



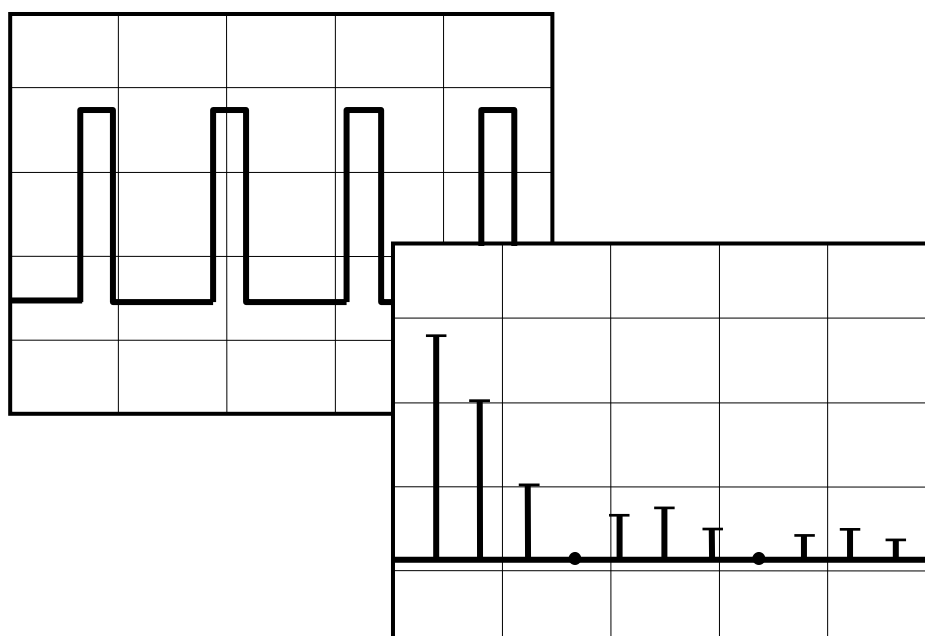
КАФЕДРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
И ОСНОВ РАДИОТЕХНИКИ

С.И. Богомолов, Н.А. Каратаева

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по курсу  
**РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ**

Теория сигналов  
(Часть 1)



**ТОМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра ТОР**

**С.И. Богомолов, Н.А. Каратаева**

**Лабораторный практикум часть I  
по курсу  
*РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ*  
Теория сигналов**

Томск - 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ .....	4
2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ, ВЫПОЛНЕНИЮ И ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	4
2.1. Правила подготовки к лабораторным работам.....	4
2.2. Правила выполнения лабораторных работ .....	5
3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА И ТРЕБОВАНИЯ К ЕГО ОФОРМЛЕНИЮ .....	6
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 .....	7
ПРАКТИКА АППАРАТУРНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТЯХ .....	7
4.1. Цель работы.....	7
4.2. Основные определения, обозначения и расчетные соотношения .....	7
4.3. Домашнее задание .....	9
4.4. Описание лабораторной установки .....	9
4.5. Лабораторное задание .....	9
4.6. Методические указания по выполнению лабораторных работ с модулем PCSGU250.....	10
4.7. Указания к отчету .....	13
4.8. Вопросы для самопроверки .....	14
5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....	15
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ.....	15
5.1. Цель работы.....	15
5.2. Основные обозначения, расчетные формулы и определения .....	15
5.3. Описание лабораторной установки .....	19
5.4. Домашнее задание .....	19
5.5. Лабораторное задание .....	19
5.6. Методические указания .....	20
5.7. Указания к отчету .....	20
5.8. Вопросы для самопроверки .....	21
6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 .....	22
АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ .....	22
6.1. Цель работы.....	22
6.2. Основные обозначения, расчетные формулы и определения .....	22
6.3. Домашнее задание .....	26
6.4. Описание лабораторной установки .....	26
6.5. Лабораторное задание и методические указания.....	27
7.6. Вопросы для самопроверки .....	28
7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	29
8 ПРИЛОЖЕНИЕ.....	30
8.1. Описание панели «Радиосигналы» .....	30
8.2. Система PC-LAB2000LT на базе блока PCSGU250.....	35

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

В дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы» (РТЦиС) рассматривается теория детерминированных и случайных радиосигналов, а также теория преобразования сигналов в линейных и нелинейных цепях. Кроме теории в программу курса включены расчётно-графические домашние задания, практические занятия и лабораторные работы.

Лабораторный практикум состоит из двух частей и включает девять четырёхчасовых лабораторных работ.

Первая часть лабораторного практикума, содержащая три лабораторные работы, посвящена исследованию спектров управляющих сигналов, радиосигналов, изучению особенностей спектров амплитудно-импульсно-модулированных сигналов.

Вторая часть лабораторного практикума, содержащая шесть лабораторных работ, посвящена исследованию основных принципов работы типовых нелинейных цепей, которые осуществляют преобразование сигналов в радиотехническом канале связи.

Подготовка к лабораторным работам по первой части практикума осуществляется в процессе выполнения индивидуального расчётно-графического домашнего задания, которое полностью определяет и организует практически всю самостоятельную работу по дисциплине РТЦиС в третьем семестре, как в плане изучения теоретического материала, так и в части подготовки к практическим и лабораторным занятиям.

## **2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ, ВЫПОЛНЕНИЮ И ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **2.1. Правила подготовки к лабораторным работам**

Первая часть лабораторного практикума выполняется во второй половине третьего семестра. В первой половине семестра начинается самостоятельная работа по изучению основных разделов курса РТЦиС, которая включает:

- 1) изучение теоретического материала;
- 2) разбор решений типовых задач;
- 3) выполнение индивидуального расчётно-графического домашнего задания.

При выполнении индивидуального задания производятся все расчёты, которые необходимы для выполнения второй, третьей и четвёртой лабораторных работ. В итоге выполнения трёх пунктов расчётно-графического домашнего задания у студентов должны быть:

- 1) изучены соответствующие разделы теории курса;
- 2) закончены и оформлены в тетради необходимые предварительные расчёты, изложенные в домашнем задании.

Первая лабораторная работа носит ознакомительный характер и требует

отдельной двухчасовой подготовки. Перед выполнением каждой лабораторной работы студенты обязаны:

- 1) ознакомиться с описанием работы и используемыми при её выполнении измерительными приборами;
- 2) ознакомиться с лабораторной установкой, знать расположение и назначение её отдельных узлов и органов управления.

## **2.2. Правила выполнения лабораторных работ**

Студенты, приступающие к выполнению лабораторных работ, обязаны пройти краткий инструктаж по безопасным приёмам работы в лаборатории, ознакомиться с правилами эксплуатации лабораторного оборудования.

Инструктаж проводит преподаватель, ведущий занятия. После инструктажа каждый студент расписывается в регистрационном журнале, выражая тем самым своё согласие с тем, что он ознакомлен с правилами безопасной работы в лаборатории и обязуется их выполнять.

Регистрационный журнал хранится у заведующего лабораторией.

Студенты, не прошедшие инструктаж, к лабораторным работам не допускаются.

Студенты, нарушающие правила техники безопасности, отстраняются от выполнения работ и могут быть допущены к ним только после письменного разрешения декана или его заместителя.

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом бригадами из двух-трёх человек. Каждый студент должен иметь рабочую тетрадь, куда заносятся результаты лабораторных исследований.

Содержание и объём этих записей должны соответствовать лабораторному заданию.

К выполнению лабораторных работ допускаются только студенты, выполнившие требования п. 2.1 и показавшие свою подготовленность при собеседовании с преподавателем или с помощью тестового машинного контроля.

Выполнив лабораторное задание, студент представляет преподавателю для проверки и утверждения рабочую тетрадь с результатами работы. Работа считается выполненной после утверждения преподавателем итогов работы. При наличии недостоверных или недостаточных данных необходима их проверка и экспериментальная доработка.

Результаты домашней подготовки и лабораторных исследований оформляются отчётом. Отчёт по каждой лабораторной работе должен быть защищён.

### **3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА И ТРЕБОВАНИЯ К ЕГО ОФОРМЛЕНИЮ**

Отчёт по лабораторной работе составляется и защищается индивидуально каждым студентом.

Отчёт пишется в ученической тетради. Титульный лист оформляется в соответствии с формой, приведённой в приложении 1.

Отчёт должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) результаты выполнения домашнего задания;
- 3) схему лабораторной установки;
- 4) результаты лабораторных исследований, представленные в порядке следования пунктов лабораторного задания (рекомендации по форме представления результатов исследования делаются, как правило, в методических указаниях к лабораторному заданию);
- 5) при совмещении графических зависимостей с целью, например, проверки расчётных соотношений и экспериментальных данных необходимо выполнять нормировку данных с целью облегчения сравнения, а также использовать различные цвета для представления различных данных;
- 6) по каждому пункту лабораторного задания необходимо дать краткое резюме: о соответствии теории и эксперимента, о причинах отклонения полученного результата от желаемого и т.п.;
- 7) графики, схемы, осциллограммы и прочий графический материал в отчёте представляются на вклейках из миллиметровой бумаги и выполняются в соответствии с требованиями ЕСКД;
- 8) работа заканчивается краткими выводами, в которых формулируется основной итог проделанной работы;
- 9) отчёт подписывается студентом.

Формой отчётности по итогам выполнения лабораторного практикума и расчётно-графического индивидуального домашнего задания является зачёт. Зачёт проставляется студенту, выполнившему все предусмотренные календарным планом расчётные и лабораторные работы, представившему и защитившему все отчёты по этим работам.

## **4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

### **ПРАКТИКА АППАРАТУРНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТЯХ**

#### **4.1. Цель работы**

Изучить оборудование лабораторного стенда и приобрести практические навыки по аппаратурному анализу сигналов во временной и частотной областях.

#### **4.2. Основные определения, обозначения и расчетные соотношения**

Основная задача радиоэлектроники как области деятельности человека состоит в создании аппаратуры для обработки и передачи информации на расстояние с помощью электромагнитных колебаний.

Все возможные носители информации называются *сигналами* в широком смысле слова. В узком смысле сигналами чаще всего называют колебания электрического тока (напряжения), электромагнитные волны или колебания механической среды, распространяющиеся на расстояние и несущие информацию.

В процессе передачи и приема сообщений сигналы подвергаются различного рода преобразованиям. Некоторые из преобразователей, называемых радиотехническими цепями, являются типовыми:

- 1) преобразователь информации в электрический сигнал;
- 2) кодирующие устройства;
- 3) передатчик, состоящий из модулятора и генератора;
- 4) канал передачи информации (воздушный, кабельный и т.д.);
- 5) приемник, состоящий из избирательного усилителя, детектора, декодирующего и регистрирующего устройств.

Ясно, что процесс передачи информации должен проходить без искажений. Однако в общем случае, при любых сигналах и радиотехнических цепях, это требование не выполнимо. Оценить же искажения сигнала при передаче можно только после решения задачи анализа прохождения сигнала по каналу связи.

На основании сказанного можно задачи лабораторного практикума по дисциплине РТЦиС конкретизировать следующим образом:

- 1) изучение современной аппаратуры и приобретение практических навыков аппаратурного анализа сигналов;
- 2) изучение радиотехнических цепей и приобретение практических навыков измерения основных характеристик цепей;
- 3) изучение и практическое освоение экспериментальных методов анализа прохождения сигналов через радиотехнические цепи.

Несмотря на чрезвычайное многообразие сигналов, представление о каждом из них складывается из знания его свойств в двух областях: временной

и спектральной.

Под временным описанием понимают задание сигнала с помощью функции времени  $s(t)$ , определяющей его мгновенные значения. Под временной характеристикой сигнала  $s(t)$  понимают любую функцию, характеризующую развитие сигнала во времени, например, мгновенную мощность, взаимную энергию, корреляционную функцию и т.д. Основными параметрами могут быть длительность сигнала, период, длительность фронтов, амплитуда и т.д. Наиболее универсальным и удобным инструментом для наблюдения сигнала и определения временных параметров является осциллограф, на экране которого мы можем видеть картину развития сигнала во времени.

Под спектральным описанием детерминированного сигнала понимают задание его с помощью функции частоты  $\dot{S}(\omega)$ , называемой комплексной спектральной плотностью и определяющей все спектральные свойства сигнала. Между временным и спектральным представлениями сигнала существует взаимнооднозначное соответствие, устанавливаемое парой преобразований Фурье

$$\dot{S}(\omega) = \Phi^+[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (4.1)$$

$$s(t) = \Phi^-[\dot{S}(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (4.2)$$

Если сигналы во временной области описываются периодическими функциями

$$s(t) = s(t + k \cdot T). \quad (4.3)$$

где  $T$  - период;

$k$ - число натурального ряда, то в спектральной области эти сигналы описываются рядами Фурье:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n \dot{\phi}_n(t), \quad (4.4)$$

$$\text{где } \dot{C}_n = \frac{\int_{t_i}^{t_i+T} s(t) \dot{\phi}_n^*(t) dt}{\int_{t_i}^{t_i+T} 2 \dot{\phi}_n(t) dt}. \quad (4.5)$$

$\{\dot{\phi}_n(t)\}$  - ортогональный базис (полная ортогональная система базисных функций).

В тех случаях, когда сигналы представляют собой, электромагнитные колебания, а радиотехнические цепи реализованы с преимущественным применением как линейных, так и нелинейных резисторов  $R$ , конденсаторов  $C$ ,



катушек индуктивности  $L$ , в качестве ортогонального базиса целесообразнее всего применять систему тригонометрических функций  $\{\sin(n\omega_1 t), \cos(n\omega_1 t)\}$ . Ряд Фурье при этом представляет собой совокупность гармонических колебаний с различными амплитудами  $A_n$ , начальными фазами  $\varphi_n$  и частотами  $n\omega_1$ , т.е.

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n). \quad (4.6)$$

Для аппаратурного анализа периодических сигналов в спектральной области применяется анализатор спектра, на экране которого можно наблюдать совокупность амплитуд гармонических колебаний, сдвинутых друг относительно друга пропорционально частоте  $n\omega_1$ .

### 4.3. Домашнее задание

При самостоятельной подготовке к лабораторной работе необходимо:

- 1) изучить физические характеристики сигналов, их классификацию, основные виды математического описания (временное и спектральное);
- 2) ознакомиться с описанием сменной панели "Радиосигналы" лабораторного стенда, четко представлять ее структурную схему и функциональные возможности;
- 3) изучить по описанию технические характеристики и особенности многофункциональной системы Pc-Lab2000LT и работу с ней при анализе временных и спектральных характеристик периодических сигналов.

### 4.4. Описание лабораторной установки

Работа выполняется на лабораторном стенде по курсу РТЦиС с использованием сменной панели "Радиосигналы". Для измерения основных временных и спектральных параметров сигналов используется многофункциональная система Pc-Lab2000LT на базе блока PCSGU250, позволяющая сконцентрировать возможности полной лаборатории в одном приборе. Аппаратные и программные средства Pc-Lab2000LT обеспечивают функционирование двухканального осциллографа, анализатора спектра, регистратора, функционального генератора и измерителя частотных характеристик. Встроенный редактор волны сигнала и автоматизированный генератор последовательностей позволяют синтезировать сигналы произвольной формы, используя файл или внешний сигнал.

### 4.5. Лабораторное задание

При практической работе в лаборатории необходимо:

- 1) ознакомиться с оборудованием лабораторного стенда;
- 2) изучить функциональные возможности сменной панели "Радиосигналы";

3). запустить программу PcLab2000. Проверить работу программы с модулем PCSGU250;

4) проверить совместную работу модулей PCSGU250. На выходе генератора сформировать гармонический сигнал частоты 1 кГц и с амплитудой 1 В и проверить эти параметры с помощью осциллографа, в том числе, и с использованием маркеров;

5) на выходе генератора сформировать прямоугольную последовательность импульсов с частотой 2 кГц, скважностью 2 и с амплитудой 2 В и проверить эти параметры с помощью осциллографа. Измерить время нарастания фронта (спада) импульса между уровнями 0,1 и 0,9 амплитуды импульса;

6) исследовать спектральные характеристики сигналов, заданных по п.п. 4 и 5.

7) исследовать форму и измерить основные параметры сигналов с разных выходов "Генератора видеосигналов" с помощью модуля осциллографа;

8) исследовать с помощью модуля анализатора спектра спектральный состав периодического сигнала сложной формы, заданного преподавателем.

#### **4.6. Методические указания по выполнению лабораторных работ с модулем PCSGU250**

##### **4.6.1. Работа с осциллографом**

Запустить программу PcLab2000 (ярлык PcLab2000 на рабочем столе). Проверить работу программы с модулем PCSGU250:

**{Options} → {Hardware setup} → {PCSGU250} → {OK}.**

(В фигурных скобках здесь и далее перечислены последовательности выбираемых установок на панели прибора)

Выполнить калибровку осциллографа (входы каналов CH1 и CH2 не подключены к источникам сигналов либо заземлены):

**{Options} → {Calibrate} → {OK}.**

Процесс калибровки завершается выводом надписи: **'100% Complete'**. Осциллограф готов к работе.

После выбора соответствующими кнопками масштабов по каналам вертикальных и горизонтального отклонений и физического подключения каналов к исследуемым узлам цепи запустить развертку **{Run}**. На начальном этапе измерений синхронизацию развертки удобнее отключать **{Off}**.

Для уменьшения относительных погрешностей измерений следует масштабы устанавливать таким образом, чтобы разность измеряемых координат составляла не менее двух третей длины соответствующей оси экрана.

После включения синхронизации развертки **{On}** устанавливается уровень синхронизации (позиция ползунка **{Trigger Level}** сопровождается перемещением соответствующей отметки на левом краю экрана). Для сигналов несложной формы уровень синхронизации выбирают в диапазоне наибольшей крутизны сигнала.

Для более точного преобразования геометрических координат графиче-

ских образов в параметры сигнала используют маркеры: **{View}** → **{Markers (DSO)}**. Позиция каждого маркера сопровождается указанием его координаты (а также разности между маркерами). По вертикальной оси возможна размерность сигнала как в вольтах [V], так и децибелах (0 dBm соответствует эффективному напряжению 0,775 В, т. е. мощности 1 милливатт на нагрузке 600 Ом).

При работе с АМ сигналами при значениях несущей частоты в десятки и более раз превышающих частоту модулирующих колебаний использовать режим накопления. Кнопка **{Persist}** включает/отключает режим накопления.

#### 4.6.2. Работа с генератором

Выход генератора подключается/отключается нажатием на одну из кнопок, определяющих форму сигнала. Частота повторения формируемого колебания задается дискретно кнопками **{0,05 Hz...500 k}** и плавно с помощью ползунка **{Frequency}**. Амплитуда переменной составляющей сигнала и постоянное смещение рабочей точки задаются ползунками, соответственно, **{Amplitude}** и **{Offset}**. Задавать эти параметры при необходимости можно также непосредственной записью требуемых значений в соответствующие окна ввода и отображения информации.

Обратите внимание, что под амплитудой понимается полный размах колебаний (от пика до пика).

Для последовательности прямоугольных импульсов предусмотрено также регулирование их скважности **{Duty cycle}**.

При выборе опции **{More Function}** открывается окно библиотеки сигналов сложной формы. Библиотека содержит описание предварительно сформированных сигналов: последовательности колебаний вида  $\sin x/x$ , сигналы с линейной частотной модуляцией **{Sweep}**, а также предусмотрена возможность работы с сигналами, форма которых задана пользователем **{Library Waveforms}**.

#### 4.6.3. Спектральный анализ сигналов

Переход из режима **{Oscilloscope}** в режим спектрального анализа осуществляется по клавише **{Spectrum analyzer}**, при этом по умолчанию выполняется спектральный анализ первого канала. Анализ второго канала может быть выполнен при отключении первого (для **{Ch1}** клавиша **{On}** не подсвечена).

Частотный диапазон анализа определяется выбором соответствующей клавиши в поле **{FREQ. RANGE}**. Для исключения погрешностей измерений необходимо следить за тем, чтобы частота дискретизации не оказалась ниже удвоенной ширины спектра сигнала.

Клавишами **{Freq. Scale}** определяется линейный **{LIN}** либо логарифмический **{LOG}** масштаб по оси частот.

Дополнительное масштабирование графиков может быть осуществлено с помощью кнопок поля **{Zoom}**.

Наиболее приемлемые спектральные характеристики для исследуемых в лабораторных работах сигналов получаются при следующих исходных установках:

**{Options} → {FFT Window} → {Hanning} и {Options} → {FFT Options} → {RMS Average}.**

Для получения более точных числовых показаний следует включить маркеры **{View} → {Markers (FFT) f & V}.**

Для получения спектральных характеристик сигналов с линейным масштабом по вертикальной оси следует выполнить дополнительные преобразования.

#### **4.6.4 Линейное масштабирование спектральных характеристик.**

Для получения линейного масштаба по оси амплитуд следует сохранить данные спектрального анализа в ранее созданном личном каталоге в папке **Lab1: {File} → {Save FFT Data}** в текстовом файле (расширение .txt) с оригинальным именем {Имя файла}.

Открыть программу электронных таблиц: **{Офис} → {LibreOffice} → {LibreOfficeCalc}** и ввести в нее полученные данные спектрального анализа: **{Вставка} → {Лист из файла} → {Окно "Вставить": [Выбрать файл из списка или ввести имя в поле «Имя файла»] → [Открыть]} → {Окно «Импорт текста»: → [Ok]} → {Окно «Вставить лист»: → [Ok]}.**

В результате сформируется таблица из трех столбцов: номер строки  $N$ , частота  $f[\text{kHz}]$  и амплитуда  $V[\text{dBV}]$  соответствующей спектральной составляющей.

В полученной таблице заменить все десятичные точки запятыми: **{Правка} → {Найти и заменить} → {Найти [.]} → {Заменить на [,]} → {Заменить все} → {Закреть}.**

Скопировать данные столбца  $V$  в столбец  $D$ :

В ячейку  $E1$  ввести запись:  $V[V]$ .

В ячейку  $E2$  ввести запись:  $=10^{(C2/20)}$ .

Скопировать данные ячейки  $E2$  на весь столбец  $E$  (выделив ячейку  $E2$  растянуть ее «хвостик» на все значащие ячейки столбца  $E$ ).

Сформировать график  $V[f]$ . Для этого выделить столбцы  $D$  и  $E$  и в меню **{Вставка}** выбрать **{Диаграмма}**.

На вкладке «**Мастер диаграмм**» на первом шаге «**Тип диаграммы**» выбрать **{Диаграмма XY} → {Только линии} → {Далее}**.

На шаге 2 проконтролировать диапазон данных: **{SD\$1:\$E\$326} → {Далее}**.

На шаге 3 проконтролировать ряды данных: (Значения  $X$  **{SD\$2:\$D\$326}**), (Значения  $Y$  **{E\$2:\$E\$326}**) → **{Далее}**.

На шаге 4 обозначить оси **[Ось X]: {f[kHz]}**; **[Ось Y]: {V[V]}** → **{Готово}**.

Сформированный график отражает спектр сигнала в линейном масштабе.

#### 4.6.5. Генератор сигналов низкой частоты (НЧ)

Для формирования гармонических модулирующих колебаний используется дополнительный генератор сигналов низкой частоты. Управление параметрами формируемого сигнала выполняет программа **Fr**. При запуске программы FR появляется окно с органами регулирования генератора.

Сигнал на исследуемый стенд с выхода компьютера подается при помощи специального кабеля.

#### 4.6.6. Работа с генератором сигналов низкой частоты (НЧ)

Запустить генератор НЧ (ярлык **Fr** на рабочем столе). Установить вид необходимого сигнала и его параметры с помощью кнопок на лицевой панели прибора. Амплитуда сигнала на лицевой панели генератора устанавливается в относительных единицах и для определения конкретных значений требует дополнительных измерительных операций.

#### 4.6.7. Искажения сигналов (сигналы с отсечкой)

Провести с помощью анализатора СКЧ-56 анализ спектра периодического сигнала с переменным углом отсечки (см. рис. 4.1) с выхода II "Генератора видеосигналов". Половина длительности косинусоидального импульса, выраженная в радианах или градусах, называется углом отсечки. Численное значение угла отсечки  $\theta$  (в градусах) можно определить по формуле

$$\theta = \frac{360}{T} \cdot \frac{\tau}{2}. \quad (4.7)$$

где  $T$  - период сигнала;  
 $\tau$  - длительность импульса.

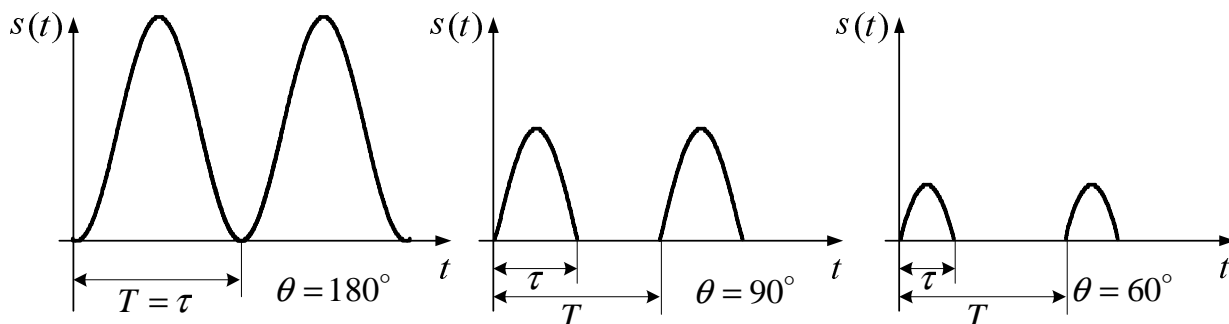


Рисунок 4.1 – Примеры сигналов с выхода II "Генератора видеосигналов" Углу отсечки задать значения 0; 30; 60; 90; 120; 180<sup>0</sup>.

#### 4.7. Указания к отчету

Оформление согласно общим правилам и требованиям.

Построить осциллограммы проанализированных сигналов согласно п. 4.6.1 с указанием числовых значений основных параметров.

Построить спектрограммы периодических сигналов с заданными углами отсечки.

Проанализировать полученные результаты и сделать вывод о влиянии угла отсечки на спектр гармонического колебания.

Попытайтесь указать, при решении, каких практических радиотехнических задач наблюдаемые изменения спектра сигнала (при изменении угла отсечки) могут оказаться как вредными, так и полезными.

#### **4.8. Вопросы для самопроверки**

Поясните:

- 1) какие временные параметры сигнала можно измерить с помощью осциллографа;
- 2) в чем заключается принцип работы простейшего анализатора спектра последовательного типа;
- 3) какие достоинства и недостатки имеет последовательный принцип анализа спектра;
- 4) в чем заключается задача экспериментального анализа спектра сигнала;
- 5) почему последовательный анализатор непригоден для анализа одиночных сигналов;
- 6) что такое динамические искажения спектра сигнала;
- 7) в чем причина динамических искажений спектра при анализе сигнала;
- 8) чем определяется разрешающая способность по частоте анализатора спектра;
- 9) что такое полоса обзора анализатора;
- 10) что такое время обзора при анализе спектра;
- 11) из каких соображений выбирается время обзора при анализе спектров сигналов последовательным анализатором;
- 12) что такое спектр сигнала;
- 13) зачем нам нужно знать спектр сигнала.

Изобразите:

- 1) упрощенную структурную схему анализатора спектра;
- 2) спектр амплитуд синусоиды при различных углах отсечки.

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ

#### 5.1. Цель работы

Изучить свойства спектров периодических сигналов. Исследовать спектральный состав периодической последовательности униполярных и знакопеременных импульсов прямоугольной формы в зависимости от частоты следования, длительности импульса и количества импульсов в пачке.

#### 5.2. Основные обозначения, расчетные формулы и определения

Периодический сигнал  $s(t)$  с периодом  $T$  может быть представлен рядом Фурье по системе ортогональных тригонометрических функций кратных аргументов:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_1 t . \quad (5.1)$$

или 
$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{jn\omega_1 t} \quad (5.2)$$

где  $\omega_1 = 2\pi/T = 2\pi f_1$  - частота первой гармоники;

$a_0/2$  – постоянная составляющая сигнала  $S(t)$ ;

$a_n, b_n$  – значения коэффициентов пропорциональности косинусоидальной и синусоидальной  $n$ -ых составляющих ряда Фурье;

$A_n$  - амплитуда  $n$ -ой гармоники;

$\varphi_n$  - начальная фаза  $n$ -ой гармоники.

---

$$\frac{a_0}{2} = \dot{C}_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) dt , \quad (5.3)$$

---

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(n\omega_1 t) dt , \quad (5.4)$$

---

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(n\omega_1 t) dt , \quad (5.5)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = 2 \cdot |\dot{C}_n| , \quad \varphi_n = -\arctg \frac{b_n}{a_n} = \arg \dot{C}_n \quad (5.6)$$

$$\dot{A}_n = A_n e^{-j\varphi_n} = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cdot e^{-jn\omega_1 t} dt = a_n - jb_n \quad (5.7)$$

Совокупность амплитуд  $\{A_n\}$ , фаз  $\{\varphi_n\}$  и частот  $\{n\omega_1\}$  гармонических составляющих называют соответственно спектром амплитуд, спектром фаз и спектром частот. Графическое изображение спектров, в котором по оси ординат откладываются амплитуды (или начальные фазы) гармонических колебаний, а по оси абсцисс – частоты, называется спектральной диаграммой амплитуд (фаз).

Сигнал может быть восстановлен по спектру.

$$s_N(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n), \quad (5.8)$$

$s_N(t)$  - оценка сигнала  $s(t)$ .

Относительное значение мощности погрешности представления сигнала  $s(t)$  оценкой  $s_N(t)$  определяется по формуле

$$\delta = \frac{P - P_N}{P}, \quad (5.9)$$

где  $P$  и  $P_N$  - мощности сигнала  $s(t)$  и оценки  $s_N(t)$  соответственно

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} s^2(t) dt, \quad (5.10)$$

$$P_N = \sum_{n=-N}^N |\dot{C}_n|^2 = \left(\frac{a_0}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N A_n^2 = \left(\frac{a_0}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (a_n^2 + b_n^2) \quad (5.11)$$

В таблице 5.1 показаны периодические последовательности униполярных и знакопеременных импульсов прямоугольной формы с амплитудой  $E$ , длительностью  $\tau$  и частотой следования  $\omega_1$ . Здесь же представлены формулы для расчета коэффициентов косинусоидальной и синусоидальной составляющих ряда Фурье.

В таблице 5.2 описаны временные свойства сигналов и заданы параметры периодических последовательностей униполярных и знакопеременных импульсов прямоугольной формы для конкретного рабочего места.

**Примечания:** 1. Амплитуда импульсов с выходов 9,7 и 13 составляет 8В.

2. Знакопеременные сигналы моделируются на макете путем перемножения сигналов с двух выходов "Генератора видеосигналов", переменная составляющая сигнала с выхода 13 умножается на сигнал с выхода 9 (либо выхода 7), причем период любого знакопеременного сигнала равен 1000 мкс.

3. После перемножителя амплитуда знакопеременных сигналов составляет  $E=0,1*4*8 \approx 3,2$ В.



Таблица 5.1 – Значения коэффициентов  $a_n$  и  $b_n$  тригонометрического ряда Фурье

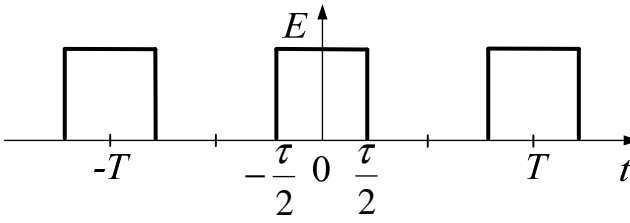
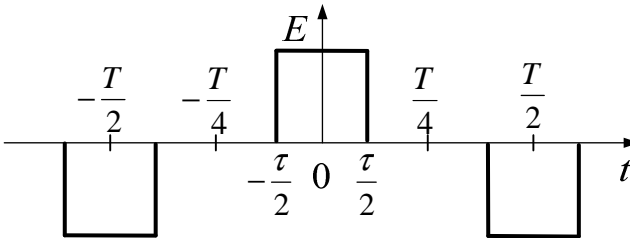
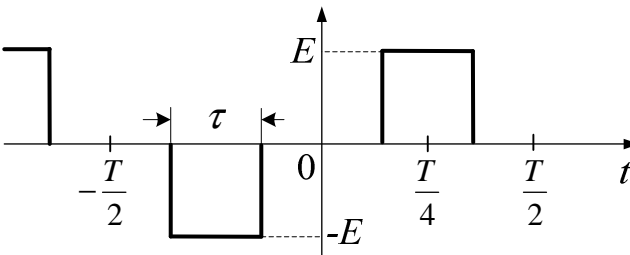
График сигнала $s(t)$	Временные свойства $s(t)$	Формулы для расчета $a_n$ и $b_n$	Размах импульса $E, B$
	$s(t) = s(-t)$	$a_n = \frac{2E}{n\pi} \cdot \sin\left(n\pi \frac{\tau}{T}\right)$ $b_n = 0$	8,0
	$s(t) = s(-t)$ $s(T/4+t) = -s(T/4-t)$	$a_n = \frac{4E}{n\pi} \cdot \sin^2\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{\tau}{T}\right)$ $b_n = 0$	3,2
	$s(t) = -s(-t)$ $s(T/4+t) = s(T/4-t)$	$a_n = 0$ $b_n = \frac{4E}{n\pi} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(n\pi \frac{\tau}{T}\right)$	3,2

Таблица 5.2 – Параметры периодической последовательности импульсов прямоугольной формы

Номер рабочего места	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11																							
Номер выхода Генератора видеосигналов	9	9	9	9	9	9	9	9	9	7	7																							
Частота следования с выходов 9 и 7, кГц	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	6																							
Длительность импульса положительной полярности $\tau$ , мкс	250	125	62,5	31,25	15,625	484,375	468,75	437,5	375	15,625	15,625																							
Шифр студента	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	51	52	53	61	62	63	71	72	73	81	82	83	91	92	93	101	102	103	111	112	113	
Временные свойства сигналов	$s(t) = s(-t)$	+			+	+		+	+		+	+		+	+		+	+		+	+		+	+		+	+		+	+		+	+	
	$s(t) = -s(-t)$			+					+				+					+				+			+					+				+
	$s(T/4+t) = s(T/4-t)$			+					+				+					+				+			+					+				+
	$s(T/4+t) = -s(T/4-t)$		+						+				+					+				+			+					+				+

### 5.3. Описание лабораторной установки

При выполнении лабораторной работы используются сменная панель «Радиосигналы», осциллограф и анализатор спектра, соединенные согласно схеме, изображенной на рис. 5.1.

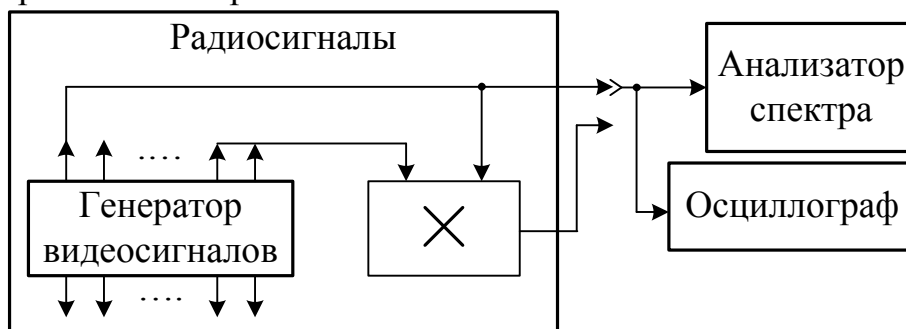


Рисунок 5.1 – Схема эксперимента

Исследуемые сигналы снимаются либо непосредственно с «Генератора видеосигналов», либо предварительно формируются при помощи функционального узла макета перемножителя  $\times$ .

### 5.4. Домашнее задание

Самостоятельная работа заключается в следующем:

- 1) проработать лекционный материал и рекомендованную литературу по теме: «Спектральный анализ периодических сигналов»;
- 2) изучить временные свойства сигналов, представленных в таблице 5.1;
- 3) по заданным в таблице 5.2 для Вашего рабочего места значению частоты следования импульсов прямоугольной формы, длительности импульса, положительной полярности и временным свойствам дать временное представление сигнала на периоде;
- 4) рассчитать и построить спектр амплитуд и спектр фаз заданного сигнала (не менее 10 составляющих), произвести качественный анализ полученных спектров, сравнить временное и спектральное представление;
- 5) построить оценку сигнала из трех гармонических колебаний с максимальными амплитудами, частотами, кратными частоте исследуемого сигнала и соответствующими начальными фазами;
- 6) рассчитать погрешность представления сигнала оценкой из трех гармонических колебаний.

### 5.5. Лабораторное задание

При исследовательской работе необходимо:

- 1) измерить и зарисовать в масштабе спектрограммы и осциллограммы проанализированных дома сигналов;
- 2) изучить изменения в спектре амплитуд, происходящие при уменьшении и увеличении длительности импульсов периодической последовательно-

сти с постоянным периодом повторения;

3) исследовать изменения в спектре амплитуд, происходящие при увеличении периода повторения и постоянной длительности импульсов;

4) получить и зарисовать в масштабе пачки из двух, четырех, восьми и 32 импульсов, сравнить спектры между собой.

### **5.6. Методические указания**

Методические указания по работе с модулями системы PcLab2000 приведены в разделе 4.6. описания лабораторной работы №1 настоящего сборника. Более детальное описание системы PcLab2000 приведено в пособии [6].

Для наблюдения сигналов, рассчитанных в домашнем задании, использовать вывод 8 генератора видеосигналов рабочего макета. Длительность импульса установить с помощью переключателя «Длительность». При необходимости формирования биполярных импульсов использовать дополнительные модули перемножителей рабочего макета. В этом случае на второй вход перемножителя следует подать сигнал с вывода 13 генератора видеосигналов рабочего макета.

Для исследования характеристик сигналов с изменяющейся длительностью использовать вывод 8 генератора видеосигналов рабочего макета. Длительность импульса регулировать с помощью переключателя «Длительность».

Для исследования характеристик сигналов с переменным периодом следования использовать вывод 7 генератора видеосигналов рабочего макета. Период повторения импульсов устанавливать с помощью переключателя «Период».

Сигналы в виде последовательностей пачек импульсов наблюдать на выводе 9 генератора видеосигналов рабочего макета. Количество импульсов в пачке регулировать с помощью переключателя «Длительность».

### **5.7. Указания к отчету**

Оформление согласно общим требованиям и правилам оформления отчета по лабораторной работе.

Отчет должен содержать результаты выполнения индивидуального домашнего задания, экспериментальные временные и спектральные диаграммы рассчитанного дома сигнала, а также диаграммы сигналов, позволяющие выявить изменения в спектрах в зависимости от скважности, частоты следования импульсов, количества импульсов в пачке, а также анализ полученных результатов и выводы.

**Примечание.** *Следует привести в ответе не менее трех временных и спектральных диаграмм исследованных сигналов по каждому влияющему фактору.*

## 5.8. Вопросы для самопроверки

Поясните:

- 1) какими свойствами обладают спектры периодических сигналов;
- 2) как влияет изменение длительности импульса и периода повторения на спектр периодической последовательности прямоугольных видеоимпульсов;
- 3) как отразится на спектре периодического сигнала изменение положения начала отсчета времени;
- 4) как изменится спектр периодического сигнала, если период повторения устремить в бесконечность;
- 5) какая связь существует между сплошным спектром непериодического сигнала и линейчатым спектром соответствующего периодического сигнала;
- 6) как связаны между собой длительности импульса и ширина спектра.

Постройте и сравните:

- 1) спектры периодической последовательности униполярных импульсов и периодической последовательности знакопеременных импульсов;
- 2) спектры периодической последовательности видеоимпульсов и пачки из нескольких этих же видеоимпульсов.

Запишите выражение для спектральной плотности периодического сигнала.

## 6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ

#### 6.1. Цель работы

Изучить основные параметры и характеристики амплитудно-модулированных (АМ) сигналов. Исследовать спектры радиосигналов, полученных путем амплитудной модуляции гармонического сигнала и периодической последовательности коротких импульсов управляющими периодически сигналами сложной формы.

#### 6.2. Основные обозначения, расчетные формулы и определения

6.2.1. В процессе модуляции участвуют два вида лабораторно-модулированных сигналов: несущий и управляющий. При амплитудной модуляции в соответствии с управляющим сигналом  $s_y(t)$  меняется амплитуда несущего сигнала  $s_o(t)$ .

Различают два вида амплитудной модуляции (АМ) балансную и простую. Математическое описание амплитудно-модулированного сигнала в общем случае представляется выражением

$$s_{AM}(t) = k_{AM} \cdot s_y(t) \cdot s_o(t), \quad (6.1)$$

где  $k_{AM}$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров модулятора.

Если управляющий сигнал  $s_y(t)$  содержит постоянную  $s_o$  и переменную  $\tilde{s}_y(t)$  составляющие, то имеет место простая амплитудная модуляция с математическим описанием

$$s_{AM}(t) = k_{AM} \cdot (s_o + \tilde{s}_y(t)) \cdot s_o(t), \quad (6.2)$$

В случае отсутствия постоянной составляющей имеет место так называемая балансная модуляция (см. формулу 6.1).

#### 6.2.2. Узкополосные амплитудно-модулированные сигналы

Для получения узкополосных АМ-сигналов в качестве несущего колебания используют высокочастотное гармоническое колебание. Узкополосность достигается в том случае, если частота несущего сигнала много больше максимальной частоты в спектре управляющего сигнала.

##### А. Тональная модуляция

Если несущий  $s_o(t)$  и управляющий  $s_y(t)$  сигналы представляют собой гармонические колебания, тогда модуляция называется тональной

$$s_o(t) = A_o \cos(\omega_o t + \varphi_o), \quad (6.3)$$

$$s_y(t) = B \cos(\Omega t + \varphi_y) \quad (6.4)$$

где  $A_o$ ,  $B$  – амплитуды;  $\omega_o$ ,  $\Omega$  – частоты;  $\varphi_o$ ,  $\varphi_y$  – начальные фазы.

В случае простой АМ (рис.6.1а) математическое описание модулированного сигнала имеет вид:

$$s_{AM}(t) = A_o [1 + M \cdot \cos(\Omega t + \varphi_y)] \cdot \cos(\omega_o t + \varphi_o), \quad (6.5)$$

где  $M$  – коэффициент амплитудной модуляции (иногда называют глубиной модуляции).

**Примечание.** Закон изменения огибающей линейно связан с управляющим сигналом, поэтому информацию об управляющем сигнале легко получить путем выделения огибающей (детектированием).

Спектр модулированного сигнала (рисунок 6.2а) представляет собой совокупность трех гармонических колебаний, а именно

$$s_{AM}(t) = A_o \cdot \cos(\omega_o t + \varphi_o) + \frac{A_o M}{2} \cdot \cos[(\omega_o + \Omega)t + \varphi_o + \varphi_y] + \frac{A_o M}{2} \cdot \cos[(\omega_o - \Omega)t + \varphi_o - \varphi_y], \quad (6.6)$$

При амплитудной модуляции происходит перенос спектра управляющего сигнала из области низких частот в область высоких.

Временное и спектральное представление радиосигнала при тональной модуляции изображено на рисунке 6.1.

На рисунке 6.1а обозначены максимальное  $A_{max}$  и минимальное  $A_{min}$  значения огибающей, зная которые, можно оценить коэффициент (глубину) модуляции  $M$ .

$$\left. \begin{aligned} A_{max} &= A_o (1 + M) \\ A_{min} &= A_o (1 - M) \end{aligned} \right\}. \quad (6.7)$$

$$M = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \quad (6.8)$$

$$A_o = \frac{1}{2} (A_{max} + A_{min}) \quad (6.9)$$

В случае балансной АМ математическое описание модулированного сигнала (см.рис. 7.1б) имеет вид

$$\begin{aligned} s_{БМ}(t) &= k_{БМ} \cdot A_o \cdot B \cdot \cos(\Omega t - \pi/2) \cdot \cos(\omega_o t - \pi/2) = \\ &= A_{БМ} \cos(\omega_o - \Omega)t + A_{БМ} \cos[(\omega_o + \Omega)t - \pi], \end{aligned} \quad (6.10)$$

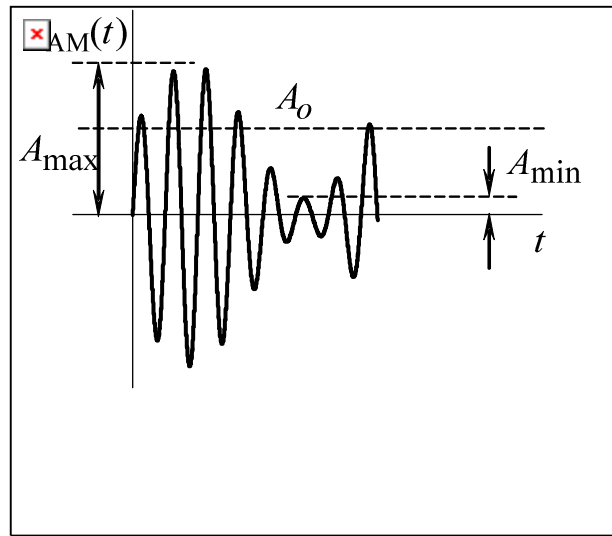
где  $A_{БМ} = k_{БМ} \cdot A_o \cdot B$  – амплитуда боковой составляющей.

$k_{БМ}$  – коэффициент пропорциональности.

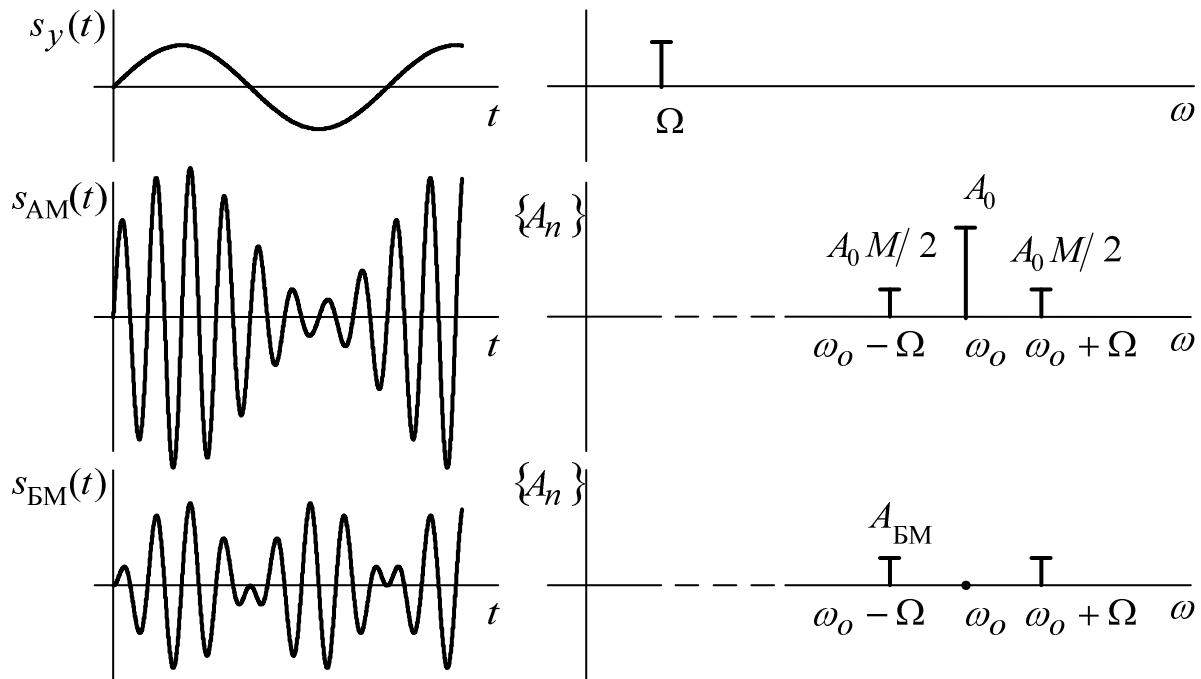
В спектре сигнала (рис. 6.2б) нет информации о несущем колебании. Радиосигнал, получившийся в результате балансной модуляции, узкополосен и может быть представлен квазигармоническим колебанием вида

$$\begin{aligned} s_{БМ}(t) &= k_{БМ} \cdot s_y(t) \cdot s_o(t) = k_{БМ} \cdot s_y(t) \cdot A_o \cos(\omega_o t + \varphi_o) = \\ &= A_{БМ}(t) \cdot \cos(\omega_o t + \varphi_o). \end{aligned} \quad (6.11)$$

где  $A_{БМ}(t) = k_{БМ} \cdot A_o \cdot s_y(t)$  – огибающая модулированного колебания.



а)



б)

Рисунок 6.1 - а) простая модуляция, б) сравнение с балансной модуляцией

**Примечание.** Закон изменения огибающей и закон изменения управляющего сигнала имеют нелинейную связь, поэтому выделение управляющего сигнала представляет сложную техническую задачу, которая решается, как правило, путем предварительного восстановления в спектре радиосигнала несущего колебания.

Ширина спектра радиосигнала,  $\Delta\omega$  как при простой, так и при балансной модуляции равна  $2\Omega$ .

$$\Delta\omega = 2\Omega, \quad (6.12)$$



Балансная модуляция позволяет получить выигрыш по мощности.

Б. Модуляция периодическим сигналом сложной формы

Управляющий сигнал задан спектром

$$s_y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos(n\Omega t + \varphi_n). \quad (6.13)$$

При простой модуляции имеем

$$\begin{aligned} s_{AM}(t) &= \left[ A_0 + k_{AM} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(n\Omega t + \varphi_n) \right] \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= A_0 \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(n\Omega t + \varphi_n) \right] \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \end{aligned} \quad (6.14)$$

где  $M_n$  -  $n$ -ый (парциальный) коэффициент модуляции.

Спектр модулированного сигнала описывается выражением вида

$$\begin{aligned} s_{AM}(t) &= A_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_0 M_n}{2} \cos[(\omega_0 + n\Omega)t + \varphi_0 + \varphi_n]}_{\text{ВБП}} + \\ &+ \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_0 M_n}{2} \cos[(\omega_0 - n\Omega)t + \varphi_0 - \varphi_n]}_{\text{НБП}}, \end{aligned} \quad (6.15)$$

где ВБП – верхняя боковая полоса, НБП – нижняя боковая полоса.

Поясняющие иллюстрации приведены на рисунке 6.3. Спектрограммы на рисунке 6.3б наглядно демонстрируют перенос спектра управляющего сигнала из области низких частот в область высоких.

6.2.3. Широкополосные амплитудно-импульсно-модулированные АИМ-сигналы

Несущее колебание представляет собой периодическую последовательность коротких импульсов, математическое описание которой представляет собой ряд Фурье

$$s_o(t) = E \left[ \frac{\tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{E} \cdot \cos(n\omega_o t + \varphi_n) \right]. \quad (6.16)$$

**Примечание.** Во избежание искажений, возникающих за счет наложения спектров, должно выполняться условие  $n_{max} \cdot \Omega_1 < \omega_1/2$ , т.е. максимальная частота в спектре управляющего сигнала не должна превышать половину частоты следования импульсов несущего колебания.

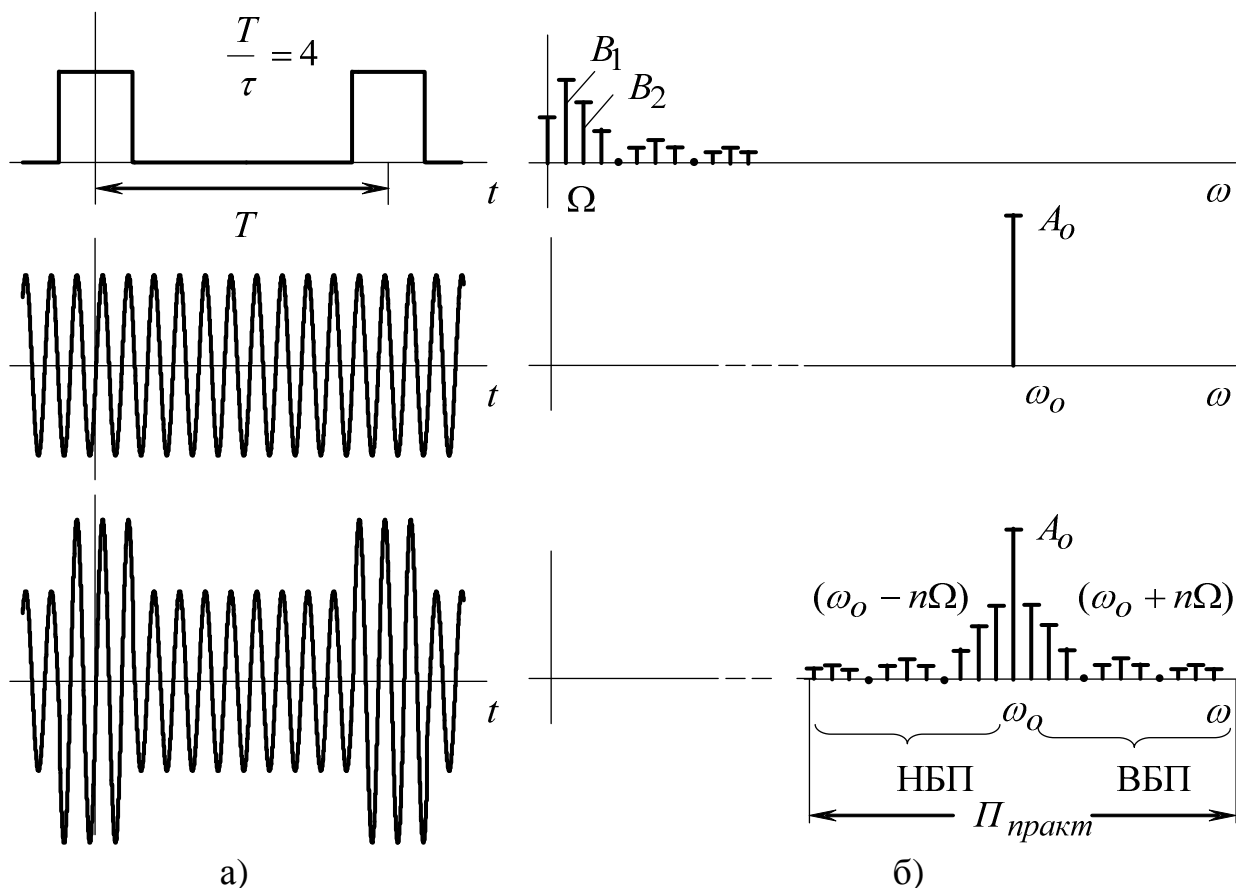


Рисунок 6.3 – Временное и спектральное представления радиосигнала при амплитудной модуляции периодическим управляющим сигналом

### 6.3. Домашнее задание

Самостоятельная работа заключается в следующем:

- 1) проработать лекционный материал и рекомендованную литературу по теме "Радиосигналы";
- 2) дать математическое описание амплитудно-модулированного сигнала (в качестве несущего сигнала использовать гармоническое колебание с параметрами  $U_{\omega} = 8\text{В}$ ,  $\omega_0 = 2\pi \cdot 32 \cdot 10^3$  рад/с,  $\varphi_0 = 60^\circ$ , в качестве управляющего сигнала использовать свой вариант из табл. 5.2, коэффициент модуляции  $K_{\text{АМ}} \sim 0,1$ );
- 3) рассчитать парциальные коэффициенты модуляции;
- 4) построить спектр амплитуд и спектр фаз АМ-сигнала;
- 5) построить векторные диаграммы, иллюстрирующие тональную модуляцию для двух случаев - простой и балансной модуляции.

### 6.4. Описание лабораторной установки

При выполнении лабораторной работы №3 используются следующие приборы: сменная панель "Радиосигналы", анализатор спектра и осциллограф. Несущие сигналы - гармоническое колебание и последовательность ко-

ротких импульсов - снимаются с выходов 1 и 7 "Генератора видеосигналов". Управляющие сигналы снимаются либо непосредственно с "Генератора видеосигналов", либо предварительно формируются при помощи функциональных узлов макета: перемножителя "X", сумматора " $\Sigma$ " и усилителя ">". Модуляция осуществляется путем перемножения несущего и управляющего сигналов.

На рисунке 6.5 изображена одна из возможных схем включения.

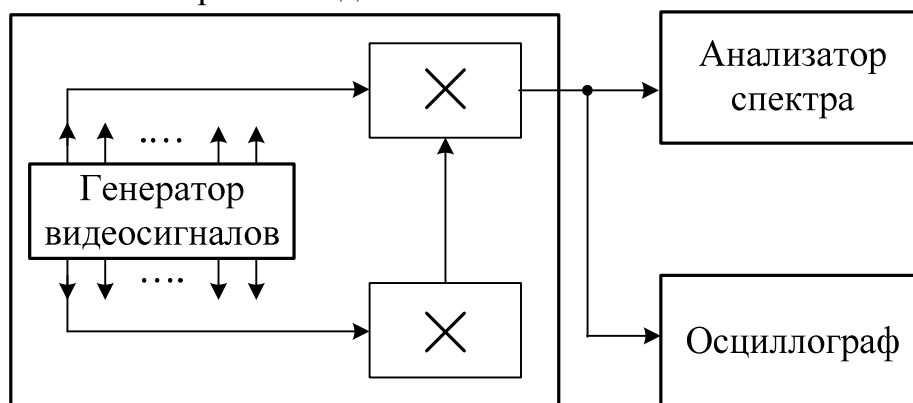


Рисунок 6.5 – Схема эксперимента

### 6.5. Лабораторное задание и методические указания

При выполнении работы необходимо:

1) получить тонально-модулированное колебание путем перемножения высокочастотного гармонического колебания без постоянной составляющей и низкочастотного гармонического колебания с постоянной составляющей (несущий и управляющий сигналы снимаются соответственно с 1 и 11 выходов "Генератора видеосигналов", ручка ОТСЕЧКА должна быть повернута в крайнее правое положение);

2) измерить и зарисовать в масштабе осциллограмму и спектрограмму полученного радиосигнала;

3) вычислить глубину модуляции по осциллограмме (формула 6.9) и по спектрограмме  $M = 2U_{\delta}/U_0$  сравнить их между собой;

4) исследовать и изобразить в масштабе осциллограмму и спектрограмму АМ-сигнала при балансной модуляции, получаемой путем перемножения гармонических сигналов с двух выходов 1 и 12 "Генератора видеосигналов";

5) исследовать и изобразить в масштабе осциллограмму и спектрограмму АМ-сигнала, полученного перемножением высокочастотного гармонического колебания (выход 1 "Генератора видеосигнала") и проанализированного в домашнем задании и лабораторной работе № 2 управляющего сигнала, заданного в таблице 5.2 и получаемого с помощью функциональных узлов сменной панели "Радиосигналы";

6) сравнить между собой спектрограммы управляющего сигнала и полученного АМ-сигнала, оценить практическую ширину спектра АМ-сигнала;

7) исследовать особенности спектров амплитудно-импульсно-

модулированных (АИМ) сигналов, получаемых путем перемножения периодической последовательности униполярных прямоугольных импульсов (с частотами следования 32, 16,8 кГц) с выхода 7 и сигнала сложной формы по выбору (пилообразной формы - с выхода 6 или косинусоидальной формы - с выхода II);

8) изобразить в масштабе полученные осциллограммы и спектрограммы АИМ-сигналов, сравнить их между собой, а также сравнить спектры АИМ-сигналов со спектром выбранного управляющего сигнала.

## **7.6. Вопросы для самопроверки**

Поясните:

- 1) в чем заключается процесс модуляции;
- 2) что понимается под несущим и модулирующим колебаниями;
- 3) как определяется и от чего зависит глубина амплитудной модуляции;
- 4) в чем принципиальное отличие осциллограмм сигналов о балансной амплитудной модуляцией и обычных АМ-сигналов;
- 5) каким путем можно преобразовать радиосигнал с балансной модуляцией в обычный АМ-сигнал;
- 6) в чем заключается причина возникновения искажений в огибающей АМ-сигнала при перемодуляции;
- 7) как записываются АМ-колебание и как формируется его спектр при модуляции: гармоническим колебанием; произвольным периодическим колебанием; непериодическим сигналом;
- 8) как изобразить векторные диаграммы АМ-сигнала при тональной простой и балансной модуляциях;
- 9) в каких пределах меняется мощность АМ-колебания, средняя за период высокой частоты (при простой амплитудной модуляции);
- 10) как распределяется в спектре АМ-сигнала мощность, средняя за период модуляции;
- 11) как осуществляется импульсная модуляция;
- 12) в чем проявляются различия между управляющим и несущим сигналами при импульсной модуляции;
- 13) как формируется спектр АИМ-сигнала;
- 14) какие изменения происходят в спектре управляющего сигнала при импульсной модуляции;
- 15) из каких соображений следует выбирать частоту следования импульсов несущего колебания.

## 7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 2005.-462с.(304 экз.)
2. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : Учебное пособие для вузов/ М.:ФОРУМ, 2005; М.:Инфа-М,2005.-431с.(31 экз.)
3. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. -М: Горячая линия-Телеком, 2005.-704с.(101 экз.)
4. Каратаева Н.А. Радиотехнические цепи и сигналы. Теория сигналов и линейные фильтры: Учебное пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 255 с.  
ISBN 5-86889-175-9
5. Прохождение управляющих сигналов через линейные цепи и корреляционный анализ: Учебное пособие/Разработчик Н.А.Каратаева.- ТИА-СУР,1987.-40с.
6. Богомолов С.И. Система РС-LAB2000LT: Руководство к лабораторным работам по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы». – Томск: ТУСУР, 2013. – 42 с.

## 8 ПРИЛОЖЕНИЕ

### 8.1. Описание панели «Радиосигналы»

#### 8.1.1. Назначение

Все необходимое для выполнения лабораторных работ смонтировано на лабораторном стенде. При выполнении работ используются:

сменная панель «Радиосигналы», изображенная на рисунке 8.1;

многофункциональная система PC-LAB2000LT на базе блока PCSGU250, включающая в себя, в частности, модули осциллографа и анализатора спектра.

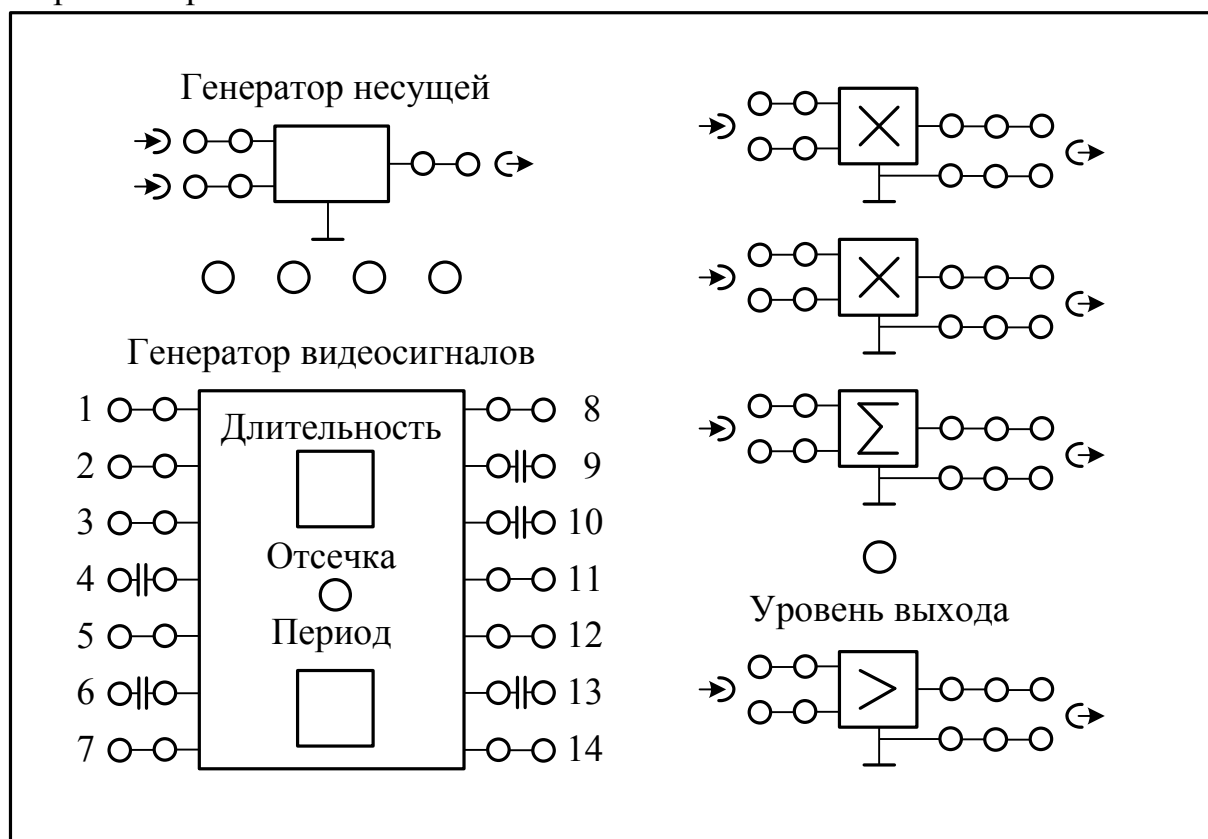


Рисунок 8.1 – Внешний вид сменной панели «Радиосигналы»

Панель «Радиосигналы» лабораторного стенда представляет собой генератор электрических колебаний широкого класса и предназначена для выполнения лабораторных работ, проведения экспериментальных исследований студентами в рамках курсового проектирования и учебно-исследовательской работы (УИР), а также лекционных демонстраций в курсах «Радиотехнические цепи и сигналы» и «Основы теории цепей».

#### 8.1.2. Состав панели

В состав панели «Радиосигналы» входят:

- 1) «Генератор несущей»;

- 2) «Генератор видеосигналов»;
- 3) два четырехкватратных перемножителя двух аналоговых сигналов (х);
- 4) сумматор ( $\Sigma$ ) двух аналоговых сигналов;
- 5) усилитель ( $>$ ) с регулируемым уровнем выходного напряжения.

### 8.1.3. Описание блока «Генератор несущей»

«Генератор несущей» представляет собой генератор высокочастотных, близких к гармоническим, колебаний ( $f \approx 120-300$  кГц) с электромагнитной перестройкой частоты и регулируемым уровнем выхода. Перестройка частоты может осуществляться как вручную с помощью потенциометров ЧАСТОТА, ГРУБО, ТОЧНО, так и путем подачи напряжений (до 8 В) на управляющие входы генератора « $\rightarrow$  ЧМ» и « $\rightarrow$  ФМ». При подаче управляющего сигнала на вход « $\rightarrow$  ЧМ» изменение частоты генерируемых колебаний пропорционально напряжению сигнала, т.е. генератор будет вырабатывать частотно-модулированные колебания (ЧМК). При подаче управляющего сигнала на вход « $\rightarrow$  ФМ» на выходе генератора будет получено фазомодулированное колебание (ФМК). Девиация частоты ЧМК и индекс модуляции ФМК могут регулироваться с помощью ручки ИНДЕКС, ДЕВИАЦИЯ. Изменение средней частоты ЧМК и ФМК производится с помощью ручек ЧАСТОТА, ГРУБО, ТОЧНО.

С помощью ручки УРОВЕНЬ ВЫХОДА можно регулировать амплитуду генерируемых колебаний от 0 до 5 В.

### 8.1.4. Описание блока «Генератор видеосигналов»

«Генератор видеосигналов» вырабатывает одновременно 14 когерентных, с кратными частотами, колебаний различной формы. Для удобства около каждой пары выходных гнезд генератора выгравирована упрощенная временная зависимость напряжения, по которой можно судить о частоте, форме колебания и о регулируемом параметре (угле отсечки, скважности и т.д.). Регулируемый параметр указан на временных диаграммах горизонтальными короткими линиями.

Таблица 8.1 – Характеристики сигналов на выходах «Генератора видеосигналов»

Номер выхода	Описание сигналов и их основные параметры
1	Гармоническое колебание с частотой 32768 Гц. С помощью переключателя ДЛИТЕЛЬНОСТЬ на этом выходе можно получить или непрерывное гармоническое колебание или "пакеты" с частотой следования 20480, содержащие 1, 2, 4, 8, 16, 24, 28, 30, 31 периода синусоиды.
2	Только отрицательные полупериоды колебания, вырабатываемого на

	выходе « I », в форме «пакетов» или непрерывной последовательности. Длительность «пакета» регулируется переключателем ДЛИТЕЛЬНОСТЬ в тех же пределах, что и у гармонического колебания на выходе « I ».
3	То же самое, что и на выходе «2», но положительной полярности.
4	Колебание прямоугольной формы с постоянной скважностью $N=2$ («меандр») положительной полярности с частотой 2048 Гц, Между парой выходных гнезд "4" включен разделительный конденсатор. После разделительного конденсатора получается прямоугольный знакопеременный сигнал без постоянной составляющей.
5	Короткие ( $\tau_u = 6$ мкс) экспоненциальные импульсы напряжения с частотой 2048 Гц. Сигнал может быть использован или в качестве синхронизирующего для осциллографа, или в качестве испытательного при снятии импульсных характеристик цепей.
6	Периодическое линейнонарастающее (пилообразное) напряжение частотой 2048 Гц с начальным уровнем, близким к нулю. Взяв этот сигнал после разделительного конденсатора, можно получить линейнонарастающее напряжение без постоянной составляющей. Сигнал можно использовать и как напряжение горизонтальной развертки осциллографа.
7	Прямоугольные импульсы положительной полярности с постоянной длительностью порядка 15 мкс, период следования которых можно изменять с помощью переключателя ПЕРИОД с шагом в два раза.
8	Прямоугольные импульсы положительной полярности со скважностью 2 и частотой 32768 Гц. С помощью переключателя ДЛИТЕЛЬНОСТЬ можно получить или непрерывную последовательность этих импульсов, или "пакеты" с частотой следования 2048 Гц, содержащие 1, 2, 4, 8, 6, 24, 28, 30, 31 прямоугольных импульсов.
9	Прямоугольные импульсы положительной полярности с частотой 2048 Гц, длительность которых может меняться дискретно с помощью переключателя ДЛИТЕЛЬНОСТЬ по закону. $\tau_u = 15,5 \cdot K$ мкс, где $K$ - любое целое число из ряда 1, 2, 4, 8, 16, 24, 28, 30, 31.
10	Колебание треугольной формы с частотой 2048 Гц. Длительность треугольной части сигнала меняется с помощью переключателя ДЛИТЕЛЬНОСТЬ.
11	Гармонический сигнал с частотой 2048 Гц. Предусмотрена регулировка с помощью потенциометра ОТСЕЧКА угла отсечки в пределах от 0 до 180°.
12	Гармоническое напряжение с частотой 2048 Гц. Параметры колебания не регулируются.
13	Прямоугольный сигнал положительной полярности со скважностью



	два, частотой 1024 Гц. После конденсатора этот сигнал можно получить без постоянной составляющей.
14	Линейнонарастающее от нуля напряжение с частотой 64 Гц. Сигнал может использоваться в качестве напряжения горизонтальной развертки осциллографа и управляющего напряжения в генераторе несущей (« $\rightarrow$ ЧМ») для измерения амплитудно-частотных характеристик цепей.

### 8.1.5. Описание перемножителей

Перемножители позволяют перемножить два любых аналоговых сигнала, снимаемых с выходов других функциональных узлов панели. Перемножаемые сигналы подаются на входы X и Z перемножителей.

Выходной сигнал

$$Y = A \cdot X \cdot Z$$

пропорциональный произведению входных сигналов X и Z, снимается с гнезд (« $\rightarrow$  Y»). Коэффициенты пропорциональности A и B перемножителей в первом приближении можно считать равными 0,1. При необходимости их более точно можно определить экспериментально путем подачи на оба входа одновременно гармонического сигнала с известной амплитудой  $X_m = Z_m$  и измерения с помощью осциллографа амплитуды выходного сигнала  $Y_m$ .

В этом случае  $A = Y_m / X_m^2$ .

### 8.1.6. Описание сумматора

При подаче на входы 1 и 2 сумматора « $\Sigma$ » суммируемых аналоговых сигналов с амплитудами  $U_{1m}$  и  $U_{2m}$  на выходе будет получен сигнал амплитудой

$$U_{m\text{вых}} = k(U_{1m} + U_{2m})$$

Коэффициент пропорциональности сумматора  $k \approx 0,5$ . При необходимости он может быть более точно определен экспериментально аналогично определению коэффициентов A и B перемножителей.

### 8.1.7. Описание усилителя

В состав панели «Радиосигналы» входит неинвертирующий усилитель с регулируемым с помощью ручки УРОВЕНЬ ВЫХОДА выходным напряжением.

Максимальный коэффициент передачи усилителя по напряжению не превышает единицы. И тем не менее это усилитель, так как, обладая большим входным ( $\approx 100$  кОм) и малым выходным ( $\approx 10$  Ом), сопротивлениями он обеспечивает усиление сигнала по мощности. Усилитель целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо или обеспечить согласование высоко-

омного источника сигнала «Генератора радиосигналов» с низкоомной нагрузкой (входы исследуемых линейных цепей), или возникает необходимость в регулировке амплитуды используемого колебания.

#### 8.1.8. Общие замечания

Все функциональные узлы панели «Радиосигналы» имеют один общий провод ( $\perp$ ). Поэтому все необходимые электрические соединения выхода одного узла со входом другого в пределах панели ведутся только одним проводом с наконечниками, включаемыми в соответствующие гнезда.

Подключение же к панели внешних устройств (радиоизмерительных приборов, исследуемых цепей и т.д.) должно проводиться по двухпроводной схеме. При этом общие провода приборов соединяются с соответствующими гнездами панели первыми еще до включения питания.

Уровни входных и выходных напряжений всех функциональных узлов подобраны практически одинаковыми ( $\approx 9-10$  В). Это позволяет подавать сигналы от одного функционального узла к другому без опасения возможных в таких случаях электрических перегрузок.

Уровень выходных напряжений "Генератора радиосигналов" не регулируется. Поэтому в тех случаях, когда такая регулировка необходима, следует сигнал подавать через усилитель, имеющий регулировку уровня выхода.

Выходы «Генератора радиосигналов», перемножителей, сумматора рассчитаны на подключение нагрузок с сопротивлением не менее 5 кОм. Поэтому при необходимости подключения к ним цепей, входные сопротивления которых или неизвестны, или меньше 5 кОм, следует между ними включать согласующий усилитель.

Вход управления частотой « $\rightarrow$  ЧМ» «Генератора несущей» является открытым (нет разделительного конденсатора). Поэтому при подаче на этот вход управляющего напряжения с постоянной составляющей будет наблюдаться естественное изменение среднего значения частоты колебаний, генерируемых «Генератором несущей». Компенсировать этот уход частоты можно с помощью ручек ЧАСТОТА, ГРУБО, ТОЧНО.

Смонтированные на панели «Радиосигналы» перемножителя являются четырехкватратными и имеют открытые входы X и Z. Это значит, что результат перемножения (выходной сигнал) будет зависеть не только от знаков мгновенных значений входных сигналов в данный момент, но и от значения постоянных составляющих перемножаемых сигналов.

Все колебания, вырабатываемые одновременно на выходах «Генератора радиосигналов», являются когерентными. т. е. их начальные фазы жестко связаны друг с другом, а частоты являются кратными. Поэтому, используя пилотное напряжение с частотой 2048 Гц (выход б) для внешней горизонтальной развертки осциллографа, мы всегда будем наблюдать на экране изображение одного или нескольких периодов исследуемого сигнала неподвижным.

## 8.2. Система PC-LAB2000LT на базе блока PCSGU250

### 8.2.1 Назначение

Многофункциональная система Pc-Lab2000LT на базе блока PCSGU250 позволяет сконцентрировать возможности полной лаборатории в одном приборе, запитанном по интерфейсу USB.

Многофункциональное ПО Pc-Lab2000LT обеспечивает функционирование двухканального осциллографа, анализатора спектра, регистратора, функционального генератора и измерителя частотных характеристик. Встроенный редактор волны сигнала и автоматизированный генератор последовательностей позволяют синтезировать сигналы произвольной формы, используя файл или внешний сигнал.

Для оценки программного обеспечения в демонстрационном режиме оборудование не требуется.

### 8.2.2. Общая информация

Pc-Lab2000LT на основе блока PCSGU250 имеет следующие инструментальные возможности и основные характеристики:

- маркеры: для измерения амплитуды/напряжения и частоты/времени;
- входные соединения: DC, AC и GND;
- разрешение: 8 бит;
- сохранение изображений дисплея и данных измерений;
- питание от USB порта\* (500 мА)
- габаритные размеры: 205x55x175 мм.

Примечание. \* Не рекомендуется использовать для питания прибора USB-hub. Это может привести к сбою в работе программного обеспечения.

### 8.3.3. Технические характеристики модулей:

#### ***Анализатор спектра (Spectrum Analyzer)***

- диапазон частот 0...120 Гц до 12 МГц;
- линейная или логарифмическая шкала времени;
- принцип действия: БПФ (Fast Fourier Transform);
- разрешение БПФ: 2048 линий;
- БПФ входного канала: CH1 или CH2;
- функция масштабирования.

#### ***Регистратор переходных процессов (Transient Recorder)***

- временная шкала: 20 мс/дел...2000 с/дел;
- макс. длина записи: 9,4 часа/экран;
- автоматическое сохранение данных;
- автоматическая запись в течение года;
- максимальное число выборок: 100/с;
- минимальное число выборок: 0,05/с.

#### ***Функциональный генератор (Function generator)***

- частотный диапазон (синусоидальный сигнал): 0.005 Гц...1000 кГц;
- частотный диапазон (прямоугольный и пилообразный сигналы): 0.005 Гц...500 кГц;
- расширяемая библиотека сигналов;
- диапазон амплитуд: 100 мВ...10 В (размах амплитуд) (на частоте 1 кГц, выходной нагрузке 600 Ом), выходное сопротивление 50 Ом.

#### ***Осциллограф (Oscilloscope)***

- полоса пропускания: (каждого из двух каналов): 0...12 МГц,  $\pm 3$  дБ;
- входной импеданс: 1 МОм/30 пФ;
- максимальное входное напряжение: 30 В (АС+DC);
- временная развертка: 0.1 мкс...500 мс на деление;
- диапазон по входу: 10 мВ...3 В на деление;
- считывание показаний: среднеквадратичное значение (True RMS), dBV, dBm, пиковые значения, коэффициент заполнения импульсов, частота и др.;
- длина записи: 4К отсчетов на канал;
- частота дискретизации: 250 Гц...25 МГц;
- функции истории отсчетов и цифрового захвата.

Возможно одновременное измерение сразу по двум каналам CH1, CH2.

#### ***Анализатор частотных характеристик цепей (Bode plotter)***

- автоматическая синхронизация осциллографа и генератора;
- частотный диапазон: 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц;
- начальная частота: 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц.

Примечание. \* Технические характеристики могут быть модифицированы. DLL доступна для собственного развития