4. 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 c(t), спектр которого ограничен полосой частот от 0 до $f_в$, полностью определяется последовательностью своих мгновенных значений, которые берутся в точках, отсчитываемых через интервалы времени, $T_д \le 1/2f_в$ или с частотой $f_д > 2 f_в$.***

Процесс преобразования непрерывного во времени и ограниченного по спектру сигнала *c(t)* в сигнал $c(N \cdot T_д)$, определенный в точках отсчета $T_д$, $2T_д$, ... $NT_д$ – называется **дискретизацией**.

Значения сигнала $c(NT_д)$ 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 $T_д$ предоставлялся свой временной интервал $\tau_к = \dfrac{T_д}{N}$, называемый ***канальным интервалом***.

Длительность канального интервала (рис.15) равна $\tau_к = \tau_и + \tau_з$ (где $\tau_и$ – длительность импульса, $\tau_з$ – защитный интервал).

Интервал времени между двумя соседними отсчетами в одном сигнале (или канале) называется **периодом дискретизации** $T_д = \tau_к \cdot N$. Например, если $f_д$ = 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 ***c(t),*** то необязательно передавать его непрерывно, а достаточно передать его отдельные мгновенные значения, взятые через интервалы времени $T_д$. Между отсчетами

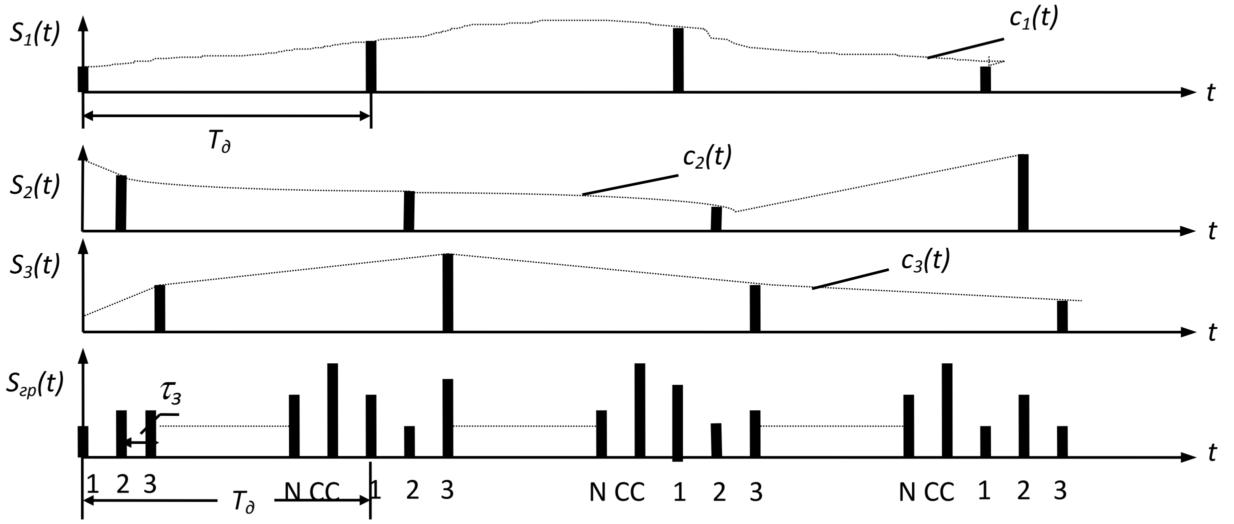

Рис.15. К пояснению метода временного разделения

сигнала одного канала можно передавать отсчеты сигналов других каналов с теми же параметрами дискретизации (рис.15). Таким образом, реализуется ***временное разделение каналов***.

Для правильного разделения канальных сигналов на приеме (рис.15) добавляется ***синхросигнал*** **(СС),** который чем-то (амплитудой, длительностью и т.д.) отличается от импульсов канальных сигналов.

Операция дискретизации осуществляется с помощью ***канального электронного ключа*** (*ЭК*) (рис.16), на один вход которого поступает первичный сигнал *c(t)*, ограниченный по спектру частотой $f_в$, а на управляющий - периодическая последовательность прямоугольных импульсов (*ПППИ*) *f(t)* с периодом $T_д$, представляющая собой ***переносчик.*** Каждый импульс переносчика открывает ключ на время своей длительности $\tau_и << T_д$. Длительность $\tau_и$ зависит от количества каналов.

Операцию дискретизации рассматривают как амплитудно-импульсную модуляцию. Поэтому дискретизированный сигнал называют ***АИМ – сигналом***, а ключ - АИМ – модулятором (рис.16).

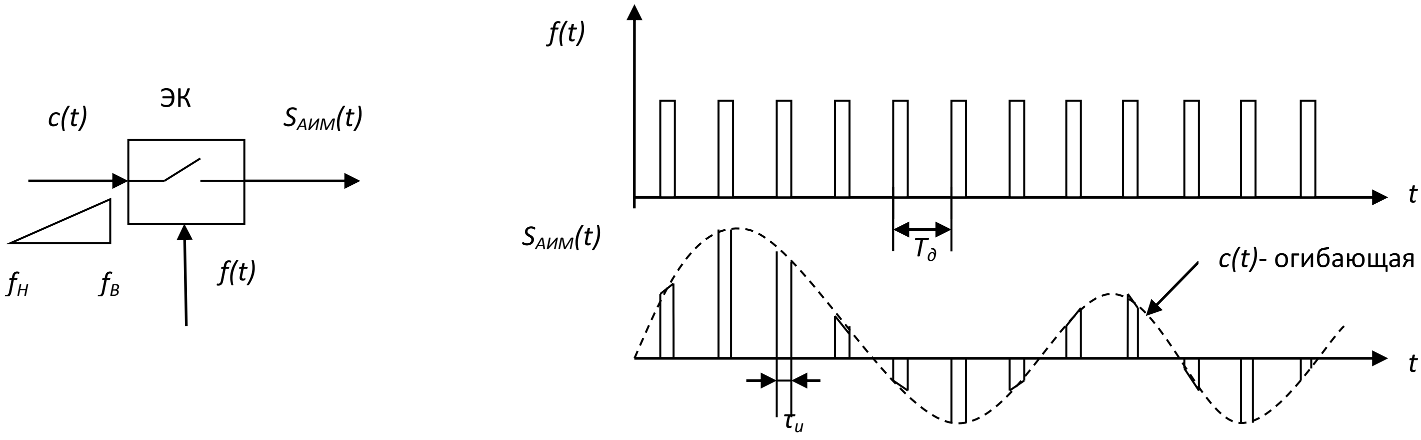

Рис.16. Преобразование аналогового сигнала в АИМ-сигнал.

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:

$$S_{АИМ}(t) = \left[1 + m_a c(t)\right] f(t), \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{m_a}$ - коэффициент, характеризующий **глубину модуляции.**

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

$$f(t) = A\left[\frac{\tau_u}{T_д} + \frac{2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin n\pi\frac{\tau_u}{T_д}}{n}\cos n\omega_д t\right],$$

(4)

где *A* **- амплитуда импульсов ПППИ**, $\omega_д = 2\pi/T_д$ – круговая частота последовательности *f(t)*.

Спектр ПППИ в соответствии с (4) *бесконечен* и представлен **на рис. 17**. **Огибающая амплитуд частотного спектра (**или спектра амплитуд) **ПППИ** на рис. 17 **соответствует** частотному спектру **одиночного прямоугольного импульса** длительностью $\tau_и$, а **число гармоник** частоты следования импульсов **ПППИ** (т.е. $\mathbf{f_д}$) *до первого нуля* спектра амплитуд равно ***q-1,*** т.е. **на единицу меньше скважности** последовательности импульсов ***q*** *(*напомним, что отношение $T_д/\tau_и=q$, называется ***скважностью****). Таким образом, гармоники частоты дискретизации* $\mathbf{f_д}$ *с номерами, кратными коэффициенту скважности* ***q, отсутствуют.*** При этом более **90...95% мощности** периодической последовательности импульсов сосредоточено в полосе частот **от** ***0 до*** $F_{макс}=1/\tau_и$. Следовательно, для передачи исходной ПППИ по **каналам (трактам, линиям**) связи их полоса частот должна быть **не менее** $\Delta F=1/\tau_и$.

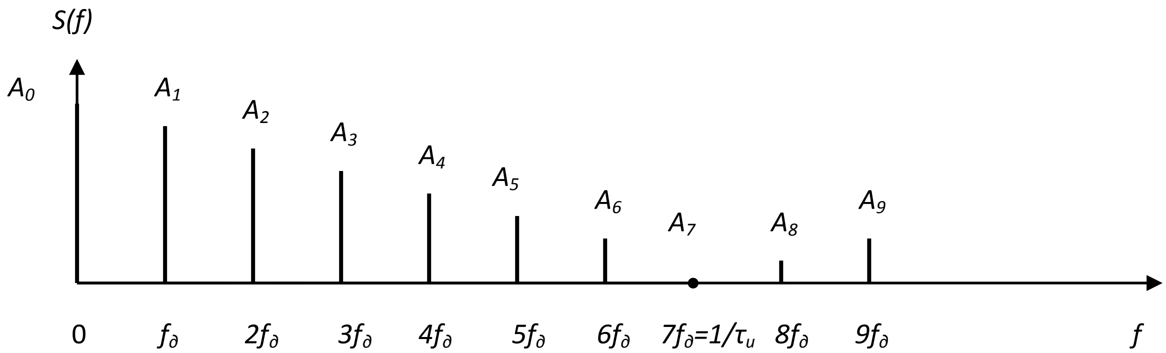

Рис.17. Спектр амплитуд периодической последовательности прямоугольных импульсов

Определим спектр АИМ-сигнала при модуляции амплитуды переносчика ПППИ одночастотным синусоидальным сигналом $c(t) = C_{макс}\sin\omega_c t$ *(в данной записи сигнал* ***не имеет постоянной составляющей, в общем случае может иметь постоянную составляющую).***

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

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

где $\boldsymbol{m_a = C_{макс}/A}$.

Из формулы (5) следует, *что **в общем случае*** 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 $A_{nг}=\frac{2A}{\pi n}\sin\frac{n\pi}{q}\cos n\omega_д$;
- боковые частоты (нижняя и верхняя) около гармоник частоты дискретизации с амплитудами равными $A_{nб}=\frac{m_a A}{\pi n}\sin\frac{n\pi}{q}\sin(n\omega_д\pm\omega_c)t$.

Если модулирующий сигнал является многочастотным, т.е. занимает полосу частот (**сплошной спектр**) от $\omega_н$ **до** $\omega_в$**,** то спектр канального **АИМ-сигнала** будет содержать постоянную составляющую, **исходный сигнал**, занимающий полосу частот от $\omega_н$ до $\omega_в$, гармоники частоты дискретизации $n\omega_д$ и **нижние и верхние боковые полосы** частот вокруг гармоник частоты дискретизации, занимающие полосы частот $n\omega_д \pm (\omega_н...\omega_в)$.

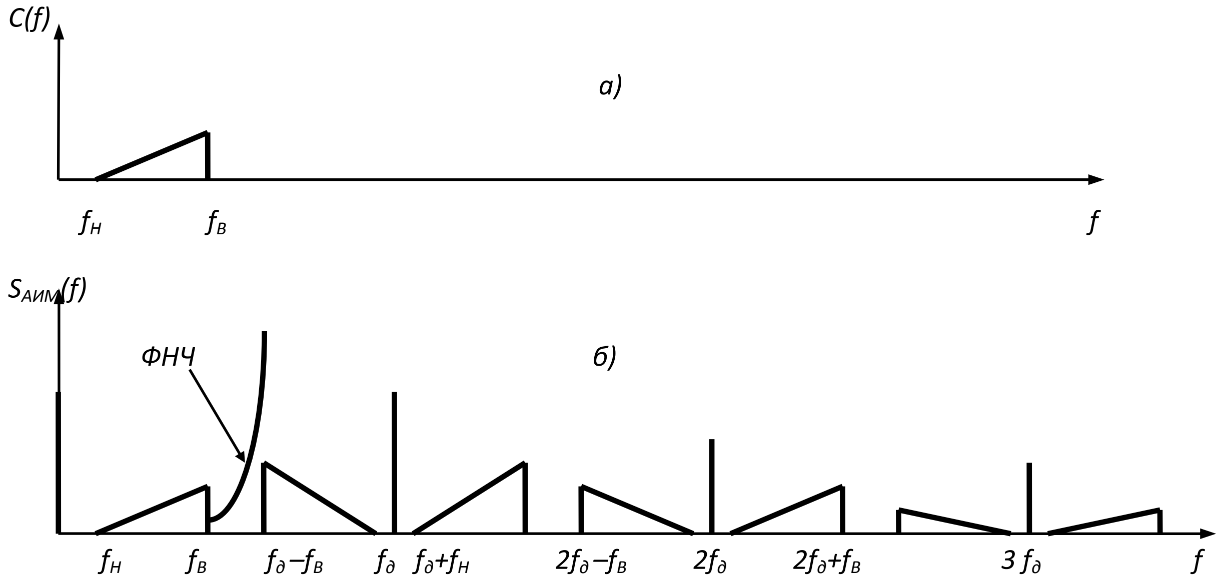

Рис.18. Спектр АИМ-сигнала

Спектр АИМ-сигнала $S_{АИМ}(f)$ в ***общем случае*** при модуляции сигналом со **сплошным** спектром *C(f)* **(рис.18а),** показан на **рис.18б.**

Для восстановления **на приеме** непрерывного исходного сигнала на выходе канала *(после декодера*) **достаточно** поставить **ФНЧ (фильтр нижних частот)**. При этом полоса расфильтровки ФНЧ $\boldsymbol{\Delta f_p}$ между полосой частот исходного сигнала с верхней граничной частотой $f_в$ и нижней боковой полосой частот около первой гармоники частоты дискретизации $f_д$ с нижней граничной частотой $f_д - f_в$ равна

$$\boldsymbol{\Delta f_p} = (f_д - f_в) - f_в = \boldsymbol{f_д - 2\, f_в}.$$

ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ И ТЕСТЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. ЗАДАНИЕ 6.1 _КР Изобразите спектр переносчика сигнала при скважности $q = 3 + N$ (см. рис.17).

2. ЗАДАНИЕ 6.2 КР Определите частоту дискретизации $f_д$ (на основании т. Котельникова) сигнала, спектр которого ограничен частотами $f_н$ = (5N) кГц и $f_в$ = (5N+12) кГц. Изобразите спектральный состав АИМ-сигнала (см. рис.18), соответствующий выбранной частоте дискретизации $f_д$ и рассчитайте ширину полосы расфильтровки Δf_p при его демодуляции.

3. ЗАДАНИЕ 6.3_КР Изобразите примерный вид группового АИМ-сигнала при заданном количестве каналов N (см. рис.15).

N- номер студента по списку группы.

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 $f_д$ = 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 $f_н$ = 0,3 кГц, $f_в$ = 3,4 кГц?

1. 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 $\boldsymbol{H}_{\textbf{АИМ}}$, выраженную в шагах квантования δ. Это соответствует импульсно-кодовой модуляции **(ИКМ).**

//ВСТАВКА: В понятие **ИКМ – преобразование** входит три операции:

1) **дискретизация** аналогового сигнала по Котельникову,2)**квантование** дискретного отсчета по амплитуде (или по соответствующему ей уровню квантования на характеристике квантования кодера), 3) **кодирование** номера уровня квантования (числа, представленного в масштабе, выраженном в шагах квантования δ, на характеристике квантования кодера), соответствующего данному дискретному отсчету. Поэтому **2) и 3) операции делает КОДЕР**, на выходе которого будет двоичная кодовая комбинация (в виде последовательности нулей и единиц длиной **m** разрядов (бит)). //

В этом случае:

$$H_{\text{АИМ}} = \sum_{i=0}^{m-1} a_i 2^i = a_0 2^0 + a_1 2^1 + a_2 2^2 + \ldots + a_{m-1} 2^{m-1},$$

(6)

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

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

m – число разрядов.

Кодовая комбинация **на выходе кодера**, записанная в двоичной системе счисления, согласно (6), будет выглядеть следующим образом (рис.19):

a_{m-1}	…	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0

Рис.19. 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.

$$11 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \rightarrow 1011.$$

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

Рассмотрим АИМ-сигнал на входе кодера и соответствующий ему цифровой сигнал на выходе кодера (рис.20).

Рис.20. Сигналы на входе и выходе кодера

ПРИМЕР. Допустим, амплитуды отсчетов, поступающих на вход кодера, могут принимать значения а диапазоне $H_{\text{АИМ}} = (0 \div 31)\delta$ условных шагов квантования (рис.21а), тогда на выходе кодера формируется цифровой сигнал, представляющий собой последовательность *пятиразрядных* кодовых комбинаций (рис.21б), т.е. m = 5.

Количество возможных уровней квантования (кодовых комбинаций на выходе кодера) равно **M**= $2^m = 2^5 = 32$ уровня (от 0 до 31го), где δ – шаг квантования (расстояние между соседними уровнями на характеристике квантования кодера (в Вольтах) и равный динамическому диапазону аналогового сигнала D (в вольтах), деленному на **M.** Если на характеристике квантования **расстояние** (в вольтах) **между соседними уровнями квантования одинаково** и равно δ **для всех сигналов** на входе кодера (для всех значений амплитуд этого сигнала), то характеристика квантования называется **равномерной** (равномерное квантование), а кодер называют **линейным** (или с равномерной характеристикой квантования).

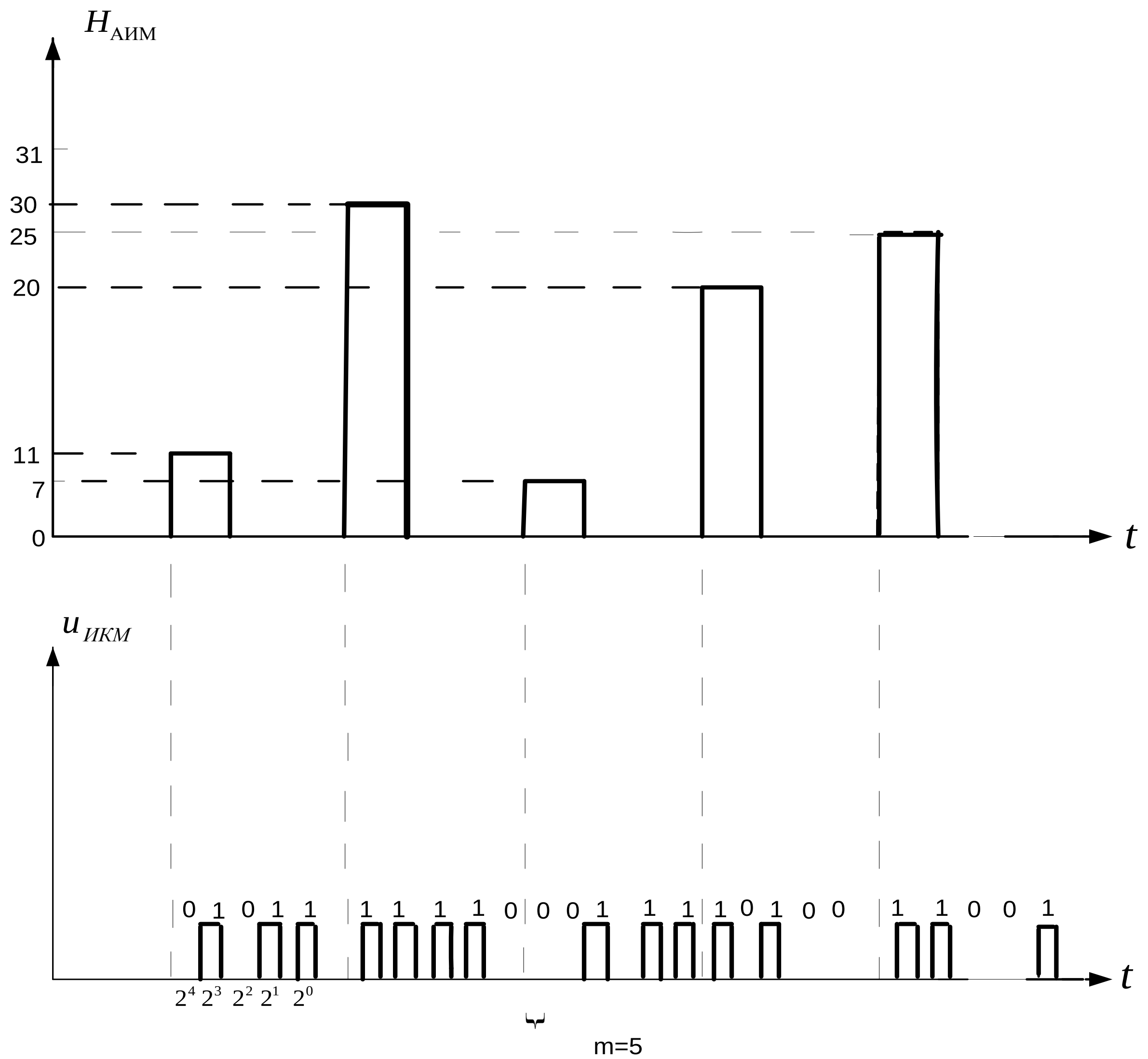

Рис.21. Временные диаграммы на входе $H_{АИМ}(t)$ и выходе $u_{ИКМ}(t)$ кодера

Симметричный двоичный код (рис.22) 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.22. Общий вид кодовой комбинации для 8-ми разрядного симметричного кода

Натуральный двоичный код (рис.23) в основном используется при кодировании однополярных сигналов.

a_7	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0

Рис.23. Общий вид кодовой комбинации для 8-ми разрядного натурального кода

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**):

$$B_1 = f_д \cdot m. \qquad (7)$$

Например, при аналого-цифровом преобразовании телефонного сигнала выбирают $f_д = 8$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 $B_N = B_1 \cdot N,$ (8)

где N – общее число канальных интервалов в цикле передачи.

<u>Пример 1:</u> *Закодировать АИМ-отсчет с амплитудой, равной $H_{АИМ}$ = 75δ 8 – ми разрядным двоичным кодом для случая применения:- натурального двоичного кода;- симметричного двоичного кода.*

Решение:

В соответствии с (6) и рис. 22, 23 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. ЗАДАНИЕ 7.1 _КР Запишите значение АИМ-отсчета $4N \cdot \delta$ виде 8-ми разрядной кодовой комбинации в натуральном двоичном коде (см. рис.22);
2. ЗАДАНИЕ 7.2 _КР Запишите значение АИМ-отсчета $(-4N + 60) \cdot \delta$ в симметричном двоичном коде (см. рис.21).
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. ЗАДАНИЕ 8.1 _КР Необходимо закодировать АИМ-отсчет с амплитудой, равной $H_{АИМ} = 112\delta$ 8–ми разрядным двоичным кодом для случая применения:

- натурального двоичного кода, - симметричного двоичного кода.

5. ЗАДАНИЕ 8.2 _КР 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 шестиразрядный цифровой сигнал?

11. Минимальное количество разрядов при двоичном кодировании отсчета с амплитудой равной 73-м шагам квантования равно …. ?

12. Скорость передачи для ЦСП с общим числом каналов 10 равна … кбит/с.

Кроме Задания 5 из методички Четкин С.В 2013 год, НАДО выполнить:

Дополнительные (обязательные) ЗАДАНИЯ для КР

6.1, 6.2, 6.3 ;

7.1, 7.2 ;

8.1, 8.2

помечены ЗЕЛЕНЫМ цветом в ЭТОМ файле.

N- номер студента по списку группы.

Рис.19. Структура кодовой комбинации, соответствующей амплитуде АИМ-отсчета $H_{\text{АИМ}}$