

Кафедра теории электрической связи им. А.Г. Зюко

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению
индивидуального задания по дисциплине
“СИГНАЛЫ и ПРОЦЕССЫ в РАДИОТЕХНИКЕ”
на тему
ОПИСАНИЕ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ
и РАСЧЕТЫ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК”

Составитель Иващенко П. В.

СОДЕРЖАНИЕ

	с.
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	3
СОДЕРЖАНИЕ ИЗ	3
УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 1	4
УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 2	7
УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 3	10
УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 4.....	11
ЛИТЕРАТУРА	14
Приложение А - Таблица исходных данных для выполнения ИЗ.....	15
Приложение Б - Заданные для выполнения ИЗ сигналы.....	16
Приложение В - Спектральная плотность заданных для выполнения ИЗ сигналов	17
Приложение Г - Математические соотношения для выполнения ИЗ.....	18
Приложение Д - Основные правила оформления ИЗ	19
Приложение Е - Образец титульного листа ИЗ.....	20

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Индивидуальное задание (ИЗ) выполняют студенты, обучающиеся по направлению «Радиотехника»; при изучении модулей 1 и 2 дисциплины «Сигналы и процессы в радиотехнике» (СПР). Студент выполняет ИЗ по варианту, номер которого совпадает с порядковым номером фамилии студента в журнале академической группы.

Конкретные исходные данные для заданного номера варианта студент выписывает из Приложения А этих указаний. Согласно указанному преподавателем сроку выполнения отдельных задач студент должен представить руководителю для просмотра материалы с решением задач. Работу студента над ИЗ руководитель учитывает во время ежемесячных аттестаций текущей работы.

Студент оформляет выполненное ИЗ по модулю 1 (задачи 1 и 2) и по модулю 2 (задачи 3 и 4) согласно правилам оформления текстовых документов (Приложения Д, Е). Все графики строятся с использованием числовых масштабов по осям координат.

Оформленное ИЗ студент сдает руководителю на рецензирование и, после положительной рецензии, защищает его. Зачтенное ИЗ вместе с зачтенными практическими и лабораторными занятиями является условием допуска студента к экзамену по модулю.

СОДЕРЖАНИЕ ИЗ

ИЗ состоит из четырех задач.

Задача 1. Импульсный сигнал $s(t)$ задан аналитическим выражением, определяющим его форму. Это может быть импульс: ГАУССОВСКИЙ, ДВУСТОРОННИЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ, ТРЕУГОЛЬНЫЙ, КОСИНУС, КОСИНУС-КВАДРАТ или ПОДНЯТЫЙ КОСИНУС. Заданы также два числа: A (мВ), определяющее амплитуду импульса, и b (мс), определяющее скорость изменения сигнала. Необходимо:

- а) рассчитать и построить график сигнала $s(t)$, определить его длительность;
- б) найти выражение для спектральной плотности сигнала $S(j\omega)$. Построить график амплитудного спектра $|S(f)| = |S(j2\pi f)|$ для области значений $f \geq 0$;
- в) определить ширину спектра сигнала F_{\max} , как протяженность интервала $(0, F_{\max})$, вне которого нормированные значения амплитудного спектра $|S(f)| / S(0)$ не превышают заданное значение γ .

Задача 2. Сигнал $s(t)$ задан в задаче 1, там же определено F_{\max} . Необходимо:

- а) определить интервал дискретизации T_d , представить таблицу отсчетов $s(kT_d)$, построить график дискретного сигнала $s_d(t)$;
- б) определить частоту дискретизации f_d и построить график амплитудного спектра отсчетов для области частот $0 \leq f \leq 2f_d$. Показать на графике граничные частоты полосы пропускания и полосы задерживания фильтра, восстанавливающего сигнал по отсчетам;
- в) привести схемы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифроаналогового преобразователя (ЦАП); пояснить принципы аналого-цифрового и цифроаналогового преобразований; представить сигнал $s(t)$ цифровым сигналом, определить длительность двоичного символа T_b .

Задача 3. Несущее колебание с амплитудой $A_0 = 1$ В подвергается аналоговой модуляции заданного вида (АМПЛИТУДНОЙ, БАЛАНСНОЙ, ОДНОПОЛОСНОЙ, ЧАСТОТНОЙ или ФАЗОВОЙ). Модулирующим сигналом в случае АМ, БМ и ОМ является сигнал $s(t)$, заданный в задаче 1, а в случае ЧМ и ФМ – гармоничное колебание частоты F_{\max} , найденной в задаче 1. В случае ЧМ задана девиация частоты, а в случае ФМ – девиация фазы. Необходимо:

- а) построить график амплитудного спектра модулированного сигнала (значение частоты несущего колебания f_0 выбирается из условия, что $f_0 \gg F_{\max}$);
- б) рассчитать ширину спектра модулированного сигнала и показать ее на графике спектра;

в) изобразить и описать схему (функциональную или структурную) модулятора заданного вида модуляции;

г) изобразить и описать схему (функциональную или структурную) детектора заданного вида модуляции.

Задача 4. Изобразить и описать схему модулятора заданного сигнала цифровой модуляции (АМ-2, ЧМ-2 или ФМ-2). Модулятор должен содержать фильтр, предназначенный для ограничения спектра модулированного сигнала, включенный или в цепь модулирующего сигнала, или в цепь модулированного сигнала. Рассчитать полосу пропускания такого фильтра, если модулирующий сигнал – это цифровой сигнал, для которого в задаче 3 определена длительность двоичного символа. Рассчитать ширину спектра модулированного сигнала.

УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 1

Задача 1 относится к разделу “Спектральный анализ непериодических сигналов с помощью преобразования Фурье”. Некоторые сведения о спектральном представлении непериодических сигналов приведены в литературе [1, разд. 2.6, 2.10; 2, разд. 2.2; 3, разд. 2.3, Приложение 3; 4, разд. 2.3, Приложение Д3].

Расчет и построение графика заданного сигнала $s(t)$

Общий вид сигналов, которые встречаются при выполнении ИЗ, показан в Приложении Б. Необходимо построить график с использованием числовых масштабов по осям координат. Заданная функция $s(t)$ четная, поэтому для построения графика достаточно рассчитать точки для $t \geq 0$. При выборе значений переменной t нужно учитывать скорость изменения заданной функции $s(t)$.

В случае гауссовского и двустороннего экспоненциального импульсов, учитывая, что $e^0 = 1$, $e^{-1} = 0,368$; $e^{-2} = 0,135$; $e^{-3} = 0,050$; $e^{-4} = 0,018$, значения t выбирают таким образом, чтобы аргумент экспоненты принимал значения от 0 до 4 с шагом 0,5 или 1.

В случае косинус-импульса и косинус-квадрат импульса значения t выбирают так, чтобы аргумент косинуса принимал значения 0 ; $\pi/8$; $\pi/4$; $3\pi/8$; $\pi/2$. В случае поднятого косинус-импульса – значения 0 ; $\pi/4$; $\pi/2$; $3\pi/4$; π .

Пример 1. Задан сигнал - степенной импульс

$$s(t) = \begin{cases} A[1 - (2t/b)^2], & |t| \leq b/2, \\ 0, & |t| > b/2, \end{cases}$$

где $A = 50$ мВ, $b = 80$ мс.

Из аналитического описания видно, что функция $s(t)$ четная, максимальное значение импульса $s(0) = A$. При изменении t от 0 до $b/2$ функция $s(t)$ монотонно убывает, поэтому достаточно рассчитать 2 или 3 промежуточные точки. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные значения степенного импульса $s(t)$

t , мс	0	10	20	30	40
$s(t)$, мВ	50	46,9	37,5	21,9	0

Построенный по точкам табл. 1 график $s(t)$ приведен на рис. 1.

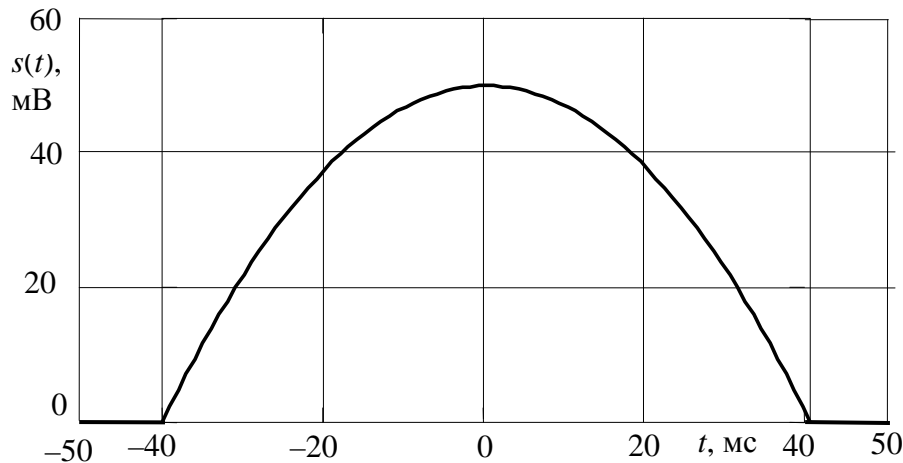


Рисунок 1 – График заданного степенного импульса

Получение выражения для спектральной плотности заданного сигнала

Поскольку заданный сигнал – функция четная, то целесообразно использовать косинус преобразование Фурье

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} s(t) \cos(\omega t) dt.$$

В Приложении Г приведены некоторые соотношения, которые помогут выполнить математические преобразования. Рекомендуется интегрирование выполнить в общем виде, а числовые даны подставить в конечный результат. Для получения конечного выражения нужно перейти к частоте f , выполнив замену $\omega = 2\pi f$.

В Приложении В приведены конечные выражения для спектральной плотности $S(f)$, как справочные данные для самопроверки.

Пример 2. Найдем спектральную плотность для сигнала, использованного в примере 1.

$$\begin{aligned} S(\omega) &= 2 \int_0^{b/2} A [1 - (2t/b)^2] \cos(\omega t) dt = 2A \int_0^{b/2} \cos(\omega t) dt - \frac{8A}{b^2} \int_0^{b/2} t^2 \cos(\omega t) dt = \\ &= 2A \frac{\sin(\omega t)}{\omega} \Big|_0^{b/2} - \frac{8A}{b^2} \left[\frac{2t}{\omega^2} \cos(\omega t) + \left(\frac{t^2}{\omega} - \frac{2}{\omega^3} \right) \sin(\omega t) \right] \Big|_0^{b/2} = \\ &= 2A \left[\frac{\sin \frac{\omega b}{2}}{\omega} - \frac{4}{b\omega^2} \cos \frac{\omega b}{2} - \frac{\sin \frac{\omega b}{2}}{\omega} + \frac{8}{b^2 \omega^3} \sin \frac{\omega b}{2} \right]. \end{aligned}$$

Переходя к переменной f , получим окончательное выражение для спектральной плотности

$$S(f) = \frac{2Ab}{(\pi bf)^2} \left(\frac{\sin(\pi bf)}{\pi bf} - \cos(\pi bf) \right), \quad -\infty < f < \infty.$$

Построение графика амплитудного спектра

Амплитудный спектр – это модуль спектральной плотности $|S(f)|$. Для построения графика важно определиться с шагом для переменной f . Для этого можно воспользоваться видом графиков $|S(f)|$, приведенных в Приложении В. Из этих рисунков видно, что достаточно

просчитать значения функции $|S(f)|$ для области значений f от нуля до $3/b$. С учетом скорости изменения функции $|S(f)|$ шаг для f в 3–4 раза меньше, чем $1/b$. Необходимо обязательно найти экстремальные значения функции $|S(f)|$.

При расчетах значений функций $|S(f)|$ может появиться неопределенность вида $0/0$. Эту неопределенность можно снять по известным математическим правилам. Приведем некоторые из неопределенностей, которые встречаются при выполнении ИЗ. Они раскрываются по правилу Лопиталю

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1;$$

$$\lim_{bf \rightarrow 0,5} \frac{\cos(\pi b f)}{1-(2b f)^2} = \frac{-\pi \sin(\pi b f)}{-2 \cdot 2b f \cdot 2} \Big|_{bf=0,5} = \frac{\pi}{4};$$

$$\lim_{bf \rightarrow 1} \frac{\sin(\pi b f)}{1-(b f)^2} = \frac{\pi \cos(\pi b f)}{-2b f} \Big|_{bf=1} = \frac{\pi}{2}.$$

Пример 3. Для найденной в примере 2 спектральной плотности построить график амплитудного спектра $|S(f)|$. При $f = 0$ имеем неопределенность $0/0$. Положим $\pi b f = x$ и раскроем ее

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x - x \cos x}{x^3} = \frac{\cos x - \cos x + x \sin x}{3x^2} \Big|_{x=0} = \frac{\cos x}{3} \Big|_{x=0} = \frac{1}{3}.$$

Выберем для сложной переменной $\pi b f$ шаг, равный $\pi/4$, или шаг для $f = 1/(4b)$. Учитывая, что $b = 80$ мс, в качестве шага для f примем целое число, а именно 4 Гц. Результаты расчетов сведем в табл. 2.

Таблица 2 – Расчет графика амплитудного спектра

f , Гц	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$\pi b f$	0	1,01	2,01	3,02	4,02	5,03	6,03	7,04	8,04	9,05	10,05
$ S(f) $, мВ/Гц	2,67	2,40	1,73	0,91	0,22	0,16	0,22	0,10	0,04	0,09	0,06

Экстремальное значение функции $|S(f)|$, когда она принимает нулевое значение, имеет место при $\sin(\pi b f)/(\pi b f) - \cos(\pi b f) = 0$, или $\text{tg}(\pi b f) = \pi b f$. Подбором на калькуляторе найдем, что первый нуль имеет место при $\pi b f_{01} = 4,5$; $f_{01} = 4,5/(\pi b) = 4,5/(\pi \cdot 0,08) = 17,9$ Гц.

Рассчитанный график $|S(f)|$ приведен на рис. 2.

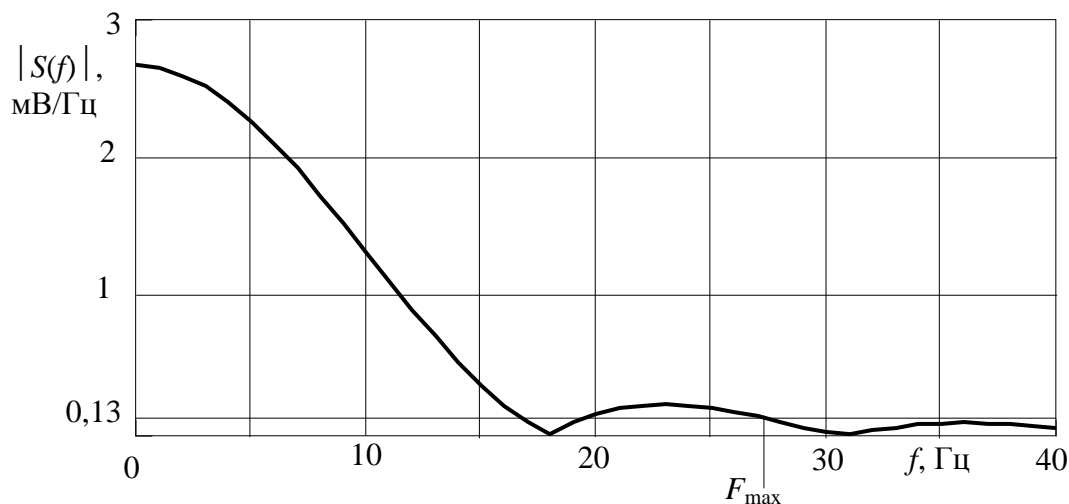


Рисунок 2 – Амплитудный спектр степенного импульса

Определение максимальной частоты спектра сигнала F_{\max}

Частота F_{\max} определяется по условия, что значения амплитудного спектра на частотах $f \geq F_{\max}$ не превышают заданное значение $y = |S(F_{\max})|/S(0)$. Рекомендуется F_{\max} определить графически, хотя для гауссовского и двустороннего экспоненциального импульсов F_{\max} можно определить аналитически. Итак, на графике $|S(f)|$ необходимо указать значение $|S(F_{\max})| = y \cdot S(0)$, а затем определить значение F_{\max} на пересечении горизонтальной прямой на уровне $|S(F_{\max})|$ и графика $|S(f)|$.

Пример 4. Для спектра, рассчитанного в примере 3, определить F_{\max} при условии, что $y = |S(F_{\max})|/S(0) = 0,05$. Поскольку $S(0) = 2,67$ мВ/Гц, $|S(F_{\max})| = 2,67 \cdot 0,05 = 0,13$ мВ/Гц. На пересечении горизонтальной прямой на уровне 0,13 и графика $|S(f)|$ (рис. 2) находим, что $F_{\max} = 27$ Гц.

УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 2

Задача 2 связана с двумя темами – это “Теорема Котельникова” и “АЦП и ЦАП”. Соответствующие сведения об этих темах можно найти в литературе [1, разд. 2.15 – 2.17, 12.10, 12.11; 2, разд. 5.2, 15.1; 3, разд. 2.4, 16.2; 4, разд. 2.4, 17.2].

Расчет интервала дискретизации и отсчетов сигнала

Согласно теореме Котельникова при дискретизации сигнала $s(t)$ интервал дискретизации T_d не может превышать значение $1/(2F_{\max})$, где F_{\max} – максимальная частота спектра сигнала $s(t)$. Значение F_{\max} найдено в задаче 1. Целесообразно выбрать $T_d = (0,7...0,8)/(2F_{\max})$. Эту целесообразность хорошо будет видно ниже из графика рис. 4 при определении граничных частот полосы пропускания и полосы задерживания восстанавливающего ФНЧ.

Отсчеты сигнала $s(t)$ – это значения $s(kT_d)$,

где $k = k_{\min}, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, k_{\max}$; k_{\min} и k_{\max} – номера крайних отсчетов, которые определяются по условия, что при $t < k_{\min}T_d$ и при $t > k_{\max}T_d$ значения $|s(t)|$ меньше половины шага квантования $\Delta s/2$. Заданные в ИЗ сигналы – четные функции, поэтому $k_{\min} = -k_{\max}$.

Пример 5. В примере 4 найдено значения максимальной частоты спектра сигнала $s(t)$: $F_{\max} = 27$ Гц. Тогда $T_d = (0,7...0,8)/(2F_{\max}) = (0,7...0,8)/(2 \cdot 27) = (13,0...14,8)$ мс. Примем $T_d = 14$ мс. Рассчитаем відліки сигнала $s(t)$, аналитическое выражение которого приведено в примере 1. Рассчитанные відліки представлено в табл. 3.

Таблица 3 – Відліки сигнала, квантование відліків и кодирование уровней квантования

k	kT_d , мс	$s(kT_d)$, мВ	$s(kT_d)/\Delta s$	$p(kT_d)$	$s_{\text{кв}}(kT_d)$, мВ	$\varepsilon_{\text{кв}}(kT_d)$, мВ	Кодовые комбинации
-2	- 28	25,5	12,75	13	26	+0,5	01101
-1	- 14	43,9	21,95	22	44	+0,1	10110
0	0	50,0	25,0	25	50	0	11001
1	14	43,9	21,95	22	44	+0,1	10110
2	28	25,5	12,75	13	26	+0,5	01101

График дискретного сигнала $s_d(t)$, построенный на основе рассчитанных отсчетов, приведен на рис. 3.

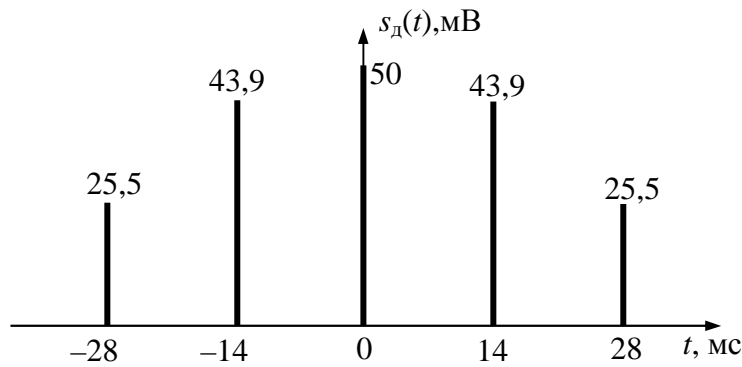


Рисунок 3 – График дискретного сигнала

Построение графика спектра дискретного сигнала

Для построения графика достаточно помнить, что спектральная плотность отсчетов является суммой периодических повторений с периодом частоты дискретизации f_d спектральной плотности непрерывного сигнала $S(f)$ умноженной на f_d (частота дискретизации $f_d = 1/T_d$ – величина, обратная к интервалу дискретизации):

$$S_d(f) = f_d \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(f - nf_d), \quad -\infty < f < \infty.$$

При изображении амплитудного спектра дискретного сигнала определяют модуль $|S_d(f)|$ и показывают график для области значений $f \geq 0$. Для получения представления о спектре $|S_d(f)|$ достаточно рассчитать частичную сумму ряда для членов с номерами $n = 0, 1$ и 2 .

Пример 6. Спектральную плотность непрерывного сигнала из примера 1 найдено в примере 2, а интервал дискретизации – в примере 5. Частота дискретизации $f_d = 1/T_d = 1/(14 \cdot 10^{-3}) = 71,4$ Гц. Ради вычислительных удобств при построении графика спектра примем $f_d = 70$ Гц.

Строим график спектральной плотности $S(f)$ для положительных и отрицательных частот путем нанесения точек графика рис. 2 – это будет составляющая ряда с $n = 0$. Затем строим два сдвинутых вправо на f_d и $2f_d$ графика – это будут составляющие ряда с $n = 1$ и $n = 2$. Амплитудный спектр дискретного сигнала рассчитывается как модуль суммы значений трех графиков. Расчеты проводятся для области $0 \leq f \leq 2f_d$. Результаты расчета $|S_d(f)|$ приведены на рис. 4 (без учета множителя f_d). Там же показана АЧХ ФНЧ, который используется для восстановления непрерывного сигнала по отсчетам (масштаб для значений АЧХ не приводится). Его параметры – граничные частоты полосы пропускания $f_{пп}$ и полосы задерживания $f_{пз}$. Эти параметры выбираются при условиях: $f_{пп} \geq F_{\max}$, $f_{пз} \leq f_d - F_{\max}$. На рис. 4 параметры выбраны из равенств: $f_{сп} = F_{\max} = 27$ Гц, $f_{сз} = f_d - F_{\max} = 43$ Гц.

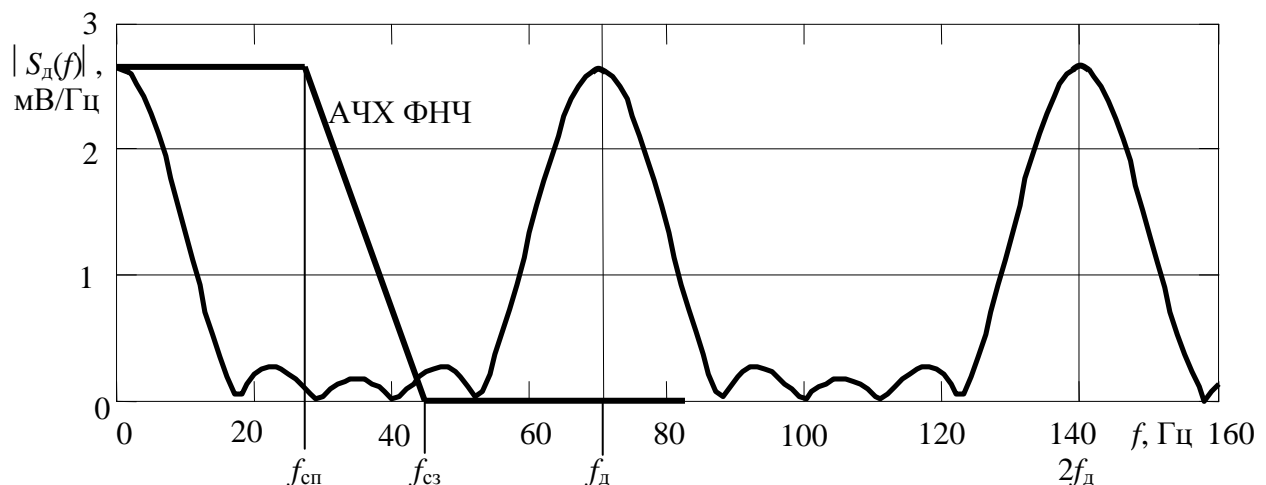


Рисунок 4 – Спектр дискретного сигнала и АЧХ восстанавливающего ФНЧ

Представление непрерывного сигнала цифровым сигналом

Схема аналого-цифрового преобразователя (АЦП) должна содержать дискретизатор, квантователь и кодер отсчетов, а схема цифроаналогового преобразователя (ЦАП) – декодер и ФНЧ. Описание преобразований сигналов в АЦП и ЦАП можно найти в учебниках [3, разд. 16.2], [4, разд. 17.2], [1, разд. 12.10, 12.11].

Для представления непрерывного сигнала цифровым сигналом необходимо выполнить квантование отсчетов $s(kT_d)$ и кодирование их двоичным кодом. В результате равномерного квантования квантованные отсчеты $s_{кв}(kT_d)$ принимают лишь значения, кратные шагу квантования Δs : $s_{кв}(kT_d) = p(kT_d) \cdot \Delta s$, где $p(kT_d)$ – целое число, уровень квантования. Квантование заключается в замене отсчета $s(kT_d)$ ближайшим квантованным значением $s_{кв}(kT_d)$, которое однозначно описывается числом $p(kT_d)$. Через такое приближенное представление отсчетов возникает погрешность квантования $\epsilon_{кв}(kT_d) = s_{кв}(kT_d) - s(kT_d)$. Ее значение по модулю не превышает половины шага квантования: $|\epsilon_{кв}(kT_d)| \leq \Delta s/2$. Расчет уровней квантования выполняется по соотношению

$$p(kT_d) = \text{int} \left(\frac{s(kT_d)}{\Delta s} + 0,5 \right), \quad \text{где } \text{int}(x) - \text{целая часть от } x.$$

Кодирование уровней квантования состоит в записи $p(kT_d)$ в двоичной системе счисления. Код должен быть равномерным, т.е. все кодовые комбинации должны иметь одинаковое количество двоичных символов. Длина кода n – целое число, которое выбирается из условия $2^n \geq L$, где $L = \frac{s_{\max}(t) - s_{\min}(t)}{\Delta s}$ – количество уровней квантования; $s_{\max}(t)$ и $s_{\min}(t)$ – возможные соответственно максимальное и минимальное значения сигнала $s(t)$ ^{*}.

Длительность двоичного символа определяется простым соотношением $T_{\text{б}} = T_d/n$. Для наглядности цифровой сигнал необходимо представить временной диаграммой.

Пример 7. Выполним квантование рассчитанных в примере 6 отсчетов при условии, что шаг квантования $\Delta s = 2$ мВ, и кодирование уровней квантования. Анализируемый сигнал $s(t)$, имеет $s_{\max}(t) = 50$ мВ и $s_{\min}(t) = 0$, откуда $L = \frac{s_{\max}(t) - s_{\min}(t)}{\Delta s} = \frac{50}{2} = 25$.

Из условия $2^n \geq L$ длина кода $n = 5$.

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

На рис. 5 представлена соответствующая временная диаграмма цифрового сигнала.

Длительность двоичного символа $T_{\text{б}} = T_d/n = 14/5 = 2,8$ мс.

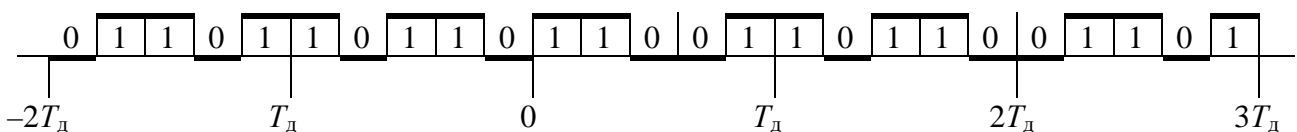


Рисунок 5 – Временная диаграмма цифрового сигнала

^{*} В реальных условиях, когда сигнал $s(t)$ принимает и отрицательные значения, АЦП преобразует неотрицательный непрерывный сигнал $s(t) - s_{\min}(t) \geq 0$ в цифровой сигнал. В случае необходимости, полученные кодовые комбинации после АЦП преобразуются в комбинации, содержащие знаковые разряды и модули отсчетов.

УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 3

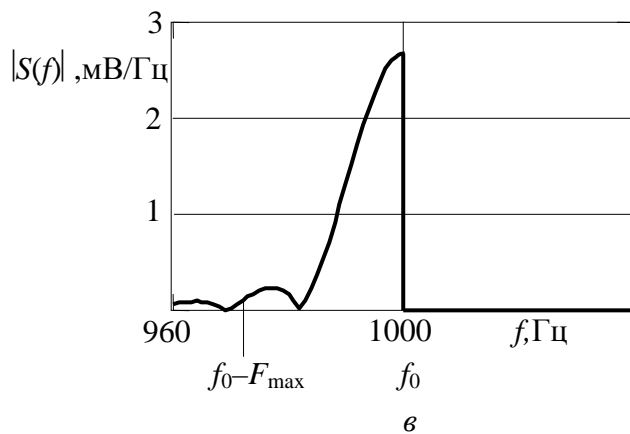
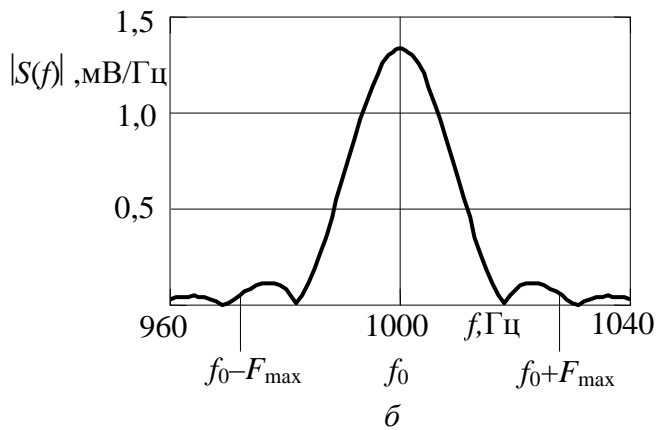
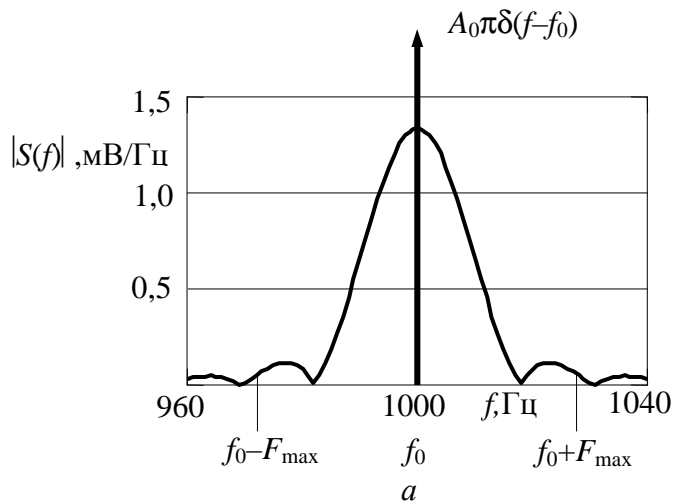


Рисунок 6 – Спектры модулированных сигналов: *a* – при АМ; *б* – при БМ; *в* – при ОМ

Задача 3 относится к разделу “Аналоговые виды модуляции гармонического переносчика”. Сведения о временном и спектральном описании модулированных сигналов можно найти в [1, разд. 3.1–3.6; 2, разд. 4.1, 4.2; 3, разд. 3.1–3.4; 4, разд. 3.1–3.4; 5, разд. 2, 5]; о построении модуляторов – в [2, разд. 11.5; 3, разд. 6.5–6.8; 4, разд. 6.4–6.7; 5, разд. 3, 6]; о построении детекторов – в [1, разд. 8.9, 8.10; 2, разд. 11.6; 3, разд. 14.1–14.5; 4, разд. 15.1–15.5; 5, разд. 4, 7].

Построение графика спектра модулированного сигнала и расчет ширины спектра сигналов АМ, БМ и ОМ не вызывает трудностей, это хорошо описано в перечисленной выше литературе.

На рис. 6 показаны спектры сигналов АМ, БМ и ОМ при модуляции сигналом, заданным в примере 1. Поскольку $F_{\max} = 27$ Гц, частота несущего колебания выбрана равной 1000 Гц, что значительно превышает значение F_{\max} . Изображен спектр сигнала ОМ с нижней боковой полосой частот, хотя можно изобразить спектр сигнала ОМ с верхней боковой полосой частот. При построении графика необходимо использовать значения амплитудного спектра модулирующего сигнала, полученные в задаче 1. На графике необходимо показать ширину спектра сигнала (на рис. 6 она не показана, чтобы не загромождать графики). Колебание несущей частоты при АМ нужно показать в виде δ -функции, поскольку график изображает спектральную плотность, а не спектр амплитуд.

Построение графика спектра модулированного сигнала и расчет ширины спектра сигналов ЧМ и ФМ могут быть выполнены на основе ука-

занной выше литературы. Показательный пример таких расчетов приведен в [3, разд. 3.4; 4, разд. 3.4].

Рекомендуется изобразить схемы модулятора и детектора заданного вида модуляции с использованием функциональных блоков (генератор, перемножитель, сумматор и т.п.). Схе-

мы должны соответствовать математическому описанию соответствующего модулированного сигнала или преобразованиям, которые описывают процесс детектирования.

УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 4

Задача 4 относится к разделу “Сигналы цифровой модуляции”. Сведения об этом разделе можно найти в [3, разд. 3.5, 6.10; 4, разд. 3.5, 6.9; 5, разд. 12-14].

Для построения схемы модулятора следует исходить из того, что сигнал цифровой модуляции – это последовательность элементарных радиоимпульсов $s_i(t)$. Импульсы следуют через промежутки времени – тактовый интервал T . В случае двоичных АМ-2, ЧМ-2 или ФМ-2 сигналов индекс i принимает значения 0 и 1 в соответствии с двоичным символом, который передается сигналом $s_i(t)$, а тактовый интервал T равняется длительности двоичного символа T_0 цифрового модулирующего сигнала.

В табл. 4 приведено описание элементарных сигналов для методов модуляции, заданных в этой задаче.

Таблица 4 – Описание элементарных сигналов

i	М е т о д м о д у л я ц и и					
	АМ-2		ЧМ-2		ФМ-2	
	$s_i(t)$	a_i	$s_i(t)$	a_i	$s_i(t)$	a_i
1	$a \cdot A(t) \sin(2\pi f_0 t)$	a	$a \cdot A(t) \sin(2\pi(f_0 + \Delta f/2)t)$	a	$a \cdot A(t) \sin(2\pi f_0 t)$	a
0	0	0	$a \cdot A(t) \sin(2\pi(f_0 - \Delta f/2)t)$	a	$-a \cdot A(t) \sin(2\pi f_0 t)$	$-a$

В этой таблице:

a_i – коэффициент, определяющий энергию i -го элементарного сигнала;

$A(t)$ – огибающая элементарных сигналов;

f_0 – частота несущего колебание;

Δf – разнос частот при ЧМ-2.

Таким образом, элементарный сигнал – это отрезок гармонического колебания с огибающей $A(t)$. С целью определения спектра элементарных сигналов их следует рассматривать как сигнал БМ – результат перемножения модулирующего сигнала $A(t)$ на несущее колебание $\sin(2\pi f_0 t)$ (или на $\sin(2\pi(f_0 + \Delta f/2)t)$ и $\sin(2\pi(f_0 - \Delta f/2)t)$ при ЧМ-2, что не меняет сути). При БМ спектры модулирующего и модулированного сигналов жестко связаны, а именно, две боковые полосы частот сигнала БМ есть точные копии модулирующего сигнала с симметрией относительно частоты несущего колебания. Поэтому необходимое ограничение спектра модулированного сигнала может быть достигнуто, как фильтрацией модулирующего сигнала соответствующим ФНЧ, так и фильтрацией модулированного сигнала соответствующим полосовым фильтром (ПФ). Отсюда вытекает два возможных способа построения схем модуляторов – с фильтрацией с помощью ФНЧ и с фильтрацией с помощью ПФ.

Рассмотрим формирование сигнала $s_i(t)$ в случае АМ-2 или ФМ-2 и фильтрации с помощью ФНЧ:

1 Цифровой модулирующий сигнал поступает к входу кодера манипуляционного кода, кодер вырабатывает импульс амплитуды a_i (рис. 7,а), в соответствии с табл. 4, и длительности, равной тактовому интервалу T .

2 Этот импульс поступает к входу ФНЧ, который при действии импульса $b(t)$ амплитуды $a_i = 1$ вырабатывает импульс $A(t)$, что показано, в качестве примера, на рис 7, б. В общем случае отклик ФНЧ представляет функцию $a_i A(t)$ (t_0 – задержка импульса в ФНЧ).

3 Сигнал $a_i A(t)$ подается на один из входов перемножителя, на второй вход которого подается гармоническое колебание $\sin(2\pi f_0 t)$. На выходе перемножителя имеет место сигнал $s_i(t)$.

На рис. 8 приведены амплитудные спектры импульсов $b(t)$ и $A(t)$. При расчетах рис. 7,б и 8,б коэффициент ската спектра α равнялся 0,25.

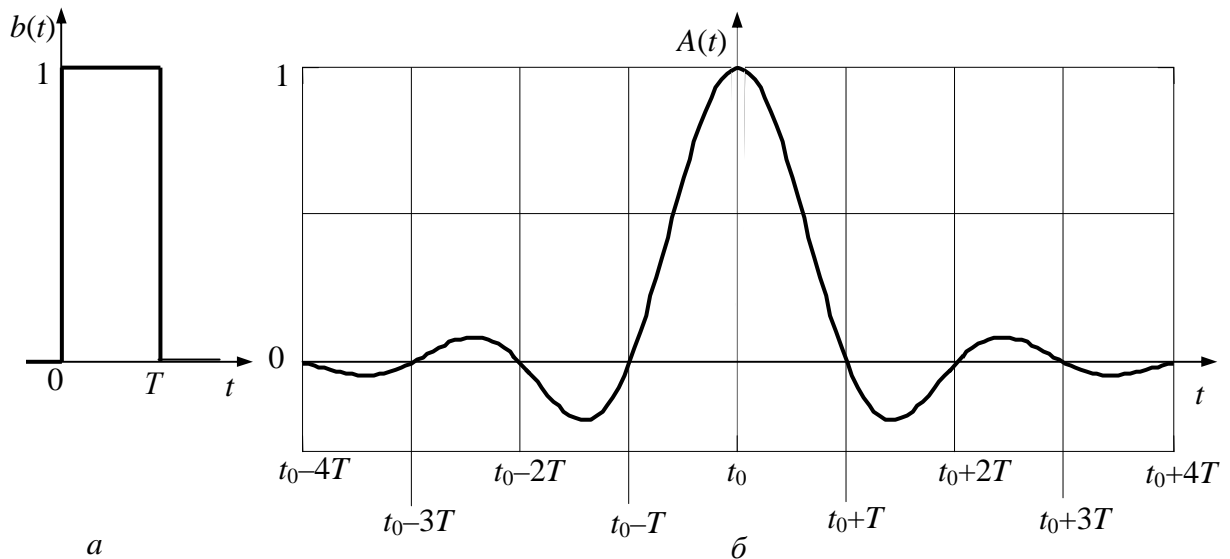


Рисунок 7 – Временные диаграммы импульсов:
a – на входе ФНЧ ($a_i = 1$); *б* – на выходе ФНЧ

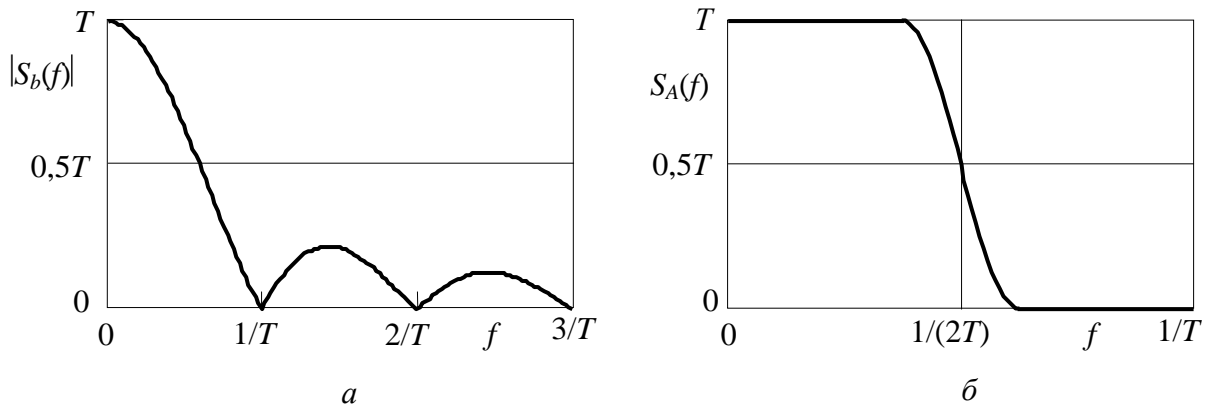


Рисунок 8 – Амплитудные спектры импульсов:
a – на входе ФНЧ; *б* – на выходе ФНЧ

Рассмотрим формирование сигнала $s_i(t)$ в случае **ЧМ-2 и фильтрации с помощью ФНЧ**. На рис. 9 показаны модулирующий сигнал $b(t)$ и соответствующий сигнал ЧМ-2 $s(t)$. Сигнал $s(t)$ – последовательность элементарных сигналов $s_0(t)$ и $s_1(t)$ (с целью упрощения рисунка показаны элементарные сигналы с П-образной огибающей $A(t)$). Можно считать, что сигналы $s_1(t)$ – элементы сигнала АМ-2, который рассмотрен выше (в этом случае $s_0(t) \equiv 0$), а сигналы $s_0(t)$ – элементы сигнала АМ-2, когда модулирующим был цифровой сигнал, инверсный к показанному на рис. 9 (в этом случае $s_1(t) \equiv 0$).

Из приведенных выше соображений сигнал ЧМ-2 можно рассматривать, как сумму двух сигналов АМ-2. Отсюда вытекает способ построения модулятора сигнала ЧМ-2:

1 Схема должна быть двухканальной – один канал используется для формирования элементарных сигналов $s_1(t)$, а другой – для формирования элементарных сигналов $s_0(t)$; выходы этих подканалов подаются на входы сумматора, на выходе которого имеет место сигнал ЧМ-2.

2 Входной модулирующий цифровой сигнал поступает на вход манипуляционного кодера, который имеет два выхода – на одном выходе имеют место П-импульс амплитуды a , когда на входе символ 1, а на втором выходе имеют место П-импульс амплитуды a , когда на входе символ 0.

3 Эти выходы подаются на входы двух идентичных ФНЧ, которые формируют из каждого входного П-импульса импульс $A(t)$.

4 Выходы ФНЧ подаются на входы двух перемножителей, на другие входы которых подаются от генераторов колебания $\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ и $\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$.

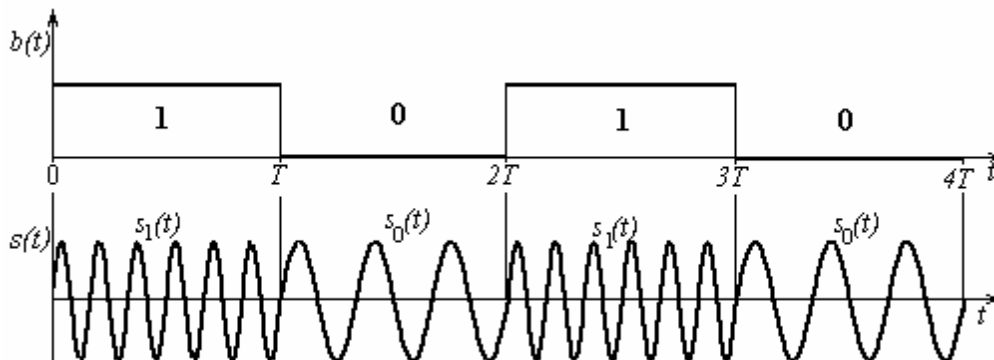


Рисунок 9 – Цифровой модулирующий сигнал $b(t)$ и соответствующий ему сигнал ЧМ-2 $s(t)$

Описанные схемы модуляторов сигналов АМ-2, ЧМ-2 и ФМ-2 при соответствующих характеристиках ФНЧ могут обеспечить передачу сигналов без межсимвольной интерференции. Для получения сигнала ЧМ-2 может быть использованная еще одна схема – с фильтрацией с помощью ФНЧ: входной цифровой сигнал преобразуется в двухуровневый, принимающий уровни a и $-a$. Этот сигнал подается во вход ФНЧ, а выход ФНЧ – на вход модулятора аналоговой частотной модуляции.

Рассмотрим формирование сигналов **АМ-2, ЧМ-2 и ФМ-2 в случае фильтрации с помощью полосовых фильтров ПФ**. Выше указано, что формирование модулированных сигналов с ограниченным спектром может выполняться с использованием ПФ. В таком случае схема модулятора имеет несколько более простой вид – ключ (мультиплексор), после которого включен СФ. Ключ управляется цифровым модулирующим сигналом $b(t)$:

- в случае АМ-2 этот ключ пропускает или не пропускает колебание $\sin(2\pi f_0 t)$ – необходимо иметь генератор такого колебания;
- в случае ФМ-2 этот ключ пропускает колебание $\sin(2\pi f_0 t)$ или колебание $-\sin(2\pi f_0 t)$ – необходимо иметь генератор колебания $\sin(2\pi f_0 t)$ и инвертор;
- в случае ЧМ-2 этот ключ пропускает колебание $\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ или колебание $\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$ – необходимо иметь два генератора колебаний. Такой сигнал не является полным эквивалентом сигнала, сформированного с использованием ФНЧ.

Минимальная граничная частота полосы пропускания ФНЧ модуляторов сигналов разных видов цифровой модуляции определяется по условия: $f_{\text{пп}} = 1/(2T)$ (рис. 8, б).

Если **фильтрация выполняется полосовым фильтром**, то его минимальная полоса пропускания в случае АМ-2 и ФМ-2 определяется по условия: $F_{\text{пп}} = 1/T$.

Если в модуляторе сигнала ЧМ-2 фильтрация выполняется полосовым фильтром, то его минимальная полоса пропуска определяется: $F_{\text{пп}} = 1/T + \Delta f$, где Δf – разнос частот. Выбор $\Delta f = 1/T$ обеспечивает ортогональность элементарных сигналов $s_0(t)$ и $s_1(t)$. Ортогональность элементарных сигналов можно обеспечить и в случае $\Delta f = 1/(2T)$ за счет специального фазирования колебаний $\sin(2\pi(f_0+\Delta f/2)t)$ и $\sin(2\pi(f_0-\Delta f/2)t)$ (этот метод ЧМ-2 называется ММЗ – модуляция минимального сдвига или MSK – Minimum Shift Keing), но модулятор существенно более сложный и его схема здесь не рассматривается.

Ширина спектра модулированного сигнала определяется формулами, приведенными выше для полосы пропускания полосового фильтра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гоноровский И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. - М.: Радио и связь, 1986.
2. **Баскаков С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 1988.
3. **Панфилов И.П.,** Дырда В.Е. Теория электрической связи: Учебник для техникумов. - М.: Радио и связь, 1991.
4. **Панфілов І. П.,** Дирда В. Ю., Капацін А. В. Теорія електричного зв'язку: Підручник для студентів вузів 1-го та 2-го рівнів акредитації. – К.: Техніка, 1998.
5. **Методы** формирования и преобразования сигналов в системах электросвязи: Методруководство по курсу ТЭС / Сост. Ю. Ф. Коробов- Одесса: ОЭИС, 1990.

Приложение А - Таблица исходных данных для выполнения ИЗ

№ варианта	Форма импульса	A , мВ	b , мс	y	Δs , мВ	Вид аналоговой модуляции	Девиация частоты, Гц	Девиация фазы, рад	Вид цифровой модуляции
1	Гауссовский	35	30	0,02	1,5	Амплитудная	–	–	ЧМ-2
2	Двусторон. экспоненц.	70	40	0,06	3,5	Балансная	–	–	АМ-2
3	Треугольный	20	85	0,03	1,0	Однополосная	–	–	ЧМ-2
4	Косинусный	20	50	0,05	0,75	Частотная	200	–	ФМ-2
5	Косинус-Квадрат	25	75	0,02	1,0	Фазовая	–	3,5	АМ-2
6	Поднятый косинус	5	25	0,02	0,2	Амплитудная	–	–	ЧМ-2
7	Гауссовский	50	15	0,02	2,5	Балансная	–	–	ФМ-2
8	Двусторон. экспоненц.	100	20	0,06	5,0	Однополосная	–	–	ЧМ-2
9	Треугольный	80	65	0,03	4,0	Частотная	150	–	АМ-2
10	Косинусный	65	25	0,05	3,0	Фазовая	–	5,0	ФМ-2
11	Косинус-Квадрат	45	50	0,02	2,0	Амплитудная	–	–	ЧМ-2
12	Поднятый косинус	75	25	0,02	4,0	Балансная	–	–	АМ-2
13	Гауссовский	10	30	0,02	0,5	Однополосная	–	–	ЧМ-2
14	Двусторон. экспоненц.	55	45	0,06	2,5	Частотная	220	–	ФМ-2
15	Треугольный	10	5	0,03	0,5	Фазовая	–	3,0	ЧМ-2
16	Косинусный	95	60	0,05	4,0	Амплитудная	–	–	АМ-2
17	Косинус-Квадрат	20	65	0,02	0,8	Балансная	–	–	ФМ-2
18	Поднятый косинус	65	70	0,02	3,0	Однополосная	–	–	ЧМ-2
19	Гауссовский	5	2	0,02	0,25	Частотная	5000	–	АМ-2
20	Двусторон. экспоненц.	5	45	0,06	0,2	Фазовая	–	4,5	ФМ-2
21	Треугольный	35	25	0,03	1,5	Амплитудная	–	–	ЧМ-2
22	Косинусный	60	50	0,05	3,0	Балансная	–	–	АМ-2
23	Косинус-Квадрат	35	15	0,02	1,75	Однополосная	–	–	ЧМ-2
24	Поднятый косинус	20	80	0,02	0,8	Частотная	120	–	ФМ-2
25	Гауссовский	75	10	0,02	3,5	Фазовая	–	4,0	АМ-2
26	Двусторон. экспоненц.	95	60	0,06	4,5	Амплитудная	–	–	ЧМ-2
27	Треугольный	10	80	0,03	0,5	Балансная	–	–	ФМ-2
28	Косинусный	100	40	0,05	5,0	Однополосная	–	–	ЧМ-2
29	Косинус-Квадрат	40	2	0,02	2,0	Частотная	3500	–	АМ-2
30	Поднятый косинус	80	70	0,02	4,0	Фазовая	–	3,7	ФМ-2

Приложение Б - Заданные для выполнения ИЗ сигналы

Описание импульса		Вид графика $s(t)$
Гауссовский импульс	$s(t) = A \exp(-(4t/b)^2), \quad -\infty < t < \infty$	
Двусторонний экспоненциальный импульс	$s(t) = A \exp(-4 t /b), \quad -\infty < t < \infty$	
Треугольный импульс	$s(t) = \begin{cases} A(1-2 t /b), & t \leq b/2, \\ 0, & t > b/2 \end{cases}$	
Косинус-импульс	$s(t) = \begin{cases} A \cos(\pi t/b), & t \leq b/2, \\ 0, & t > b/2 \end{cases}$	
Косинус-квадрат импульс	$s(t) = \begin{cases} A \cos^2(\pi t/b), & t \leq b/2, \\ 0, & t > b/2 \end{cases}$	
Поднятый косинус-импульс	$s(t) = \begin{cases} 0,5A(1+\cos(2\pi t/b)), & t \leq b/2, \\ 0, & t > b/2 \end{cases}$	

Приложение В - Спектральная плотность заданных для выполнения ИЗ сигналов

Форма импульса	Спектральная плотность	Вид графика $ S(f) / S(0)$
Гауссовский импульс	$S(f) = 0,25\sqrt{\pi}Ab \exp\left(-\left(\frac{\pi b f}{4}\right)^2\right)$	
Двусторонний экспоненциальный импульс	$S(f) = \frac{2Ab}{4+(\pi b f)^2}$	
Треугольный импульс	$S(f) = \frac{Ab}{2} \left(\frac{\sin(\pi b f / 2)}{\pi b f / 2}\right)^2$	
Косинус-импульс	$S(f) = \frac{2Ab}{\pi} \cdot \frac{\cos(\pi b f)}{1-(2bf)^2}$	
Косинус-квадрат и поднятый косинус-импульсы	$S(f) = \frac{Ab}{2(1-(bf)^2)} \cdot \frac{\sin(\pi b f)}{\pi b f}$	

Приложение Г - Математические соотношения для выполнения ИЗ

$$\int_0^{\infty} \exp(-a^2 x^2) \cos(bx) dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a} \exp(-b^2/4a^2) \quad \text{при } a > 0$$

$$\int \exp(ax) \cos(bx) dx = \frac{\exp(ax)}{a^2 + b^2} (a \cos(bx) + b \sin(bx))$$

$$\int x \cos(ax) dx = \frac{\cos(ax)}{a^2} + \frac{x \sin(ax)}{a}$$

$$\int x^2 \cos(ax) dx = \frac{2x}{a^2} \cos(ax) + \left(\frac{x^2}{a} - \frac{2}{a^3} \right) \sin(ax)$$

$$\int \cos(ax) dx = \frac{\sin(ax)}{a}$$

$$\sin(\pi \pm x) = \mp \sin x$$

$$\sin(\pi/2 + x) = \cos x$$

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2(\alpha/2)$$

$$1 + \cos \alpha = 2 \cos^2(\alpha/2)$$

Приложение Д - Основные правила оформления ИЗ

1 Выполненное индивидуальное задание должно содержать:

- титульный лист (см. Приложение Е);
- исходные данные к индивидуальному заданию;
- чистый лист для рецензии руководителя;
- содержание;
- основную часть;
- выводы;
- перечень ссылок.

2 Текст выполняется на одной стороне листов (можно и с двух сторон) белой бумаги формата А4 (297x210 мм), рукописным способом (чернилами или пастой темного цвета) или на компьютере в редакторе Word, шрифт Times New Roman Cyr, размер 14, междустрочный интервал одинарный. На листах оставляют поля: левое, верхнее и нижнее не меньше 20 мм, правое не меньше 10 мм.

3 Страницы выполненного задания нумеруют арабскими цифрами. Номер страницы проставляют в правом верхнем углу листа.

4 Текст выполненного задания делят на разделы в соответствии с задачей (раздел - решение одной задачи). Раздел должен иметь порядковый номер арабскими цифрами и название.

5 Текст выполненного задания должен быть четким и не допускать различных толкований. При этом используются термины, обозначения и определения, употребляемые в дисциплине СПР и предыдущих дисциплинах ТЭЦ и высшая математика, а также в рекомендованной учебной и специальной литературе. К использованным формулам должны быть приведены ссылки на источники, а к использованным числовым значениям - объяснение относительно их происхождения. Результаты расчетов сопровождаются указанием соответствующих единиц измерения.

6 Иллюстрации (графики, схемы) выполняются компьютерным способом, а при рукописном способе - тушью, черными чернилами или пастой на листах с текстом, или на кальке, при этом в тексте оставляют свободное место для кальки.

7 Иллюстрации и таблицы обязательно нумеруют и проставляют название (например, "Рисунок 1.1 – Структурная схема системы передачи" – первый рисунок первого раздела). Номер и название размещаются: для иллюстраций - внизу (под иллюстрацией), для таблиц - сверху (над таблицей).

8 Условные графические обозначения на функциональных и структурных схемах должны отвечать требованиям ЕСКД.

9 Перечень ссылок содержит в себе ссылки на учебники, учебные пособия и книги, которые были использованы при выполнении задания. Ссылка в тексте приводятся в квадратных скобках. В скобках проставляют номер, под которым источник значится в перечне ссылок.

10 Выполненное задание должно быть сброшюрованным с использованием скоб, скоросшивателей и т.п.

Приложение Е - Образец титульного листа ИЗ

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СВЯЗИ и ИНФОРМАТИЗАЦИИ УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СВЯЗИ им. О. С. ПОПОВА**

Кафедра теории электрической связи им. А.Г. Зюко

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

по дисциплине «Сигналы и процессы в радиотехнике» на тему:

**ОПИСАНИЕ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ и РАСЧЕТЫ
ИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Выполнил(ла) студент(ка) 2-го курса ННИ РТЭ

группы
(Фамилия и инициалы)

Руководитель
(Фамилия и инициалы)

Индивидуальное задание проверено и допущено к защите

Руководитель
(подпись)

“ ” 200... г.

Оценка индивидуального задания после защиты.

.....
(подпись)

“ ” 200... г.

Одесса 200...