

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РФ

Московский технический университет связи и информатики

Н.А. Шишова

*Рекомендовано УМО по образованию в области
телекоммуникаций для студентов,
обучающихся по направлению подготовки
бакалавров 210700 - Инфокоммуникационные
технологии и системы связи*

Протокол №56 от 31.03.2011г.

**Методические указания
по проведению тестирования, практических и лабораторных
занятий**

**по курсу «ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ»**

Учебное пособие

МОСКВА 2011

УДК 621.395.341 (075)

Н.А. Шишова. Методические указания по проведению тестирования, практических и лабораторных занятий по курсу «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей». Учебное пособие / МТУСИ. – М., 2011. – 23 с. ил.

Рассмотрены основные определения, теоретический материал и примеры решения задач по различным разделам курса «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей». Приведены типовые задачи и тесты для самопроверки. Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 210700 - Инфокоммуникационные технологии и системы связи, при изучении современных телекоммуникационных систем.

Ил. 14, список лит. 3 назв.

Рецензенты: В.Н. Дмитриев, докт. техн. наук, профессор (АГТУ)

Б.В. Попов, канд. техн. наук, профессор (ПГУТИ)

© Московский технический университет
связи и информатики, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей» является одной из базовых дисциплин в подготовке специалистов в области электросвязи. Поэтому высокое качество подготовки не может быть гарантировано без глубокого знания курса и умения владеть учебным материалом при решении практических задач инженерного характера. При изучении курса теоретический материал целесообразно применять для решения отдельных, элементарных в начале обучения, и более сложных, комплексных и системных, в конце обучения вопросов и задач по различным разделам изучаемой дисциплины. Это способствует не только выработке умения выбрать и отыскать наиболее оптимальные методы решения, но и выработке навыков работы с многочисленной справочной и нормативной литературой.

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ КУРСА «ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ»

1. Принципы построения ЕСЭ РФ.
2. Особенности коммутации каналов, сообщений и пакетов.
3. Логарифмические единицы передачи.
4. Диаграмма уровней.
5. Основные характеристики первичных сигналов.
6. Основные характеристики речевого (телефонного) сигнала.
7. Основные характеристики нетелефонных сигналов.
8. Принципы построения канала двустороннего действия.
9. Дифференциальная система (ДС).
10. Канал как одиночная замкнутая система.
11. Электрическое эхо в телефонных каналах.
12. Амплитудная модуляция (АМ).
13. Методы формирования канальных сигналов при АМ.
14. Методы формирования одной боковой полосы (ОБП).
15. Структурная схема МСП с частотным разделением каналов (ЧРК).
16. Иерархические принципы построения аналоговых систем передачи (АСП).
17. Принципы формирования стандартных групп каналов.

18. Принципы организации двусторонних линейных трактов.
19. Структурная схема МСП с временным разделением каналов (ВРК).
20. Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ).
21. Этапы формирования цифрового сигнала.
22. Квантование сигнала по уровню.
23. Принципы двоичного кодирования.
24. Иерархические принципы построения цифровых систем передачи (ЦСП).
25. Принципы регенерации цифровых сигналов.
26. Особенности построения волоконно-оптических систем передачи (ВОСП).
27. Общие принципы построения систем и сетей мобильной связи.
28. Общие принципы построения радиорелейных систем передачи (РРСП).
29. Распространение сигнала на интервале радиорелейной линии (РРЛ).
Замирания и борьба с ними.

1. УРОВНИ ПЕРЕДАЧИ

Электрические сигналы количественно можно характеризовать мощностью P , напряжением U и током I . В технике электросвязи принято пользоваться логарифмическими величинами - **уровнями передачи**, что позволяет существенно упростить многие расчеты, связанные с передачей сигналов. Уровни передачи, вычисленные посредством десятичных логарифмов, выражаются в децибелах (дБ).

Уровнем передачи называется логарифмическое отношение мощности, напряжения или тока передаваемого сигнала, измеренное в какой либо точке x системы, к уже известным опорным величинам. Количественные значения уровней передачи определяются по формулам:

- уровень по мощности $p_M = 10 \lg \frac{P_x}{P_0}$, дБ
 - уровень по напряжению $p_H = 20 \lg \frac{U_x}{U_0}$, дБ
- (1)

- уровень по току $p_T = 20 \lg \frac{I_x}{I_0}$, дБ

где P_x, U_x, I_x - величины мощности, напряжения и тока в рассматриваемой точке x системы;

P_0, U_0, I_0 - величины, принятые за опорные.

Практически могут существовать три случая соотношения мощностей, напряжений и токов:

1. $P_x > P_0, U_x > U_0, I_x > I_0$. Уровни передачи будут иметь значения больше нуля и называются *положительными уровнями*, т.е. имеют знак «+»;
2. $P_x = P_0, U_x = U_0, I_x = I_0$. Уровни передачи равны нулю и называются *нулевыми уровнями*;
3. $P_x < P_0, U_x < U_0, I_x < I_0$. Уровни передачи будут меньше нуля и называются *отрицательными уровнями*, т.е. имеют знак «-».

Для расчета значений абсолютных значений параметров сигнала при известных уровнях передачи в дБ используются очевидные математические соотношения:

$$P_x = P_0 \cdot 10^{0,1 \cdot p_m}, \quad U_x = U_0 \cdot 10^{0,05 \cdot p_n}, \quad I_x = I_0 \cdot 10^{0,05 \cdot p_T}$$

В зависимости от значений опорных величин P_0, U_0, I_0 различают три вида уровней передачи: абсолютный, относительный и измерительный.

Абсолютными уровнями передачи называются такие уровни, когда мощность $P_0 = 1 \text{ мВт}$ (мВ·А), напряжение $U_0 = 0,775 \text{ В}$, ток $I_0 = 1,29 \text{ мА}$, что имеет место при $Z_0 = 600 \text{ Ом}$. При этом формулы (1) примут вид:

$$p_M = 10 \lg \frac{P_x(Bm)}{1 \cdot 10^{-3}}, \text{ дБм}$$

$$p_H = 20 \lg \frac{U_x(B)}{0,775}, \text{ дБн}$$

$$p_T = 20 \lg \frac{I_x(A)}{1,29 \cdot 10^{-3}}, \text{ дБт}$$

На основании известных соотношений

$$P = I \cdot U; \quad I = \frac{U}{|Z|}; \quad P = \frac{U^2}{|Z|}; \quad U = I \cdot |Z|; \quad P = I^2 \cdot |Z|$$

где Z – сопротивление (в общем случае комплексное),

соотношения для абсолютных уровней передачи p_M , p_H и p_T будут следующие:

$$p_M = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} = 10 \lg \left[\frac{U_x^2}{|Z_x|} \cdot \frac{|Z_0|}{U_0^2} \right] = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} + 10 \lg \left| \frac{Z_0}{Z_x} \right| = p_H + 10 \lg \left| \frac{Z_0}{Z_x} \right| \text{ дБм},$$

$$p_M = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} = 10 \lg \left[\frac{I_x^2}{I_0^2} \cdot \frac{|Z_x|}{|Z_0|} \right] = 20 \lg \frac{I_x}{I_0} + 10 \lg \left| \frac{Z_x}{Z_0} \right| = p_T - 10 \lg \left| \frac{Z_0}{Z_x} \right| \text{ дБм},$$

$$p_H = p_T - 20 \lg \left| \frac{Z_0}{Z_x} \right| \text{ дБн}.$$

При $Z_x = 600$ Ом получим $p_M = p_H = p_T$.

Измерительным уровнем называют абсолютный уровень в точке x тракта передачи, если к входу канала передачи подключен генератор гармонического колебания с абсолютным уровнем и частотой, рекомендованными (т.е. установленными директивно) при выполнении измерений. В качестве такого генератора для каналов тональной частоты (ТЧ) обычно используют генератор со следующими характеристиками: частота 1020 Гц, ЭДС = 1,55 В, выходное сопротивление 600 Ом. Такой генератор иногда называют «нормальным», при его подключении к входу канала, который имеет входное сопротивление 600 Ом, на

этом входе устанавливаются нулевые абсолютные уровни мощности и напряжения.

Относительными уровнями передачи называются уровни, определяемые в точке x системы при значениях P_0, U_0, I_0 , соответствующих величинам в некоторой другой точке системы, принятой за исходную (или начальную), т.е. $P_0 = P_{\text{вх}}, U_0 = U_{\text{вх}}, I_0 = I_{\text{вх}}$.

Относительные уровни передачи представляют собой разность абсолютных уровней в некоторой точке x и точке, принятой за исходную. Тогда

$$p_{M_0} = 10 \lg \frac{P_x}{P_{\text{вх}}} = 10 \lg \left[\frac{P_x}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3}}{P_{\text{вх}}} \right] = 10 \lg \left[\frac{P_x}{1 \cdot 10^{-3}} \right] - 10 \lg \left[\frac{P_{\text{вх}}}{1 \cdot 10^{-3}} \right] = p_x - p_{\text{вх}}, \text{дБом}$$

где $p_x, p_{\text{вх}}$ - абсолютные уровни сигнала соответственно в точке x и точке, принятой за исходную.

В точке нулевого относительного уровня (ТНОУ) $p_x = p_{\text{вх}} \Rightarrow p_{M_0} = 0 \text{ дБ}$.

Единицы измерения абсолютного уровня $p_M^{\text{ТНОУ}}$, определённого в ТНОУ, записываются как дБм0.

Для перехода относительного уровня к абсолютному следует использовать выражение:

$$p_M = p_{M_0} + p_M^{\text{ТНОУ}}.$$

Пример:

Действующее значение напряжения сигнала в заданной точке тракта системы передачи равно 1,6 В. Сопротивление цепи передачи в этой точке составляет 75 Ом. Определить значения абсолютных уровней передачи по мощности, напряжению и току.

Решение:

$$p_{\text{н}} = 20 \lg \left(\frac{1,6}{0,775} \right) \cong 20 \lg(2) = 6 \text{ дБн}$$

$$p_{\text{м}} = 10 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) = p_{\text{н}} + 10 \lg \left(\left| \frac{Z_0}{Z} \right| \right) \cong 6 + 10 \lg \left(\frac{600}{75} \right) = 6 + 10 \lg(8) \cong 15 \text{ дБм}$$

$$p_{\text{т}} = p_{\text{м}} + 10 \lg \left(\left| \frac{Z_0}{Z} \right| \right) \cong 15 + 9 = 24 \text{ дБт}$$

При решении подобных задач можно использовать таблицу приближенных значений:

A	10lg(A), дБ /приблизенно/
1	0
2	3
3	4,8
5	7
7	8,5
11	10,4
13	11,1

Промежуточные значения могут быть получены из указанных в таблице значений путем разложения на слагаемые. Например, $10 = 5 \cdot 2 \Rightarrow 10 \lg(10) = 10 \lg(5) + 10 \lg(2) = 7 + 3 = 10$.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Абсолютный уровень сигнала по мощности в некоторой точке тракта системы передачи составляет $p_m = (-26+N)$ дБм (N – здесь и в последующих задачах номер студента по журналу). Сопротивление в этой точке составляет 150 Ом. Найти абсолютный уровень по напряжению и току, а также значения мощности и напряжения сигнала.
2. Напряжение гармонического испытательного сигнала составляет $U_x = (5+2N)$ мВ. Найти соответствующий этому напряжению абсолютный уровень по напряжению.
3. Мощность сигнала в ТНОУ равна $P_x = (10+5N)$ мВт. Рассчитать абсолютный уровень этого сигнала.
4. Определить абсолютный уровень по мощности гармонического сигнала на сопротивлении $Z_x = (75+2N)$ Ом, если известно, что абсолютный уровень сигнала по напряжению на этом сопротивлении $p_n = (5-5N)$ дБн.
5. Абсолютный уровень по мощности сигнала в измеряемой точке с сопротивлением $Z_x = (75+2N)$ Ом составляет $p_m = (10-2N)$ дБм. Рассчитайте абсолютный уровень по напряжению в этой точке.
6. Определить величины мощности и напряжения гармонического сигнала на сопротивлении $Z_x = (75+2N)$ Ом, если известно, что абсолютный уровень сигнала по мощности на этом сопротивлении $p_m = (5-5N)$ дБм.
7. Найдите значение мощности сигнала, если известно что уровень по мощности равен $p_m = (10-2N)$ дБм.
8. На один вход развязывающего устройства (рис.1) подан сигнал с абсолютным уровнем 0 дБм, а на другой – с абсолютным уровнем $(10-2N)$ дБм. Каков будет

абсолютный уровень сигнала по мощности на выходе развязывающего устройства (потерями в развязывающем устройстве пренебречь).

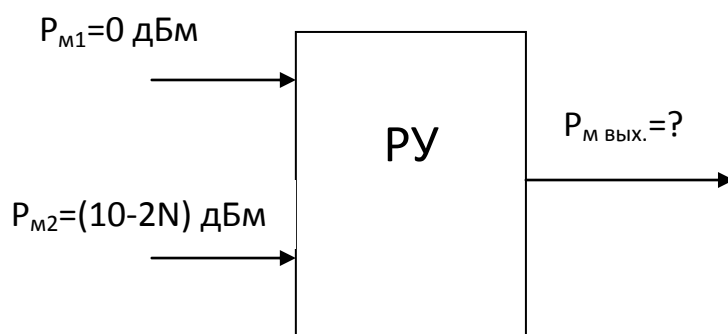


Рис.1.

9. В точке тракта с сопротивлением Ом абсолютный уровень по мощности равен абсолютному уровню по напряжению.
10. В точке тракта с сопротивлением Ом абсолютный уровень по мощности больше абсолютного уровня по напряжению.
11. В точке тракта с сопротивлением Ом абсолютный уровень по мощности меньше абсолютного уровня по напряжению.
12. В точке тракта с мощностью $P_x = 0$ Вт абсолютный уровень по мощности равен дБ.
13. В точке тракта с мощностью Вт абсолютный уровень по мощности равен $p_m = 0$ дБ.
14. В точке тракта с мощностью $P_x = 100$ мВт абсолютный уровень по мощности равен дБ.

2. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛЬНЫХ И ГРУППОВЫХ СИГНАЛОВ

В основе амплитудной модуляции (АМ) лежит операция перемножения сигнала и несущей. На рис.2в изображена классическая форма АМ сигнала, полученного в результате перемножения сигнала $U_c(t)$ (рис.2а) и переносчика (несущей) $U_n(t)$ (рис.2б). Спектр АМ сигнала $S_{AM}(f)$ содержит несущее колебание с амплитудой U_{ω_n} и колебания двух боковых частот, симметричных относительно несущей и с одинаковыми амплитудами $U_{\omega_0} = 0,5mU_{\omega_n}$. Спектр первичного сигнала, несущей и АМ сигнала при модуляции гармоническим колебанием показан на рис. 2г, 2д и 2е соответственно.

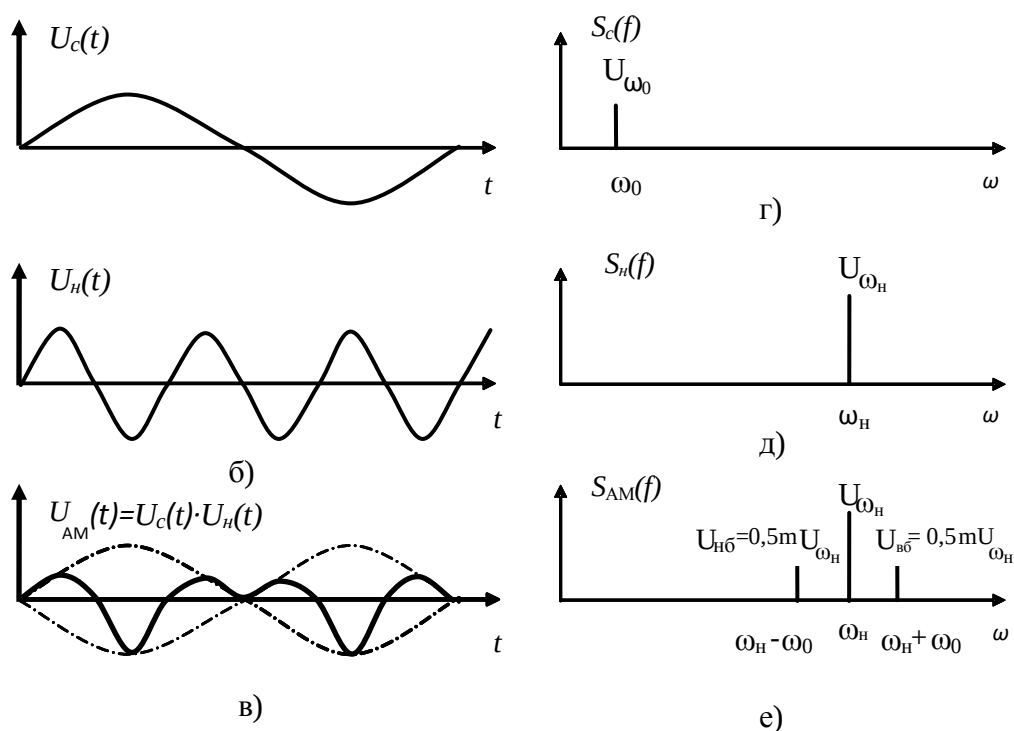


Рис.2. Временное (а,б,в) и частотное (г,д,е) представление
сигналов при амплитудной модуляции

Если первичный сигнал представляет сложный сигнал, спектр которого ограничен полосой частот $\omega_1.. \omega_2$ (рис. 3а), то спектр АМ сигнала будет иметь вид, согласно рис.3б.

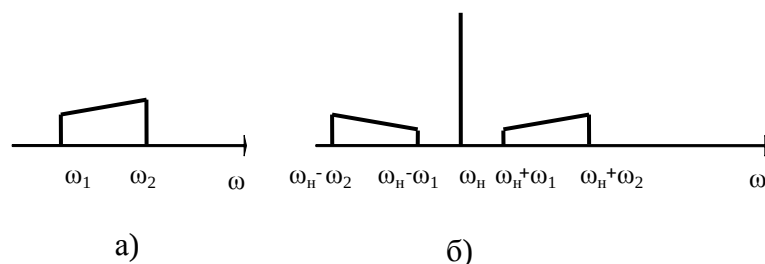


Рис.3. Спектр первичного сигнала и АМ канального сигнала при модуляции сложным сигналом

Таким образом, спектр АМ сигнала содержит несущую и две боковые полосы частот (нижнюю и верхнюю), симметричные относительно несущей частоты. Полная ширина спектра канального сигнала при АМ равна удвоенной наивысшей частоте спектра первичного сигнала $\Delta\omega = \omega_n + \omega_2 - \omega_n + \omega_2 = 2\omega_2$.

В системах передачи (СП) с частотным разделением каналов (ЧРК) для формирования канального сигнала чаще всего используют метод передачи одной боковой полосы (ОБП) или однополосную модуляцию, что позволяет разместить в заданном частотном диапазоне максимальное количество каналов. Несущие частоты выбирают так, чтобы спектры канальных сигналов не только не перекрывались, но между ними оставался защитный промежуток Δf_3 для их качественного разделения (расфильтровки) при помощи реальных полосовых фильтров (рис.4). Групповой сигнал получают, суммируя канальные сигналы (рис.4). Ширина его частотного спектра составляет

$$\Delta f_{\text{ЧРК}} = \Delta f_k \cdot N, \quad (2)$$

где $\Delta f_k = \Delta f + \Delta f_3$, $\Delta f = f_2 - f_1$ – ширина спектра канального сигнала, Δf_3 – защитный промежуток, N – количество каналов.

Очевидно, что разнос между несущими частотами смежных (соседних) каналов должен составлять Δf_k .

В соответствии с вышесказанным, для канала ТЧ:

$$f_1 = 0,3 \text{ кГц}; \quad f_2 = 3,4 \text{ кГц}; \quad \Delta f = 3,1 \text{ кГц}; \quad \Delta f_k = 4 \text{ кГц} \text{ и } \Delta f_3 = 0,9 \text{ кГц}.$$

В иерархии СП с ЧРК все групповые сигналы кратны 12 каналам ТЧ. Например, первичная группа объединяет 12 каналов ТЧ и ширина частотного спектра группового сигнала должна быть $\Delta f_{\text{ЧРК}} = 12 \cdot \Delta f_k = 48 \text{ кГц}$.

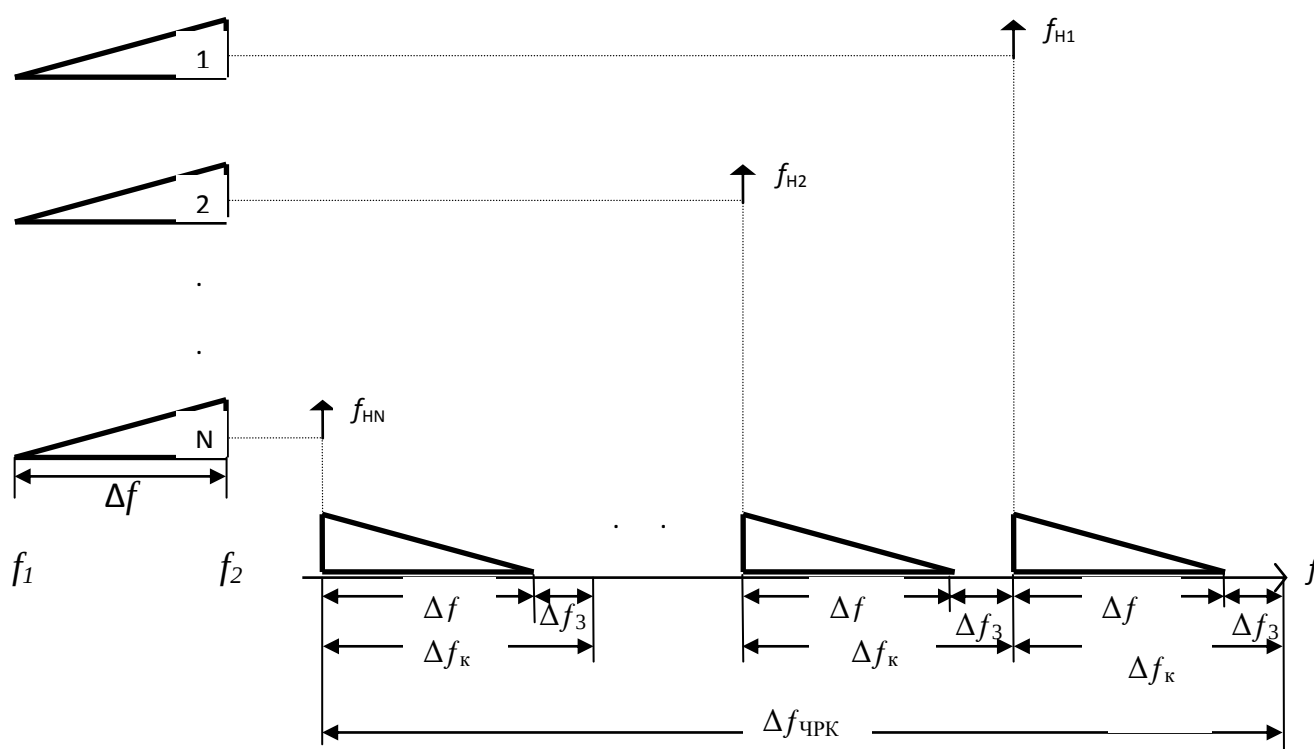


Рис.4. Пояснение формирования группового сигнала в системах с ЧРК

При реализации метода передачи ОБП необходимо подавить несущее колебание и одну боковую полосу частот. Подавление несущей частоты осуществляется соответствующим выбором схем преобразователей частоты: балансной или двойной балансной (кольцевой) схемы канального амплитудного

модулятора. Несущее колебание на выходе таких схем при их балансировании будет практически отсутствовать.

Подавление неиспользуемой боковой полосы частот осуществляется *фильтровым* или *фазоразностным* (ФРМ) *методами*. Фильтровый способ является основным. В общем виде схема, реализующая фильтровой метод формирования ОБП, приведена на рис.5.

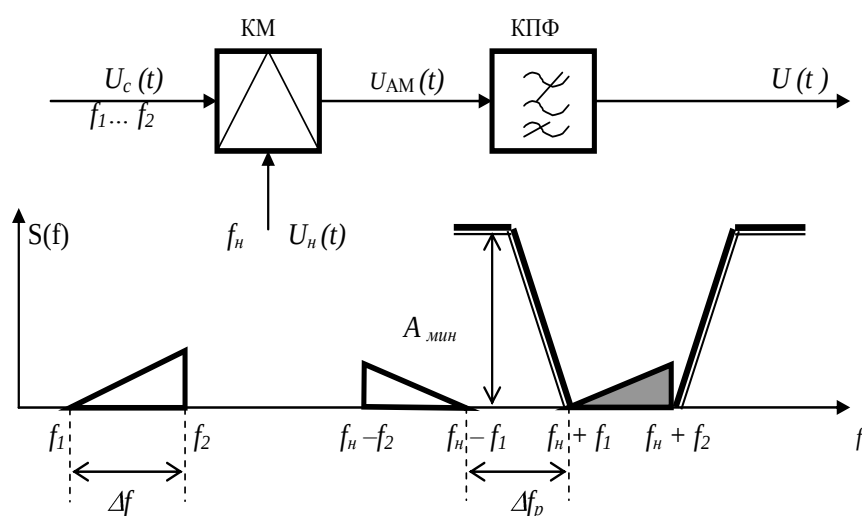
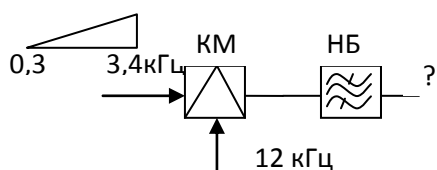


Рис.5. Фильтровой метод формирования ОБП

Как следует из рис. 5, первичный сигнал $U_c(t)$, занимающий полосу частот $\Delta f = f_2 - f_1$, поступает на балансный канальный амплитудный модулятор (КМ), на выходе которого имеем амплитудно-модулированный сигнал $U_{AM}(t)$, содержащий инверсную нижнюю и верхнюю боковые полосы частот $(f_n - f_2) \dots (f_n - f_1)$ и $(f_n + f_1) \dots (f_n + f_2)$, соответственно. Полезная боковая полоса частот (на рис.5 - верхняя) выделяется канальным полосовым фильтром (КПФ).

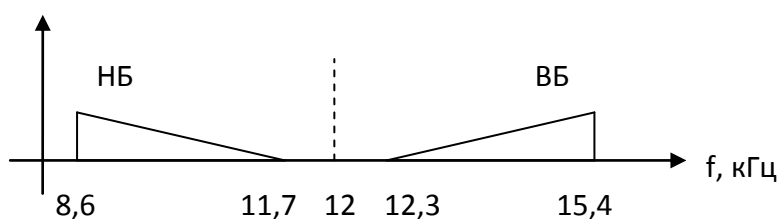
Пример:

На вход КМ поступает произвольный сигнал, спектр которого находится в пределах от $f_1 = 0,3 \text{ кГц}$ до $f_2 = 3,4 \text{ кГц}$. Частота несущего колебания составляет $f_n = 12 \text{ кГц}$. Определить спектр АМ на выходе канального полосового фильтра, если он пропустит нижнюю боковую полосу частот (НБ)?

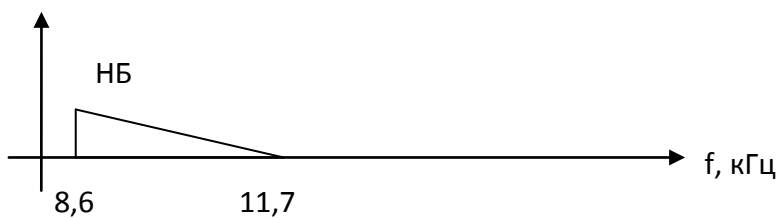


Решение:

1) на выходе КМ:



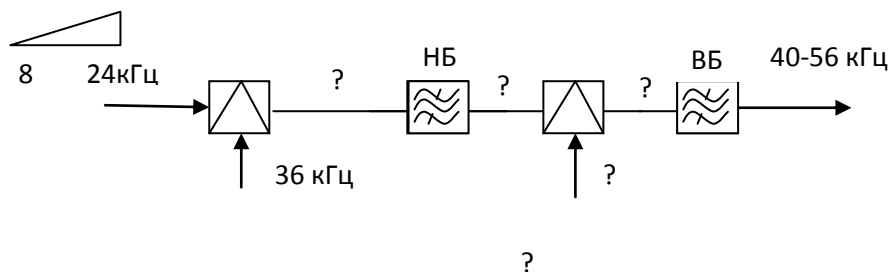
2) на выходе КДФ:



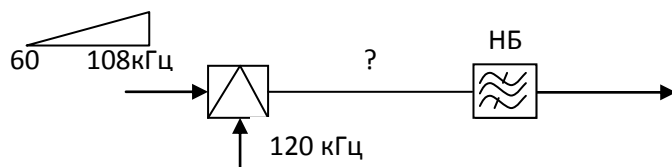
ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Определить спектр частот в различных точках схем, обозначенных вопросительными знаками:

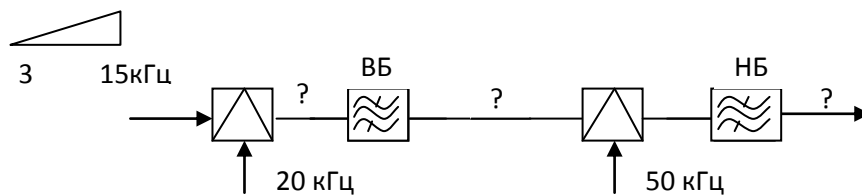
1.1.



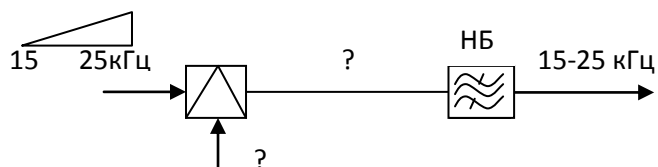
1.2.



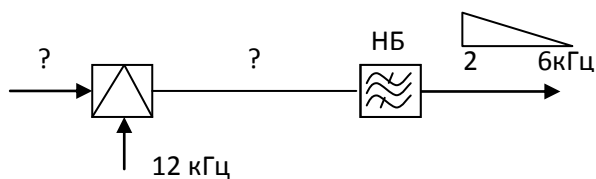
1.3.

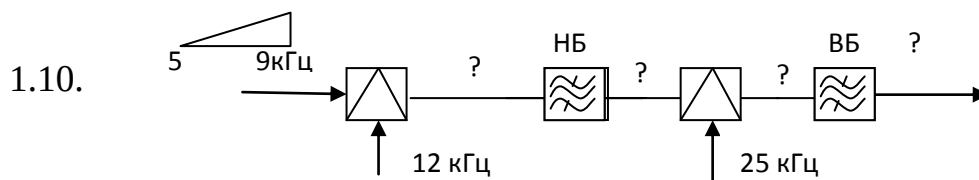
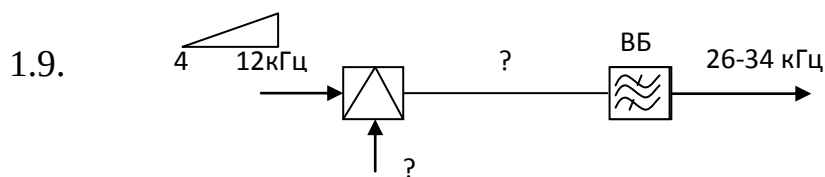
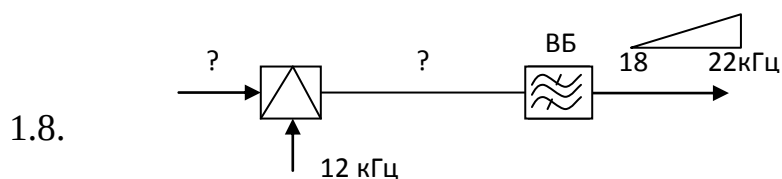
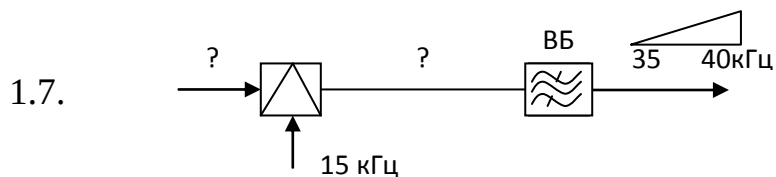
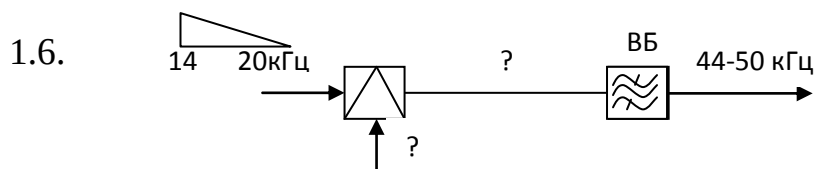


1.4.



1.5.





2. Какое назначение имеет каналный фильтр в СП с ЧРК на передаче?
3. Какое назначение имеет каналный фильтр в СП с ЧРК на приеме?
4. Каким образом реализуется принцип частотного разделения каналов?
5. Какой недостаток способа передачи канального сигнала в СП с ЧРК с одной боковой полосой?
6. Какой способ передачи канальных сигналов в СП с ЧРК является основным?

3. АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

В основе построения цифровых систем передачи (ЦСП) с временным разделением каналов (ВРК) лежит теорема Найквиста-Котельникова, которая гласит: *непрерывный во времени сигнал $s(t)$, спектр которого ограничен полосой частот от 0 до f_e , полностью определяется последовательностью своих мгновенных значений, которые берутся в точках, отсчитываемых через интервалы времени, $T_\delta \leq 1/2f_e$ или с частотой $f_\delta > 2f_e$.*

Процесс преобразования непрерывного во времени и ограниченного по спектру сигнала $s(t)$ в сигнал $s(N \cdot T_\delta)$, определенный в точках отсчета $T_\delta, 2T_\delta, \dots, NT_\delta$ – называется **дискретизацией**.

Значения сигнала $s(NT_\delta)$ в точках отсчета называются *дискретами* или *отсчетами*. При этом отсчеты N канальных сигналов передаются по общей линии связи не одновременно, а поочередно, так, чтобы каждому канальному сигналу на интервале времени T_δ предоставлялся свой временной интервал $\tau_k = \frac{T_\delta}{N}$, называемый *канальным интервалом*.

Длительность канального интервала (рис.6) равна $\tau_k = \tau_u + \tau_z$ (где τ_u – длительность импульса, τ_z – защитный интервал).

Интервал времени между двумя соседними отсчетами в одном сигнале (или канале) называется **периодом дискретизации** $T_\delta = \tau_k \cdot N$. Например, если $f_\delta = 8$ кГц, то в течение 1 секунды в каждом канале формируется 8000 отсчетов.

Суть теоремы отсчетов состоит в том, что если необходимо передать непрерывный и ограниченный по спектру сигнал $s(t)$, то необязательно передавать его непрерывно, а достаточно передать его отдельные мгновенные значения, взятые через интервалы времени T_δ . Между отсчетами сигнала одного канала можно передавать отсчеты сигналов других каналов с теми же

параметрами дискретизации (рис.6). Таким образом, реализуется *временное разделение каналов*.

Для правильного разделения канальных сигналов на приеме (рис.6) добавляется *синхросигнал* (СС), который чем-то (амплитудой, длительностью и т.д.) отличается от импульсов канальных сигналов.

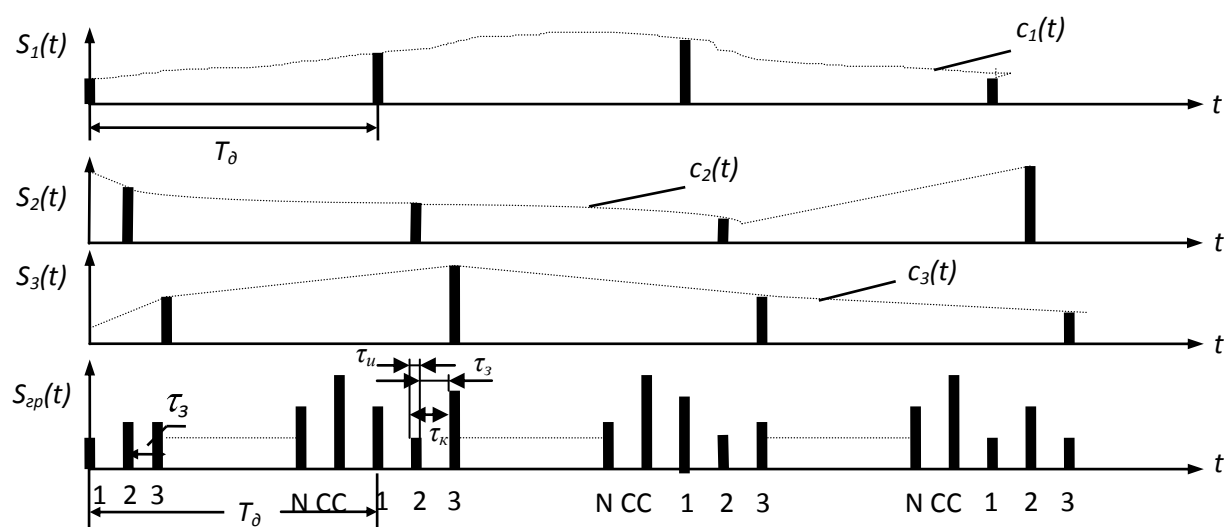


Рис.6. К пояснению метода временного разделения каналов

Операция дискретизации осуществляется с помощью **канального электронного ключа** (ЭК) (рис.7), на один вход которого поступает первичный сигнал $s(t)$, ограниченный по спектру частотой f_{ϵ} , а на управляющий - периодическая последовательность прямоугольных импульсов (ПППИ) $f(t)$ с периодом T_{δ} , представляющая собой **переносчик**. Каждый импульс переносчика открывает ключ на время своей длительности $\tau_u \ll T_{\delta}$. Длительность τ_u зависит от количества каналов.

Операцию дискретизации рассматривают как **амплитудно-импульсную модуляцию**. Поэтому дискретизированный сигнал называют **АИМ – сигналом**, а ключ - АИМ – модулятором (рис.7).

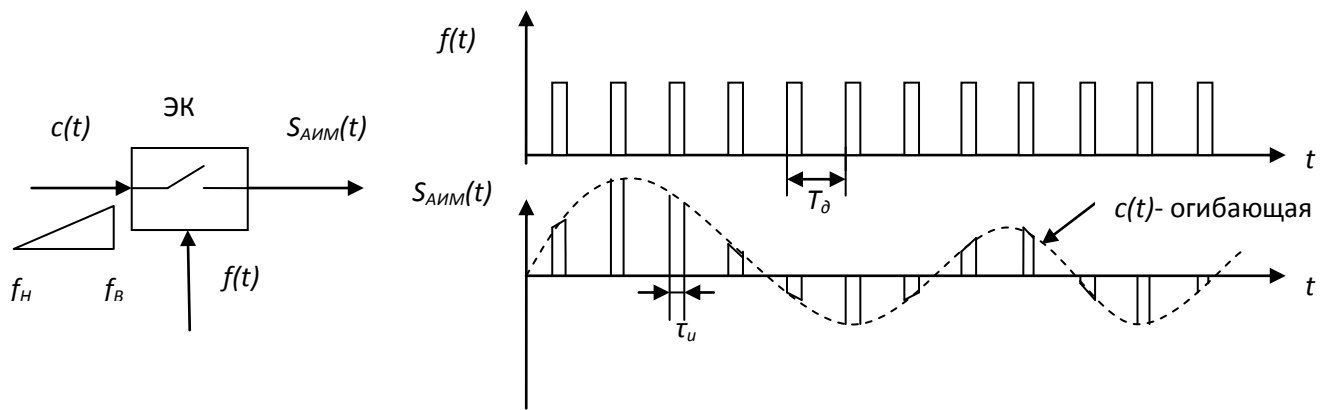


Рис.7. Преобразование аналогового сигнала в АИМ-сигнал.

С математической точки зрения операция дискретизации соответствует умножению дискретизируемого сигнала $c(t)$ на импульсный переносчик $f(t)$. В общем виде АИМ- сигнал можно описать следующим аналитическим выражением:

$$S_{AИМ}(t) = [1 + m_a c(t)] \bar{f}(t), \quad (3)$$

где m_a - коэффициент, характеризующий глубину модуляции.

Периодическую последовательность прямоугольных импульсов $f(t)$ переносчика можно разложить в ряд Фурье:

$$f(t) = A \left[\frac{\tau_u}{T_\delta} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\pi \frac{\tau_u}{T_\delta}}{n} \cos n\omega_\delta t \right], \quad (4)$$

где A - амплитуда импульсов ПППИ, $\omega_\delta = 2\pi / T_\delta$ - круговая частота последовательности $f(t)$.

Спектр ПППИ в соответствии с (4) представлен на рис. 8. Огибающая спектра амплитуд ПППИ соответствует спектру одиночного прямоугольного импульса длительностью τ_u , а число гармоник тактовой частоты (частоты следования) до

первого нуля спектра амплитуд равно $q-1$, т.е. на единицу меньше скважности последовательности импульсов q (напомним, что отношение $T_d/\tau_u=q$, называется *скважностью*). При этом более 90...95% мощности периодической последовательности импульсов сосредоточено в полосе частот от 0 до $F_{\max}=1/\tau_u$. Следовательно, для передачи исходной ПППИ по каналам (трактам, линиям) связи их полоса частот должна быть не менее $\Delta F=1/\tau_u$.

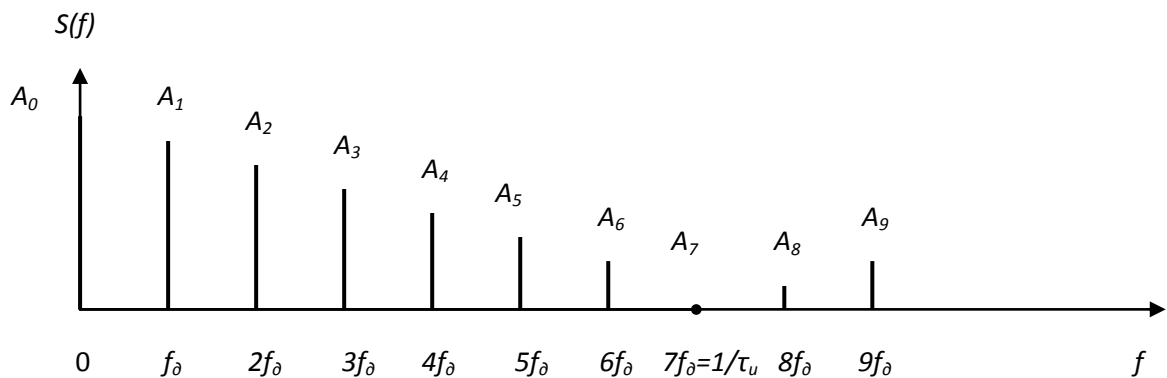


Рис.8. Спектр амплитуд периодической последовательности прямоугольных импульсов

Определим спектр АИМ-сигнала при модуляции амплитуды переносчика ПППИ одночастотным синусоидальным сигналом $c(t) = C_{\max} \sin \omega_c t$.

После перемножения исходного сигнала $c(t)$ и переносчика $f(t)$, получим выражение:

$$S_{\text{АИМ}}(t) = \frac{A}{q} + \frac{m_a A}{q} \sin \omega_c t + \frac{2A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{q}}{n} \cos n\omega_d + \frac{m_a A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{q}}{n} \sin(n\omega_d \pm \omega_c)t, \quad (5)$$

где $m_a = C_{\max}/A$.

Из формулы (5) следует, что АИМ-сигнал содержит в своем составе:

- постоянную составляющую с амплитудой $A_0=A/q$;
- исходный (модулирующий) сигнал с амплитудой $A_c = \frac{m_a A}{q} \sin \omega_c t$;
- гармоники частоты следования ПППИ - частоты дискретизации, амплитуды которых равны $A_{n\pi} = \frac{2A}{\pi} \sin \frac{n\pi}{q} \cos n\omega_\delta$;
- боковые частоты (нижняя и верхняя) около гармоник частоты дискретизации с амплитудами равными $A_{n\delta} = \frac{m_a A}{\pi} \sin \frac{n\pi}{q} \sin(n\omega_\delta \pm \omega_c) t$.

Если модулирующий сигнал является многочастотным, т.е. занимает полосу частот от ω_n до ω_δ , то спектр канального АИМ-сигнала будет содержать постоянную составляющую, исходный сигнал, занимающий полосу частот от ω_n до ω_δ , гармоники частоты дискретизации $n\omega_\delta$ и нижние и верхние боковые полосы частот вокруг гармоник частоты дискретизации, занимающие полосы частот $n\omega_\delta \pm (\omega_n \dots \omega_\delta)$.

Спектр АИМ-сигнала $S_{АИМ}(f)$ при модуляции сигналом со спектром $C(f)$ (рис.9а), показан на рис.9б.

Для восстановления на приеме непрерывного исходного сигнала на выходе канала достаточно поставить ФНЧ. При этом полоса расфильтровки ФНЧ Δf_p между полосой частот исходного сигнала с верхней граничной частотой f_δ и нижней боковой полосой частот около первой гармоники частоты дискретизации f_δ с нижней граничной частотой $f_\delta - f_\delta$ равна $\Delta f_p = (f_\delta - f_\delta) - f_\delta = f_\delta - 2 f_\delta$.

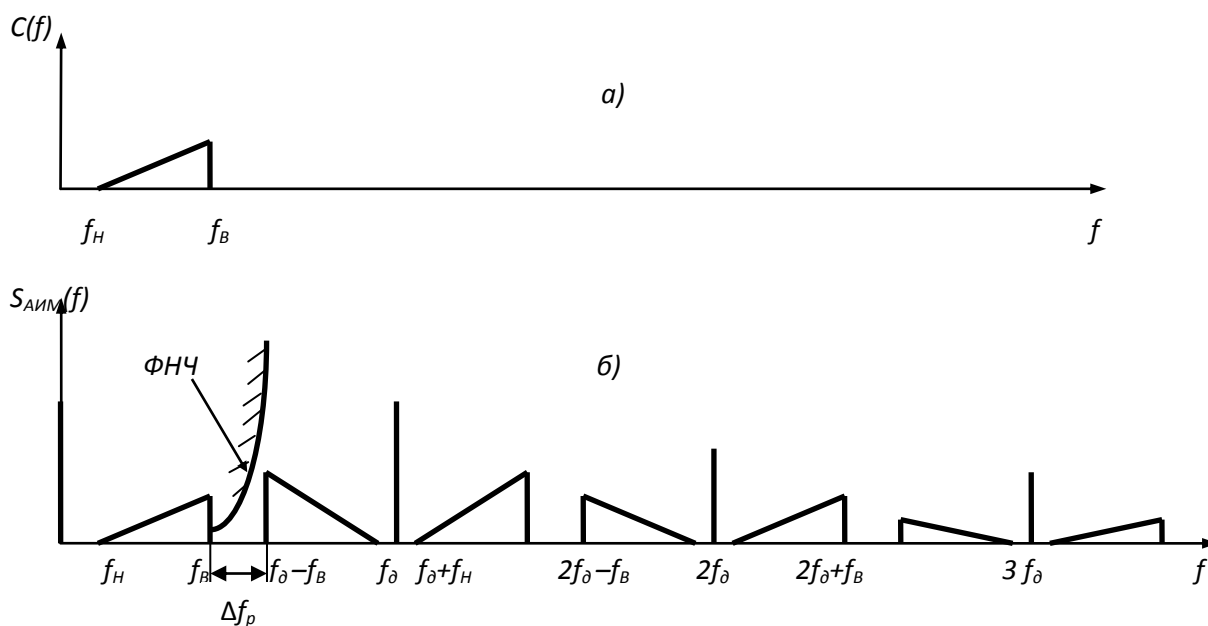


Рис.9. Спектр АИМ-сигнала

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Изобразите спектр переносчика сигнала при скважности $q = 3 + N$ (см. рис.8).

2. Определите частоту дискретизации f_0 (на основании т. Котельникова) сигнала, спектр которого ограничен частотами $f_H = (5N)$ кГц и $f_0 = (5N+12)$ кГц. Изобразите спектральный состав АИМ-сигнала (см. рис.9), соответствующий выбранной частоте дискретизации f_0 и рассчитайте ширину полосы расфильтровки Δf_p при его демодуляции.

3. Изобразите примерный вид группового АИМ-сигнала при заданном количестве каналов N (см. рис.6).

4. Каким образом реализуется временное разделение каналов?

5. Каким образом осуществляется дискретизация непрерывного сигнала?

6. С помощью какого элемента схемы осуществляется операция дискретизации?

7. Какое количество отсчетов формируется в каждом канале за 10 секунд, если $f_{\delta} = 8$ кГц?
8. Какое назначение имеет ФНЧ в СП с ВРК на передаче?
9. Какое назначение имеет ФНЧ в СП с ВРК на приеме?
10. Чему равна частота дискретизации, если исходный сигнал ограничен частотами $f_n = 0,3$ кГц, $f_e = 3,4$ кГц?

4. ПРИНЦИПЫ КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ

Кодирование представляет собой отображение АИМ-квантованного сигнала в виде сочетания двоичных кодовых символов. Формальный аналог этой операции – представление чисел в двоичной системе счисления. При кодировании каждому квантованному по уровню АИМ-сигналу ставят в соответствие кодовую комбинацию определённой структуры, состоящую из символов 0 и 1 и называемую *кодовым словом*. Количество символов в кодовом слове определяет *разрядность кода* и обозначается m . Для определения структуры комбинации в простейшем случае нужно в двоичном коде записать амплитуду АИМ-отсчета $H_{\text{АИМ}}$, выраженную в шагах квантования δ . Это соответствует импульсно-кодовой модуляции (ИКМ). В этом случае:

$$H_{\text{АИМ}} = \sum_{i=0}^{m-1} a_i 2^i = a_0 2^0 + a_1 2^1 + a_2 2^2 + \dots + a_{m-1} 2^{m-1}, \quad (6)$$

где $a_i = (0,1)$ – состояние соответствующего разряда комбинации;

2^i – вес соответствующего разряда в условных шагах квантования;

m – число разрядов.

Кодовая комбинация, записанная в двоичной системе счисления, согласно (6), будет выглядеть следующим образом (рис.10):

a_{m-1}	$\dots$	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
-----------	---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Рис.10. Структура кодовой комбинации, соответствующей амплитуде АИМ-отсчета $H_{\text{АИМ}}$

Например, если число разрядов кода $m = 4$ и $H_{\text{АИМ}} = 11\delta$, то кодовая комбинация будет иметь структуру **1011**, т.к. $11 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \rightarrow 1011$.

Рассмотренную выше последовательность действий (алгоритм перевода) удобнее изобразить так:

11	2
1	5
1	2
0	1

Записывая остатки от деления в направлении, указанном стрелкой, получим: $11_{10} = 1011_2$

Последовательность m – разрядных кодовых комбинаций представляет собой групповой сигнал с ИКМ, называемый также **цифровым**.

Рассмотрим квантованный АИМ-сигнал на входе кодера и соответствующий ему цифровой сигнал на выходе кодера (рис.11).

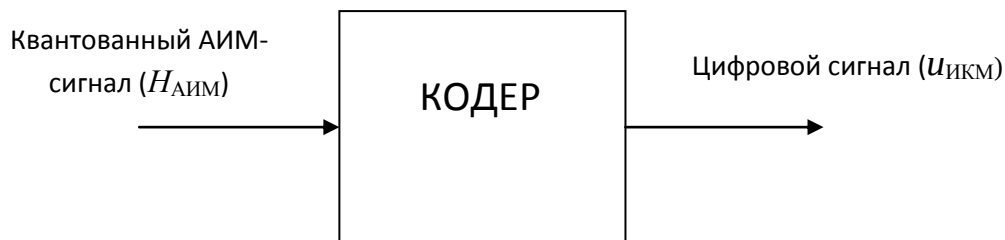


Рис.11. Сигналы на входе и выходе кодера

Если амплитуды отсчетов, поступающих на вход кодера, могут принимать значения в диапазоне $H_{\text{АИМ}} = (0 \div 31)\delta$ условных шагов квантования (рис.12а), тогда на выходе кодера формируется цифровой сигнал, представляющий собой последовательность *пятиразрядных* кодовых комбинаций (рис.12б), т.е. $m = 5$.

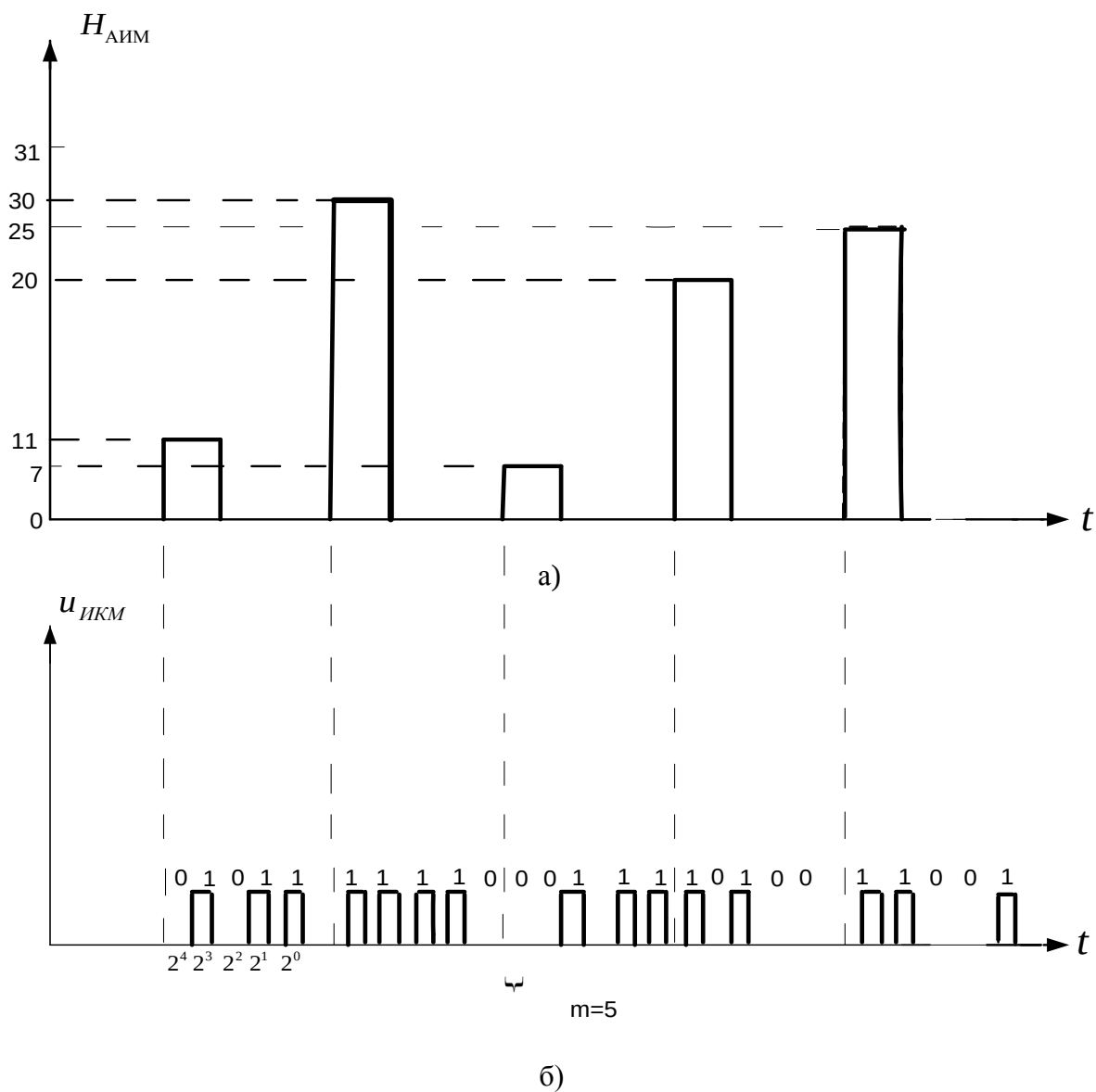


Рис.12. Временные диаграммы на входе $H_{\text{АИМ}}(t)$ и выходе $u_{\text{ИКМ}}(t)$ кодера

Для телефонных сигналов при неравномерном квантовании необходимо использовать восьмиразрядный код ($m=8$), а при равномерном - 12-разрядный

($m=12$). На практике находят применение двоичные коды следующих типов: натуральный двоичный код, симметричный двоичный код.

Симметричный двоичный код (рис.13) в основном используется при кодировании двуполярных сигналов (например, телефонных). В этом коде для всех положительных отсчетов знаковый символ имеет значение 1, а для отрицательных - 0. Для положительных и отрицательных отсчетов, равных по амплитуде, структуры кодовых комбинаций полностью совпадают (за исключением знакового разряда), т.е. код является симметричным. Например, максимальному положительному сигналу соответствует код 11111111, а максимальному отрицательному – 01111111.

знаковый разряд	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
--------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Рис.13. Общий вид кодовой комбинации для 8-ми разрядного симметричного кода

Натуральный двоичный код (рис.14) в основном используется при кодировании однополярных сигналов.

a_7	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Рис.14. Общий вид кодовой комбинации для 8-ми разрядного

Скорость передачи двоичного цифрового сигнала для одного канала, полученного в результате ИКМ – преобразования, находят по формуле (для двоичных кодов скорость передачи численно совпадает с частотой следования двоичных символов):

$$B_1 = f_o \cdot m. \quad (7)$$

Например, при аналого-цифровом преобразовании телефонного сигнала выбирают $f_o = 8\text{кГц}$, $m=8$. Отсюда следует, что скорость передачи

оцифрованного телефонного сигнала (основного цифрового канала ОЦК) равна 64 кбит/с.

Скорость передачи группового (многоканального) цифрового сигнала определяется как

$$B_N = B_1 \cdot N, \quad (8)$$

где N – общее число канальных интервалов в цикле передачи.

Пример 1:

Закодировать АИМ-отсчет с амплитудой, равной $H_{\text{АИМ}} = 75\delta$ 8 – ми разрядным двоичным кодом для случая применения:

- натурального двоичного кода;*
- симметричного двоичного кода.*

Решение:

В соответствии с (6) и рис. 13, 14 запишем число 75 в двоичной форме:

$$75_{10} = 1001011_2.$$

Для натурального двоичного кода первый разряд будет иметь вес, т.е. 01001011.

С учётом знака, для симметричного кода, кодовое слово имеет вид 11001011.

Пример 2:

Декодировать двоичную комбинацию вида 01110011 для случаев применения:

- натурального двоичного кода;*
- симметричного двоичного кода.*

Решение:

Если декодировать комбинацию вида 01110011 для натурального двоичного кода, то будем иметь: $2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^1 + 1 = 115\delta$.

Для симметричного: $-(2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^1 + 1) = -115\delta$.

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Запишите значение АИМ-отсчета $4N \cdot \delta$ в виде 8-ми разрядной кодовой комбинации в натуральном двоичном коде (см. рис.14);

2. Запишите значение АИМ-отсчета $\llcorner 4N + 60 \rceil \delta$ в симметричном двоичном коде (см. рис.13).

3. При передаче по линии связи 2-х кодовых комбинаций, полученных в 1-й задаче, произошли ошибки в $(N/8)$ - разряде (полученное число округлить до целого). Необходимо найти значение полученного АИМ-отсчета, выраженное в шагах квантования δ .

4. Необходимо закодировать АИМ-отсчет с амплитудой, равной $N_{\text{АИМ}} = 112\delta$ 8-ми разрядным двоичным кодом для случая применения:

- натурального двоичного кода
- симметричного двоичного кода.

5. Необходимо декодировать двоичную комбинацию вида 01101110 для случаев применения:

- натурального двоичного кода;
- симметричного двоичного кода.

6. Для чего применяют неравномерное квантование сигнала по уровню?

7. Как меняется шаг квантования при неравномерном квантовании?
8. Чем характеризуется равномерное квантование сигнала по уровню?
9. Сколько разрядов будет содержать кодовая комбинация, если при квантовании сигнала использовалось 256 уровней квантования?
10. Какой будет максимальный уровень квантования сигнала на входе кодера, если на выходе кодера получен шестизрядный цифровой сигнал?

Литература

1. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. – 2-е изд., испр. - М.: Горячая линия – Телеком, 2008.

2. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов– М.: Горячая линия – Телеком, 2005.

3. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов/В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др.; Под ред. В.И. Иванова. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ КУРСА «ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ».....	3
1. УРОВНИ ПЕРЕДАЧИ.....	4
ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	9
2. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛЬНЫХ И ГРУППОВЫХ СИГНАЛОВ.....	11
ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	16
3. АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ.....	18
ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	23
4. ПРИНЦИПЫ КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ.....	24
ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	29
ЛИТЕРАТУРА.....	30