

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.Н. Мирянова

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ»**

Часть 1

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов направления
27.03.04 – Управление в технических системах

Севастополь
СевГУ
2019

УДК 621.391
М64

Р е ц е н з е н т:

В.С. Чернега - кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационные системы»

Мирянова В.Н.

М64 Лабораторный практикум по дисциплине «Информационные сети и телекоммуникации»: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления 27.03.04 – Управление в технических системах. – Ч.1 / В.Н. Мирянова. – Севастополь: СевГУ, 2019. – 31 с.

Целью лабораторного практикума является привитие навыков исследования процессов в телекоммуникационных системах. Лабораторные работы предполагают изучение способов моделирования сигналов, методов аналоговой и цифровой модуляции; охватывают вопросы дискретизации и восстановления сигналов в цифровых системах передачи информации. Каждая лабораторная работа кроме кратких теоретических сведений и указаний по её выполнению содержит требования к оформлению и содержанию отчета, а также перечень контрольных вопросов.

УДК 621.391

Лабораторный практикум рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Информатика и управление в технических системах», протокол № 1 от 30 августа 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Лабораторная работа № 1. Исследование временных и спектральных параметров видеосигналов.....	4
2. Лабораторная работа № 2. Исследование параметров радиосигналов с полосовой модуляцией	14
3. Лабораторная работа № 3. Исследование процессов дискретизации и восстановления сигналов	25
Библиографический список	30

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум включает четыре лабораторные работы, охватывающие основные разделы первой части изучаемой дисциплины, посвященные системам телекоммуникаций. Каждая лабораторная работа выполняется в течение четырех академических часов. В процессе подготовки к выполнению работы студент должен ознакомиться с основными теоретическими положениями, описанием используемого программного продукта и выполнить предварительные теоретические расчеты.

Все лабораторные работы выполняются в системах схемотехнического моделирования Electronics Workbench или Multisim, которые позволяют моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы большой степени сложности. В программах имеются библиотеки, включающие набор типовых электрических и электронных элементов. Параметры элементов можно изменять в широком диапазоне значений. Достаточный набор приборов позволяет производить измерения различных величин, задавать входные воздействия, строить графики. Одним из достоинств программы является вид измерительных приборов, приближенный к реальному. Результаты моделирования можно вывести на печать или импортировать в текстовый или графический редактор.

В настоящее время «Electronics Workbench» — это дочерняя компания, права на которую полностью принадлежат корпорации National Instruments Corporation [www.ni.com]. Штаб-квартира Electronics Workbench находится в канадском городе Торонто, офисы размещены более чем в 35 странах мира. Основные идеи, наработки и опыт специалистов компании были продолжены в программе-наследнике NI Multisim.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИДЕОСИГНАЛОВ

1.1. Цель работы

Изучение основных типов периодических сигналов, применяющихся в телекоммуникационных системах, и их спектральных характеристик.

1.2. Теоретические сведения

Для передачи информации используют некоторый материальный носитель — сигнал, согласованный с предоставленным каналом связи. **Сигнал** — это изменение физической величины со временем.

В современных телекоммуникационных системах используются разнообразные сигналы с различными свойствами. Классификацию

сигналов по типу математической модели можно представить следующим образом (рисунок 1.1):

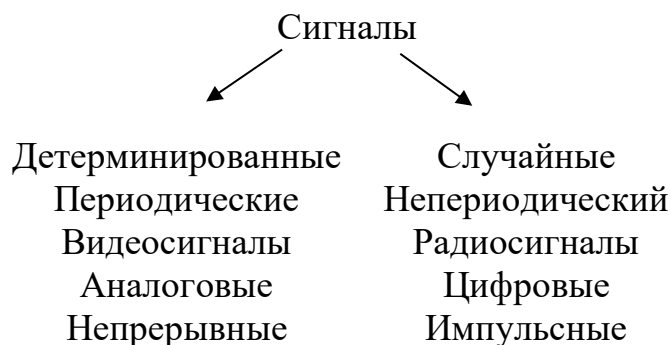


Рисунок 1.1 – Классификация сигналов

Сигнал, описывающий во времени непрерывно изменяющийся процесс, называется *аналоговым*. Сигнал, представляющий собой кратковременную последовательность конечной длительности, является *импульсным*.

Иногда удобно передавать только значения непрерывного сигнала (отсчеты или выборки), взятые в отдельные моменты времени. Такой квантованный по времени сигнал называется *дискретным*. Если же передавать не сами выборки в виде коротких импульсов, а их числовые значения, то сначала необходимо эти значения получить. Эта процедура в технике связи называется квантованием по уровню. Таким образом, сигнал, квантованный по времени и уровню, называется *цифровым*.

Если математическая модель позволяет точно предсказать и описать сигнал, то такой сигнал называется *детерминированным*. В случае невозможности точного описания и предсказания сигнала в любые моменты времени, сигнал называется *случайным* [1].

Высокочастотное модулированное колебание называется *радиосигналом*. Сигнал без высокочастотного заполнения является *видеосигналом*.

Если сигнал может быть описан функцией вида

$$s(t) = s(t + T) \quad (1.1)$$

где T – период, он называется *периодическим*. При невозможности такого представления, сигнал является *непериодическим*.

Термин «*дискретный*» или «*цифровой*» сигнал используется для обозначения сигнала, независимая переменная (чаще всего время) которого квантована, так что значения сигнала известны только в дискретные моменты времени.

В настоящей лабораторной работе исследуются аналоговые детерминированные периодические сигналы, примеры временных диаграмм которых изображены на рис. 1.1.

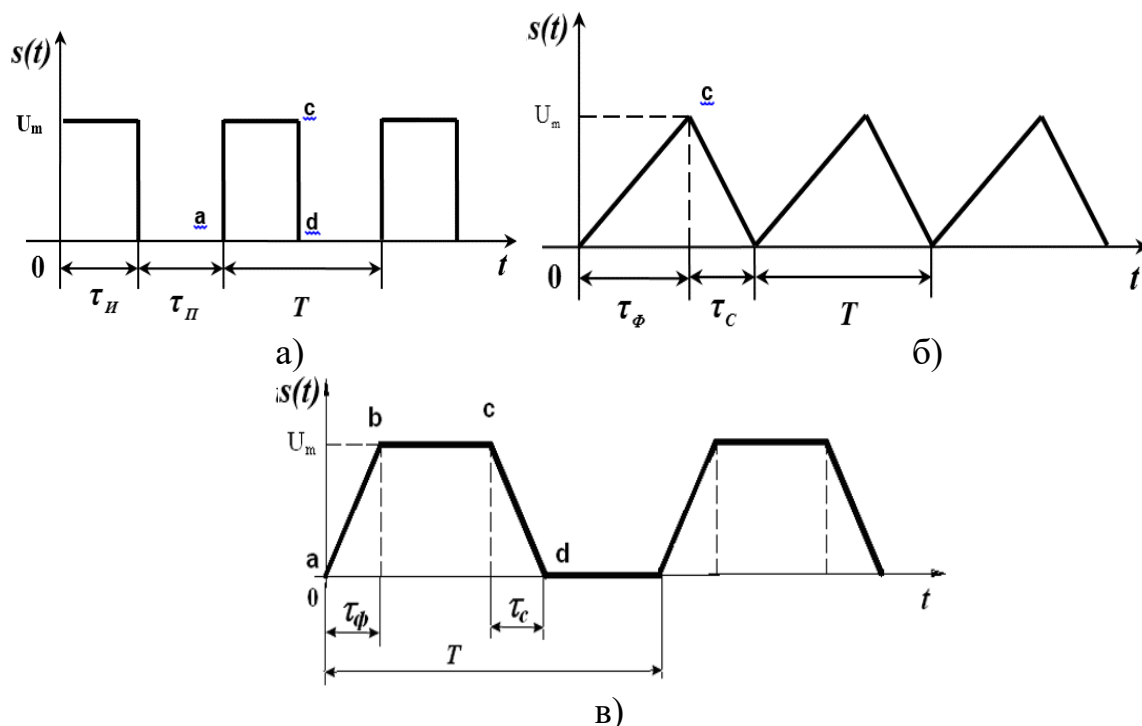


Рисунок 1.1 – Периодические несинусоидальные сигналы:
а) прямоугольное; б) пилообразное; в) трапецеидальное

Мгновенные значения периодических несинусоидальных сигналов могут быть представлены в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$s(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t), \quad (1.1)$$

где коэффициенты разложения

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) dt, \quad a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(k\omega_1 t) dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(k\omega_1 t) dt. \quad (1.2)$$

Импульсы, изображенные на рисунке 1.1, характеризуются периодом следования T , с, или частотой $f=1/T$, Гц, длительностью импульса τ_u , с; временем паузы t_n , с; длительностью фронта τ_ϕ , с и среза τ_c , с, (заднего фронта). Отношение $T/\tau_u=q$ называется скважностью, а обратная величина — $D= \tau_u / T$ — коэффициентом заполнения.

Часто необходимо оценить не только изменение сигнала во времени, но и его спектральный состав, т. е. из каких простых гармонических колебаний он состоит. В этих случаях прибегают к спектральному представлению сигнала, в основе которого лежит преобразование Фурье. Совокупность гармонических колебаний, на которые может быть разложен данный периодический несинусоидальный сигнал, называется *спектром сигнала*. Одним из представлений спектра сигнала служит диаграмма, называемая

амплитудно-частотным спектром. Амплитудно-частотный спектр для трапецеидального сигнала изображен на рисунке 1.2.

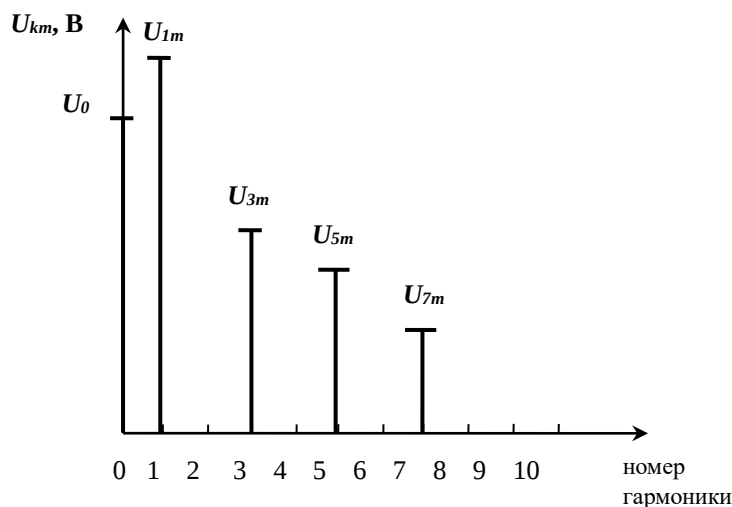


Рисунок 1.2 – Амплитудно-частотный спектр трапецеидального сигнала

В целом ряде практических задач передачи сигналов весьма существенное значение имеют энергетические характеристики сигнала.

Для периодических сигналов средняя мощность за период может быть записана как

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \quad (1.3)$$

или, используя тригонометрический ряд Фурье,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t) \right)^2 (t) dt. \quad (1.4)$$

После преобразования получается соотношение

$$P = \left(\frac{a_0}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) = \left(\frac{a_0}{2} \right)^2 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k^2, \quad (1.5)$$

называемое *равенством Парсеваля*, из которого следует, что средняя мощность периодического колебания равна сумме средних мощностей составляющих его гармоник. Зависимость $P=f(\omega)$ называется *спектром мощности периодического колебания*.

Важной практической характеристикой является ширина спектра, определяемая как полоса частот в пределах которой сосредоточена большая часть средней мощности (энергии) колебаний. *Практической шириной спектра* ΔF сигнала называется полоса, в которой содержится 99 % полной энергии сигнала (по определению Международного Союза Телекоммуникаций **ITU** (*International Telecommunications Unit*)). Не

учитываемый 1% энергии образует так называемое внеполосное излучение и создает помехи для соседних каналов связи.

Для периодических сигналов практическую ширину спектра можно оценить, используя равенство Парсеваля. Для этого необходимо суммировать мощности гармоник P_k в ряде (1.5) до тех пор, пока, сумма не превысит значений $0,95 \div 0,99$ от величины мощности в (1.3). Найденный таким образом наибольший номер $k_{\max}$ гармоники, учтенной в сумме, позволяет вычислить практическую ширину спектра как

$$\Delta F = F_1 \cdot k_{\max}, \quad (1.6)$$

где F_1 – интервал частот, равный частоте 1-ой гармоники.

Например, пусть прямоугольный сигнал имеет следующие параметры (см. рис. 1.1): амплитуда $U_m=1\text{В}$; период $T=10\text{мс}$; время импульса $\tau_u=4\text{мс}$; амплитуды гармоник в спектре: $U_0=0,4\text{В}$; $U_1=0,58\text{В}$; $U_2=0,18\text{В}$; $U_3=0,4\text{В}$.

Вычисляем среднюю мощность по формуле (1.3)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt = \frac{1}{0,01} \int_0^{0,004} 1^2(t) dt = 0,4\text{Вт}.$$

Откуда $0,95P=0,95 \cdot 0,4=0,38\text{Вт}$.

Суммируем мощности гармоник по формуле (1.5)

$$P = \left(\frac{a_0}{2}\right)^2 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k^2 = \left(\frac{0,4}{2}\right)^2 + (0,58)^2 + (0,18)^2 = 0,408 > 0,38\text{Вт}.$$

Делаем вывод, что $k_{\max} = 2$ и практическая ширина модулирующего сигнала равна

$$\Delta F = (1/0,01) \cdot 2 = 200 \text{ Гц}.$$

1.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить порядок работы в среде **Electronics Workbench**.
2. Провести моделирование прямоугольного периодического сигнала.
- 2.1. Составить схему, изображенную на рисунке 1.3.

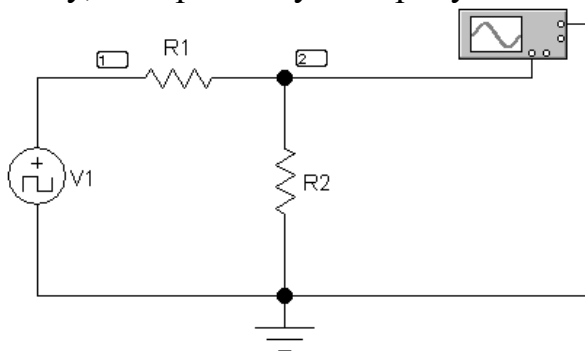


Рисунок 1.3 – Схема моделирования прямоугольных импульсов

2.2. Установить параметры генератора прямоугольных импульсов и сопротивлений согласно варианту, указанному в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Варианты параметров для прямоугольных импульсов

№ варианта	Амплитуда, В	Частота, Гц	Коэффициент заполнения D (Duty cycle), %	Сопротивление R1=R2, Ом
1	1	1000	10	100
2	2	2000	15	200
3	3	3000	20	300
4	4	4000	10	400
5	5	5000	15	500
6	6	6000	20	600
7	7	7000	10	700
8	8	8000	15	800

2.3. Провести моделирование прямоугольной периодической последовательности импульсов. Получить на осциллографе график данного сигнала. По графику, используя маркеры, определить период, длительность импульса, амплитуду, скважность сигнала. Экспериментальные данные занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Данные эксперимента 1

Вид сигнала	Амплитуда, В	Период, с	Длительность импульса, с	Длительность паузы, с	Скважность
Прямоугольный					
Треугольный					
Несимметричный треугольный					
Синусоидальный					

2.4. Получить амплитудный спектр прямоугольного сигнала, используя анализатор Фурье, подключив его к точке 2 (установить в настройках анализатора точку 2). Для получения наглядного представления спектра установить число гармоник в пределах 30÷60. Маркерами измерить, постоянную составляющую, амплитуды первых трех гармоник, практическую ширину спектра.

Экспериментальные данные занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Данные эксперимента 2

Вид сигнала	Постоянная составляющая, В	Амплитуда первой гармоники, В		Амплитуда второй гармоники, В		Амплитуда третьей гармоники, В		Практическая ширина спектра, Гц
		амплитуда, В	частота, Гц	амплитуда, В	частота, Гц	амплитуда, В	частота, Гц	
Прямоугольный								
Треугольный								
Несимметричный треугольный								
Синусоидальный								

3. Провести моделирование треугольного периодического сигнала.

3.1. Заменить в схеме на рисунке 1.3 генератор прямоугольных импульсов на функциональный генератор (рисунок 1.4). Выбрать нажатием соответствующей кнопки режим треугольных импульсов.

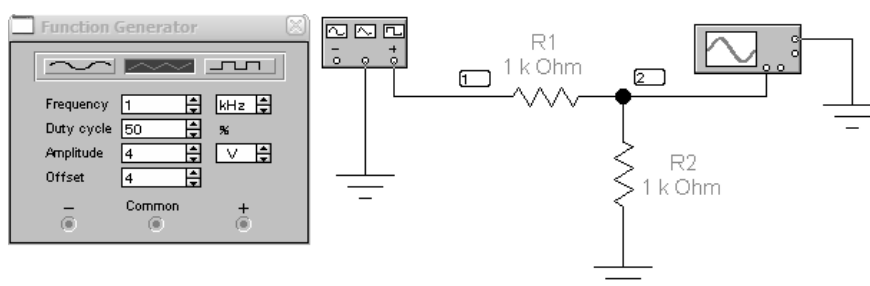


Рисунок 1.4 – Схема моделирования треугольных импульсов

3.2. Установить параметры генератора и сопротивлений согласно варианту, указанному в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Варианты параметров для симметричных треугольных импульсов

№ варианта	Амплитуда, В	Частота, Гц	Коэффициент заполнения (Duty cycle), %	Сопротивление, Ом
1	1	1000	50	100
2	2	2000	50	200
3	3	3000	50	300
4	4	4000	50	400
5	5	5000	50	500
6	6	6000	50	600
7	7	7000	50	700

8	8	8000	50	800
---	---	------	----	-----

3.3. Провести моделирование симметричной треугольной периодической последовательности импульсов. Получить осциллограмму данного сигнала. По графику, используя маркеры, определить период, длительность импульса, амплитуду, скважность сигнала. Экспериментальные данные занести в таблицу 1.2.

3.4. Получить амплитудный спектр симметричного треугольного сигнала, используя анализатор Фурье. Для получения наглядного представления спектра установить число гармоник в пределах $30 \div 60$. Маркерами измерить, постоянную составляющую, амплитуды первых трех гармоник, практическую ширину спектра.

Экспериментальные данные занести в таблицу 1.3.

4. Провести моделирование несимметричного треугольного периодического сигнала.

4.1. Установить параметры генератора и сопротивлений в схеме на рисунке 1.3 согласно варианту, указанному в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Варианты параметров для несимметричных треугольных импульсов

№ варианта	Амплитуда, В	Частота, Гц	Коэффициент заполнения (Duty cycle), %	Сопротивление, Ом
1	1	1000	10	100
2	2	2000	15	200
3	3	3000	20	300
4	4	4000	10	400
5	5	5000	15	500
6	6	6000	20	600
7	7	7000	10	700
8	8	8000	15	800

4.2. Провести моделирование несимметричной треугольной периодической последовательности импульсов. Получить на осциллографе график данного сигнала. По графику, используя маркеры, определить период, длительность импульса, амплитуду, скважность сигнала. Экспериментальные данные занести в таблицу 1.2.

4.3. Получить амплитудный спектр несимметричного треугольного сигнала, используя анализатор Фурье. Для получения наглядного представления спектра установить число гармоник в пределах $30 \div 60$. Маркерами измерить, постоянную составляющую, амплитуды первых трех гармоник, практическую ширину спектра.

Экспериментальные данные занести в таблицу 1.3.

5. Провести моделирование последовательности синусоидальных импульсов.

5.1. Составить схему, изображенную на рисунке 1.5. Установить параметры элементов согласно варианту, указанному в таблице 1.6.

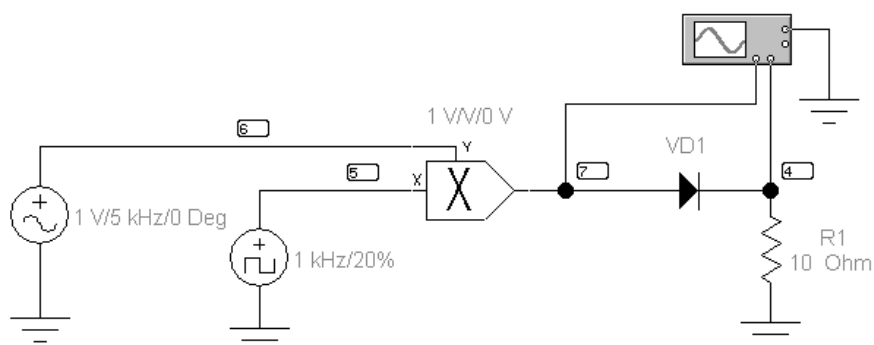


Рисунок 1.5 – Схема моделирования синусоидальных импульсов

Таблица 1.6 – Варианты параметров для синусоидальных импульсов

№ варианта	Генератор синусоидальных сигналов			Генератор прямоугольных сигналов			Сопротивление, Ом
	Амплитуда, В	Частота, кГц	Начальная фаза, градус	Амплитуда, В	Частота, кГц	Коэффициент заполнения (Duty cycle), %	
1	1	5	0	1	1	20	10
2	2	5	0	2	1	20	10
3	3	5	0	3	1	20	10
4	4	5	0	4	1	20	10
5	5	5	0	5	1	20	10
6	6	5	0	6	1	20	10
7	7	5	0	7	1	20	10
8	8	5	0	8	1	20	10

5.2. Провести моделирование несимметричной треугольной периодической последовательности импульсов. Получить на осциллографе график данного сигнала. По графику, используя маркеры, определить период, длительность импульса, амплитуду, скважность сигнала. Экспериментальные данные занести в таблицу 1.2.

5.3. Получить амплитудный спектр несимметричного треугольного сигнала, используя анализатор Фурье, подключив его к точке 4. Для получения наглядного представления спектра установить число гармоник в пределах 30÷60. Маркерами измерить, постоянную составляющую, амплитуды первых трех гармоник, практическую ширину спектра.

Экспериментальные данные занести в таблицу 1.3.

6. Для каждого типа сигнала, используя осциллограмму, записать математическую модель.

7. Для каждого типа сигнала рассчитать амплитуды первых трех гармоник спектра по формуле ряда Фурье. Результаты вычислений записать в таблицу 1.7. Сравнить расчет с полученными экспериментальными данными.

8. Для каждого типа сигнала рассчитать среднюю мощность P всего сигнала за период по формуле (1.3), оценить практическую ширину спектра по формуле (1.6), выбрав гармоники главного лепестка спектра. Определить мощность P_{Δ} сигнала, приходящуюся на главный лепесток спектра, используя формулу (1.4). Определить долю мощности, приходящуюся на главный лепесток, по формуле P_{Δ} / P . Сравнить расчет с полученными экспериментальными данными.

Таблица 1.7 – Результаты вычислений

Вид сигнала	Постоянная составляющая U_0 , В	Амплитуда первой гармоники U_{m1} , В	Амплитуда второй гармоники U_{m2} , В	Амплитуда третьей гармоники U_{m3} , В	Практическая ширина спектра ΔF , Гц	Доля мощности на практической ширине спектра P_{Δ} / P , %	Средняя мощность P всего сигнала за период, Вт
Прямоугольный							
Треугольный							
Несимметричный треугольный							
Синусоидальный							

1.4. Содержание отчета

1. Схема моделирования для каждого типа периодической последовательности.

2. Осциллограммы сигнала для каждого типа периодической последовательности.

3. Амплитудные спектры для каждого типа периодической последовательности.

4. Расчет постоянной составляющей и первых трех гармоник спектра, практической ширины спектра и средней мощности каждого исследованного сигнала.

1.5. Контрольные вопросы

1. Что понимается под термином «видеосигнал»?

2. Приведите известное вам определение электрического импульса.
3. Назовите основные характеристики периодических последовательностей импульсов.
4. Поясните, каким образом можно получить математическую модель периодического сигнала, заданного графически.
5. Приведите определение амплитудного спектра периодического сигнала.
6. Запишите тригонометрический ряд Фурье в общем виде.
7. Получите разложение в тригонометрический ряд Фурье прямоугольной последовательности импульсов, используя ее математическую модель.
8. Получите разложение в тригонометрический ряд Фурье треугольной последовательности импульсов, используя ее математическую модель.
9. Приведите энергетические характеристики аналоговых сигналов.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ С ПОЛОСОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

2.1. Цель работы

Изучить амплитудную и частотную модуляцию аналоговых сигналов. Получить навыки моделирования радиосигналов.

2.2. Теоретические сведения

Полосовая модуляция используется для передачи сигналов радиочастотного диапазона (от 100 кГц до порядка ГГц). При этом видеосигнал (низкочастотный сигнал) сдвигается несущей волной (или просто несущей) на более высокую частоту. Для радиопередачи на нужное расстояние несущая преобразуется в электромагнитное поле. Передача электромагнитного поля через пространство выполняется с помощью антенн. Необходимость несущей диктуется ограниченными размерами антенны. В качестве несущей обычно рассматривается гармоническая функция

$$s_0(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.1)$$

Полосовая модуляция — это процесс преобразования информационного сигнала в синусоидальный сигнал. В общем случае полосовой радиосигнал, несущий в себе информацию, можно записать

$$a(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) = A(t) \cos \psi(t). \quad (2.2)$$

Синусоиды могут отличаться по амплитуде, фазе и частоте. Таким образом, *полосовую модуляцию* можно определить, как процесс варьирования амплитуды, фазы или частоты (или их комбинаций) радиочастотной несущей согласно передаваемой информации. Отсюда получают *три основных вида модуляции: амплитудную, фазовую и*

частотную (а также их комбинации). Фазовую и частотную модуляцию иногда объединяют под общим термином «угловая модуляция».

Амплитудная модуляция (АМ) является наиболее простым способом заложения информации в высокочастотное колебание. При АМ огибающая амплитуд несущего колебания изменяется по закону, совпадающему с законом изменения передаваемого сообщения, частота же и начальная фаза колебания поддерживаются неизменными. Поэтому для амплитудно-модулированного радиосигнала выражение (2.2) можно заменить следующим:

$$a(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.3)$$

Характер огибающей $A(t)$ определяется видом передаваемого сообщения.

Если выбрать в качестве модулирующей (информационной) функции гармоническую

$$s(t) = S_0 \cos(\Omega t + \gamma), \quad (2.4)$$

то такая модуляция называется *тональной*. В этом случае мгновенное значение модулированного сигнала запишется в виде:

$$a(t) = A_0 [1 + M \cos(\Omega t + \gamma)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2.5)$$

где A_0 — амплитуда несущей, Ω — частота модуляции; γ — начальная фаза огибающей. Параметр

$$M = \frac{\Delta A_m}{A_0} \quad (2.6)$$

называется *коэффициентом модуляции* и показывает отношение изменения амплитуды несущего колебания к самой амплитуде, т. е. эффективность модуляции (рисунок 2.1).

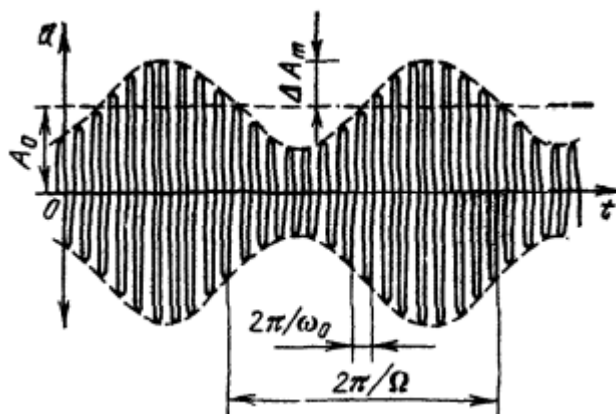


Рисунок 2.1 — Тональная модуляция

При больших уровнях модулирующего колебания возникает явление, называемое перемодуляцией и характеризующееся значением $M > 1$. В этих случаях закон изменения амплитуды радиосигнала не соответствует закону передаваемого сообщения. Следовательно, коэффициент модуляции M всегда должен быть меньше 1.

После преобразования (2.5) путем применения формулы произведения косинусов получим:

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{A_0 M}{2} \cos((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \gamma) + \frac{A_0 M}{2} \cos((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \gamma). \quad (2.7)$$

Формула (2.7) устанавливает спектральный состав однотонового АМ-сигнала (рис. 2.2). Здесь принята следующая терминология: ω_0 - несущая частота, $\omega_0 + \Omega$ - верхняя боковая частота, $\omega_0 - \Omega$ - нижняя боковая частота. Следует обратить внимание на равенство амплитуд верхнего и нижнего боковых колебаний, а также на симметрию расположения этих спектральных составляющих относительно несущего колебания.

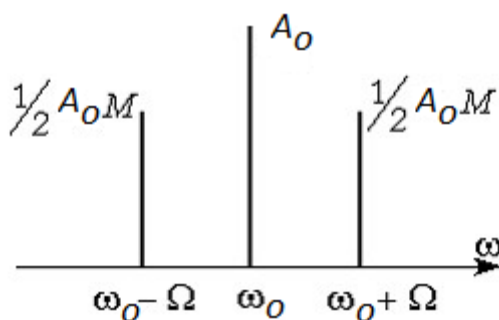


Рисунок 2.2 — Спектр однотонового АМ-сигнала

Реальный первичный сигнал имеет сложный спектр. Поэтому аналитическое выражение АМ-сигнала в данном случае будет иметь вид

$$a(t) = A_0 \left[1 + \sum_{i=1}^k M_i \cos(\Omega_i t + \gamma_i) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2.8)$$

где M_i — коэффициент модуляции для i -й гармоники первичного сигнала. Набор этих коэффициентов называют парциальными и определяют по формуле

$$M_i = \frac{2U_{mi}}{U_{m0}}, \quad (2.9)$$

где U_{m0} — амплитуда несущего колебания (центральной составляющей спектра), U_{mi} — амплитуда боковой составляющей спектра (левой или правой)

В спектре сложномодулированного (отличного от синусоиды) АМ-сигнала, помимо несущего колебания, будут содержаться группы верхних и нижних боковых колебаний. Спектр верхних боковых колебаний является масштабной копией спектра модулирующего сигнала, сдвинутой в область высоких частот на величину ω_0 . Спектр нижних боковых колебаний располагается зеркально относительно несущей частоты ω_0 и также повторяет спектральную диаграмму модулирующего сигнала. Ширина спектра АМ-сигнала равна удвоенному значению наивысшей частоты в спектре модулирующего низкочастотного сигнала.

Если записать выражение для несущей в виде:

$$s_0(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A_0 \cos \psi(t), \quad (2.10)$$

где $\psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$ — полная фаза сигнала, то отсюда вытекает определение *угловой модуляции* как вида гармонической модуляции, при которой под воздействием управляющего сигнала изменяется параметр $\psi(t)$ модулируемого колебания, а его амплитуда при этом сохраняется неизменной. Такая модуляция реализуется в двух вариантах: как фазовая и как частотная. В первом варианте изменениям подвергается фаза несущего колебания, а во втором — по закону управляющего сигнала изменяется частота сигнала-переносчика информации.

Если по-прежнему считать модулирующим (информационным) сигналом гармоническую функцию (2.4), то выражение для фазомодулированного (ФМ) сигнала запишется следующим образом:

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + m \cos \Omega t), \quad (2.11)$$

где m — *индекс модуляции*, определяющий максимальное отклонение фазы модулированного колебания от фазы немодулированного колебания. Индекс модуляции пропорционален амплитуде S_0 модулирующего сигнала и играет такую же роль, как и коэффициент модуляции в выражениях для АМ-сигналов.

Выражение для частотно-модулированного (ЧМ) сигнала в случае, когда информационный сигнал — это косинусоида с нулевой начальной фазой $s(t) = S_0 \cos \Omega t$, будет иметь вид

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega_{\text{ЧМ}}}{\Omega} \sin \Omega t). \quad (2.12)$$

Здесь слагаемое $\frac{\Delta\omega_{\text{ЧМ}}}{\Omega} \sin \Omega t$ характеризует изменения мгновенной фазы в процессе частотной модуляции. Следовательно, ЧМ-сигнал можно отождествить с ФМ-сигналом, у которого индекс модуляции $m = \frac{\Delta\omega_{\text{ЧМ}}}{\Omega}$.

Приращение $\Delta\omega_{\text{ЧМ}}$ называется *девиацией частоты*.

Частотно-модулированный изображен сигнал на рис. 2.3.

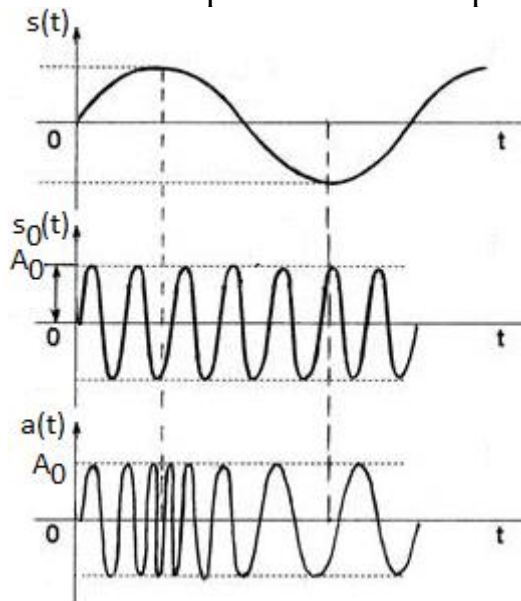


Рисунок 2.3 – Частотная модуляция

Преобразуем (2.12) по формуле косинуса суммы аргументов:

$$a(t) = A_0[\cos(\omega_0 t)\cos(m\sin\Omega t) - \sin(\omega_0 t)\sin(m\sin\Omega t)]. \quad (2.13)$$

Применим для выражений $\cos(m\sin\Omega t)$ и $\sin(m\sin\Omega t)$ преобразования по функциям Бесселя [2]:

$$\left. \begin{aligned} \cos(m\sin\Omega t) &= J_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m) \cos 2n\Omega t, \\ \sin(m\sin\Omega t) &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(m) \cos(2n-1)\Omega t, \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

где J_k — функции Бесселя k -го порядка.

Тогда выражение (2.13) запишется в виде

$$a(t) = A_0 \left[J_0(m) \cos(\omega_0 t) + J_1(m) \cos((\omega_0 + \Omega)t) - J_1(m) \cos((\omega_0 - \Omega)t) + \right. \\ \left. + J_2(m) \cos((\omega_0 + 2\Omega)t) - J_2(m) \cos((\omega_0 - 2\Omega)t) + \right. \\ \left. + J_3(m) \cos((\omega_0 + 3\Omega)t) - J_3(m) \cos((\omega_0 - 3\Omega)t) + \dots \right] \quad (2.15)$$

Из (2.15) видно, что частотно-модулированный сигнал имеет дискретный спектр (рис. 2.4) с гармониками на частотах $(\omega_0 \pm n\Omega)$, где $n=1, 2, 3, 4, 5 \dots$

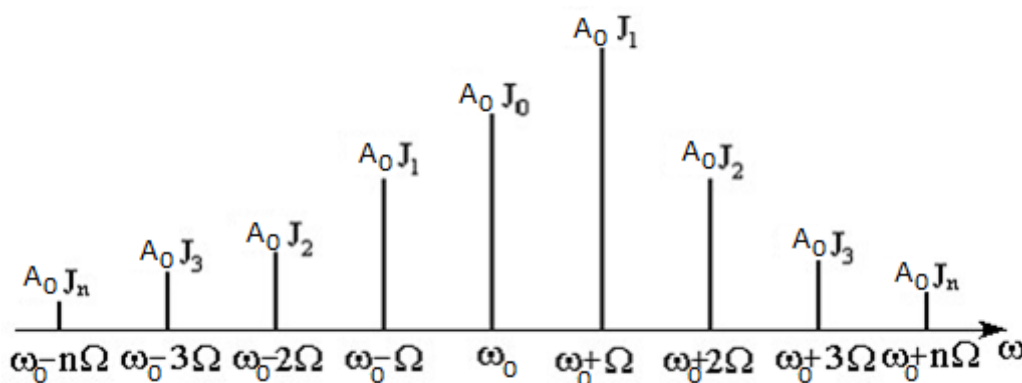


Рисунок 2.4 – Спектр частотно-модулированного сигнала

Вид спектра модулированного колебания зависит от индекса частотной модуляции m , теоретически спектр бесконечен, но на практике он ограничивается двумя - тремя составляющими, так как функции Бесселя высших порядков интенсивно убывают.

В теории функций Бесселя доказывается, что функции с положительными и отрицательными индексами связаны между собой соотношением:

$$J_{-k}(m) = (-1)^k J_k(m). \quad (2.16)$$

Поэтому начальные фазы боковых колебаний с частотами $(\omega_0 + k\Omega)$ и $(\omega_0 - k\Omega)$ совпадают, если k — чётное число, и отличаются на 180°

градусов, если k — нечётное.

С ростом индекса модуляции расширяется полоса частот, занимаемая сигналом. Обычно полагают, что допустимо пренебречь всеми спектральными составляющими с номерами $k > m + 1$. Отсюда следует оценка практической ширины спектра сигнала с угловой модуляцией по формуле

$$\Delta F_{\text{практ}} = 2(m + 1)\Omega. \quad (2.17)$$

Как правило, реальные ЧМ- и ФМ-сигналы характеризуются условием $m \gg 1$. В этом случае

$$\Delta F_{\text{практ}} \approx 2m\Omega = 2\Delta\omega_{\text{ЧМ}}. \quad (2.18)$$

Таким образом, сигнал с угловой модуляцией занимает полосу частот, приблизительно равную удвоенной девиации частоты.

Для передачи АМ-сигнала требуется полоса частот, равная 2Ω , то есть в m раз меньшая. Большая широкополосность ЧМ- и ФМ-сигналов обуславливает их гораздо более высокую помехоустойчивость по сравнению с АМ-сигналами.

Очевидно, частотно-модулированное колебание является в то же время и фазомодулированным. Поэтому оба вида модуляции иногда называют угловой модуляцией. Однако при частотной модуляции изменение частоты, а не фазы совпадает с законом изменения модулирующего сигнала. Кроме того, при частотной модуляции индекс модуляции обратно пропорционален модулирующей частоте, тогда как при фазовой модуляции такой зависимости нет.

Если колебание промодулировано гармоническим сигналом, отличить частотную модуляцию от фазовой можно, только сравнив изменения мгновенной фазы модулированного колебания с законом изменения модулирующего напряжения.

Итак, наряду с отмеченным сходством частотная и фазовая модуляции имеют следующие принципиальные различия:

- при фазовой модуляции индекс m пропорционален амплитуде низкочастотного колебания и не зависит от частоты Ω , а девиация фазы $\Delta\omega_{\text{ФМ}}$, наоборот, связана с частотой модулирующего сигнала прямой пропорциональной зависимостью;

- при частотной модуляции девиация частоты $\Delta\omega_{\text{ЧМ}}$ зависит только от амплитуды модулирующего колебания S_0 и не связана с его частотой. Индекс модуляции в этом случае обратно пропорционален низкой частоте управляющего сигнала Ω .

Различия между частотной и фазовой модуляциями проявляются наиболее заметно, если в качестве управляющего используется сложный полосовой сигнал с большим числом спектральных составляющих на разных частотах.

2.3. Порядок выполнения работы

1. Провести моделирование амплитудно-модулированного сигнала.

1.1. Для изучения АМ-сигналов создать схему, изображенную на рис. 2.5.

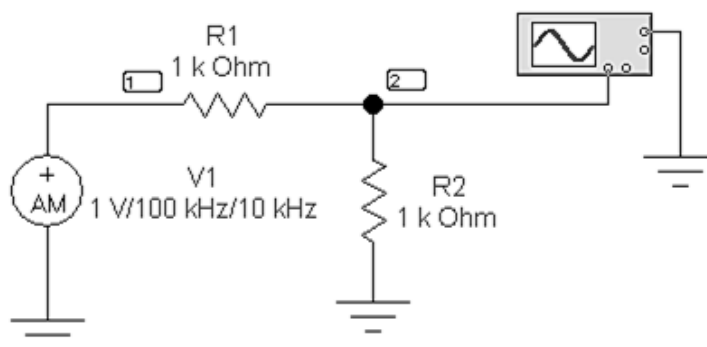


Рисунок 2.5 – Схема моделирования АМ-сигнала

1.2. Установить параметры генератора и элементов согласно схеме и варианту из таблицы 2.1.

Таблица 2.1 - Варианты параметров для АМ-сигнала

№ варианта	Генератор АМ-сигналов			Индекс модуляции (М)	
	Амплитуда несущей (VC), В	Частота несущей (FC), кГц	Частота модуляции (FM), кГц	Опыт №1	Опыт №2
1	1	100	10	1	0,5
2	2	50	5	1	0,5
3	3	120	6	1	0,5
4	4	150	15	1	0,5
5	1	160	20	1	0,5
6	2	200	10	1	0,5
7	3	250	25	1	0,5
8	4	20	2	1	0,5

1.3. Установить в окне параметров генератора АМ индекс модуляции, равный 1.

1.4. Получить осциллограмму сигнала и его спектр. Для анализатора спектра установить основную частоту, равную частоте модуляции, число гармоник 30.

1.5. Измерить с помощью маркеров на осциллограмме соответствующие амплитуды и рассчитать коэффициент модуляции по формуле (2.6) или, используя соотношение

$$M = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}.$$

Сравнить значения коэффициента (индекса) модуляции, полученные экспериментально и установленные в генераторе. Результаты расчета по осциллограмме записать в таблицу 2.2.

1.6. По спектрограмме определить амплитуды составляющих спектра. Значения амплитуд записать в таблицу 2.2.

1.7. Используя параметры генератора (табл. 2.1), записать выражения для АМ-сигнала по формулам (2.5) и (2.7) (начальные фазы сигналов считать нулевыми). По выражению 2.7 определить теоретические амплитуды спектра и записать результаты расчетов в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты экспериментов

Коэффициент модуляции		Амплитуды гармоник спектра, В					
Установка	Расчет по осциллограмме	$\omega_0 - \Omega$		ω_0		$\omega_0 + \Omega$	
		Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
1							
0,5							

1.8. С помощью полученных выражений построить графики сигнала в любом математическом приложении. Сравнить полученные результаты с экспериментом.

2. Провести моделирование сложного АМ-сигнала.

2.1. Создать схему, изображенную на рис. 2.6. Сумматор и мультиплексор (перемножитель) DA2 находятся в библиотеке «Control», параметры которых менять не следует.

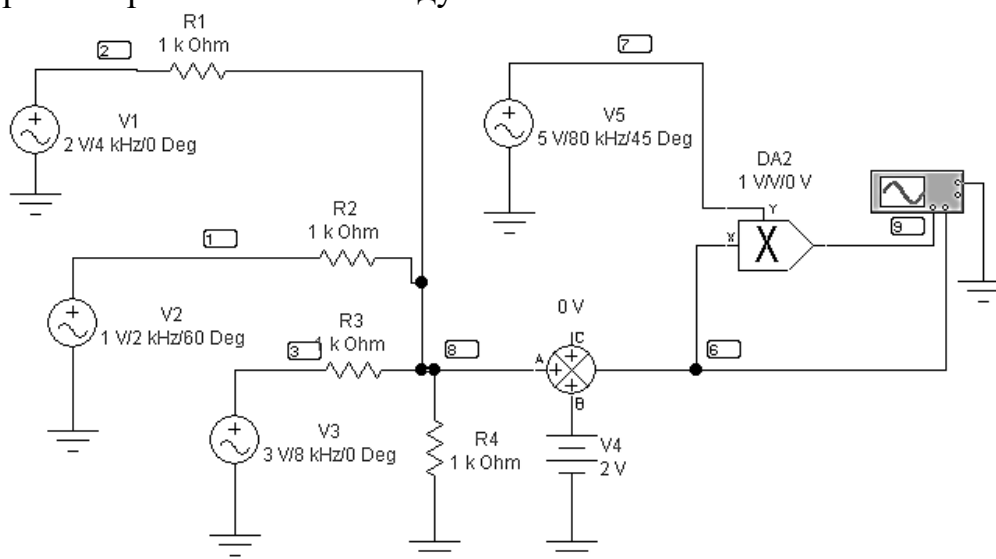


Рисунок 2.6 – Схема моделирования сложного АМ-сигнала

2.2. Установить параметры элементов схемы, приведенные в таблице 2.3. Начальные фазы источников V1, V2, V3 установить соответственно 0, 60, 0 градусов. Параметры источника V5 (несущая) установить, как указано на рисунке 2.6.

Таблица 2.3 – Варианты параметров информационного сигнала

№ варианта	Источник V1		Источник V2		Источник V3		Источник V4
	Амплитуда, В	Частота, кГц	Амплитуда, В	Частота, кГц	Амплитуда, В	Частота, кГц	Напряжение, В
1	2	4	1	2	3	8	2
2	2	8	3	4	2	16	2
3	4	2	3	1	2	4	1
4	2	6	3	3	3	12	2
5	1	12	2	6	1	24	3
6	3	5	2	3	1	15	2
7	3	10	4	6	1	30	1
8	1	7	4	3	4	14	4

2.3. Получить осциллограмму сигналов.

2.4. Получить амплитудный спектр сложного АМ-сигнала. Установить параметры анализатора спектра: основная частота 1 кГц, число гармоник 120. С помощью маркеров определить парциальные коэффициенты модуляции, используя формулу (2.9).

2.5. Записать аналитическое выражение для АМ-сигнала по формуле (2.8) и построить график данной функции, сравнив его с полученной в ходе эксперимента осциллограммой.

3. Провести моделирование частотно-модулированного сигнала.

3.1. Для изучения ЧМ-сигналов создать схему на базе генератора FM, изображенную на рис. 2.7.

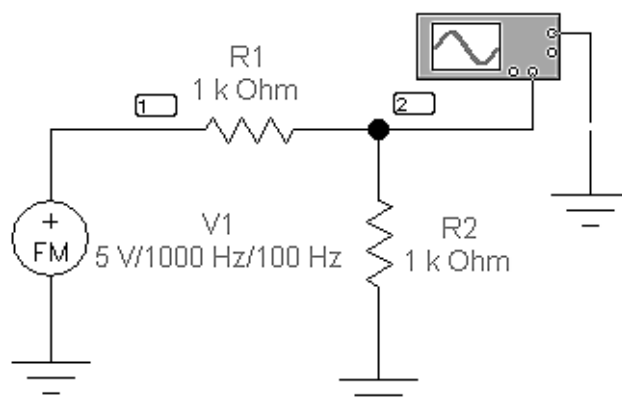


Рисунок 2.7 – Схема моделирования ЧМ-сигнала

3.2. Установить параметры FM-генератора и элементов согласно схеме и варианту из таблицы 2.4.

Таблица 2.4 - Варианты параметров для ЧМ-сигнала

№ варианта	Генератор ЧМ-сигналов							Индекс модуляции (М)		
	Амплитуда несущей VC, В	Частота несущей (FC), кГц			Частота модуляции (FM), кГц					
		Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3
1	2	1	100	100	0,1	10	10	0,1	1	2,4
2	3	1,5	150	150	0,15	15	15	0,1	1	2,4
3	4	2	200	200	0,2	20	20	0,1	1	2,4
4	5	2,5	250	250	0,25	25	25	0,1	1	2,4
5	2	3	300	300	0,3	30	30	0,1	1	2,4
6	3	3,5	350	350	0,35	35	35	0,1	1	2,4
7	4	4	400	400	0,4	40	40	0,1	1	2,4
8	5	4,5	450	450	0,45	45	45	0,1	1	2,4

3.3. Получить осциллограмму и спектр ЧМ-сигнала при трех значениях индекса модуляции (см. табл. 2.4). Основную частоту анализатора спектра установить равной частоте модуляции.

3.4. Оценить практическую ширину спектра сигнала по формуле (2.17) для каждого из опытов.

3.5. Записать аналитическое выражение для ЧМ-сигнала по формуле (2.12), где $\frac{\Delta\omega_{\text{ЧМ}}}{\Omega} = m$ — индекс модуляции, и построить графики данной функции, сравнив их с полученными в ходе экспериментов осциллограммами.

3.6. Сделать вывод о влиянии коэффициента частотной модуляции на спектр сигнала.

2.4. Содержание отчета

1. Схема моделирования АМ-сигнала.
2. Осциллограммы АМ-сигнала для двух значений индекса амплитудной модуляции.
3. Амплитудные спектры АМ-сигнала для двух значений индекса амплитудной модуляции.
4. Выражения и графики для АМ-сигнала по формулам (2.5) и (2.7).
5. Заполненная таблица 2.2 с данными расчетов и экспериментов.
6. Схема моделирования сложного АМ-сигнала.
7. Осциллограмма и спектр сложного АМ-сигнала.
8. Выражение и графики для АМ-сигнала по формуле (2.8).
9. Парциальные коэффициенты модуляции по формуле (2.9).
10. Схема моделирования ЧМ-сигнала.
11. Осциллограммы и спектры ЧМ-сигнала для трех значений индекса частотной модуляции.
12. Оценка практической ширины спектра по формуле (2.17).
13. Выражения и графики для ЧМ-сигнала по формулам (2.12).

2.5. Контрольные вопросы

1. Приведите функциональную схему типовой системы передачи информации.
2. Поясните термины «видеосигнал», «радиосигнал».
3. Поясните, для чего в системе передачи информации вводится модуляция.
4. Поясните, в чем отличие аналоговой и цифровой модуляции.
5. В чем заключается процесс амплитудной модуляции?
6. В чем заключается процесс частотной (фазовой) модуляции?
7. Запишите в общем виде выражение для простейшего (однотонального) АМ-сигнала, промодулировав несущую гармоническим сигналом.
8. Запишите в общем виде выражение для ЧМ-сигнала.
9. Что такое коэффициент модуляции?
10. Как влияет величина коэффициента модуляции на спектральный состав АМ-, ЧМ-сигнала.
11. Укажите преимущества и недостатки амплитудной и частотной модуляции.
12. Дайте определение спектральной плотности сигнала.
13. В чем отличие спектрального отображения периодических и непериодических непрерывных (аналоговых) сигналов?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

3.1. Цель работы

Изучить условия дискретизации и восстановления аналоговых сигналов. Получить навыки моделирования и измерения характеристик дискретного сигнала и восстанавливающего фильтра нижних частот.

3.2. Теоретические сведения

Если информация является аналоговой, ее знаковое кодирование (как в случае текстовой информации) невозможно; вначале информацию следует перевести в цифровой формат. Процесс преобразования аналогового сигнала в форму, совместимую с цифровой системой связи, начинается с *дискретизации (или квантования) сигнала*.

В процессе дискретизации поступающий аналоговый сигнал преобразуется в последовательность выборок (отсчетов) (sample). Квантование по времени — это замена непрерывной функции $u(t)$, заданной на интервале $0 \leq t \leq T$ последовательностью ее мгновенных значений-отсчетов $u_1 = u(t_1)$, $u_2 = u(t_2)$, ..., $u_n = u(t_n)$, которые измеряются в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_n$, отстоящие один от другого на величину $\Delta t = t_i - t_{i-1} = \frac{T}{n}$, называемую *шагом квантования по времени* (рис. 3.1).

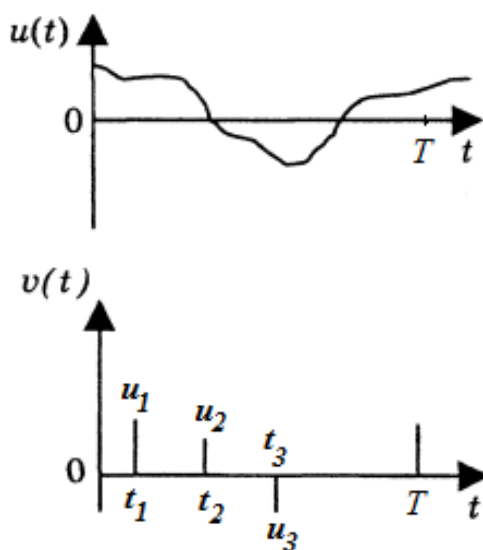


Рисунок 3.1 — Квантование по времени

Результатом процесса дискретизации является сигнал в амплитудно-импульсной модуляции (pulse-amplitude modulation — PAM). Такое название возникло потому, что выходящий сигнал можно описать как последовательность импульсов с амплитудами, определяемыми выборками

входного сигнала. Аналоговый сигнал можно восстановить (с определенной степенью точности) из РАМ-модулированного сигнала, пропустив последний через фильтр нижних частот.

Ответ на вопрос, насколько точно отфильтрованный модулированный сигнал совпадает с исходным аналоговым сигналом, дает теорема Котельникова (теорема отсчетов, теорема Котельникова-Шеннона) о выборках (sampling theorem), которая говорит также о том, каков должен быть шаг квантования по времени или другими словами частота дискретизации.

Теорема Котельникова 1 (теорема отсчетов): Любую функцию (сигнал) $s(t)$, состоящую из частот от 0 до F_B , можно непрерывно передавать с любой точностью с помощью чисел, следующих друг за другом через интервалы времени

$$\Delta t \leq \frac{1}{2F_B} \text{ секунд.} \quad (3.1)$$

(Любая функция, имеющая спектр, заключенный в ограниченной полосе частот 0 до F_B , полностью определяется последовательностью отсчетов, взятых с шагом $\Delta t \leq \frac{1}{2F_B}$ секунд).

Величина, обратная шагу квантования, $f_k = 2F_B$, называется *частотой дискретизации* или *частотой Найквиста*. В этом случае аналогом теоремы Котельникова для частоты служит *критерий Найквиста*:

$$f_k \geq 2F_B. \quad (3.2)$$

Теорема Котельникова может быть представлена и в другой редакции: аналоговый сигнал может быть полностью восстановлен из дискретной последовательности отсчетов, если ее пропустить через идеальный фильтр нижних частот, граничная частота которого $\omega_{\Gamma P} \geq 2\pi F_B$. Импульсная характеристика такого фильтра совпадает с функцией отсчетов (рис. 3.2):

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} \frac{\sin(x)}{x}, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

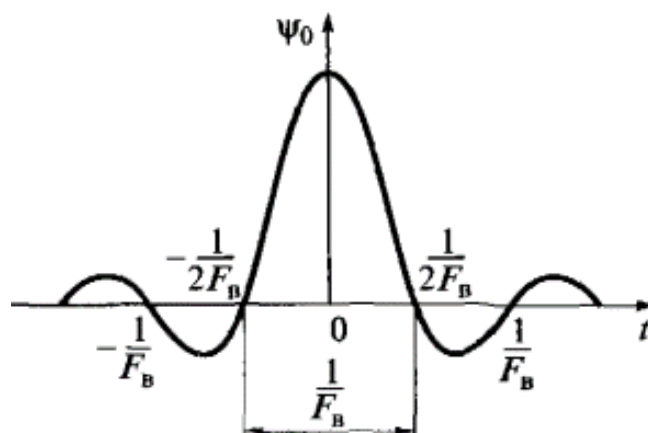


Рисунок 3.2 — Функция отсчетов

Тогда выражение для ряда Котельникова

$$S(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} S(k\Delta t) \frac{\sin[2\pi F_B(t - k\Delta t)]}{2\pi F_B(t - k\Delta t)}, \quad (3.4)$$

где k — целые числа, $S(k\Delta t)$ — амплитуды выборок (отсчетов) функции $s(t)$, F_B — верхняя частота спектра функции $s(t)$, в сущности, описывает операцию свертки дискретных выборок и функций отсчетов.

3.3. Порядок выполнения работы

1. Провести моделирование дискретизации сигнала.

1.1. Собрать схему, изображенную на рисунке 3.3. Сообщение моделируется с помощью схемы, изображенной на рис. 2.6 из лабораторной работы №2, и снимается с сопротивления R_4 . Параметры элементов указаны в таблице 3.1.

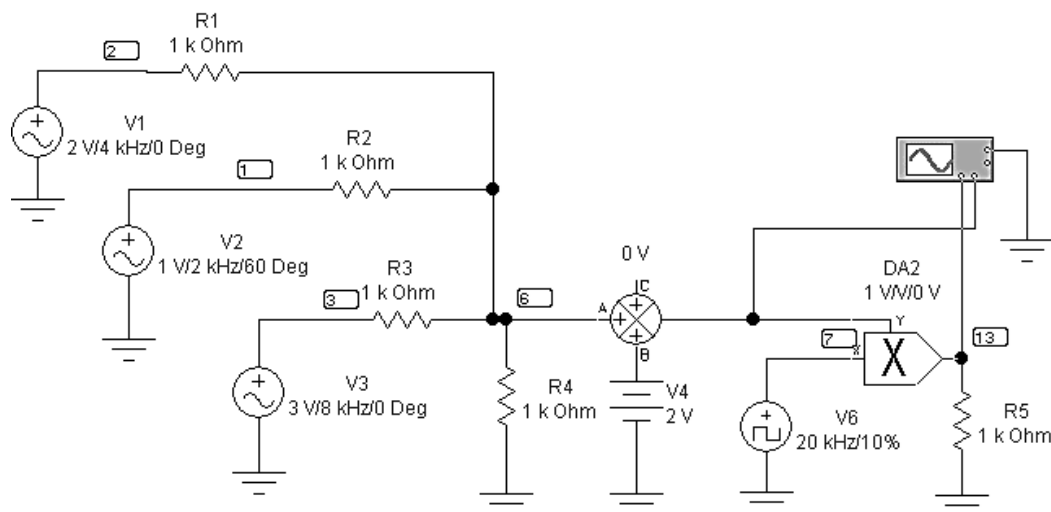


Рисунок 3.3 — Схема для моделирования процесса дискретизации аналогового сигнала

1.2. Получить амплитудный спектр сигнала источника сообщения (точка 6, рис. 3.3). По спектрограмме определить верхнюю (максимальную) частоту спектра. Выбрать частоту источника V6 (рис. 3.1), соблюдая требования теоремы Котельникова (критерий Найквиста).

1.3. Произвести моделирование и получить осциллограммы сообщения и его дискретного аналога.

Таблица 3.1 – Варианты параметров

№ варианта	Источник V1		Источник V2		Источник V3		Источник V4	Источник V6	
	Амплитуда, В	Частота, кГц	Амплитуда, В	Частота, кГц	Амплитуда, В	Частота, кГц	Напряжение, В	Напряжение, В	Duty cycle, %
1	2	4	1	2	3	8	2	5	10
2	2	8	3	4	2	16	2	5	10
3	4	2	3	1	2	4	1	5	10
4	2	6	3	3	3	12	2	5	10
5	1	12	2	6	1	24	3	5	10
6	3	5	2	3	1	15	2	5	10
7	3	10	4	6	1	30	1	5	10
8	1	7	4	3	4	14	4	5	10

2. Провести моделирование процесса восстановления дискретного сигнала.

2.1. Собрать схему с восстанавливающим фильтром нижних частот (ФНЧ), изображенную на рисунке 3.4.

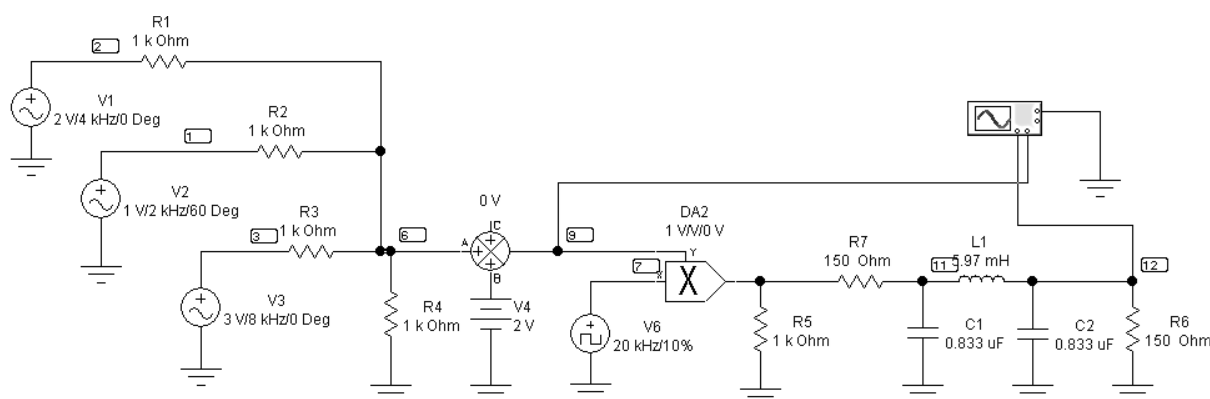


Рисунок 3.4 — Схема для моделирования процесса восстановления

2.2. Для восстановления аналогового сообщения из дискретной последовательности использовать фильтр нижних частот, собранный на реактивных элементах (C1, L1, C2) и нагруженный на резистор R6.

Резистор $R_H = R6$ должен иметь номинал, равный волновому сопротивлению фильтра, ρ .

Пример расчета номиналов элементов ФНЧ:

$C1, L1, C2$ рассчитаны по формулам для частоты среза $\omega_{гр} = 8$ кГц:

$$C1 = C2 = \frac{1}{\omega_{гр} \cdot R_H} = \frac{1}{2\pi \cdot 8000 \cdot 150} = 0,1326 \cdot 10^{-6}; L1 = \frac{2R_H}{\omega_{гр}}$$

$$= \frac{2 \cdot 150}{2\pi \cdot 8000} = 0,00597; R_H = \rho = \sqrt{\frac{L1}{C1 + C2}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,00597}{2 \cdot 0,1326 \cdot 10^{-6}}} = 150.$$

2.3. Установить рассчитанные параметры фильтра. Получить осциллограмму восстановленного сигнала.

2.4. Получить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ФНЧ. Для этого собрать схему, изображенную на рис. 3.5, которая получается путем отсоединения ФНЧ с выхода устройства на рис. 3.4.

2.5. Получить АЧХ ФНЧ. для этого воспользоваться блоком AC Frequency в меню Analysis, предварительно установив параметры блока так, чтобы конечная частота была не меньше максимальной частоты спектра аналогового сообщения. В качестве точки для анализа (Nodes for analysis) указать 12 (см. рис. 3.5).

2.6. Определить полосу пропускания частот ФНЧ по уровню 0.707. Убедиться, что полоса частот, занимаемая спектром сообщения, укладывается в полосу пропускания ФНЧ.

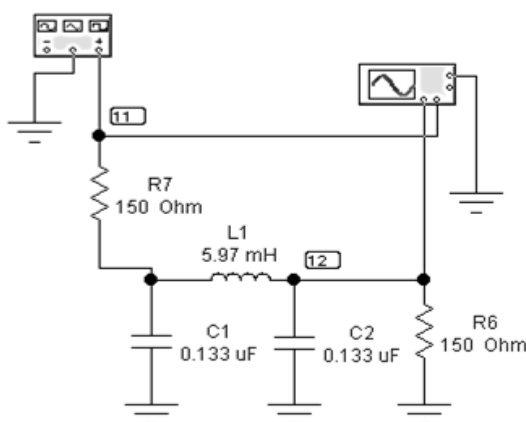


Рисунок 3.5 — Схема ФНЧ

2.7. Сделать заключение о качестве восстановления после сравнения результатов спектрального анализа на выходе ФНЧ (точка 12, рис. 3.4, 3.5) и входного спектра сообщения (точка 6, рис. 3.3, 3.4).

3.4. Содержание отчета

1. Схема моделирования процесса дискретизации аналогового сообщения.
2. Расчет частоты дискретизации по теореме Котельникова.
3. Амплитудный спектр сигнала источника сообщения.
4. Осциллограммы исходного и дискретизированного сигналов.
5. Схема моделирования процесса восстановления сигнала.
6. Расчет параметров ФНЧ.
7. Осциллограммы исходного и восстановленного сигналов.
8. АЧХ ФНЧ с отмеченной маркерами полосой пропускания.
9. Вывод о качестве восстановления сигнала.

3.5. Контрольные вопросы

1. Что подразумевает понятие «дискретизация сигнала»?
2. Дайте определение квантования по времени.
3. Что такое шаг квантования?
4. Как связан шаг квантования по времени с частотой дискретизации?
5. Сформулируйте теорему Котельникова об отсчетах.
6. О чем говорит критерий Найквиста о частоте дискретизации?
7. Поясните формулу ряда Котельникова.
8. Объясните процесс восстановления сигнала из дискретного аналога путем фильтрации.
9. Какие требования предъявляются к полосе пропускания ФНЧ, использующегося при восстановлении сигнала?
10. Что такое функция отсчетов?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нефедов, В. И. Общая теория связи : учебник для бакалавриата и магистратуры / В. И. Нефедов, А. С. Сигов ; под ред. В. И. Нефедова. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 495 с. — (Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-01326-9. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblionline.ru/book/obschaya-teoriya-svyazi-432854>.
2. Дунаев, А. С. Специальные функции в 2 ч. Часть 2 : справочник для вузов / А. С. Дунаев, В. И. Шлычков. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 521 с. — (Университеты России). — ISBN 978-5-534-07667-7. — Текст :

электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/438173>.

3. Сети и телекоммуникации : учебник и практикум для академического бакалавриата / К. Е. Самуйлов [и др.] ; под ред. К. Е. Самуйлова, И. А. Шалимова, Д. С. Кулябова. — Москва : Юрайт, 2019. — 363 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-00949-1. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/book/seti-i-telekommunikacii-432824>

4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/Б. Скляр / Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. — 1104 с.

5. Прокис Д. Цифровая связь/ Д. Прокис / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 2000. — 800 с.

Мирянова Вера Николаевна

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ»**

Часть 1

*Методические указания
к выполнению лабораторных работ*

В авторской редакции

Изд. № 208/19. Объем 2 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»