

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и
информатики

кафедра ТОРС

Задание и методические указания к лабораторной работе
по дисциплинам **«Общая теория связи»,**
«Теория информации и информационных систем»,
«Радиотехнические цепи и сигналы»

для студентов 2 курса направлений 210700, 200700, 210400
дневной формы обучения

«Методы цифровой модуляции сигнала»

Составители: д.т.н., проф. Николаев Б. И.
к.т.н. Борисенков А. В.
к.т.н. Чингаева А. М.

Самара, 2014 г.

УДК 621.391

Задание и методические указания к лабораторной работе по дисциплинам «**Общая теория связи**», «**Теория информации и информационных систем**», «**Радиотехнические цепи и сигналы**» для студентов 2 курса специальностей 210700, 200700, 210400 дневной формы обучения «**Методы цифровой модуляции сигнала**» / сост. Б. И. Николаев, А. В. Борисенков, А. М. Чингаева — Самара: ПГУТИ, 2014 — 16 с.

Методическая разработка содержит краткую теорию и подробные указания к выполнению лабораторной работы, посвящённой анализу методов цифровой модуляции сигнала.

- © Б. И. Николаев 2014
- © А. В. Борисенков 2014
- © А. М. Чингаева 2014
- © ПГУТИ 2014

1 Краткие теоретические сведения

Модуляцией называют изменение одного или нескольких параметров несущего сигнала по закону первичного сигнала. **Целью** модуляции является согласование передаваемого сигнала с непрерывным каналом связи.

Особенностью **цифровой модуляции** является то, что первичный сигнал является двоичным, т.е. его амплитуда принимает всего два возможных значения: 0 или 1 (рис. 1).

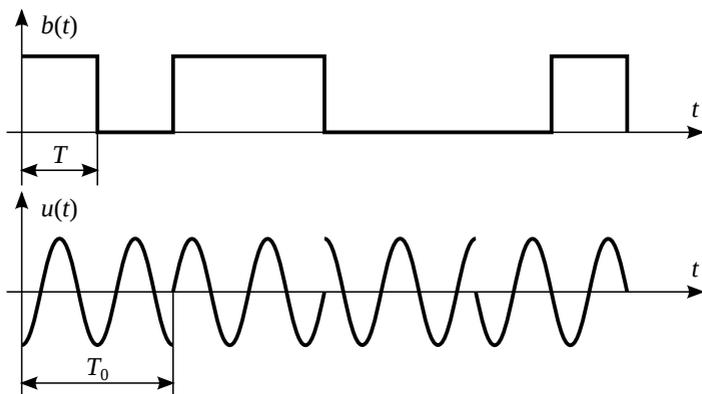


Рис. 1. Иллюстрация цифровой модуляции сигнала

На рис. 2 показана обобщённая схема цифрового модулятора, реализованная в данной работе.

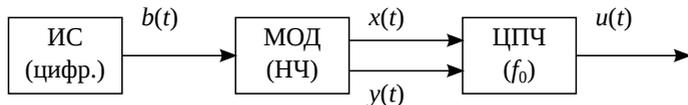


Рис. 2. Обобщённая схема цифрового модулятора

Источник сообщения (ИС) выдаёт цифровое (двоичное) сообщение, состоящее из равновероятных «0» и «1», которое представляется сигналом $b(t)$. Модулятор (МОД) модулирует поступающий сигнал по заданному закону и выдаёт на выход квадратурные компоненты, $x(t)$ и $y(t)$, модулированного сигнала — низкочастотный (НЧ) эквивалент:

$$\dot{U}(t) = x(t) + jy(t).$$

Цифровой преобразователь частоты (ЦПЧ) переносит низкочастотный модулированный сигнал на несущую частоту f_0 :

$$u(t) = \operatorname{Re} \left[\dot{U}(t) e^{j2\pi f_0 t} \right] = x(t) \cos(2\pi f_0 t) - y(t) \sin(2\pi f_0 t).$$

В зависимости от того, какой параметр несущего колебания изменяется при модуляции, получают три основных вида модуляции: амплитудная (АМ), фазовая (ФМ) и частотная (ЧМ).

В случае цифровой модуляции изменяемый параметр имеет фиксированный набор значений (позиций), количество которых называется **позиционностью** модуляции m . Число позиций, как правило, является степенью двойки: $m = 2^n$. В этом случае каждая позиция модулированного сигнала соответствует целому числу бит исходной двоичной последовательности: $n = \log_2 m$.

Чем больше число уровней m , тем большее число бит n отображает каждый уровень, тем выше битовая скорость передачи при одном и том же значении тактового интервала T_0 :

$$V_b = V_0 \log_2 m = \frac{\log_2 m}{T_0},$$

$V_0 = \frac{1}{T_0}$ — скорость модуляции.

1.1 Амплитудная модуляция (АМ)

При амплитудной модуляции по закону первичного сигнала изменяется амплитуда несущей:

$$u(t) = U(t) \cos(2\pi f_0 t).$$

При двоичной амплитудной модуляции (АМ-2) число позиций $m = 2$, и имеется всего два уровня: $U_0 = 0$ и $U_1 = 1$ (здесь и далее сигнал полагается нормированным). Амплитуда $U_0 = 0$ («пауза») соответствует передаче нуля ($b(t) = 0$), амплитуда $U_1 = 1$ («посылка») соответствует передаче единицы ($b(t) = 1$). Модулированный сигнал

$$u(t) = b(t) \cos(2\pi f_0 t).$$

При многопозиционной АМ ($m > 2$) уровни располагаются симметрично относительно начала координат на равных расстояниях друг от друга, и их число равняется m . Например, при $m = 4$ получаем 4 уровня: $U_0, U_1, U_2 = -U_1$ и $U_3 = -U_0$ (см. рис. 3).

Отображение комплексных амплитуд сигнала на комплексной плоскости (как на рис. 3) называют **сигнальным созвездием**.

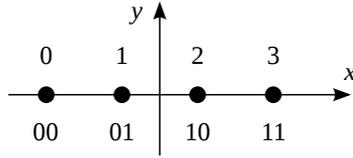


Рис. 3. Сигнальные точки при АМ-4

При АМ все значения (уровни) амплитуды действительные и располагаются вдоль оси x . Десятичные номера на рис. 3 соответствуют номерам уровней, а их двоичные представления — битам исходной двоичной последовательности. При АМ-4 $m = 4$, и число бит, отображаемых одним уровнем модулированного сигнала, $n = \log_2 4 = 2$.

1.2 Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ)

Квадратурная амплитудная модуляция получается как алгебраическая сумма двух сигналов АМ, сдвинутых по отношению друг к другу на угол $\frac{\pi}{2}$:

$$u(t) = x(t) \cos(2\pi f_0 t) - y(t) \sin(2\pi f_0 t),$$

где $x(t)$ — синфазная, а $y(t)$ — квадратурная компоненты сигнала.

В простейшем случае имеются 2 уровня $x(t)$ и 2 уровня $y(t)$. Сумма двух сигналов АМ-2 даёт сигнал КАМ с $m = 4$ (КАМ-4, см. рис. 4).

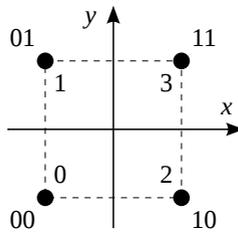


Рис. 4. Сигнальные точки при КАМ-4

Сигнальное созвездие КАМ всегда симметрично относительно начала координат.

При числе позиций $m > 4$ уровни комплексной амплитуды задаются в виде таблицы, где каждому индексу (комбинации двоичных бит исходной последовательности) соответствует пара чисел x и y . Модулятор КАМ

преобразует группы входных бит в индексы и выдаёт на выход соответствующие значения комплексных амплитуд, которые затем поступают на цифровой преобразователь частоты (см. рис. 2).

Недостатками АМ и КАМ являются

- скачки фазы и/или амплитуды на границах тактовых интервалов, приводящие к расширению спектра;
- непостоянство амплитуды модулированного сигнала (кроме КАМ-4), приводящее к увеличению пик-фактора.

1.3 Цифровая фазовая модуляция (ФМ)

При фазовой модуляции по закону первичного сигнала изменяется начальная фаза несущей:

$$u(t) = U_0 \cos [2\pi f_0 t + \varphi(t)].$$

Комплексная амплитуда при ФМ

$$\dot{U}(t) = U_0 e^{j\varphi_i},$$

где $\varphi_i = \frac{2\pi}{m} i$ — позиции фазы на комплексной плоскости (см. рис. 5).

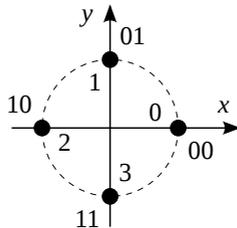


Рис. 5. Пример сигнального созвездия ФМ при $m = 4$

Преимуществом ФМ является постоянство амплитуды модулированного сигнала и, как следствие, низкий пик-фактор. Недостатком — скачки фазы на границах тактовых интервалов, приводящие к расширению спектра.

1.4 Цифровая частотная модуляция (ЧМ)

При частотной модуляции по закону первичного сигнала изменяется частота несущей:

$$\omega(t) = 2\pi f(t).$$

При цифровой ЧМ позиции частоты фиксированы, а их число равняется m . Модулированный сигнал

$$u(t) = U_0 \cos [2\pi(f + \Delta f_i)t],$$

где Δf_i — девиация (отклонение) от несущей частоты i -й позиции. Минимальное значение девиации частоты, при котором сохраняется ортогональность в усиленном смысле сигналов различных позиций, $\Delta f_{\min} = \frac{1}{4T_0}$. Соответственно, минимальное расстояние между поднесущими (сигналами с частотами $(f + \Delta f_i)$) равняется $2\Delta f_{\min} = \frac{1}{2T_0}$ (см. рис. 6).

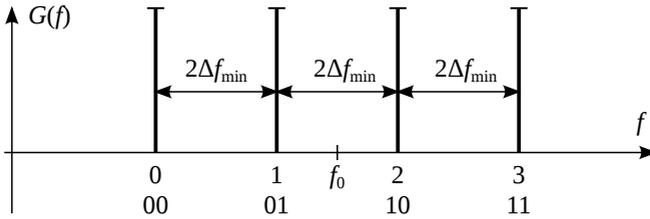


Рис. 6. Поднесущие сигнала ЧМ при $m = 4$

Комплексная амплитуда при ЧМ

$$\dot{U}(t) = U_0 e^{j2\pi\Delta f_i t}$$

является функцией времени, поэтому её отображение в виде сигнальных точек на комплексной плоскости невозможно — это будет вектор, вращающийся с частотой Δf_i .

При ЧМ, так же, как и при ФМ, амплитуда модулированного сигнала постоянна, т.е. ЧМ также имеет малый пик-фактор. Однако, с увеличением m при ЧМ быстро растёт занимаемая полоса частот.

1.5 Модуляция с минимальным сдвигом (ММС)

Модуляция с минимальным сдвигом — особый случай двоичной ЧМ ($m = 2$), при котором $\Delta f_{\min} = \frac{1}{4T_0}$. Уменьшение вдвое минимального значения девиации частоты по сравнению с обычной ЧМ-2 оказывается возможно при строгом соблюдении непрерывности фазы несущей на границах тактовых интервалов.

Для формирования сигналов ММС на практике применяют квадратурную схему модуляции (см. рис. 7).

Блок «ПК» выполняет операцию перекодировки: $c_k = c_{k-1} \oplus b_k$. Коммутатор «КОМ» демультиплексирует входной поток на два: чётных и

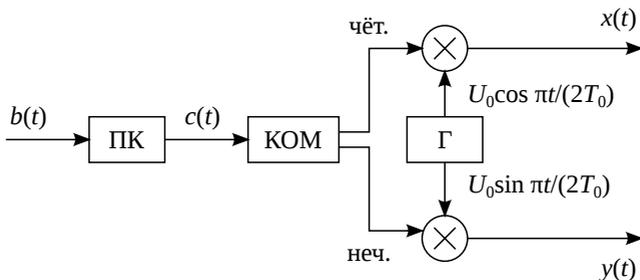


Рис. 7. Квадратурная схема формирования сигнала ММС

нечётных бит, при этом сигнал в чётной ветви запаздывает на T_0 по отношению к нечётной. Длительности тактовых интервалов в обеих ветвях увеличиваются вдвое: $T = 2T_0$. Генератор «Г» формирует компоненты комплексного опорного сигнала

$$u_c(t) = U_0 \cos \frac{\pi t}{2T_0}, \quad u_s(t) = U_0 \sin \frac{\pi t}{2T_0},$$

которые затем перемножаются с сигналами чётной и нечётной ветви соответственно. На выходе схемы получаются квадратурные компоненты

$$x(t) = c_{\text{чёт}}(t)U_0 \cos \frac{\pi t}{2T_0} \quad \text{и} \quad y(t) = c_{\text{неч}}(t)U_0 \sin \frac{\pi t}{2T_0}$$

сигнала ММС, которые затем поступают на цифровой преобразователь частоты (см. рис. 2).

Модулятор ММС является устройством с **памятью**: форма сигнала в данный момент времени определяется не только текущим значением передаваемой последовательности, но и всеми предыдущими.

1.6 Спектры сигналов цифровой модуляции

Поскольку исходная двоичная последовательность, представленная первичным сигналом $b(t)$, является случайной, модулированный сигнал $u(t)$ также будет случайным. По определению, спектральная плотность мощности (**энергетический спектр**) случайного сигнала

$$G(f) = \frac{1}{T} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2(f)}{N},$$

где $S_i(f)$ — амплитудный спектр одной реализации случайного модулированного сигнала длительностью T . Данная формула хорошо подходит

для экспериментального определения $G(f)$, в теоретических же расчётах используется формула Винера-Хинчина:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau = 2 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau,$$

где $B(\tau)$ — корреляционная функция модулированного сигнала.

Энергетические спектры сигналов при различных видах модуляции:

- В спектре **двоичной АМ** содержится несущая и сдвинутый на величину f_0 по оси частот спектр первичного сигнала $G_b(f)$:

$$G_u(f) = K \operatorname{sinc}^2 [\pi(f - f_0)T_0] + G_0\delta(f - f_0).$$

Здесь K и G_0 — нормировочные коэффициенты, $\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$, $\delta(x)$ — дельта-функция.

- В спектрах сигналов **многопозиционной АМ** ($m > 2$) и **КАМ** несущая отсутствует, т.к. сигнальные точки симметричны относительно начала координат:

$$G_u(f) = K \operatorname{sinc}^2 [\pi(f - f_0)T_0].$$

- Спектр сигнала **ФМ** при любом m имеет вид, аналогичный многопозиционной АМ и КАМ:

$$G_u(f) = K \operatorname{sinc}^2 [\pi(f - f_0)T_0].$$

- Сигнал **двоичной ЧМ** можно представить как сумму двух сигналов АМ-2 с частотами поднесущих $(f_0 - \Delta f)$ и $(f_0 + \Delta f)$. Соответственно, его спектр также будет представлять собой сумму двух спектров сигналов АМ-2:

$$G_u(f) = K \operatorname{sinc}^2 [\pi(f - f_0 + \Delta f)T_0] + G_0\delta(f - f_0 + \Delta f) + K \operatorname{sinc}^2 [\pi(f - f_0 - \Delta f)T_0] + G_0\delta(f - f_0 - \Delta f).$$

- В спектре сигнала **многопозиционной ЧМ** ($m > 2$) содержатся соответственно m поднесущих на частотах $f_i = f_0 + \Delta f_i$ и суммарный спектр, образованный наложением боковых полос:

$$G_{m\text{ЧМ}} = \sum_{i=1}^m [K \operatorname{sinc}^2(\pi(f - f_i)T_0) + G_0\delta(f - f_i)].$$

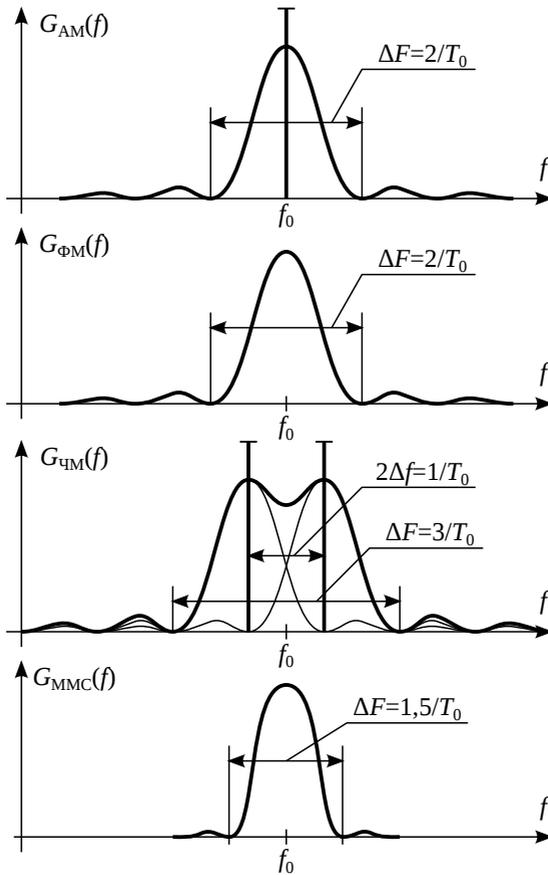


Рис. 8. Спектры сигналов двоичной АМ, ФМ и ЧМ при прямоугольной форме импульсов первичного сигнала $b(t)$ и спектр сигнала ММС

- Аналитическое выражение спектра сигнала ММС:

$$G_{\text{ММС}}^u(f) = K \left[\frac{\cos(2\pi(f - f_0)T_0)}{1 - 16((f - f_0)T_0)^2} \right]^2.$$

Спектр ММС выгодно отличается от спектров других сигналов двоичной модуляции тем, что занимает наименьшую полосу частот и имеет минимальный уровень вне этой полосы.

Шириной спектра модулированного сигнала называют полосу частот ΔF , в которой сосредоточена основная часть энергии сигнала. В различных задачах критерий определения основной части энергии сигнала

может выбираться различным образом. В данной работе ширина полосы частот определяется по центральному (основному) лепестку спектра сигнала (см. рис. 8 на стр. 10).

Спектральной эффективностью модуляции называется отношение скорости передачи информации к полосе частот модулированного сигнала: $V_b/\Delta F$. Спектральная эффективность является одним из важных показателей качества модуляции.

2 Домашнее задание

1. Рассчитать и построить в масштабе спектры сигналов двоичной АМ, ФМ и ЧМ (при $\Delta f = \Delta f_{\min}$) для $K = G_0 = 1$ и $T_0 = abc \cdot 10^{-6}$ с, где abc — три последние цифры номера студенческого билета (например, 194). Несущую частоту f_0 выбрать равной $\frac{16}{T_0}$.
2. Используя построенные в п. 1 спектры, определить ширину полосы частот ΔF (по центральному лепестку) и рассчитать спектральную эффективность $V_b/\Delta F$ для всех трёх видов модуляции.

3 Указания к выполнению работы

Перед началом работы ознакомьтесь с интерфейсом пользователя: нажмите F1 или выберите в главном меню «Помощь → Руководство пользователя».

3.1 Цель работы

Целью работы является анализ временных и спектральных характеристик и определение показателей эффективности цифровой модуляции сигнала.

3.2 Общие замечания

В целях обучения для наблюдения временных диаграмм удобно брать небольшие значения несущей частоты $f_0 = (3 \dots 5) \frac{1}{T_0}$. Однако, следует помнить, что в реальных системах передачи, как правило, $f_0 \gg \frac{1}{T_0}$.

Исходный двоичный сигнал генерируется случайно. Если форма этого сигнала при запуске работы оказалась «неудачной» (например, все нули и одна единица), регенерируйте его нажатием клавиш **Ctrl+R** (или выбором соответствующего пункта меню).

Диаграммы можно как зарисовывать, так и копировать непосредственно в электронный отчёт (или сохранять в виде графических файлов).

3.3 Выбор варианта

Тактовый интервал $T_0 = (N \cdot M)/100$ мс, где N — номер бригады, M — последняя цифра номера группы.

3.4 Исследование временных и спектральных характеристик модулированных сигналов

Исследуйте временные и спектральные характеристики сигналов АМ, КАМ, ФМ, ЧМ и ММС.

1. Установите значения тактового интервала T_0 и несущей частоты $f_0 = (3 \dots 5) \frac{1}{T_0}$ в соответствии с вариантом.
2. Для всех видов модуляции и всех значений числа позиций m определите ширину полосы частот ΔF по центральному (основному) лепестку спектра сигнала и заполните соответствующие строки таблицы 1. Спектральная диаграмма модулированного сигнала вычисляется при нажатии на кнопку «Рассчитать спектр», изображение можно масштабировать и перемещать с помощью мыши. Девиацию частоты при ЧМ устанавливать минимально возможной: $\Delta f = \frac{1}{2T_0}$. Внимание! Для получения неискажённого спектра при ЧМ значения несущей частоты необходимо выбирать равными $f_0 = (m + 5)\Delta f$.
3. Пронаблюдайте и занесите в отчёт временные диаграммы исходного сигнала $b(t)$ ¹, НЧ эквивалента (квадратурных компонент) модулированного сигнала $x(t)$ и $y(t)$, временные **и спектральные**² диаграммы модулированного сигнала $u(t)$, а также сигнальные созвездия для всех видов модуляции и всех значений числа позиций m . Для ЧМ значения несущей частоты устанавливайте равными $f_0 = (m + 5)\Delta f$ (девиация частоты $\Delta f = \frac{1}{2T_0}$), для остальных видов модуляции — $f_0 = (3 \dots 5) \frac{1}{T_0}$.
4. Пронаблюдайте за изменением векторных диаграмм различных модулированных сигналов при перемещении во времени.
5. Сделайте выводы по всем пунктам работы.

¹один раз, если сигнал не меняется

²если спектральные диаграммы для отдельных видов модуляции и/или значений m получаются одинаковыми, достаточно занести в отчёт только одну из них

3.5 Определение спектральной эффективности модуляции

Определите спектральную эффективность всех видов модуляции для всех значений m как отношение битовой скорости к ширине полосы частот модулированного сигнала. Результаты расчётов сведите в табл. 1. Сделайте выводы.

Таблица 1

	$m = 2$	$m = 4$	$m = 8$	$m = 16$
$\Delta F_{\text{АМ}}$, кГц				
$\Delta F_{\text{КАМ}}$, кГц	—			
$\Delta F_{\text{ФМ}}$, кГц				
$\Delta F_{\text{ЧМ}}$, кГц				
$\Delta F_{\text{ММС}}$, кГц		—	—	—
V_0 , кБод				
V_b , кбит/с				
$V_b/\Delta F_{\text{АМ}}$, (бит/с)/Гц				
$V_b/\Delta F_{\text{КАМ}}$, (бит/с)/Гц	—			
$V_b/\Delta F_{\text{ФМ}}$, (бит/с)/Гц				
$V_b/\Delta F_{\text{ЧМ}}$, (бит/с)/Гц				
$V_b/\Delta F_{\text{ММС}}$, (бит/с)/Гц		—	—	—

3.6 Исследование спектра ЧМ сигнала

Установите несущую частоту равной $f_0 = \frac{16}{T_0}$. Увеличивая значение девиации частоты Δf , начиная от $\Delta f_{\min} = \frac{1}{2T_0}$, пронаблюдайте за изменением спектра ЧМ сигнала при различных m . Занесите в отчёт спектральную диаграмму ЧМ-4 при значении $\Delta f = 4\Delta f_{\min}$. Сделайте выводы.

4 Содержание отчёта

1. Название и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Временные и спектральные диаграммы, таблицы зависимостей и выводы по всем пунктам лабораторной работы.
4. Общий вывод по результатам лабораторной работы.

Примечание: общий вывод не должен быть перефразировкой целей работы, а должен содержать обобщение (но не копию!) всех выводов, сделанных по каждому пункту в отдельности.

5 Контрольные вопросы

1. Дайте определение модуляции. В чём особенность цифровой модуляции?
2. Изобразите обобщённую схему цифрового модулятора, используемую в данной работе, и поясните принцип её работы.
3. Какие основные виды модуляции вы знаете? Что такое «позиционность» модуляции?
4. Как определяется скорость модуляции? битовая скорость?
5. Что называют сигнальным созвездием? Приведите примеры.
6. Как осуществляется цифровая амплитудная модуляция? В чём её преимущества? недостатки?
7. Что такое квадратурная амплитудная модуляция? Чем она отличается от АМ?
8. Как осуществляется цифровая фазовая модуляция? В чём её преимущества? недостатки?
9. Как осуществляется цифровая частотная модуляция? В чём её преимущества? недостатки?
10. Что такое модуляция с минимальным сдвигом? В чём её отличие от обычной ЧМ?
11. Дайте определение энергетического спектра случайного сигнала. Какую формулу для определения спектра используют в теоретических расчётах?
12. Как определяется ширина полосы частот сигнала?
13. Что называется спектральной эффективностью модуляции? Сравните спектральную эффективность различных видов модуляции, пользуясь результатами лабораторной работы.
14. Запишите аналитические выражения и постройте графики спектральной плотности двоичной АМ, ФМ и ЧМ.

15. Как выглядит спектр многопозиционной ЧМ? Ответ иллюстрируйте графиками из лабораторной работы.
16. Изобразите спектр сигнала ММС. В чём его отличие от спектров других сигналов двоичной модуляции?
17. Как меняется вид спектра ЧМ сигнала при изменении Δf ? Ответ иллюстрируйте графиками.

Литература

1. Кловский Д. Д. Теория электрической связи. — М.: Радиотехника, 2009. — 648 с.
2. Теория электрической связи: учебник для вузов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, В. И. Коржик, М. В. Назаров; Под ред. Д. Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 1998. — 432 с.

**Николаев Борис Иванович
Борисенков Алексей Владимирович
Чингаева Анна Михайловна**

Задание и методические указания к лабораторной работе
по дисциплинам **«Общая теория связи»,**
«Теория информации и информационных систем»,
«Радиотехнические цепи и сигналы»

для студентов 2 курса специальностей 210700, 200700, 210400
дневной формы обучения

«Методы цифровой модуляции сигнала»