



МГУ им. М.В. Ломоносова
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

**ОСНОВЫ РАБОТЫ
С ЦИФРОВЫМ ОСЦИЛЛОГРАФОМ**

Ананьева Н.Г., Харабадзе Д.Э., Салецкий А.М.

Лабораторная работа 5

Москва 2026

Цель работы

Разобрать принципы работы цифровых осциллографов. Получить навыки простейших осциллографических измерений в цепях переменного электрического тока.

Характеристики переменного тока.

Переменным называют ток (или напряжение), значение и направление которого (или только значение или только направление) изменяются с течением времени. Частным случаем переменного тока являются периодические токи, то есть, токи удовлетворяющие требованию $I(t) = I(t+nT)$, где n – любое целое число, T – период (см. рис. 1). Основной характеристикой периодического тока является его форма. Под формой сигнала понимают вид графика зависимости силы тока (или напряжения) от времени.

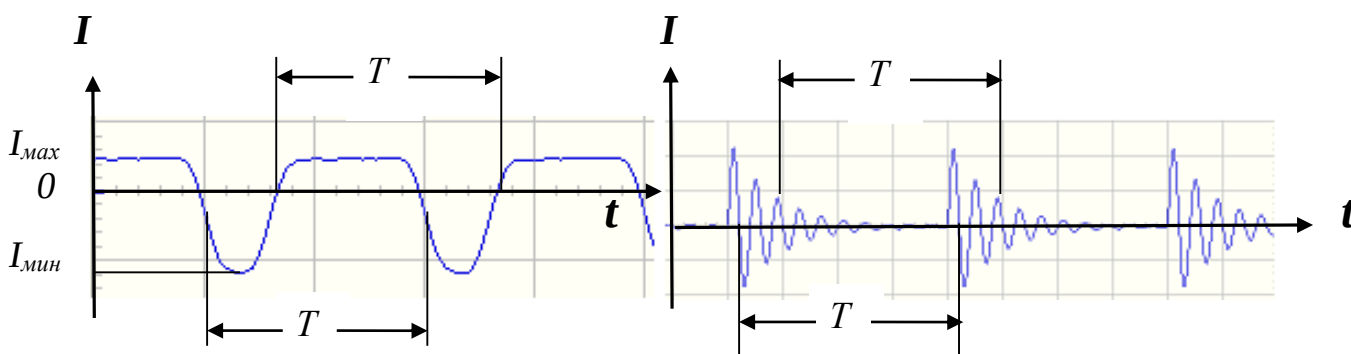


Рис.1. Характеристики периодического сигнала.

Для описания периодических токов обычно указывают:

- **Период T** – минимальное время, в течение которого периодический ток совершает полный цикл изменений, возвращаясь к исходной величине. Величину, обратную периоду, называют **частотой переменного тока F** : $F = 1/T$. Частота переменного тока численно равна количеству периодов за секунду.
- **Среднее значение за период** – постоянная составляющая сигнала (в зарубежной терминологии **DC Mean** – *direct current mean*):

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} I(t) dt ,$$

- **Эффективное (действующее или среднеквадратичное) значение**, в зарубежной терминологии – **RMS** – *root mean square*:

$$I_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} I^2(t) dt}$$

Для **гармонических** токов, то есть токов, изменяющихся по закону:

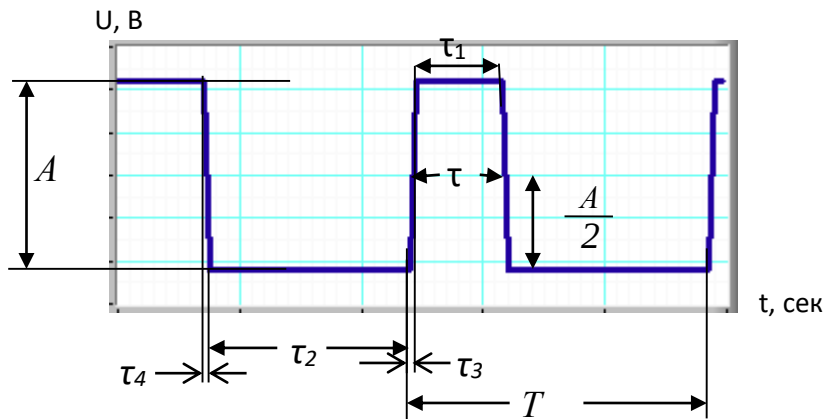
$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где I_0 – амплитуда, $\omega = 2\pi/T$ – циклическая частота, φ_0 – начальная фаза,

$$I_{cp} = 0, \quad I_{max} = -I_{min} = I_0, \quad I_{эфф} = I_0/\sqrt{2}.$$

В настоящее время во многих учебниках под термином «переменный ток» понимают только гармонический ток.

На рис. 2 показаны основные характеристики, используемые при описании трапецевидного сигнала:



A – размах,
 T – период сигнала,
 τ – длительность импульса,
 $\vartheta = T/\tau$ – скважность,
 $D = 1/\vartheta$ – коэффициент заполнения,
 τ_1 – длительность плато,
 τ_2 – длительность паузы,
 τ_3 – длительность фронта,
 τ_4 – длительность спада.

Рис. 2. Характеристики трапецевидного сигнала.

Измерение характеристик периодического тока и напряжения.

На приборах, предназначенных для измерений характеристик переменного периодического тока ставят значок $\sim$ или **АС** (англ. Alternating Current).

В цепи переменного тока значения напряжения и силы тока на всех ее участках непрерывно меняются во времени. Амперметры и вольтметры переменного тока обычно измеряют эффективное значение (и только для определенной формы сигнала, как правило, гармонического). **Осциллограф** позволяет отобразить зависимость напряжения периодического сигнала от времени.

Осциллографы бывают аналоговые и цифровые.

Принцип оцифровки сигнала

В основе цифровой техники лежит принцип оцифровки сигнала: аналоговый (непрерывный) сигнал представляется как последовательность чисел. Для этого, во-первых, сигнал разбивается на дискретные отсчеты через равные промежутки времени dt – осуществляется дискретизация по времени, во-вторых, измеряется значение напряжения сигнала в эти моменты времени – квантование по уровню.

На экране цифрового осциллографа представляют значения напряжения сигнала с шагом dt – график $U(t)$.

Очень важно правильно выбрать интервал дискретизации – dt . С одной стороны, чтобы не потерять никакой информации об аналоговом сигнале, отсчеты надо брать как можно чаще. С другой стороны, это потребует значительных затрат времени и памяти. На практике для оценки периода дискретизации dt используют **теорему Котельникова (Найквиста – Шеннона)**: аналоговый сигнал, спектр ко-

того ограничен некоторой **частотой F** , по этой теореме, полностью определяется последовательностью своих дискретных значений, взятыми через интервалы времени $\Delta t < 1/2F$. Частоту $2F$ называют частой Найквиста. Если частота дискретизации будет меньше, чем частота Найквиста (то есть удвоенная частота сигнала),

неизбежно появятся «ложные» частоты (см. рис.3, два последних графика). Реально частота дискретизации берётся в 5-10 раз выше полосы пропускания осциллографа, так как условия теоремы (ограничение спектра) выполняются входными фильтрами осциллографа лишь приближённо, что будет приводить к появлению ошибок в восстановленном сигнале.

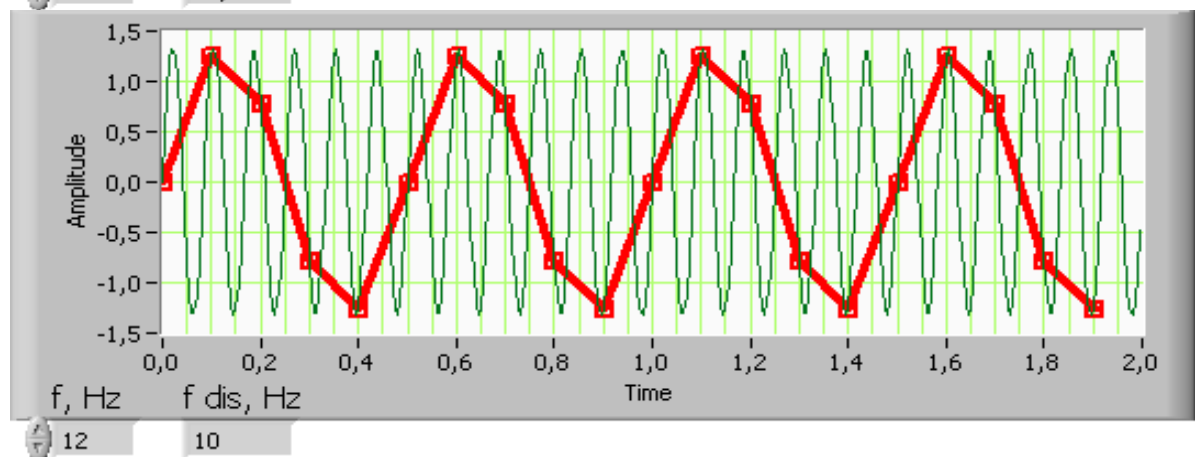
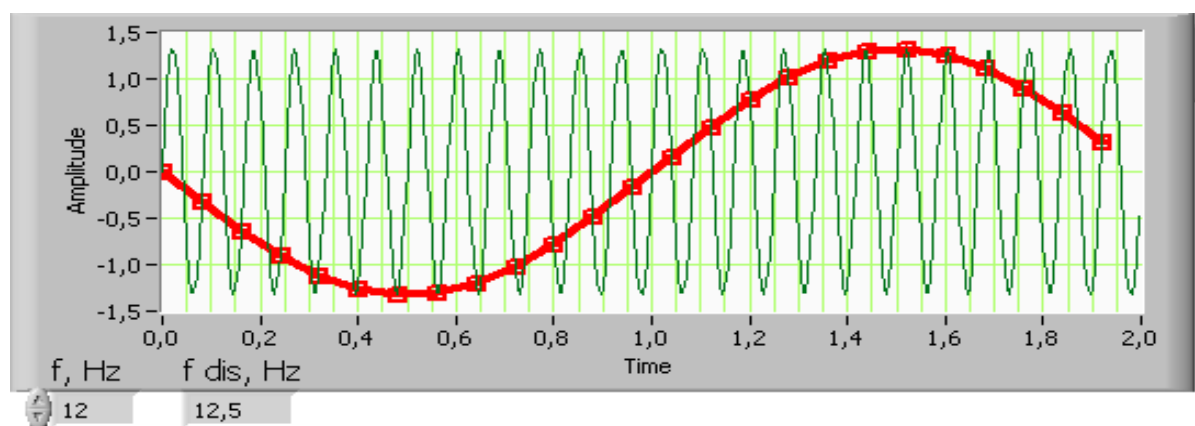
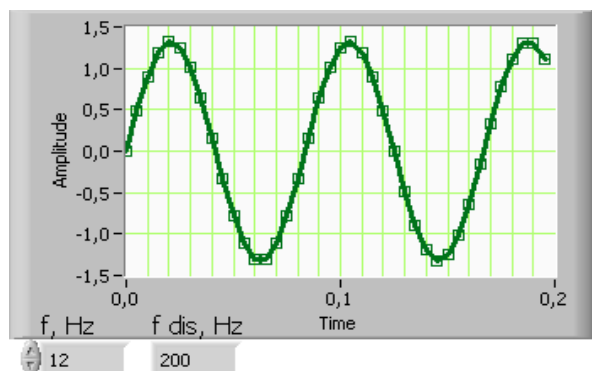
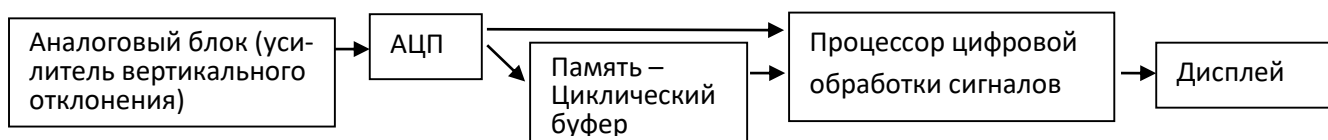


Рис. 3. Примеры оцифровки одного и того же сигнала ($f = 12$ Hz) с разной частотой дискретизации (f_{dis}), появление ложных частот.

Структура цифровых осциллографов.

Структура (архитектура) цифровых осциллографов разнообразна, но общая схема примерно такая:

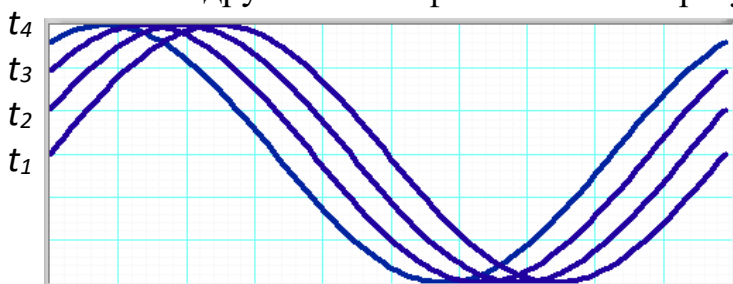


Аналоговый блок предназначен для предварительного усиления или ослабления сигнала и ограничению его частотного диапазона (для предотвращения появления «ложных» частот).

Затем нормированный сигнал поступает на АЦП – *аналогово-цифровой преобразователь*. В АЦП мгновенные значения входного сигнала $u(t)$ преобразуются в цифровые отсчеты $u(k)$. Преобразование проводится через равные интервалы времени, определяемые частотой дискретизации. В результате получается ряд значений – выборка, которая записывается в циклический буфер. Устройство цифровой обработки сигналов анализирует данные с АЦП для выявления определенного заданного условия (уровень запуска развертки или др.), и при выполнении этого условия выдает содержание циклического буфера на экран. Длительность развертки определяется частотой дискретизации и размером оперативной памяти.

Синхронизация.

Цифровой прибор работает в таком режиме: определенное время (оно определяется выбором настроек) идет оцифровка сигнала, потом собранный массив данных отображается на экране, потом снова идет набор массива данных, отображение его на экране и т.д. Проблема в том, что даже если сигнал строго периодический, но период выборки не кратен периоду сигнала, новый набор данных будет начинаться с другой точки фазы сигнала: в результате картинка на экране осциллографа будет все время изменяться.



Например, на рисунке, из-за того, что каждая картинка будет изображать синусоиду со сдвигом (в моменты времени $t_1 - t_4$), мы будем видеть «бегущую» синусоиду.

Для получения неподвижной картинки в осциллографах используют режим синхронизации. Суть этого режима в том, что развертка (отображение данных) начинается в строго определенный момент времени: когда мгновенное напряжение сигнала достигает заданного уровня по фронту (или по спаду). В результате, часто сменяющиеся картинки накладываются друг на друга, и мы видим неподвижную линию. ***Сигнал синхронизован с разверткой, когда между ними есть однозначная связь по времени.***

Принцип образования фигуры Лиссажу.

Для осциллографов с двумя каналами ввода сигналов можно на экране наблюдать развертки по времени (графики) для двух сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$. А можно для каждого момента времени t_i нанести на экран точки: по оси X – значение $U_2(t_i)$, по оси Y – значение $U_1(t_i)$, то есть, построить график зависимости $U_1(U_2)$.

Например, подавая на входы 1 и 2 два гармонических сигнала с определенными соотношениями частот и фаз, можно наблюдать неподвижные замкнутые кривые, **фигуры Лиссажу** (некоторые из которых изображены на рис. 4). Если не соблюдается строгое соответствие частот, фигура Лиссажу не будет неподвижной, и по скорости ее эволюции можно оценить расстройку частот.

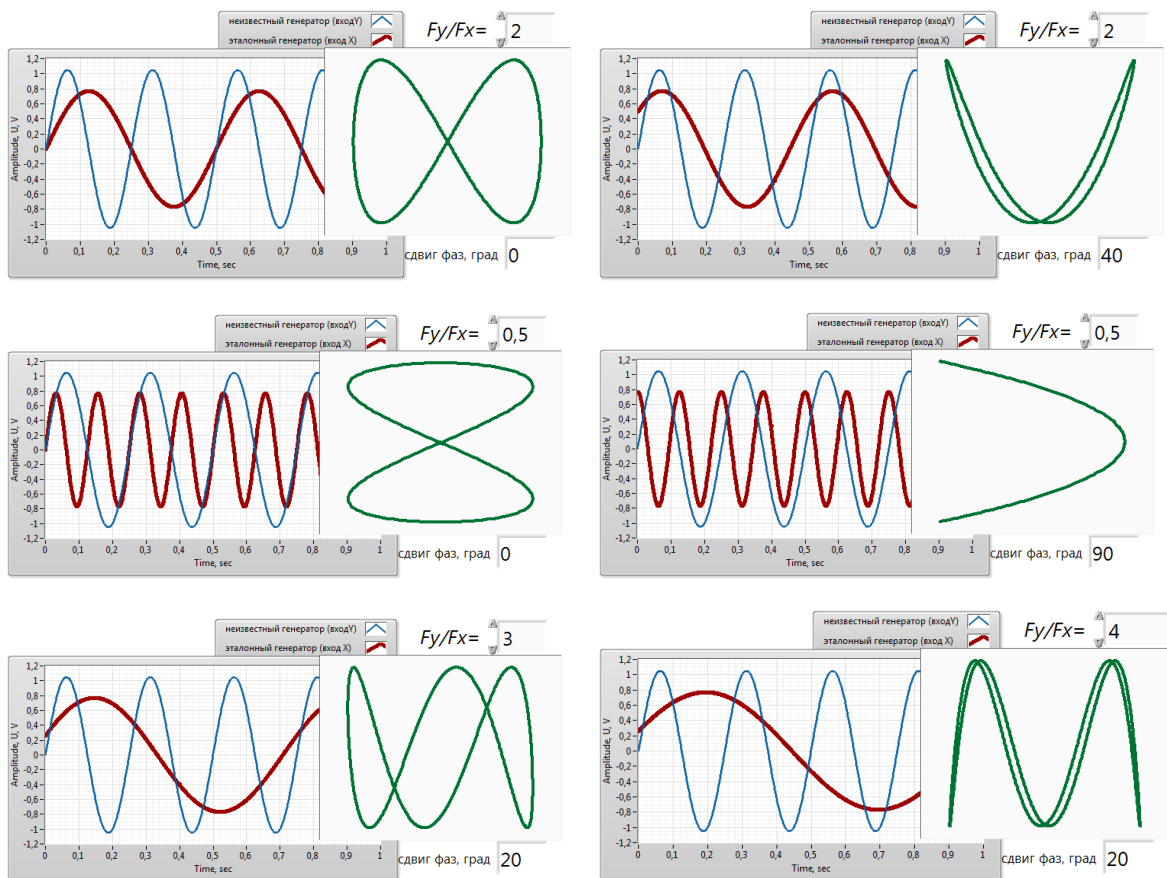


Рис. 4. Примеры фигур Лиссажу.

Рассмотрим построение фигуры Лиссажу при соотношении частот сигналов 1:1 (рис.5). Движение луча по горизонтали и вертикали описывают уравнениями:

$$x = x_0 \sin \omega t;$$

$$y = y_0 \sin(\omega t + \varphi).$$

Для вертикального отклонения луча имеем

$$y = y_0 (\sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi).$$

Подставляем в это равенство

$$\sin \omega t = \frac{x}{x_0} \text{ и}$$

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

получим уравнение движения точки:

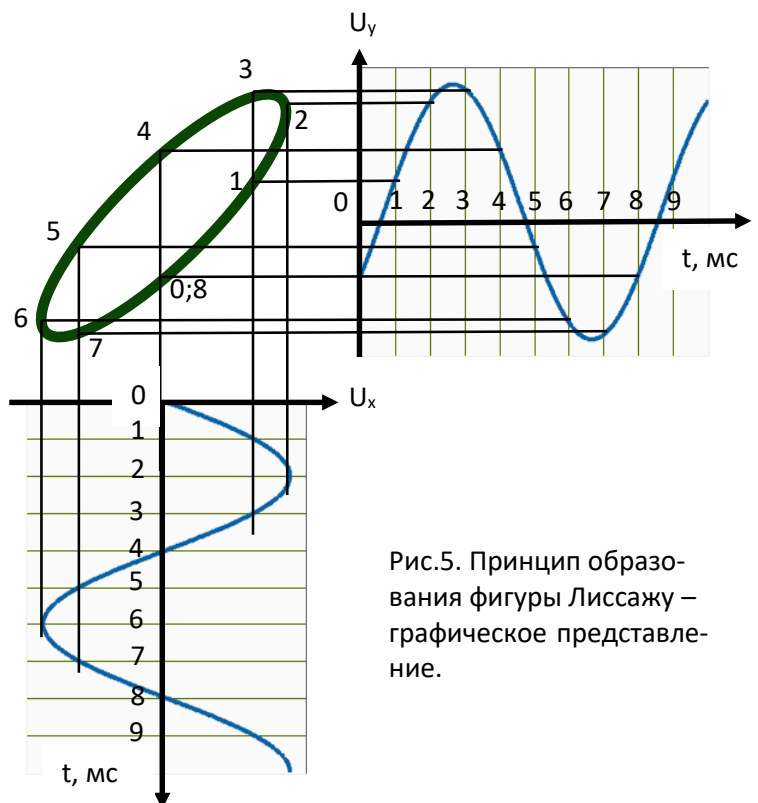


Рис.5. Принцип образования фигуры Лиссажу – графическое представление.

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

Это – уравнение эллипса, главные оси которого повернуты относительно осей X и Y на некоторый угол (рис. 6).

Координаты пересечений эллипса с осью X определяются из условия $y = 0$, откуда следует

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

Аналогично $\pm y_1/y_0 = \sin\varphi$.

Таким образом, угол сдвига фаз можно найти из характерных размеров эллипса

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

Погрешность метода резко возрастает при углах, близких к 90° , когда размеры l_x и L_x сближаются. Методом эллипса целесообразно измерять сдвиги фаз до 40° – 50° . Погрешность измерений определяется точностью измерения размеров эллипса.

Недостатком данного метода является его неоднозначность. Эволюция эллипса с ростом сдвига фаз показана на рис. 7. Для разрешения данной неоднозначности в один из сигналов можно ввести дополнительный известный фазовый сдвиг и по характеру изменения эллипса определить исходный сдвиг фаз.

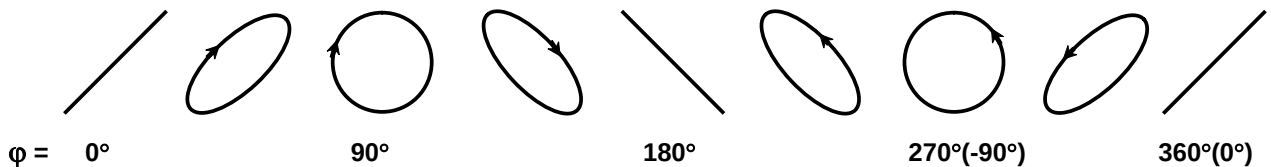


Рис. 7. Форма эллипса в зависимости от фазового сдвига.

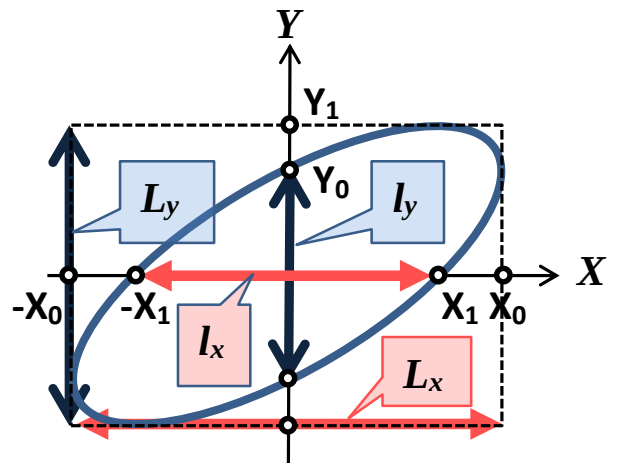


Рис. 6. Определение фазового сдвига методом эллипса.

Экспериментальное оборудование

Осциллографическая приставка PCSGU250 к компьютеру, компьютер.

Генератор гармонического сигнала неизвестной частоты.

Плата с гнездами для установки элементов схем.

Набор элементов (переключки, резисторы), соединительные провода.

Осциллографическая приставка PCSGU250 к компьютеру (вместе с программным обеспечением, установленным на ПК) – это многофункциональный цифровой прибор, который позволяет не только регистрировать форму сигнала и

автоматически проводить измерение его характеристик, но и проводить спектральный анализ сигналов, находить резонансные частоты цепей, складывать и умножать сигналы и т.д. Кроме осциллографа в PCSGU 250 есть встроенный генератор сигналов (различной формы).

На передней панели прибора расположены: внизу – выход цифрового генератора сигналов, выше – входы для подачи исследуемого сигнала, два канала. На задней панели прибора – USB разъем для подключения к компьютеру.



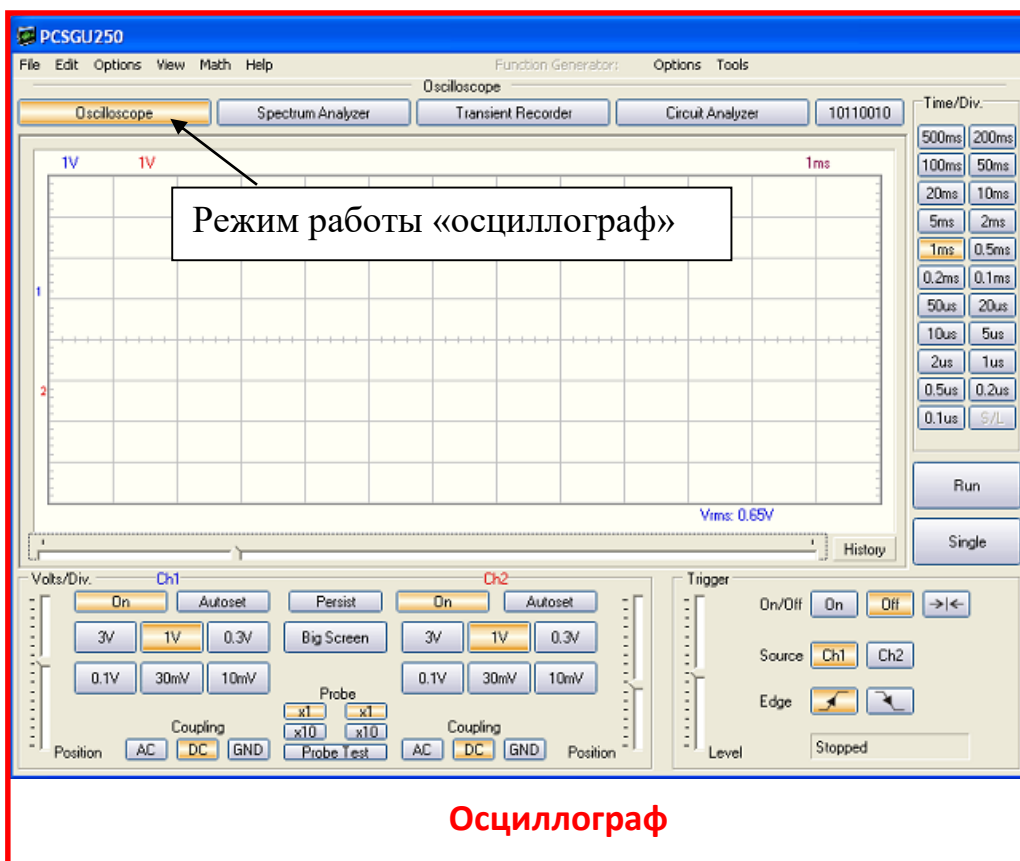
Светодиод индикации работы «READY»

1 КАНАЛ

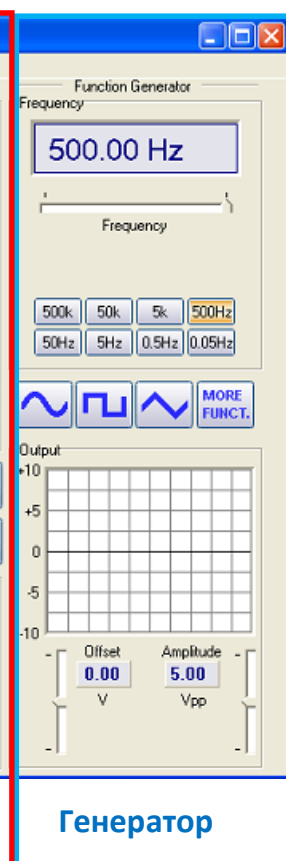
2 КАНАЛ

ЦИФРОВОЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ

На компьютере устанавливается специальная программа для работы приставки. Если поместить курсор мыши на пиктограмму PcLab2000LT, и дважды нажать левой кнопкой мыши, открывается окно программы:



Осциллограф



Генератор

Функциональные кнопки генератора.



Рис. 8. Панель управления работой генератора.

Режим работы «Осциллограф».

Приставка может работать в различных режимах. Для перехода в режим осциллографа надо выбрать кнопку «oscilloscope» (рис. на стр.7).

Лицевая панель цифровых осциллографов (или картинка лицевой панели на экране монитора для осциллографической приставки) во многом похожа на внешний вид аналоговых осциллографов (рис.9).

Обычно на лицевой панели осциллографа есть 4 основных блока:

- управление системой вертикального отклонения: чувствительность каналов **Ch1** и **Ch2**;
- управление системой горизонтального отклонения (разверткой);
Выбор длительности развертки задает интервал времени отображения сигнала на экране, он же определяет и частоту дискретизации (большей частоте дискретизации будет соответствовать большее разрешение по оси времени).
- блок синхронизации;
- блок отображения информации – дисплей (экран).

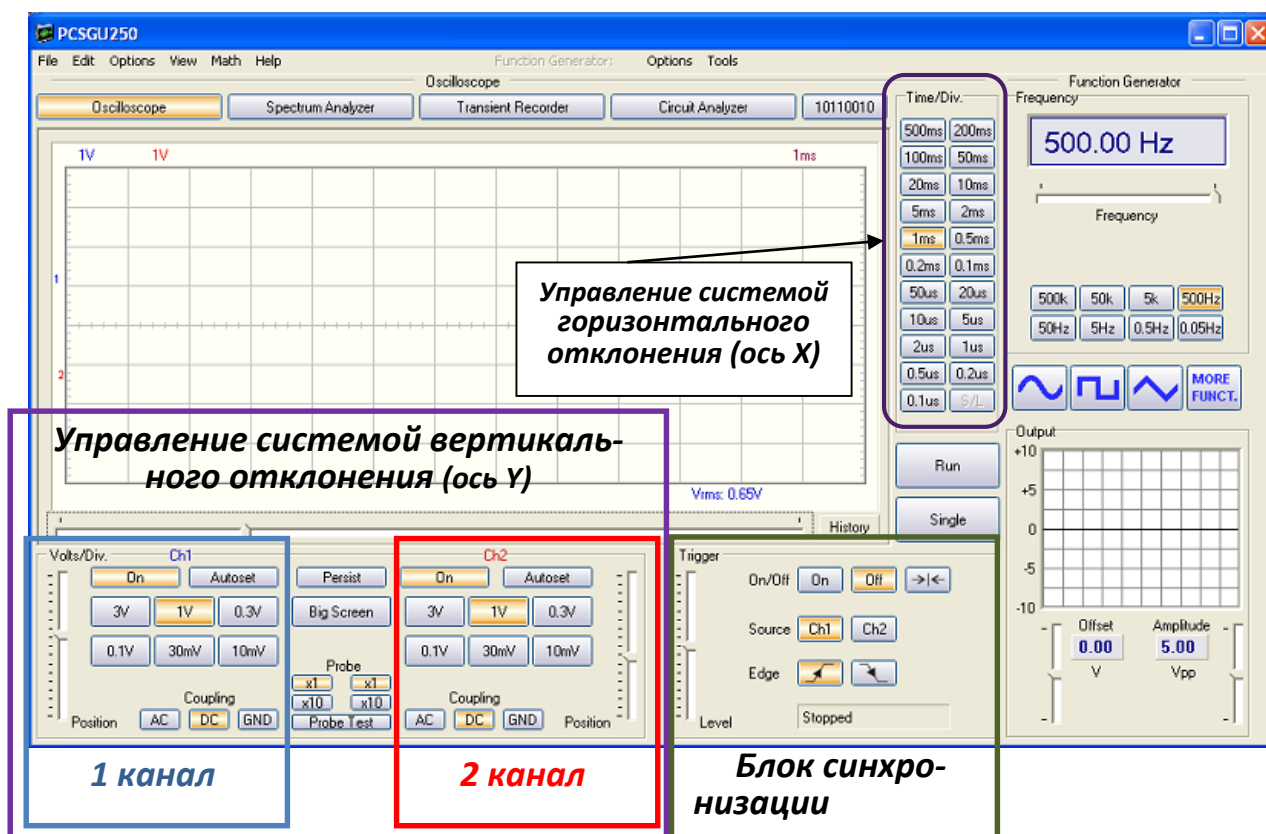


Рис. 9. «Лицевая панель» осциллографической приставки.

Включение или выключение каналов **Ch1** и **Ch2** осуществляется кнопками «On» (рис. 10).

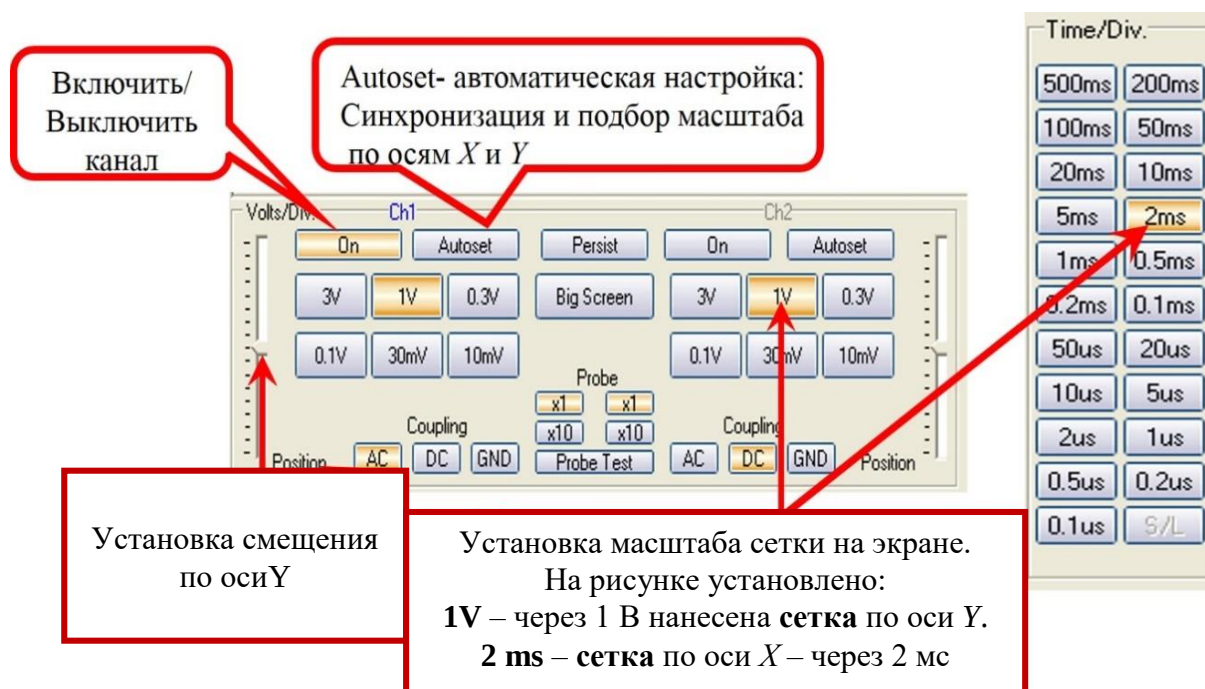


Рис. 10. Панель управления системой вертикального и горизонтального отклонения.

Возможные режимы работы каналов вертикального отклонения развертки переключаются следующими кнопками:

«AC» (закрытый вход) на усилитель вертикального отклонения (рис. 9, 10) подают только переменную составляющую сигнала. Для этого между входной клеммой осциллографа и усилителем включают конденсатор. На экране будет изображена только переменная составляющая сигнала.

«DC» (открытый вход) – вход усилителя соединен с входной клеммой прибора. На экране будет изображен сигнал с переменной и постоянной составляющими.

«GND» (земля) – входная клемма прибора отключается от усилителя и заземляется. На экране – прямая линия. Этот режим позволяет установить на экране положение «0 В».

В данной приставке синхронизация осуществляется блоком, который называют «Триггер» (рис. 11). Он расположен под экраном, справа (рис. 9).

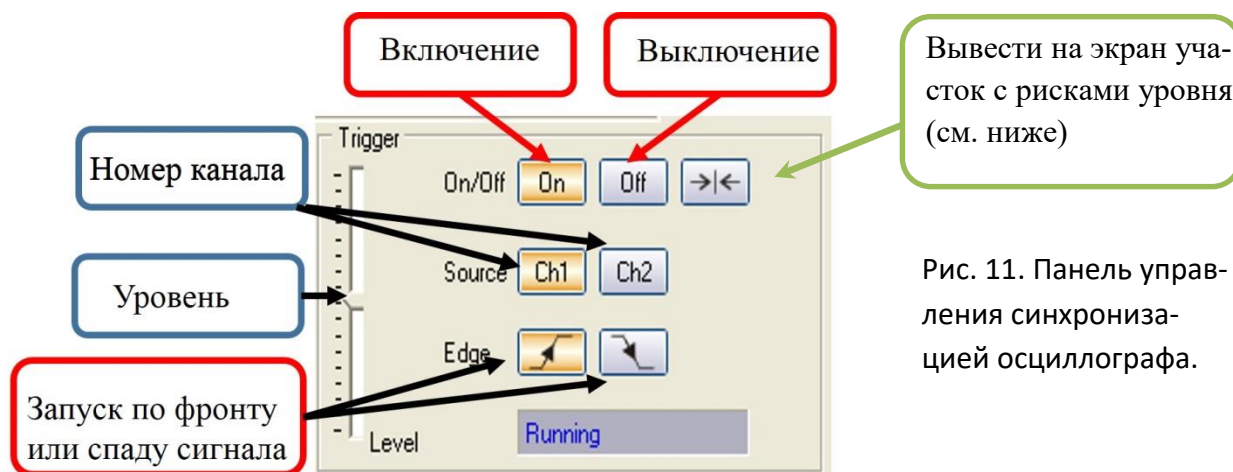
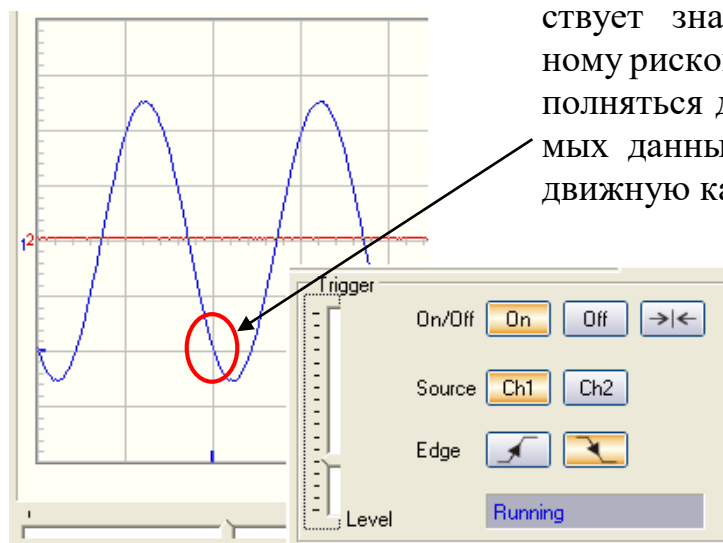


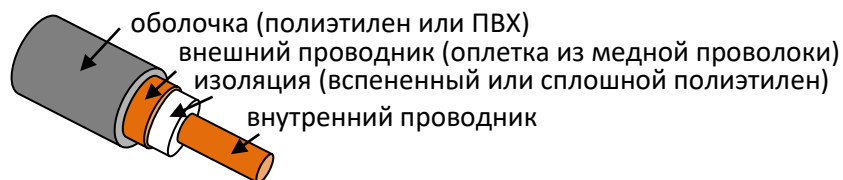
Рис. 11. Панель управления синхронизацией осциллографа.



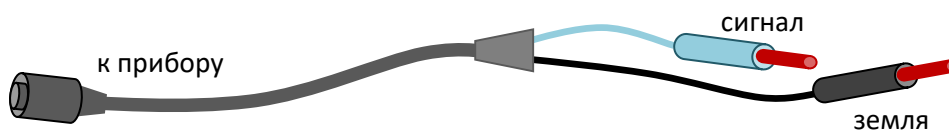
На экране осциллографа, в момент времени, отмеченный риской внизу, уровень сигнала (мгновенное напряжение) соответствует значению напряжения, отмеченному риской слева. И это условие будет выполняться для каждого набора отображаемых данных – значит, мы увидим неподвижную картинку.

В данном примере синхронизация выбрана по спаду сигнала.

Для подключения осциллографа к исследуемой цепи обычно используют **коаксиальный кабель**.



Внешний проводник (оплетка) соединяется с корпусом прибора (и «землей»). Благодаря совпадению осей обоих проводников у идеального коаксиального кабеля и электрическое и магнитное поле полностью сосредоточены в пространстве между проводниками (в диэлектрической изоляции), что исключает потери электромагнитной энергии на излучение, и влияние внешних электромагнитных наводок (помех), приводящих к "размытому" изображению.



Провод для подключения к "земле" делают более длинным и более темным (по сравнению с сигнальным).

Для цепей переменного тока необходимо соблюдать полярность подключения приборов. Как правило, «земля» для всех приборов общая. Для используемой в работе осциллографической приставки «земля» каналов осциллографа и генератора соединена внутри прибора. В некоторых измерениях можно использовать «однопроводной» режим. Например, для быстрого тестирования схем. Но для устранения наводок и достаточно точных измерений надо использовать коаксиальный кабель и соединять «землю» проводов.

При подготовке к задаче необходимо написать в рабочей тетради: конспект, письменно ответить на вопросы допуска (стр.23), подготовить таблицы для результатов – стр. 24-26 (распечатать или переписать; распечатку не резать).

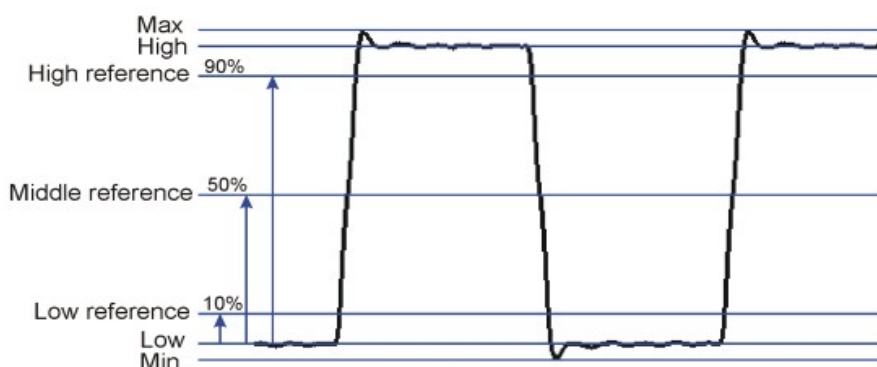
Проведение эксперимента

Упражнение 1. Определение характеристик периодического напряжения с помощью осциллографа.

Цель упражнения: познакомиться с работой генератора осциллографической приставки PCSGU250, с режимом работы осциллографа «развертка по времени», освоить измерение характеристик сигнала по масштабной сетке и в автоматическом режиме. Оценить длительности развертки и частоту дискретизации.

Ниже приведены определения некоторых характеристик периодических сигналов, используемых в осциллографической приставке PCSGU250 (рис.12). Например, если сигнал похож на трапецевидный, но содержит некоторые выбросы, то определяют установившийся максимальный уровень сигнала (High) и установившийся минимальный уровень сигнала (Low). **Эти уровни определяют размах напряжения «Amplitude».** Для гармонического сигнала традиционно «амплитуда» - это половина размаха. Но в данном приборе под «Amplitude» надо понимать размах напряжения для любой формы сигнала.

Voltage parameters



Time parameters

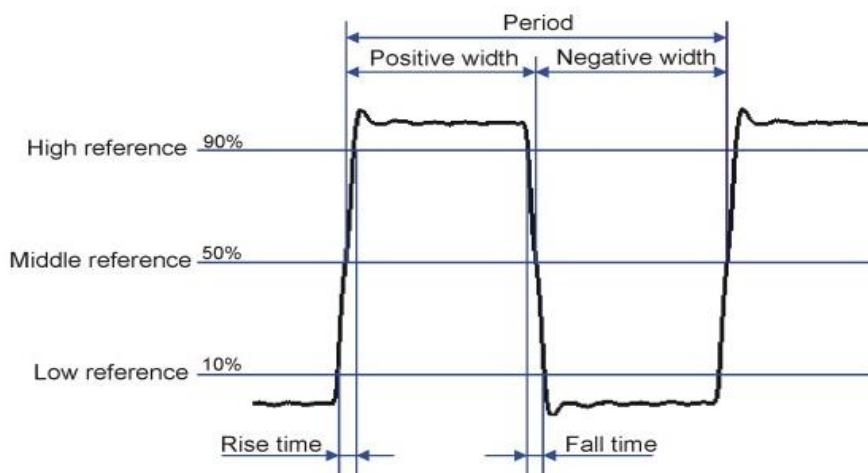


Рис. 12. Характеристики реального периодического трапецевидного сигнала согласно описанию осциллографической приставки PCSGU250.

Измерения



1. Включить компьютер и монитор. Включить осциллографическую приставку (навести курсор мыши на пиктограмму PcLab2000LT, и дважды нажать левой кнопкой мыши). На мониторе должно открыться окно лицевой панели прибора. На самой приставке должен загореться синий светодиод «READY» (см. фотографию приставки на стр. 7). Если светодиод не загорелся, вам будет предложена демонстрационная версия работы программы. Надо проверить правильность подключения приставки (под контролем преподавателя) и включить приставку (см. описание на рабочем месте).
2. В начале работы надо провести калибровку сигналов: линии двух каналов должны совпадать и проходить по оси X при «0» напряжении. Для этого в меню «Option» выбрать пункт «Calibrate»¹. В появившемся информационном окне Вам сообщат, что осциллограф будет откалиброван. Надо нажать кнопку «Ok». Через несколько секунд калибровка закончится, о чем сообщат в том же информационном окне, после этого информационное окно надо закрыть («Ok»). **Включить осциллограф - щелкнуть курсором мышки по кнопке «RUN».** Должны появиться две линии на экране осциллографа: **синяя для I канала** и **красная для II канала**.
3. Соединить провода с **I канала** осциллографа с генератором, используя плату с гнездами для установки элементов схем, **соблюдая полярность подключения: «земля» генератора должна быть соединена с «землей» осциллографа.** Включить генератор сигналов, нажав кнопку выбора формы сигнала «прямоугольный». На экране осциллографа должно появиться изображение сигнала.
4. Поменять выходные характеристики на генераторе (см. рис. 8), установить: напряжение от 5,5 до 7 В и частоту от 1600 до 1900 Гц, коэффициент заполнения (duty cycle) 20 – 40%. Изображение полученного сигнала надо настроить в удобный для работы вид: **синхронизировать** (см. стр.10), выбрать масштабы по осям (рис.9, управление системами вертикального и горизонтального отклонения). **Измерения надо проводить, выбрав такой масштаб, чтобы измеряемая величина занимала не менее 1 основного деления масштабной сетки** (если есть возможность, то растянуть ее на 3-5 делений и больше, но чтоб она не выходила за пределы экрана).

Для измерений в пунктах 5, 6 на экране должны быть 2-3 периода сигнала. **Измерения проводить только в режиме реального времени: осциллограф включен (кнопка «RUN» выделена), синхронизация включена.**

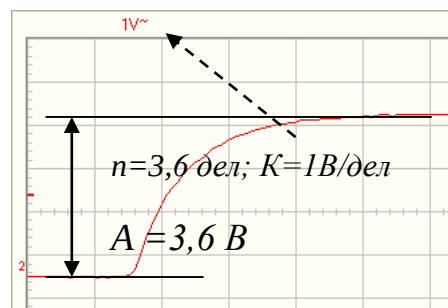
¹ Перед калибровкой надо проверить, что входы осциллографической приставки отсоединены от внешних цепей. В данном задании провода еще не подключены к цепи, но если надо будет провести калибровку в процессе работы, необходимо отключить генераторы: вынуть штекера проводов на входы осциллографической приставки с макетной платы.

5. Измерить размах напряжения сигнала A (см.рис.12) и период T по масштабной сетке, записать в таблицу 1 (таблицы можно распечатать из приложения).

$A = K \cdot n$, где K – масштаб основного деления масштабной сетки по вертикали в В, n – размер в основных делениях.

$T = L \cdot m$, где L – масштаб основного деления сетки по горизонтали в мс (или мкс), m – размер в основных делениях.

Аналогично измерить длительность сигнала (плато) и паузы (рис.2), записать в таблицу 2.



6. Измерить характеристики сигнала в автоматическом режиме осциллографа: выбрать из меню приставки пункт «View», из открывшегося меню «**Waveform Parameters**». В открывшейся таблице «Waveform Parameters» выбрать только те величины, которые надо измерить: размах напряжения – «Amplitude», временные характеристики из таблиц 1 и 2. Поставить галочку в окошке «Show on screen» – характеристики будут показаны и на экране осциллографа. Полученные результаты записать в таблицы 1 и 2.

Картинку с экрана осциллографа надо сохранить. Для этого надо выбрать в меню приставки пункт «Edit», из открывшегося меню – «Copy». Создать на компьютере документ Microsoft Word с Вашим отчетом по работе, сохранить в папке «STUD» на рабочем столе, в папке с номером Вашей группы. В названии файла написать свою фамилию. Первая строка документа должна содержать сведения: ФИО, № группы, дату выполнения. Следующая строка: «Упражнение 1». Далее вставить сохраненную на осциллографе **картинку трапецевидного сигнала с характеристиками** из п.6

Таблица 1.

Основные характеристики прямоугольного (трапецевидного) сигнала

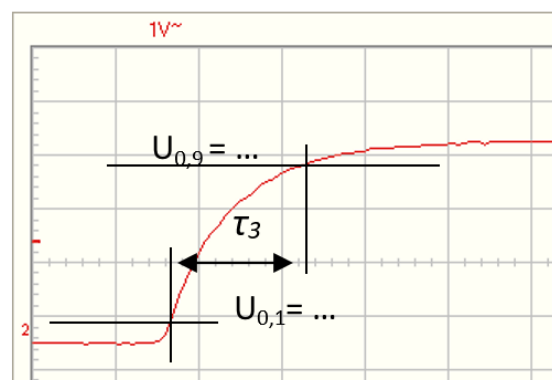
Установлено на генераторе	A, В			F, Гц			
Измерено (и рассчитано) на осциллографе по масштабной сетке	K, В/дел	n, дел	A, В	L, мс/дел	m, дел	T, мс	F, Гц
Измерено на осциллографе через «Waveform Parameters»	A, В			T, мс			F, Гц

7. Для того, чтобы измерить длительность фронта и спада, необходимо поменять масштаб по горизонтальной оси (оси времени): надо «растянуть» сигнал так, чтобы измеряемая величина была не меньше одного основного деления масштабной сетки (на рисунке стр.15 показана измеряемая величина – фронт сигнала). Для этого надо воспользоваться кнопками «Time/Div» (см. рис. 9,

10, система горизонтального отклонения). Если сигнал не виден на экране, можно воспользоваться прокруткой осциллограммы «History» (под экраном) или кнопкой $\rightarrow|\leftarrow$ блока синхронизации (рис.11).

Рассмотрим более подробно измерение длительности фронта (см. рис. 12).

Сначала надо рассчитать 0,1 и 0,9 размаха напряжения, отметить эти точки на графике, потом измерить между этими отметками временной интервал – это и будет длительность фронта.



Для подобных измерений удобно воспользоваться маркерами: из меню «View» выбрать «Markers» (рис.13а). На экране появятся вертикальные и горизонтальные линии маркеров.

Горизонтальные линии надо выставить на 0,1*A* и 0,9*A* (подвести курсор мышки, нажать и переместить линтию). Если вертикальные линии выставить на пересечения сигнала с горизонтальными маркерами, под экраном получим временной интервал между маркерами – dt (рис. 13б). Провести измерения длительности фронта через «Waveform Parameters» (записать в табл.2). Сравнить полученные результаты с измерениями по масштабной сетке. Сохранить картинку с экрана осциллографа, с выведенными на экран результатами измерений через «Waveform Parameters» (и маркерами), в файл с Вашей работой.

8. Аналогично измерить длительность спада сигнала (сохранить картинку).
9. Для измерения длительности сигнала и паузы на экране должен быть полный период сигнала. Провести измерения этих величин по масштабной сетке и через «Waveform Parameters». Результаты записать в таблицу 2, сохранить картинки.

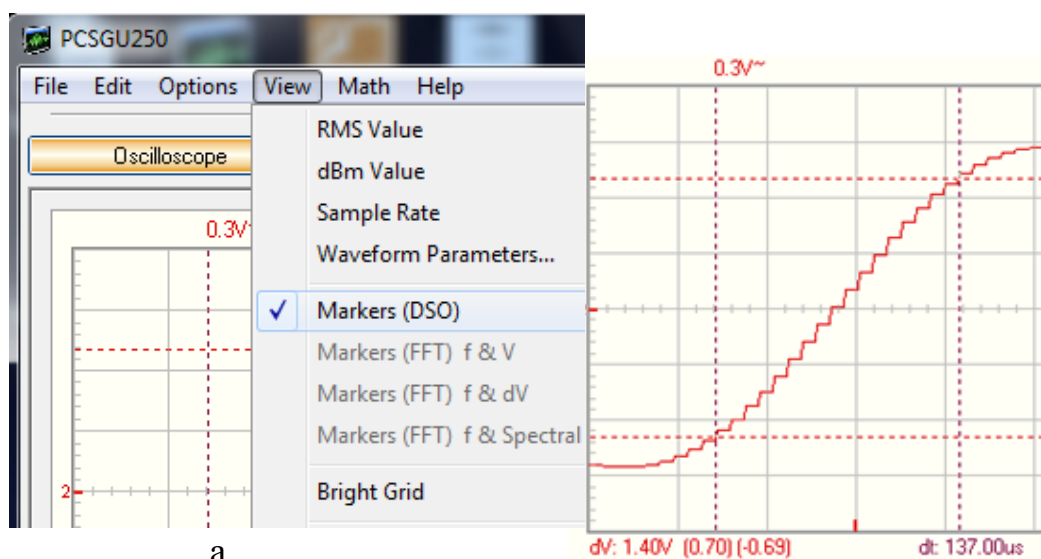


Рис. 13. Работа с маркерами осциллографической приставки PCSGU250.

Таблица 2.

Дополнительные временные характеристики прямоугольного (трапецевидного) сигнала.

По масштабной сетке измерено и рассчитано						Измерено с помощью маркеров	
L, мс/дел	m, дел	τ_1 мс	L, мс/дел	m, дел	τ_2 мс	τ_3 мкс	τ_4 мкс
измерено через «Waveform Parameters»							
τ_{PW} , мс (Positive Width)		τ_{NW} , мс (Negative Width)		τ_3 , мкс (Rise Time)		τ_4 , мкс (Fall Time)	

τ_1 – длительность плато, τ_2 – длительность паузы,

τ_3 – длительность фронта, τ_4 – длительность спада (см.рис.2).

10. **Оценить длительность развертки.** Для того, чтобы «собрать картинку» для экрана, цифровой осциллограф должен провести некоторое количество (N) измерений (оцифровку) напряжений U_n с некоторым шагом dt , сохранить это N количество результатов в буфере, и выдать график $U_n(dt)$ на экран (см. стр.2-4). В итоге мы увидим ограниченный участок непрерывного сигнала.

Измерения

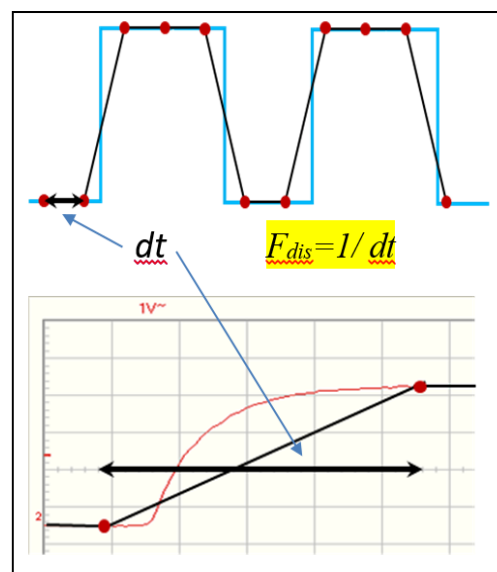
Поставить масштаб времени такой же, как был в пунктах 5-6 (см. свои сохраненные картинки), записать в таблицу 3 (вариант 1) масштаб по оси времени (строка $i = 0$). Выключить осциллограф – щелкнуть по кнопке «RUN» - кнопка станет невыделенной.

Далее будем работать с картинкой, оставшейся на экране.

Указатель прокрутки экрана «History» (под экраном) поставить на «0». Используя кнопки «Time/Div» (рис.9, 10), «сжать картинку», чтобы все измеренные значения поместились на экране, но занимали возможно большую часть экрана (проверить, что указатель прокрутки экрана остался на «0»). Записать в таблицу 3 масштаб по оси времени ($i = 1$). Вертикальные линии маркеров выставить на «0» и на конец картинки трапецевидного сигнала. Записать в таблицу 3 (вариант 1) интервал времени между вертикальными маркерами dt – длительность измерения dt_1 . **Сохранить картинку** с экрана осциллографа в файл с Вашей работой.

11. **Оценить частоту дискретизации сигнала.**

«Растянуть картинку», аналогично пункту 7, но вместо фронта (или спада) сигнала с плавными границами, мы получим ломаную линию (см. рис.), соединяющую точки дискретизации (в которых приводится оцифровка сигнала). Время между точками ломанной при подъеме или



спаде сигнала дает оценку времени дискретизации – выставить в эти точки вертикальные маркеры, проверить, что расстояние между маркерами больше масштабного отрезка оси времени (иначе надо еще больше растянуть картинку). Записать в таблицу 3 (вариант 1) масштаб по оси времени ($i = 2$), записать в таблицу 3 dt_2 . Сохранить картинку.

Таблица 3.

Оценка частоты дискретизации и количества точек измерения.

i		Вариант 1		Вариант 2	
		Масштаб оси времени	dt_i	Масштаб оси времени	dt_i
0	Начальная картинка		--		--
1	Длительность развертки dt_1				
2	Время дискретизации dt_2				
Обработка результатов		N	F_{dis}	N	F_{dis}

11. Выставить начальный масштаб по оси времени. Включить осциллограф, поменять масштаб по оси времени, чтоб на экране было 5-7 периодов колебаний (или по указанию преподавателя). Провести измерения, аналогичные пунктам 10-11, записать в таблицу (вариант 2), сохранить картинки с экрана осциллографа в файл с Вашей работой.

Выключить генератор (кнопка выбора формы сигнала). Выключить осциллограф (кнопка Run). Разобрать схему.

Обработка результатов таблицы 3

Рассчитать частоту дискретизации $F_{dis} = 1/dt_2$ для 1 и 2 вариантов, записать в таблицу 3.

Рассчитать количество точек в одной картинке на экране $N = dt_1/dt_2$ для 1 и 2 вариантов, записать в таблицу. Сделать выводы.

Упражнение 2. Изучение сложений гармонических колебаний. Биения.

Цель упражнения: Познакомиться со сложением гармонических колебаний - биениями, возможностью их визуализации на осциллографической приставке. Измерить частоту неизвестного генератора несколькими способами, в том числе используя биения.

Биение – явление, возникающее при наложении двух (или более) периодических колебаний (мы будем рассматривать гармонические) с близкими частотами, при этом наблюдается периодическое уменьшение и увеличение амплитуды суммарного сигнала.

Для упрощения математического вывода формул, рассмотрим сложение двух гармонических напряжений с близкими частотами, одинаковыми амплитудами и нулевыми начальными фазами $U1=U_0 \cos(\omega_1 t)$ и $U2=U_0 \cos(\omega_2 t)$. Тогда

$$U1 + U2 = U_0 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) = 2U_0 \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) = A(t) \cos \omega_0 t,$$

Где $A(t) = 2U_0 \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$ – медленно меняющаяся амплитуда – огибающая высокочастотных колебаний. Поскольку за один период огибающей амплитуда биений дважды меняется от нуля до максимума, частота биений равна удвоенной частоте огибающей: $\omega_6 = 2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = \omega_1 - \omega_2$; $F_6 = f_1 - f_2 = 1 / T_6$ – частота биений;

$\omega_0 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ – частота колебаний (заполнения), равна среднему арифметическому частот складываемых колебаний.

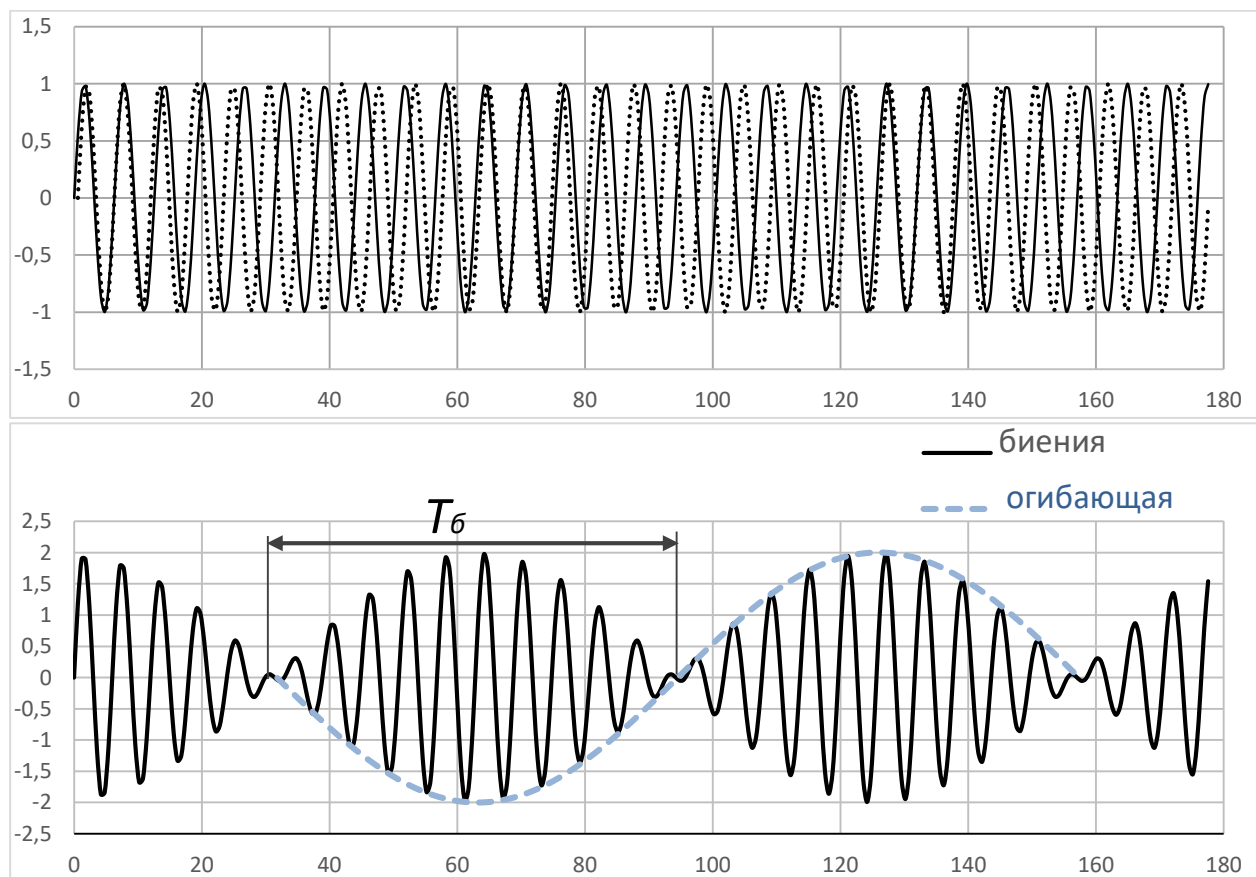


Рис. 14. Сложение гармонических колебаний – биения.

Эффект биений используют:

- для настройки источника колебаний под частоту эталонного источника. Например, при настройке музыкальных инструментов – настройщик улавливает колебания громкости суммарного звука (от настраиваемого инструмента и камертона) непосредственно ухом.
- для измерения высоких частот, в несколько раз превышающих максимальные частоты измерительного прибора.

Измерения

1. Соединить провода с **I канала** осциллографа с неизвестным генератором используя плату с гнездами для установки элементов схем (соблюдать полярность подключения: «земля» генератора должна быть соединена с «землей» осциллографа).

Включить осциллограф. Включить генератор. На экране осциллографа должно появиться изображение сигнала. Используя режим «Autoset» 1 канала (рис.11) настроить это изображение. Измерить частоту, размах напряжения и RMS сигнала неизвестного генератора в автоматическом режиме «Waveform Parameters» (результаты должны быть представлены на экране), записать в таблицу 4. Сохранить картинку в файл своей работы.

*Не путайте размах напряжения, который называют «**Amplitude**» на осциллографической приставке PCSGU250, и обозначен «A», с амплитудным напряжением гармонического сигнала $U_a = A/2$.*

Таблица 4.

Определение параметров неизвестного генератора в автоматическом режиме
«Waveform Parameters»

$f_x \pm \sigma_{f_x}, \text{Гц}$	$A \pm \sigma_A, \text{В}$	$U_a \pm \sigma_{U_a}, \text{В}$	Измерение $RMS \pm \sigma_{RMS}, \text{В}$	Расчёт $RMS \pm \sigma_{RMS}, \text{В}$

2 канал осциллографа соединить с генератором приставки, используя другие гнезда на плате, включить гармоническое напряжение с таким же размахом, как на неизвестном генераторе, частоту поставить на 5-7% больше (меньше), чем на неизвестном генераторе. Генератор приставки будет в работе эталонным генератором. Обратите внимание, что «синусоида» 2 канала движется. Почему? Сохранить картинку в файл своей работы. Записать в таблицу 5 f_{Σ} .

Выбрать из меню приставки «Math», из открывшегося меню «U1 + U2». Понаблюдать за биениями. Подобрать масштаб по времени, чтобы на экране помещалось 2 (или 3) периода биений.

Чтобы было удобнее проводить измерения характеристик биений надо убрать с экрана графики колебаний. Для этого – щелкнуть кнопку «On» в системе управления вертикального отклонения (рис.10) и для первого, и для второго каналов.

В автоматическом режиме провести измерения характеристик биений приставка не может, поэтому «остановим» картинку щелчком по кнопке «Run» - кнопка станет не активной, и воспользуемся маркерами.

Измерить период биений T_b , измерить период колебаний (заполнения) T_k (можно измерить время 10 колебаний и вычислить период, или измерить период, растянув картинку). Записать в таблицу 5. Сохранить картинку с маркерами (измерение периода биений).

Определение периода биений и заполняющих их колебаний

№	$f_{\Sigma} \pm \sigma_{f_{\Sigma}}, \Gamma\text{ц}$	$T_{\delta} \pm \sigma_{T_{\delta}}, \text{мс}$	$F_{\delta} \pm \sigma_{F_{\delta}}, \Gamma\text{ц}$	$T_{\kappa} \pm \sigma_{T_{\kappa}}, \text{мс}$	$F_{\kappa} \pm \sigma_{F_{\kappa}}, \Gamma\text{ц}$	расчет
$A_{\Sigma} = A_x$						$f_x \pm \sigma_{f_x}, \Gamma\text{ц}$
1						
2						
3						
$A_{\Sigma} < A_x$		$A_{\Sigma}^4 = \dots\dots B$		$A_{\Sigma}^5 = \dots\dots B$		
4						

- Включить осциллограф (кнопка «Run»). Изменить (уменьшить или увеличить) частоту колебаний эталонного генератора на 3-10%, наблюдать изменение картинки биений – провести 4-6 таких наблюдений на увеличение и уменьшение частоты и описать, как меняются период биений и частота заполнения, при увеличении и уменьшении частоты эталонного генератора. Выбрать еще 2 картинки для измерений, для которых провести измерения периода биений и периода колебаний, аналогично пункту 2, записать результаты измерений в таблицу. Перед измерениями проверьте, что на экране видны 1-3 периода биений. Сохранить картинки.
- Включить осциллограф. Отключить картинку сложения колебаний («Math», «U1 + U2»). Для четвертого измерения увеличить напряжение гармонического сигнала на эталонном генераторе в 2-3 раза, частоту колебаний не изменять. Сохранить картинку гармонических колебаний (на 1 и 2 каналах). Включить сложение колебаний, отключить графики синусоид с 1 и 2 каналов. Проверить, что на экране видны 2-3 периода биений, биения четко видны. Провести измерения, аналогичные п.2, записать в таблицу (4-е измерение). Сохранить картинку. Влияет ли изменение амплитуды колебаний эталонного генератора на частоту биений? А на что влияет?

Обработка результатов**Обработка результатов таблицы 4.**

- Оценить погрешности измеренных величин: считать предельную приборную погрешность равной 5% от измеряемой величины + 3 единицы последнего разряда результата (если измеряемая величина не менее 1 основного деления масштабной сетки). Записать в таблицу 4.
- Рассчитать амплитудное значение напряжения неизвестного генератора и эффективное значение его напряжения из найденного амплитудного значения (стр. 2). Оценить погрешности этих величин. Записать в таблицу 4. Сравнить измеренные и рассчитанные результаты.

Обработка результатов таблицы 5.

- Оценить погрешности измеренных величин f_{Σ} , T_{δ} , и T_{κ} . Рассчитать F_{δ} и F_{κ} , оценить их погрешности.
- Используя формулы со стр. 18 рассчитать f_x для всех строк таблицы, оценить погрешность расчетов. Сравнить результаты с измерением f_x из таблицы 8.

Упражнение 3. Изучение сложений гармонических колебаний. Фигуры Лиссажу.

Фигуры Лиссажу наблюдаются при колебаниях во взаимно перпендикулярных направлениях (см. стр. 4-6).

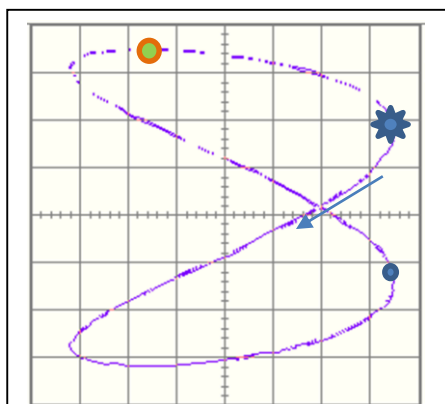


Рис. 15. Определение соотношения частот по вертикали и горизонтали.

Определить соотношение частот по фигуре Лиссажу можно, если посчитать количество колебаний по вертикали и горизонтали при обходе фигуры. Если выходим из точки $\star$, то при обходе фигуры проходим 2 максимума по горизонтали и один по вертикали. Значит, частота колебаний по горизонтали в два раза больше частоты колебаний по вертикали: $F_x = 2 F_y$.

Измерения

4. Соединить **I канал** осциллографа с неизвестным генератором используя плату с гнездами для установки элементов схем (соблюдать полярность подключения: «земля» генератора должна быть соединена с «землей» осциллографа). Включить осциллограф. Включить генератор. На экране осциллографа должно появиться изображение сигнала. Используя режим «Autoset» 1 канала (рис.11) настроить это изображение. **II канал** осциллографа соединить с генератором приставки, используя другие гнезда на плате, включить гармоническое напряжение с таким же размахом и частой, как на неизвестном генераторе (можно ввести измеренные в упр.2, п.1 значения; см. рис.8). Генератор приставки будет в работе эталонным генератором. Обратить внимание, что «синусоида» 2 канала движется. Почему? Сохранить картинку в файл своей работы.
5. Получить на экране фигуру Лиссажу. Для этого из меню «Math» выбрать режим «XY». Если частоты генераторов примерно равны, на экране должен получиться эллипс. Но картинка на экране осциллографа может «вращаться» или совсем не определяться. Изменяя частоту эталонного генератора добиться более или менее устойчивой картинки эллипса, записать частоту $f_{\text{э}}$ в таблицу 6.
6. Получить неподвижную картинку фигуры Лиссажу от двух независимых друг от друга генераторов практически невозможно (особенно на высоких частотах). А при выключении осциллографа картинка может быть не полной или не четкой. Но имея перед глазами образцы картинок, можно по вращающейся фигуре ее идентифицировать и зарисовать в тетрадь (в таблицу 6). Сохранить 3 картинки эллипса с экрана в разных фазах. Измерить по масштабной сетке L_x, l_x, L_y, l_y (рис. 6), записать в таблицу 6. Зарисовать наблюдаемый эллипс (с соблюдением масштаба) в разных фазах в таблицу 6, обозначить на рисунках измеряемые величины: L_x, l_x, L_y, l_y , записать в каких единицах измеряете (мм, деления масштабной сетки).
7. Постепенно увеличить частоту эталонного генератора до появления другой фигуры Лиссажу. Зарисовать 3 картинки фигуры с экрана в разных фазах. Записать частоту эталонного генератора. Сохранить одну из картинок.

8. Увеличивая и уменьшая частоту эталонного генератора, добиться более или менее устойчивых еще трех картинок фигур Лиссажу. Зарисовать по 3 картинке для каждой фигуры с экрана в разных фазах. Записать частоту эталонного генератора. Сохранить одну из картинок.
9. Сохранить файл своей работы на флешку (по сохраненным картинкам можно проводить обработка дома).

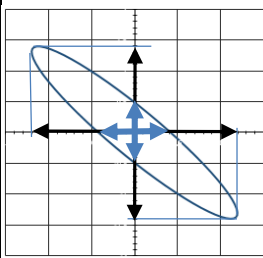
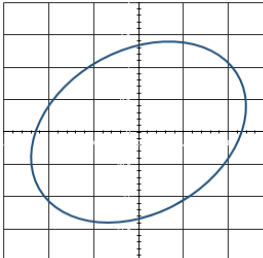
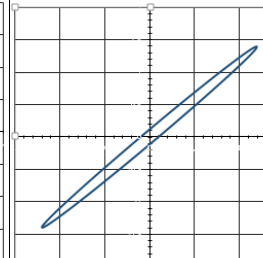
Выключить генератор, выключить осциллограф. Выключить приставку. Разобрать схемы, привести в порядок свое рабочее место.

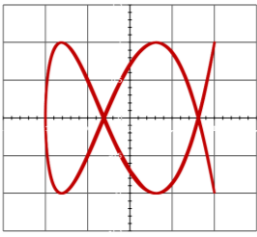
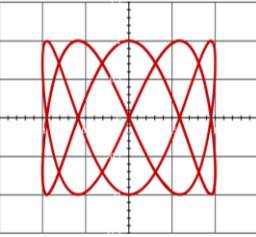
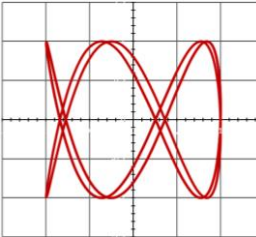
Обработка результатов

1. Обработка для 1-й строки таблицы 6. По сохранённым картинкам фигур Лиссажу при соотношении частот $f_x = f_{\Delta}$ (эллипсы) рассчитать сдвиг фаз сигналов (стр. 5-6, рис.6). Распечатать картинки с эллипсами (или построить на миллиметровке с сохранением масштаба), обозначить на рисунках измеряемые величины: L_x, l_x, L_y, l_y , записать в каких единицах измеряете (мм, деления масштабной сетки). Измерить L_x, l_x, L_y, l_y . Оценить погрешности, записать результаты с погрешностями в таблицу 6. Рассчитать $\sin \Delta\varphi, \Delta\varphi$. Записать в таблицу 6.
2. Обработка для 2-5 строк таблицы. Определить количество колебаний по горизонтальной и вертикальной осям, записать в таблицу. По этим результатам рассчитать коэффициент отношения частот f_x / f_{Δ} , и частоту неизвестного генератора f_x , записать в таблицу.
3. Оценить погрешность измеренных частот эталонного генератора и рассчитанных частот неизвестного генератора, записать в таблицу.

Таблица 6

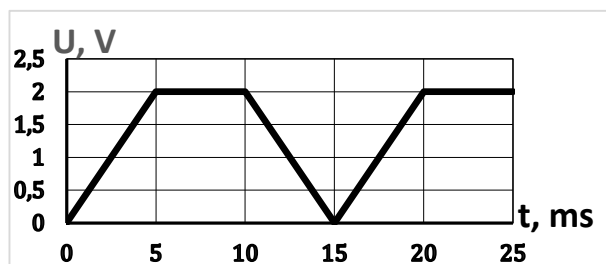
Определение частоты колебаний неизвестного генератора по фигурам Лиссажу (приведен пример таблицы с рисунками результатов; таблица для работы приведена на стр.25-26).

№	$f_{\Delta} \pm \sigma_{f_{\Delta}}, \text{Гц}$	Фигуры Лиссажу в разных фазах			$f_x \pm \sigma_{f_x}, \text{Гц}$
1					$f_x = f_{\Delta}$
	$L_y \pm \sigma_{L_y}, \text{дел}$	5,6			
	$l_y \pm \sigma_{l_y}, \text{дел}$	2,0			
	$L_x \pm \sigma_{L_x}, \text{дел}$	4,6			
	$l_x \pm \sigma_{l_x}, \text{дел}$	1,6			
	$\sin \Delta\varphi$				
	$\Delta\varphi, \text{градусы}$				

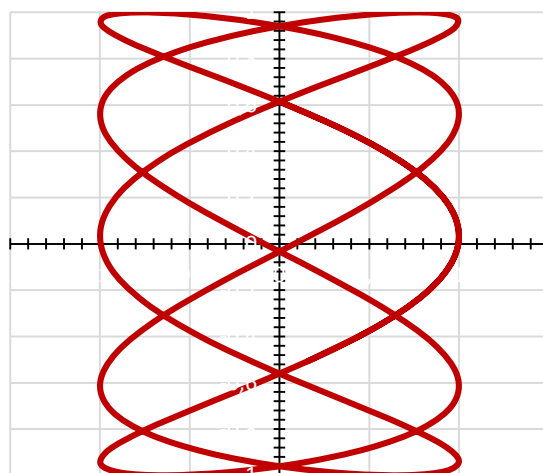
№	$f_{\pm} \pm \sigma_{f_{\pm}}, \text{Гц}$	Фигуры Лиссажу в разных фазах			$f_x \pm \sigma_{f_x}, \text{Гц}$
2					
	Колебаний по X	$f_x / f_{\pm}$			
	Колебаний по Y				
...					

Вопросы к допуску.

1. Что такое периодическое напряжение?
2. Перечислите основные характеристики переменного периодического напряжения (представьте картинки, формулы).
3. Рассчитайте среднее и эффективное значения переменного периодического напряжения, представленного на графике.



4. Определите отношение частот гармонических напряжений по оси X и оси Y: $F_x = \dots F_y$ (см. стр. 21)



Приложение. Пример оформления практической части задачи.

Можно распечатать для заполнения таблиц на занятии (листы не разрезать).

ФИО..... группа..... число.....

Лабораторная работа 4. Осциллографические измерения в цепях переменного тока.

Упражнение 1. Определение характеристик периодического напряжения с помощью осциллографа.

Таблица 1. Основные характеристики прямоугольного (трапециевидного) сигнала

Установлено на генераторе	А, В			F, Гц			
Измерено (и рассчитано) на осциллографе по масштабной сетке	К, В/дел	п, дел	А, В	Л, мс/дел	м, дел	Т, мс	F, Гц
Измерено на осциллографе через «Waveform Parameters»	А, В			Т, мс			F, Гц

Таблица 2. Дополнительные временные характеристики прямоугольного (трапециевидного) сигнала.

По масштабной сетке измерено и рассчитано						Измерено с помощью маркеров	
L, мс/дел	м, дел	τ_1 мс	L, мс/дел	м, дел	τ_2 мс	τ_3 мкс	τ_4 мкс
измерено через «Waveform Parameters»							
τ_{PW} , мс (Positive Width)		τ_{NW} , мс (Negative Width)				τ_3 , мкс (Rise Time)	τ_4 , мкс (Fall Time)

τ_1 – длительность плато, τ_2 – длительность паузы,

τ_3 – длительность фронта, τ_4 – длительность спада.

Таблица 3. Оценка частоты дискретизации и количества точек измерения.

i		Вариант 1		Вариант 2	
		Масштаб оси времени	dt_i	Масштаб оси времени	dt_i
0	Начальная картинка		--		--
1	Длительность развертки dt_1				
2	Время дискретизации dt_2				
Обработка результатов		N	F_{dis}	N	F_{dis}

ФИО..... группа..... число.....

Лабораторная работа 4.

Упражнение 2. Изучение сложений гармонических колебаний. Биения

Таблица 4. Определение параметров неизвестного генератора в автоматическом режиме «Waveform Parameters»

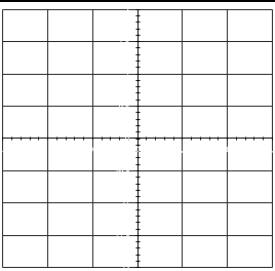
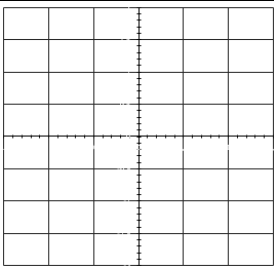
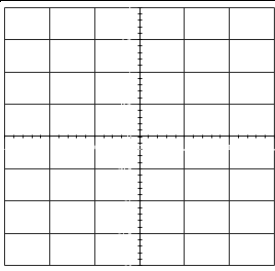
$f_x \pm \sigma_{f_x}, \text{ Гц}$	$A \pm \sigma_A, \text{ В}$	$U_a \pm \sigma_{U_a}, \text{ В}$	Измерение $RMS \pm \sigma_{RMS}, \text{ В}$	Расчёт $RMS \pm \sigma_{RMS}, \text{ В}$

Таблица 5. Определение периода биений и заполняющих их колебаний

№	$f_{\Delta} \pm \sigma_{f_{\Delta}}, \text{ Гц}$	$T_{\delta} \pm \sigma_{T_{\delta}}, \text{ мс}$	$F_{\delta} \pm \sigma_{F_{\delta}}, \text{ Гц}$	$T_{\kappa} \pm \sigma_{T_{\kappa}}, \text{ мс}$	$F_{\kappa} \pm \sigma_{F_{\kappa}}, \text{ Гц}$	расчет $f_x \pm \sigma_{f_x}, \text{ Гц}$
$A_{\Delta} = A_x$						
1						
2						
3						
$A_{\Delta} < A_x \quad A_{\Delta}^4 = \dots\dots \text{ В} \quad A_{\Delta}^5 = \dots\dots \text{ В}$						
4						
5						

Упражнение 3. Изучение сложений гармонических колебаний. Фигуры Лиссажу

Таблица 6. Определение частоты колебаний неизвестного генератора по фигурам Лиссажу

№	$f_{\Delta} \pm \sigma_{f_{\Delta}}, \text{ Гц}$	Фигуры Лиссажу в разных фазах			$f_x \pm \sigma_{f_x}, \text{ Гц}$
1					$f_x = f_{\Delta}$
	$L_y \pm \sigma_{L_y},$				
	$I_y \pm \sigma_{I_y},$				
	$L_x \pm \sigma_{L_x},$				
	$I_x \pm \sigma_{I_x},$				
	$\sin \Delta \varphi$				
	$\Delta \varphi, \text{ градусы}$				

ФИО..... группа..... число.....

Лабораторная работа 4.

Таблица 6 (продолжение)

№	$f_{\text{э}} \pm \sigma_{f_{\text{э}}}, \text{Гц}$	Фигуры Лиссажу в разных фазах			$f_x \pm \sigma_{f_x}, \text{Гц}$
2					
	Колебаний по X			$f_x / f_{\text{э}}$	
	Колебаний по Y				
3					
	Колебаний по X			$f_x / f_{\text{э}}$	
	Колебаний по Y				
4					
	Колебаний по X			$f_x / f_{\text{э}}$	
	Колебаний по Y				
5					
	Колебаний по X			$f_x / f_{\text{э}}$	
	Колебаний по Y				