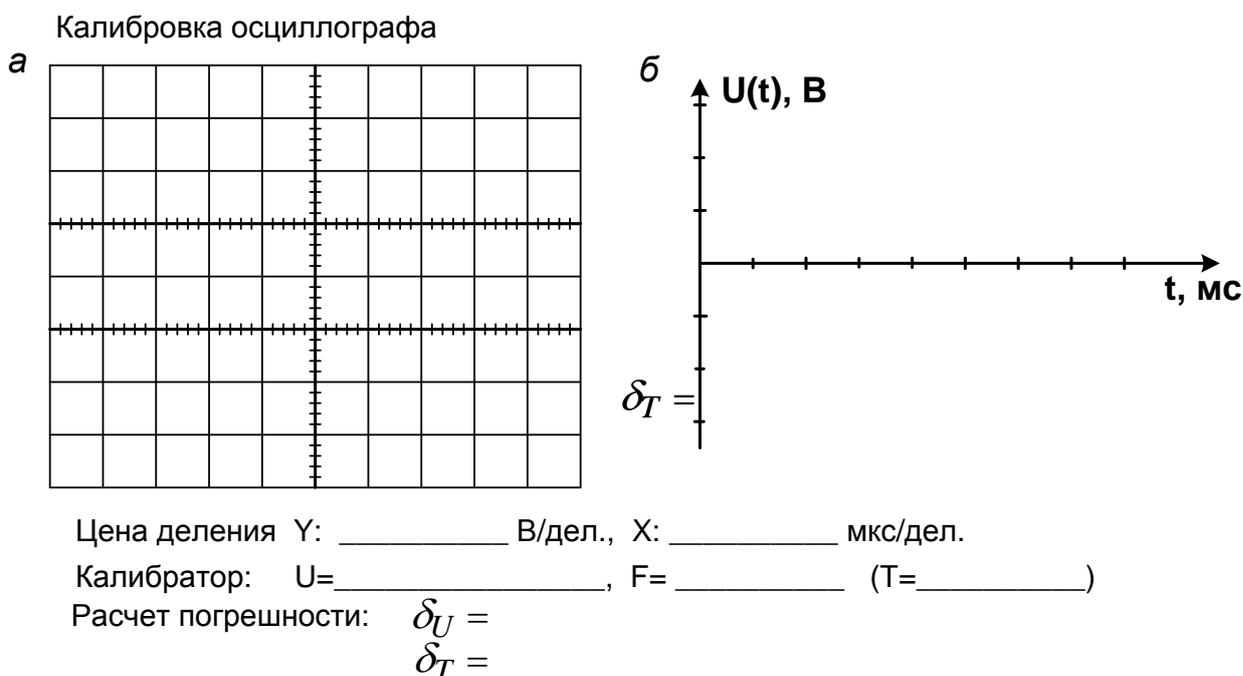


Рис. 3.9. Отчёт «Калибровка осциллографа»

Лабораторная работа № 4

Измерение параметров сигналов осциллографом С1-55

Цель работы: научиться производить измерения осциллографом различных электрических величин.

Приборы: двухлучевой осциллограф С1-55, генератор сигналов низкочастотный ГЗ-118.

Теоретическая часть

Измерение параметров сигналов

Измерение параметров сигналов можно рассмотреть на примере последовательности импульсов положительной полярности. Осциллограмма такой последовательности, полученная на экране осциллографа, показана на рис. 4.1, а.

Необходимо отметить, что вертикальные линии на осциллограммах могут отсутствовать ввиду того, что процесс резкого изменения напряжения на пластинах Y быстротечен и за это время люминофор не успевает разгореться. Но на чертежах эти линии следует показывать. Параметрами представленного сигнала являются:

- ✓ период повторения;
- ✓ длительность импульса;
- ✓ амплитуда импульса;
- ✓ среднее значение (постоянная составляющая) сигнала.

На лицевой панели осциллографа переключатель цены деления по вертикали установлен в положении $0,5 \text{ V/дел.}$, по горизонтали – 2 mS/дел.

Параметры сигнала вычисляются следующим образом:

- Период следования импульсов $5,5 \text{ дел.} \times 2 \text{ mS/дел.} = 11 \text{ mS}$;
- Длительность импульса $2 \text{ дел.} \times 2 \frac{\text{mS}}{\text{дел.}} = 4 \text{ mS}$;
- Амплитуда импульса $5,6 \text{ дел.} \times 0,5 \text{ V/дел.} = 2,8 \text{ V}$.

Для измерения постоянной составляющей сигнала на лицевой панели осциллографа (блок «УСИЛИТЕЛЬ *YI*» или «УСИЛИТЕЛЬ *YII*» в зависимости от того, на какой вход подан исследуемый сигнал) переключатель \approx/\sim установить в положение « \sim ». Осциллограмма примет вид, показанный на рис. 4.1, в. Сигнал опустился на 2 деления. Тогда его постоянная составляющая составит $2 \text{ дел.} \times 0,5 \text{ V/дел.} = 1 \text{ V}$.

В декартовой системе координат сигнал показывают в виде, представленном на рис. 4.1, в (с постоянной составляющей) и 4.1, г (без постоянной составляющей).

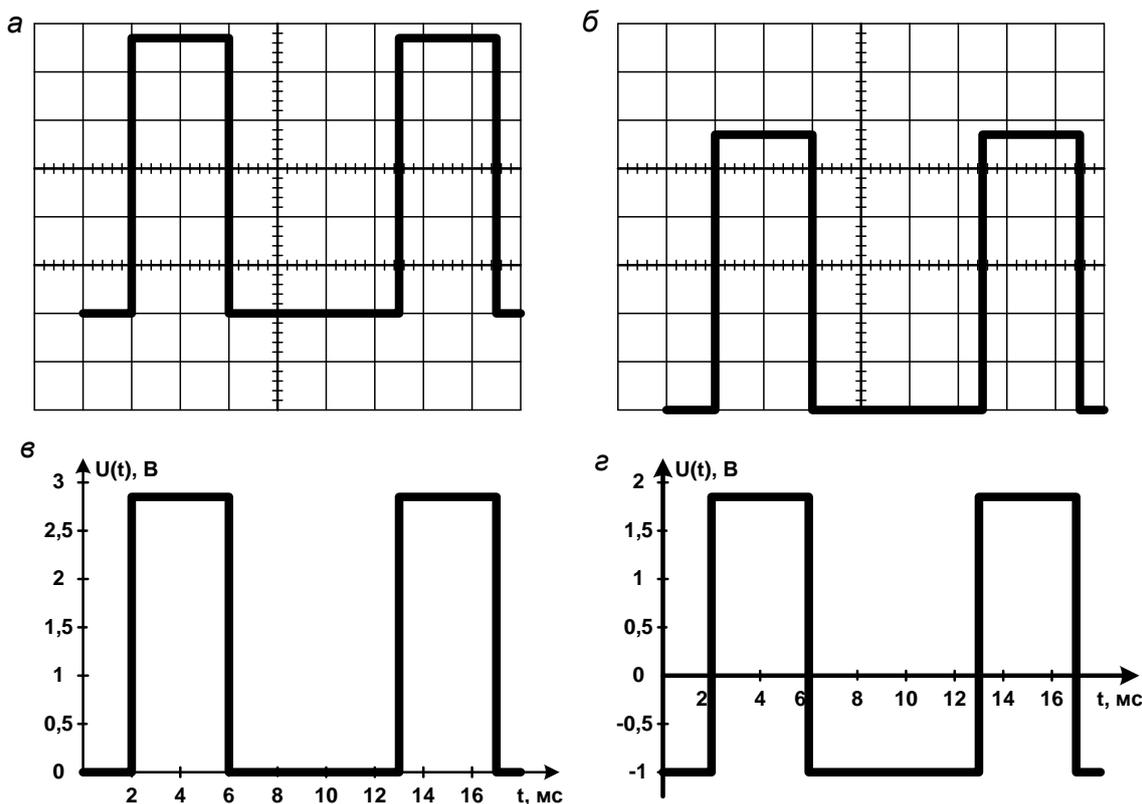


Рис. 4.1. Осциллограммы сигнала на экране осциллографа с постоянной составляющей (а) и без постоянной составляющей (б); в декартовой системе координат с постоянной составляющей (в) и без постоянной составляющей (з)

Экспериментальная часть

Измерение параметров синусоидального сигнала

1. На функциональном генераторе измерительного стенда (см. лаб. работу № 3, рис. 3.7) кнопкой **2** выбрать синусоидальную форму генерируемого напряжения.
2. Выполнить синхронизацию осциллографа. При необходимости подобрать цену деления по Y и X . Получить осциллограмму измеряемого напряжения на экране осциллографа.
3. Ручкой **4** функционального генератора установить такой размах напряжения, чтобы оно касалось горизонтальных линий шкалы и занимало максимум шкалы экрана. Число периодов сигнала, наблюдаемых на экране, не должно превышать двух.
4. Зарисовать осциллограмму, используя шаблон рис. 4.2, а. Записать значения цены делений по Y и X .

По полученным данным и полученной осциллограмме рассчитать параметры сигнала: амплитудное значение, период, частоту. Построить график сигнала в декартовой системе координат (см. рис. 4.2, б).

Измерение параметров сигнала синусоидальной формы

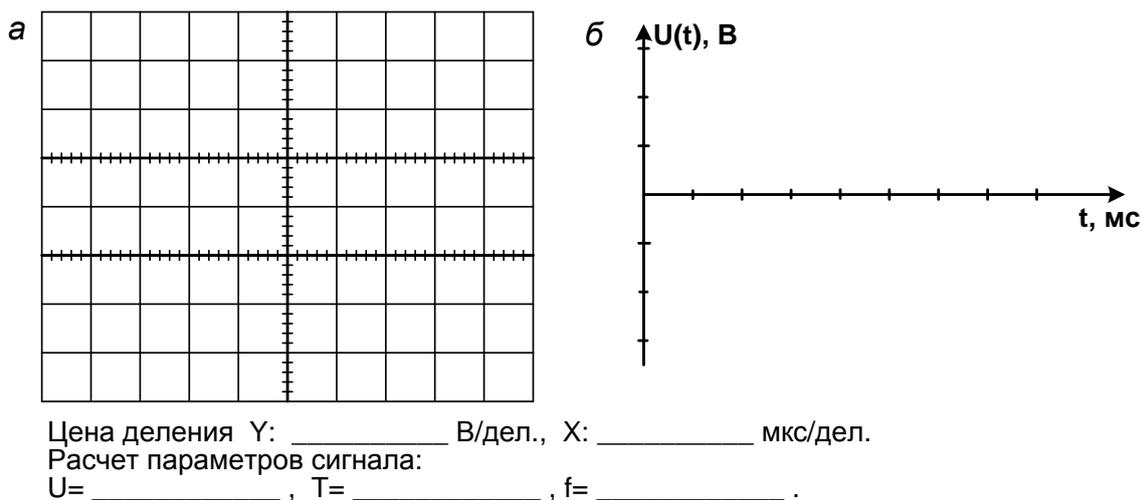


Рис. 4.2. Отчёт «Измерение напряжения синусоидальной формы»

Получение фигур Лиссажу

1. На функциональном генераторе кнопкой 2 выбрать синусоидальную форму генерируемого напряжения.
2. Соединить «Выход II» ($600\ \Omega$) генератора ГЗ – 118 (лицевая панель приведена на рис. 4.3) и «ВХОД» блока «СИНХРОНИЗАЦИЯ» осциллографа.
3. На блоке «СИНХРОНИЗАЦИЯ» установить переключатель в положение «ВХОД X».
4. На генераторе установить ручками «Hz», «МНОЖИТЕЛЬ» частоту сигнала, равную или кратную рассчитанной по результатам измерений, выполненных в п. «Измерение параметров синусоидального сигнала».
5. Регулируя амплитуды напряжений сигналов, подаваемых на входы Y и X осциллографа, меняя цену деления по Y, добиться, чтобы размеры изображения по осям Y и X были примерно равны.
6. Изменяя частоту сигнала на генераторе ГЗ – 118 дискретно и плавно регулятором «РАССТРОЙКА», добиться устойчивого изображения в виде фигуры Лиссажу.

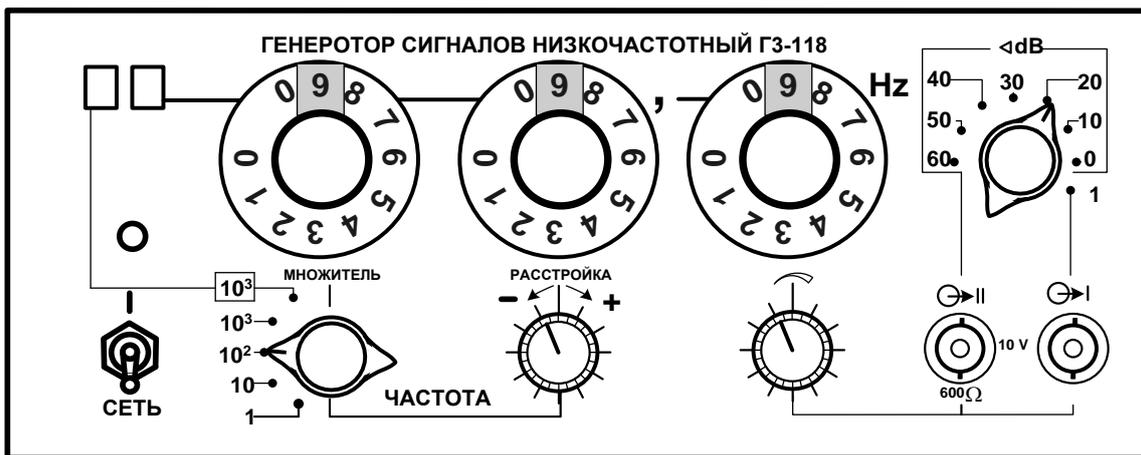
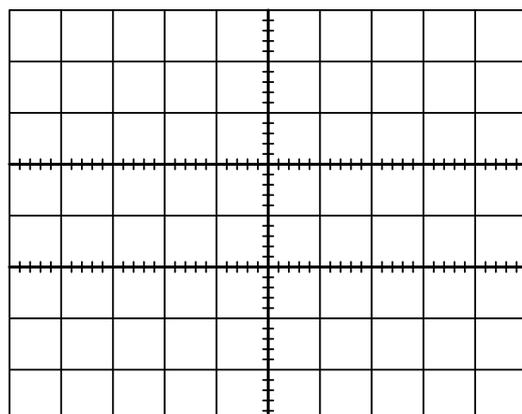


Рис. 4.3. Лицевая панель генератора ГЗ-118

7. Зарисовать осциллограмму. Записать значение частоты сигнала на выходе генератора ГЗ – 118.
8. По полученным данным и полученной осциллограмме (фигуре Лиссажу) рассчитать частоту сигнала, поданного на вход X осциллографа (см. рис. 4.4).

Фигура Лиссажу



$f_y =$ _____
 Расчет неизвестной частоты:
 $f_x =$ _____

Рис. 4.4. Отчёт «Построение фигур Лиссажу».

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение осциллографа, процессы получения осциллограммы в осциллографе.
2. Почему в качестве генератора развёртки используют генератор пилообразного напряжения?
3. Что даёт использование в качестве генератора развёртки источника синусоидальных колебаний?

4. Что такое «синхронизация»? Как происходит синхронизация генератора развёртки осциллографа? Какие виды синхронизации используются в осциллографе С1-55?

5. Как осуществляется управление яркостью луча?

6. Каким образом производится устранение обратного хода луча?

7. Каково назначение калибратора? Как осуществить калибровку осциллографа?

8. Как с помощью осциллографа можно измерить постоянное напряжение, при отсутствии вольтметра?

9. Как с помощью осциллографа измерить частоту следования импульсов?

10. Предложите состав измерительного комплекса для исследования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) четырёхполюсника. Объясните назначение каждого элемента этой схемы.

11. Что такое «открытый» и «закрытый» входы осциллографа. Когда используются эти входы осциллографа?

12. Почему на отклоняющие пластины подаются разнополярные сигналы одинаковой амплитуды?

13. Какое условие необходимо выполнить для получения неподвижного изображения на экране ЭЛТ?

14. Объясните принцип определения частоты гармонического колебания с помощью фигур Лиссажу. Начертите схему измерительного комплекса для решения этой задачи.

15. Объясните принцип определения сдвига фаз между гармоническими колебаниями одной частоты с помощью фигур Лиссажу. Начертите схему измерительного комплекса для решения этой задачи.

16. Как измерить глубину амплитудной модуляции гармонического сигнала с помощью осциллографа? Начертите схему измерительного комплекса, предназначенного для решения этой задачи.

17. Что такое нормированная (приведенная) АЧХ? Как она строится? В чём её преимущества перед обычной АЧХ?

18. Объясните назначение органов регулировки генератора низких частот ГЗ-118.

19. Объясните функциональную схему и принцип работы электронного осциллографа.

20. Объясните назначение органов регулировки осциллографа С1-55.

Лабораторная работа № 5
Изучение цифрового осциллографа ADS-2111M

Цель работы: сформировать навыки работы с цифровым осциллографом *ADS – 2111M*.

Приборы: цифровой осциллограф *ADS – 2111M*.

Теоретическая часть

Осциллограф ADS-2111M – цифровой осциллограф, предназначенный для исследования электрических сигналов путём их визуального наблюдения на жидкокристаллическом индикаторе и измерения их амплитудных и временных параметров. Прибор измеряет заданные параметры в реальном времени и выводит информацию на специальный экран (внешний монитор или телевизор).

Подробные основные и дополнительные технические характеристики прибора, принцип его работы и порядок выполнения измерений описаны в руководстве «Осциллограф ADS-2111M. Руководство по эксплуатации». На рис.5.1 и 5.2 показаны органы управления осциллографа ADS-2111M.

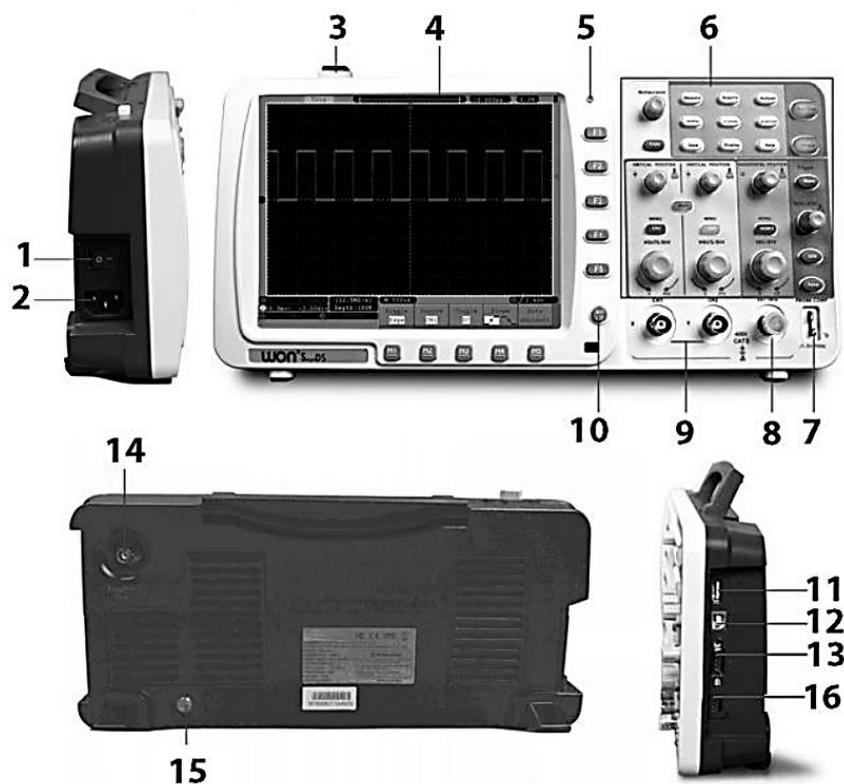


Рис. 5.1. Передняя и задняя панели прибора. Виды сбоку

1. Кнопка включения питания.
2. Разъём для подключения кабеля питания.
3. Кнопка включения прибора.
4. Дисплей прибора.
5. Индикатор сети: зелёный – прибор включён в сеть, батарея полностью заряжена (при использовании батареи); желтый – прибор включён в сеть, батарея заряжается (при использовании батареи).
6. Область органов управления (рассмотрены на рис.2).
7. Разъём для компенсации пробника.
8. Разъём для внешнего запуска прибора.
9. Входные разъёмы каналов CH1 и CH2.
10. Кнопка включения/выключения меню.
11. USB-интерфейс для подключения внешнего запоминающего устройства.
12. USB-интерфейс для подключения к компьютеру.
13. Разъём RS-232.
14. Разъём выхода Pass/Fail.
15. Винт для подключения к «земле».
16. LAN- интерфейс.

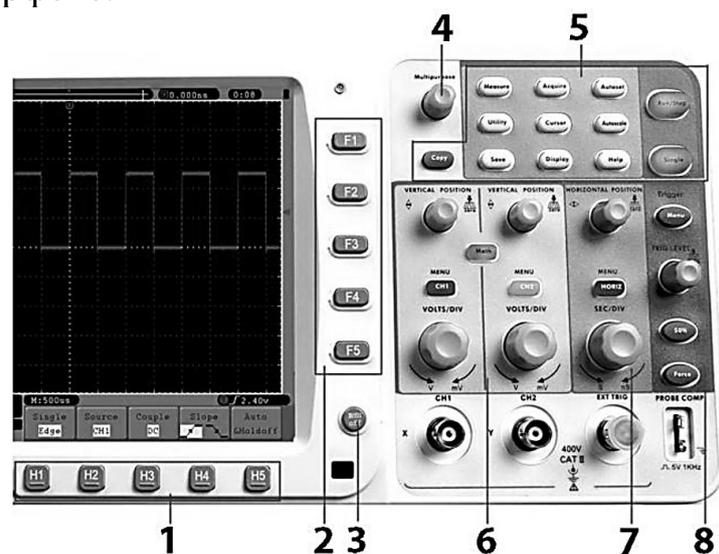


Рис. 5.2. Описание органов управления на передней панели

1. Функциональные кнопки управления меню **H1 – H5**.
2. Функциональные кнопки управления меню **F1 – F5**.
3. Кнопка включения/выключения меню.
4. Поворотный регулятор.
5. Кнопки меню функций.
6. Органы управления вертикальной системой.
7. Органы управления горизонтальной системой.

Подготовка прибора к работе

Подключить шнур питания прибора к сети **220 В** и включить прибор. В течение нескольких секунд прибор произведёт самостоятельное тестирование, после чего на экране появится рабочее окно осциллографа. При работе с прибором необходимо ознакомиться с кнопками непосредственного управления.

К кнопкам непосредственного управления относятся: ***AUTOSET; RUNSTOP; SINGLE; COPY.***

Кнопка *AUTOSET.* Эта кнопка используется для автоматического выбора настроек осциллографа, наиболее подходящих для получения осциллограммы сигнала. Нажать на кнопку ***AUTOSET,*** и осциллограф автоматически покажет осциллограмму сигнала. **Кнопка *RUN.STOP.*** Данная кнопка осуществляет остановку и запуск регистрации.

Замечание! В состоянии «***STOP***» вертикальный и горизонтальный масштабы осциллограммы могут быть изменены в некоторых пределах. Другими словами, сигнал можно растянуть в горизонтальном или вертикальном направлении. При коэффициенте развёртки, меньшем или равном **50 мс** горизонтальный масштаб может быть изменён на 4 шага вниз.

Кнопка *SINGLE.* Нажать на кнопку ***SINGLE*** для однократного запуска прибора для регистрации сигнала.

Кнопка *COPY.* Кнопка быстрого сохранения сигнала в соответствии с заданными параметрами в меню ***SAVE.***

Автоматическая калибровка

Перед началом работы с прибором необходимо произвести компенсацию пробника и автоматическую калибровку (см. «Руководство по эксплуатации»). Использование автоматической калибровки обеспечивает максимальную точность измерений. Можно запустить калибровку в любое время, но при изменении температуры на **5** или более градусов автоматическая калибровка должна быть выполнена обязательно.

Перед запуском автокалибровки от входных разъёмов осциллографа необходимо отключить пробники или соединительные кабели.

- Нажать кнопку «*UTILITY*».
- Нажать кнопку *H1* для вызова меню «*FUNCTION*».
- Поворотным регулятором выбрать элемент меню «*ADJUST*».
- Нажать кнопку *H2* для запуска автоматической калибровки (элемент «*SELFCAL*»).
- Нажать кнопку *H2* для запуска процедуры автокалибровки или любую другую кнопку, если процедуру автокалибровки выполнять не надо.

Быстрое преобразование Фурье

Быстрое преобразование Фурье (*FFT*, или БПФ) позволяет математически получить из временной зависимости сигнала его частотные компоненты, т.е. проводить анализ сигналов не только во временной, но и в частотной области. Осциллограф позволяет преобразовать **2048** точек (выборок) сигнала во временной области в **1024** точки частотной области в диапазоне от **0 Гц** до частоты Найквиста.

Предельная частота (частота Найквиста) равна половине частоты выборки аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Выполнение операции БПФ проводится следующим образом:

1. Нажать кнопку «*MATH*» для входа в меню математических операций.
2. Нажать функциональную кнопку *H2* для входа в меню выполнения БПФ.
3. Функциональной кнопкой *F1* выбрать источники сигнала для БПФ.
4. Нажатием функциональной кнопки *F2* выбрать тип окна для выполнения БПФ: *Rectangle*, *Hamming*, *Hanning* или *Blackman* (см. «Руководство по эксплуатации»).
5. Нажатием функциональной кнопки *F3* выбрать размерность шкалы по вертикали *dB* или *Vrms*.

6. Нажатием функциональной кнопки **F4** выбрать кратность увеличения фрагмента: **x1, x2, x5** или **x10**.

7. Регулятором **«HORIZONTALPOSITION»** передвинуть результат БПФ в контрольную зону.

8. Регулятором **«VERTICALPOSITION»** можно изменить вертикальное положение результата БПФ.

9. При необходимости можно воспользоваться курсорными измерениями.

Для выбора оптимальных условий преобразования предлагается четыре функции окна для **FFT (БПФ)**: **Rectangle. Hamming. Hanning** или **Blackman**. Каждая функция окна предполагает компромисс между разрешающей способностью по частоте и точностью определения амплитуды. Приоритетами измерения и характеристиками источника сигнала определяется тип используемого окна. Примеры спектров при использовании различных окон приведены в «Руководстве по эксплуатации».

Следует учитывать также, что:

1. сигналы, имеющие в спектре постоянную составляющую, могут стать причиной неверного результата измерений **FFT (БПФ)**. Для уменьшения влияния постоянной составляющей, необходимо включить **связь входа по переменному току (AC)**;

2. для уменьшения влияния белого шума и помех дискретизации при обработке периодических сигналов, необходимо использовать режим регистрации осциллографа – «Усреднение»;

3. для отображения на экране результатов **FFT (БПФ)** с большим динамическим диапазоном необходимо использовать логарифмическую шкалу **«dB»**;

Экспериментальная часть

Установка типа связи по входу **CH1**

1. Нажать кнопку **CHIMENU** для входа в меню установок канала **CH1**.
2. Нажать функциональную кнопку **H1** для входа в меню установки типа связи по входу.
3. Функциональной кнопкой **F1** выбрать либо открытый вход (**DC**), либо кнопкой **F2** – закрытый вход (**AC**), либо кнопкой **F3** – замыкание входа на землю.
4. Выбранный тип связи по входу отобразится в элементе меню **«Coupling»**.

На рис. 5.2 показан выбор закрытого типа связи по входу (а) и открытого типа (б).

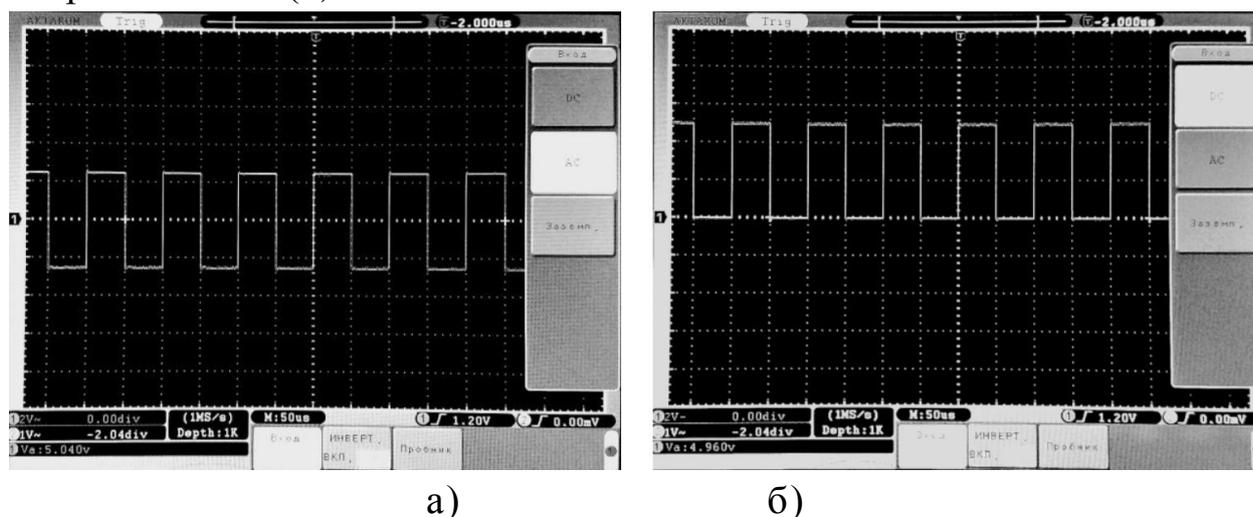


Рис. 5.2. Осциллограмма прямоугольных импульсов положительной полярности при закрытом (а) и открытом входе CH1 (б)

Установка коэффициента ослабления пробника для канала **CH1**

Для отображения осциллограммы сигнала в правильном масштабе необходимо сделать установку коэффициента ослабления пробника в меню настроек канала, соответствующую действительному ослаблению пробника. Для этого:

1. Нажать кнопку «**CHIMENU**» для входа в меню установок канала **CH1**.
2. Нажать функциональную кнопку **F3** для входа в меню установки коэффициента ослабления.
3. Функциональной кнопкой **F2** выбрать коэффициент ослабления пробника **1:1**.
4. Выбранный коэффициент ослабления отобразится в элементе меню «**Probe**».

Таблица 5.1. Коэффициент ослабления пробника и соответствующие установки меню.

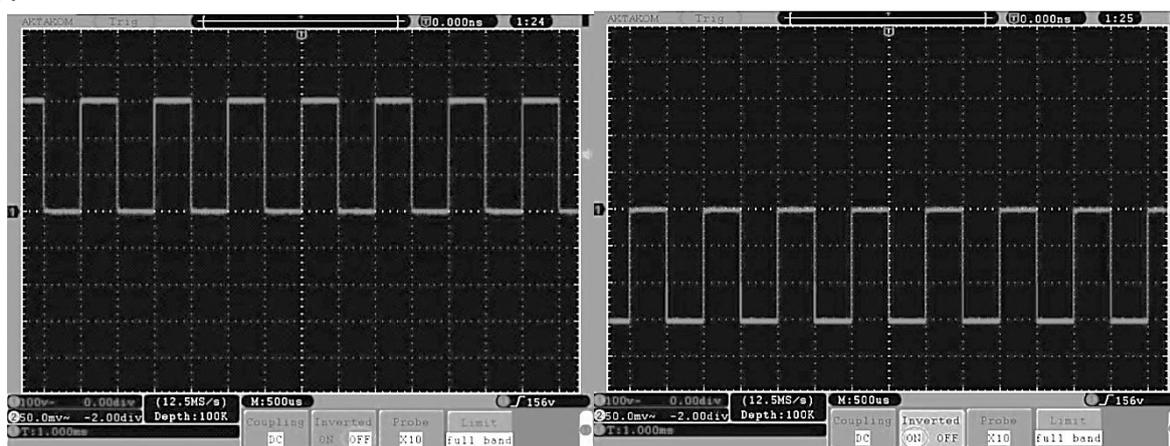
Коэффициент ослабления пробника	Соответствующая установка меню
1:1	1x
10:1	10x
100:1	100x
1000:1	1000x

Замечание! При использовании пробника с ослаблением 1:1 необходимо выбрать установку **1x**. Это поможет избежать ошибок масштаба при отображении осциллограммы или значения измеряемых величин.

Инверсия осциллограммы на канале **CH1**

Инверсия осциллограммы – это изменение фазы сигнала на 180° .

1. Нажать кнопку **«CHIMENU»** для входа в меню установок канала CH1.
2. Нажать функциональную кнопку **H2** для входа в меню установки инверсии. Затем для включения инверсии в элементе меню **«Inverted»** установить **«ON»**. Для выключения инверсии элемент меню **«Inverted»** установить в состояние **«OFF»**. На рис. 5.3 представлен вид экрана с формой сигнала.
- 3.



а)б)

Рис.5.3. Форма сигнала без инверсии (а) и с инверсией (б)

Курсорное измерения амплитудных параметров сигнала канала **CH1**

1. Нажать кнопку **«CURSOR»** для входа в режим курсорных измерений.
2. Нажать кнопку **H2** для выбора источника сигнала. Сделать активным канал **CH1**.
3. Нажать кнопку **H1** для выбора типа курсора.

4. Нажатием кнопки *F2* выбрать режим курсоров по напряжению (*Voltage*). На экране появятся две горизонтальные линии пурпурного цвета, которые соответствуют курсорам 1 и 2.
5. Регулятором «*VERTICALPOSITION*» канала *CH1* можно изменить положение курсора 1, а при помощи регулятора «*VERTICALPOSITION*» канала *CH2* – положение курсора 2.
6. Результат курсорных измерений отображается в отдельном окне в нижнем левом углу экрана (рис. 5.4).

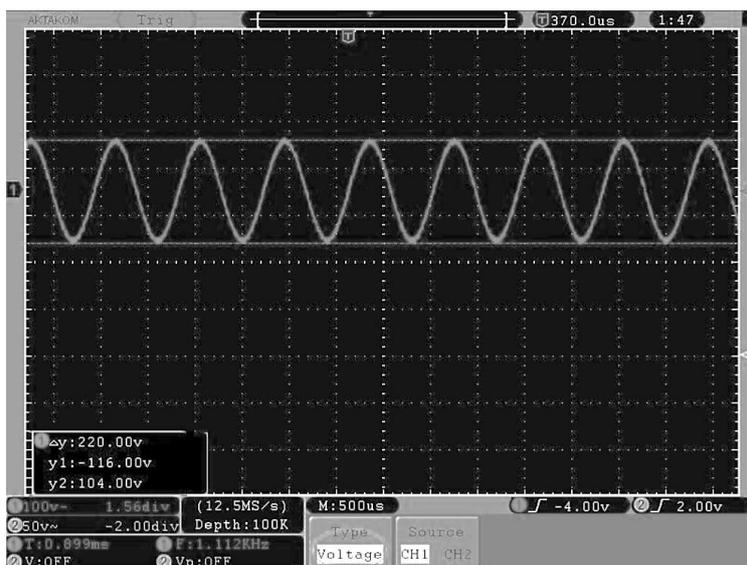


Рис.5.4. Курсорные измерения в амплитудной области

Курсорные измерения временных параметров сигнала канала *CH1*

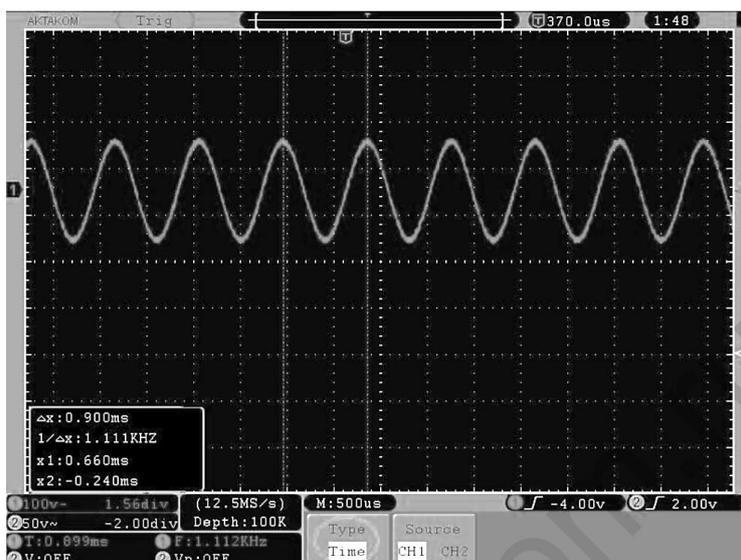


Рис. 5.5. Курсорные измерения во временной области.

1. Нажать кнопку «*CURSOR*» для входа в режим курсорных измерений.

2. Нажать кнопку *H2* для выбора источника сигнала. Сделать активным канал *CH1*.

3. Нажать кнопку *H1* для выбора типа курсора.

4. Нажатием кнопки *F3* выбрать режим курсоров в частотно-временной области (*Time*). На экране появятся две вертикальные линии пурпурного цвета, которые соответствуют курсорам **1** и **2**.

5. Регулятором «*VERTICALPOSITION*» канала *CH1* можно изменить положение курсора **1**, а при помощи регулятора «*VERTICALPOSITION*» канала *CH2* – положение курсора **2**.

6. Результат курсорных измерений отображается в отдельном окне в нижнем левом углу экрана (рис. 5.5).

Курсорные измерения в режиме быстрого преобразования Фурье (БПФ)

Данные измерения доступны только при включённом режиме БПФ(*FFT*).

1. Нажать кнопку «*MATH*» для входа в режим математических операций.

2. Нажать кнопку *H2* для выбора активным режим БПФ (*FFT*).

3. Нажать кнопку «*CURSOR*» для входа в режим курсорных измерений в режиме БПФ.

4. Нажать кнопку *H1* для выбора типа курсора.

5. Нажатием кнопки *F2* выбрать режим курсоров в амплитудной области(*Vamp*), а нажатием кнопки *F3* – выбрать режим курсоров в частотной области (*Freq*). На экране появятся две линии пурпурного цвета, которые соответствуют курсорам **1** и **2**. Регулятором «*VERTICALPOSITION*» канала *CH1* можно изменить положение курсора **1**, а при помощи регулятора «*VERTICALPOSITION*» канала *CH2* - положение курсора **2**

Таблица 5.2. Меню курсорных измерений в режиме БПФ

МЕНЮ	УСТАНОВКИ	ОПИСАНИЕ
<i>Type</i>	<i>OFF</i>	Выключение курсорных измерений в режиме БПФ.
	<i>V amp</i>	Отобразить курсоры для измерения в амплитудной области в режиме БПФ.
	<i>Freq</i>	Отобразить курсоры для измерения в частотной области в режиме БПФ.
<i>Source</i>	<i>Math FFT</i>	Источник сигнала – БПФ

6. Результат курсорных измерений в режиме БПФ отображается в отдельном окне в нижнем левом углу экрана (рис. 5.6)

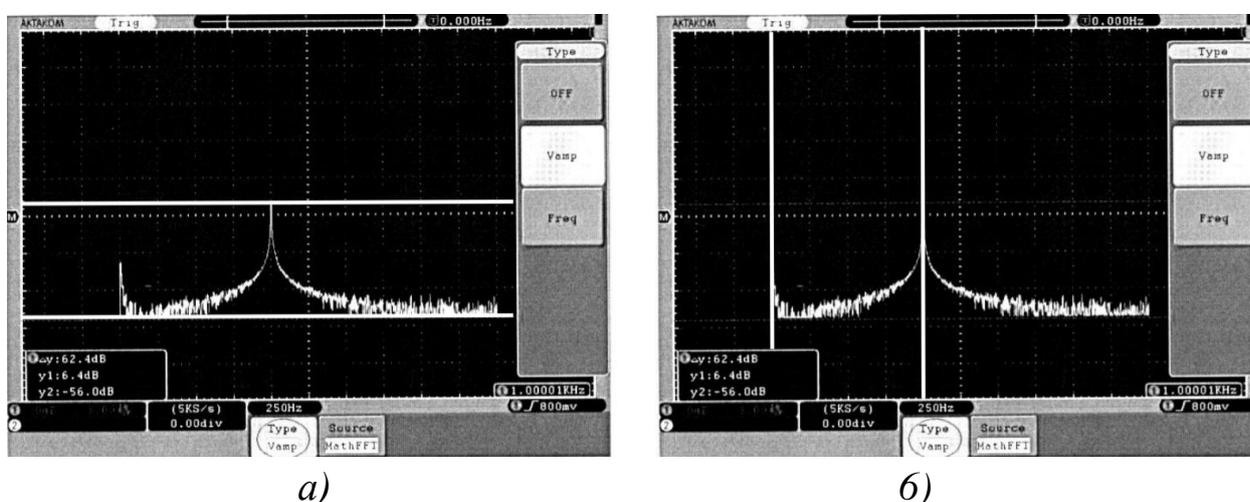


Рис. 5.6. Измерение амплитуды (а) и частоты (б) в режиме БПФ при помощи курсоров

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена система вертикальной развёртки в цифровом запоминающем осциллографе?
2. Какую функцию выполняет масштабирующее устройство?
3. В каком соотношении должны находиться частота исследуемого сигнала и полоса пропускания осциллографа для получения погрешности измерения амплитуды менее 2%?
4. Как должны соотноситься время нарастания переходной характеристики осциллографа и длительность фронта исследуемого сигнала для достижения погрешности измерения менее 2%?
5. Какие АЧХ и переходные характеристики (ПХ) осциллографа являются оптимальными?

6. Для чего предназначен АЦП?
7. Как происходит преобразование аналогового сигнала в цифровой?
8. Что такое дискретизация?
9. В каком соотношении должны находиться частота дискретизации и спектр исследуемого сигнала для его однозначного восстановления?
10. Что такое квантование и какова минимальная разрядность АЦП типового бюджетного осциллографа?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике / А.А. Данилин, Н.С. Лавренко; под ред. А. А. Данилина. – М.: Лань, 2017. – 408 с.
2. Мильков Ю.А. Метрология, стандартизация, сертификация: сб. лабораторных работ: В 2 ч. Ч. 2 / Ю.А. Мильков, Н.Г. Осипова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 67 с.
3. Осциллограф ADS-2111М. Руководство по эксплуатации. – М.: АТАКОМ, 2006. – 82 с.
4. Осциллограф С1-55 Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М., 1984. – 127 с.
5. Тюрин В.А. Цифровой запоминающий осциллограф. Устройство и принцип действия: учебно-методическое пособие / В.А. Тюрин. – Казань: Казанский федеральный университет, 2016. – 101 с.

Учебно-методическое издание

**Ирина Николаевна Зайцева,
Эрнест Иосифович Исакович,
Наталья Александровна Ярлыкова**

РАДИОИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ:

ОСЦИЛЛОГРАФЫ. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ
ПОСОБИЕ**

Техническое исполнение – В. М. Гришин
Печатается в авторской редакции

Формат 60 x 84 /16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.
Печ.л. 6,0. Уч.-изд.л. 5,8
Тираж 300 экз. (1-й завод 1-30 экз.). Заказ 186

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии
Елецкого государственного университета им. И. А. Бунина

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина»
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1