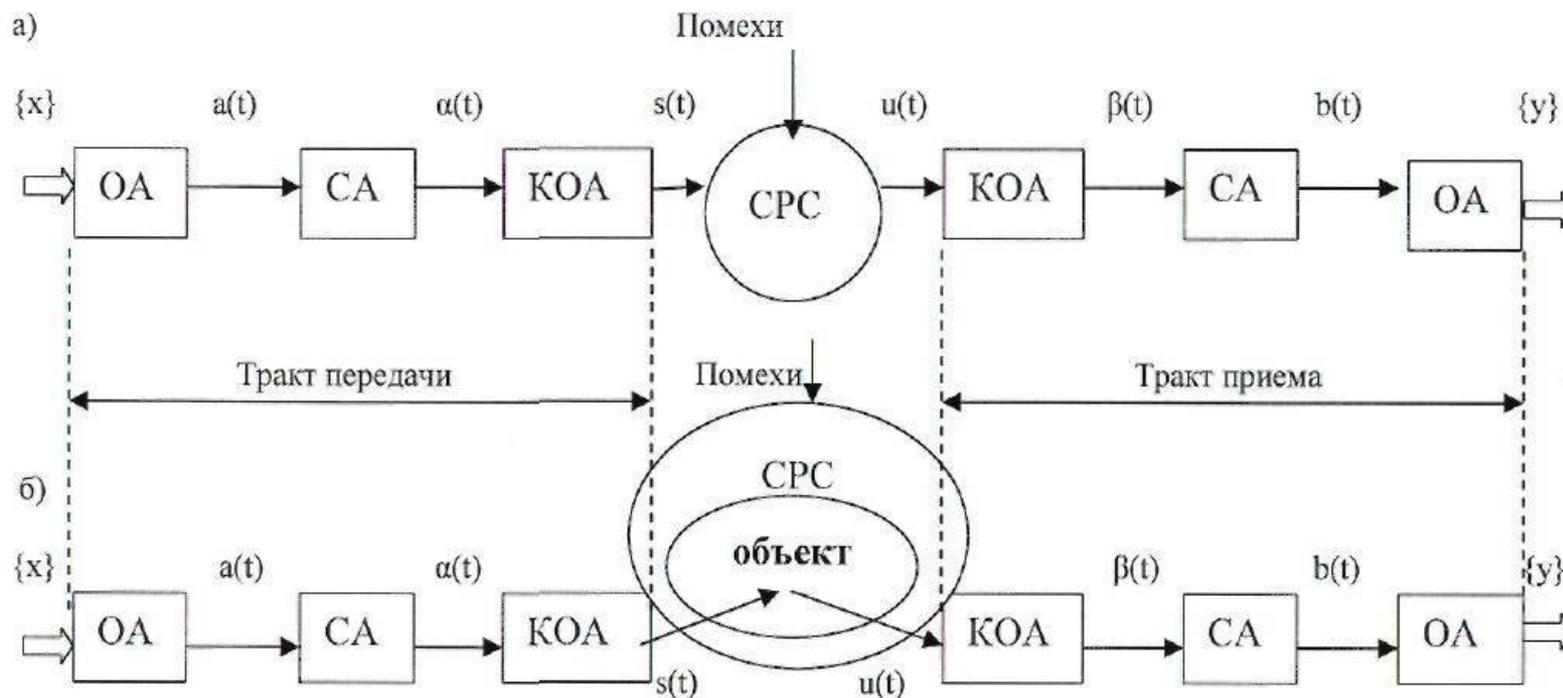
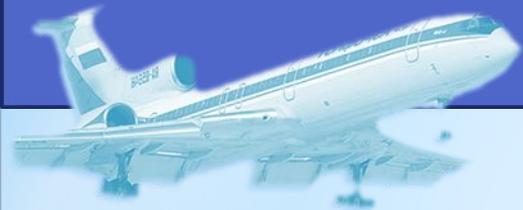


Из анализа структурных схем каналов передачи (а) и извлечения (б) информации следует, что сигналы в этих каналах можно подразделить на ПЭС $a(t)$, $\alpha(t)$, $\beta(t)$ и $b(t)$ и модулированные сигналы $s(t)$ и $u(t)$.

В общем случае эти сигналы могут быть дискретными и непрерывными.





Лекция 1/3. Дискретные сигналы

2013 г



1. Дискретные первичные электрические сигналы

Дискретные ПЭС радиоэлектронных систем имеют **конечный алфавит возможных реализаций сигнала**.

На практике наиболее широкое распространение получили **ПЭС бинарного алфавита, состоящего из двух возможных реализаций элементарных сигналов (посылок)**, называемых посылками «нажатие» и «отжатие», или сигналами «0» и «1» (при передаче телеграфных сообщений), или сигналами логических «0» и «1» (используются в цифровой технике передачи информации или при передаче данных).

Как правило, значение напряжения посылки «нажатие» больше значения напряжения посылки «отжатие».

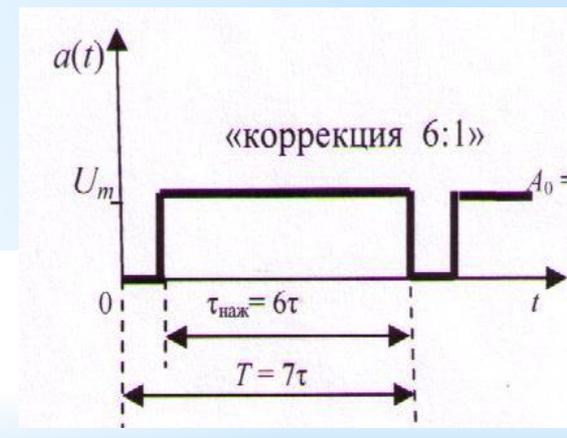
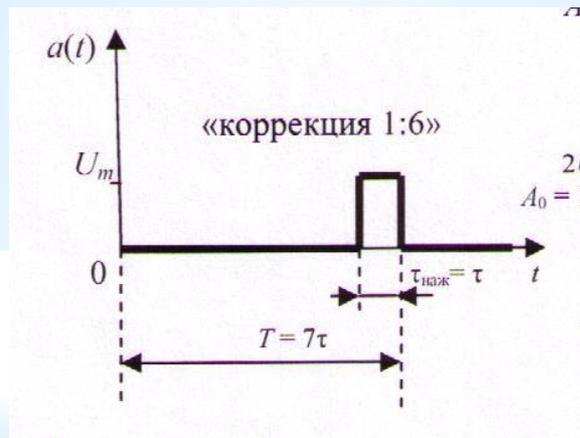
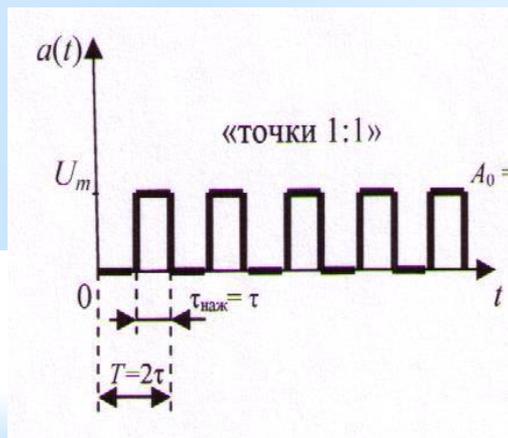
Дискретные ПЭС большинства РЭС ГА являются **непериодическими сигналами**.

Периодические дискретные ПЭС широко используются, например, в РЭС АЭС как **контрольные сигналы**, сигналы синхронизации, а также в РЭС Н и П сигналы маяков и приводных радиостанций.

Контрольные сигналы используются для контроля качества канала или отдельных его элементов.



Основные контрольные сигналы – «точки» (1:1) и «коррекция» (1:6) и (6:1).



Аналитическое представление ПЭС:

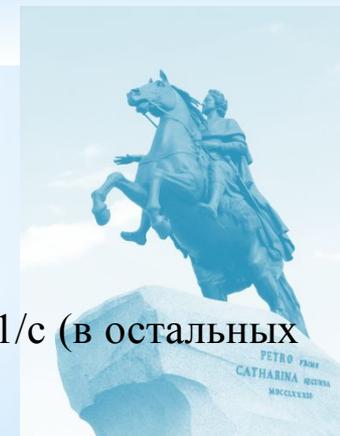
$$a(t) = \begin{cases} U_{\text{наж}}, & \text{при передаче "1";} \\ U_{\text{отж}}, & \text{при передаче "0".} \end{cases}$$

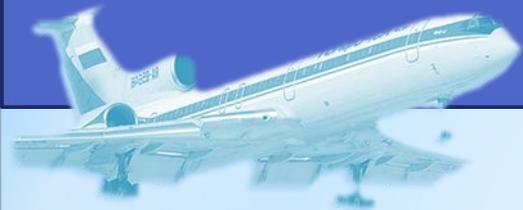
Скорость передачи ПЭС:

$$v = 1/\tau,$$

где τ – длительность элементарной посылки.

Единицы измерения скорости – Бод (при передаче телеграфных сообщений) и 1/с (в остальных случаях).





Для двоичных периодических импульсных последовательностей введено понятие **скважности** q , которое выражается отношением

$$q = \frac{T}{\tau_{\text{наж}}},$$

где T – период двоичной импульсной последовательности;

$\tau_{\text{наж}}$ – длительность импульса, состоящего из одной или нескольких следующих подряд элементарных посылок «нажатие».

Таким образом, можно сделать вывод о составе характеристик временного представления ПЭС:

$U_{\text{наж}}$, $U_{\text{отж}}$ – уровни посылок «нажатие» и «отжатие»;

τ – длительность элементарной посылки,

и для периодических сигналов:

T – период двоичной импульсной последовательности;

q – скважность.



**Алгоритм спектрального представления дискретных ПЭС,
необходимого и достаточного для инженерной практики:**

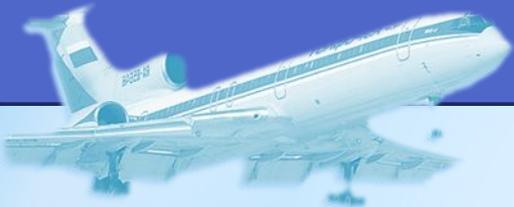
- 1. Спектр амплитуд $A(f)$ непериодического дискретного ПЭС сплошной, а периодического дискретного ПЭС – линейчатый.**
- 2. Спектр амплитуд непериодического дискретного ПЭС и огибающая спектра амплитуд периодического дискретного ПЭС идентичны и имеют вид функции**

$$\left| \frac{\sin x}{x} \right|$$

- 3. Функция $\left| \frac{\sin x}{x} \right|$ принимает нулевые значения на частотах, кратных $1/\tau$, а составляющие спектра амплитуд периодического сигнала расположены на частотах, кратных частоте $F_1 = 1/T$.**

- 4. Частота $F_1 = 1/T$ называется первой гармоникой спектра амплитуд периодического сигнала, а остальные составляющие спектра амплитуд данного сигнала называются гармониками спектра.**





5. Постоянная составляющая спектра амплитуд периодического дискретного ПЭС равна

$$A(0) = \frac{U_m}{q},$$

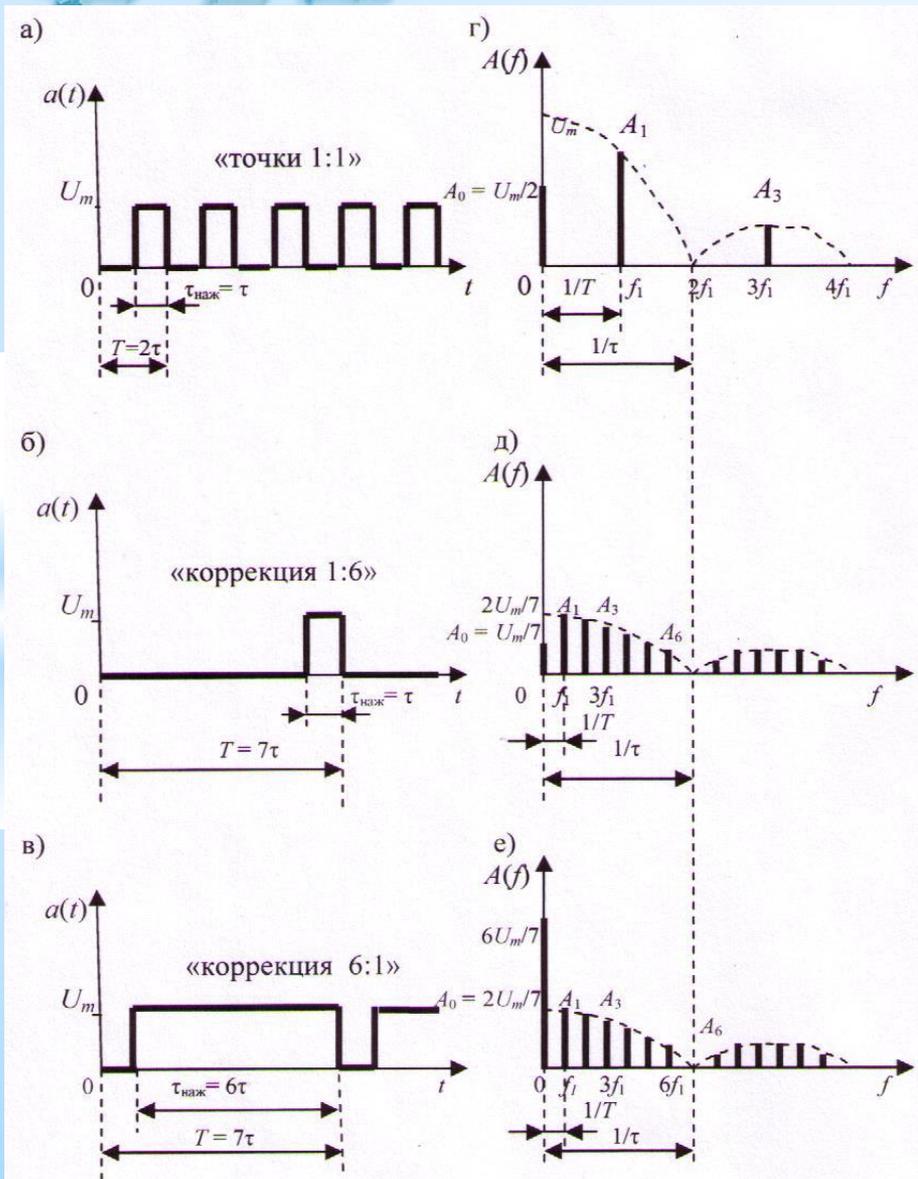
где $U_m = U_{\text{наж}} - U_{\text{отж}}$
 q – скважность.

6. Максимум огибающей спектра амплитуд периодического дискретного ПЭС равен

$$U_{\text{ог макс}} = \frac{2U_m}{q^*},$$

где q^* – числитель скважности.





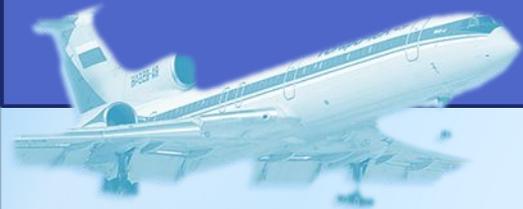
Временные и спектральные (спектрально-временные) представления ПЭС «точки» (а, г), «коррекция 1:6» (б, д) и «коррекция 6:1» (в, е) при одинаковой скорости передачи

Из анализа спектров амплитуд $A(f)$ периодических ПЭС «точки» и «коррекция» 6:1 и 1:6 следует, что основная часть энергии любого дискретного ПЭС заключена в полосе частот, ограниченной 3...5 гармониками основной частоты манипуляции $F_{\text{ман}}$, и называемой **шириной спектра** дискретного ПЭС:

$$\Delta F_{\text{ПЭС}} = (3 \dots 5) F_{\text{ман}}$$

где $F_{\text{ман}}$ – основная частота манипуляции (первая гармоника ПЭС «точки»:
 $F_{\text{ман}} = 1/T_{1:1}$.)





Из анализа спектров амплитуд периодических ПЭС $A(f)$ следует, что **основными спектральными характеристиками сигнала** являются:

- **огибающая спектра амплитуд**, определяемая функцией $\left| \frac{\sin x}{x} \right|$ с нулями в точках, кратных $\frac{1}{\tau}$ (где $\frac{1}{\tau}$ численно равна скорости передачи сигнала v_c);

- **ширина спектра сигнала** $\Delta F_{\text{ПЭС}} = (3 \dots 5) F_{\text{ман}}$,

и для периодических сигналов:

- **частоты составляющих спектра амплитуд** $F_k = k/T = kf_1$, где $k = 1, 2, 3, \dots$

Таким образом, основными характеристиками ПЭС, позволяющими определить все из его рассмотренных временных и спектральных характеристик, являются:

$U_{\text{наж}}$, $U_{\text{отж}}$ – уровни посылок «нажатие» и «отжатие»;

v_c – скорости передачи сигнала;

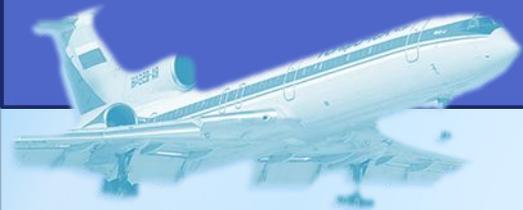
$\Delta F_{\text{ПЭС}}$ – ширина спектра сигнала,

и для периодических сигналов:

T – период двоичной импульсной последовательности;

q – скважность.





2. Дискретные модулированные сигналы

Дискретный модулированный сигнал (дискретный радиосигнал) формируется при изменении одного или нескольких параметров несущего гармонического колебания по закону ПЭС или преобразованного ПЭС, называемых **модулирующими сигналами**.

Модуляцию несущего колебания дискретным ПЭС называют **манипуляцией**.

Несущее гармоническое колебание можно представить в виде

$$s_H(t) = U_H \cos(2\pi f_H t + \varphi_0),$$

где U_H , f_H , φ_0 – амплитуда, частота и начальная фаза несущего колебания соответственно.

Несущая частота f_H – это любая частота из диапазона рабочих частот РЭС.

Понятия
«вид модулированного сигнала» и «класс радиоизлучения» –
идентичны.



Основные характеристики дискретных модулированных радиосигналов:

- несущая частота f_H ;
- вид модуляции (класс радиоизлучения);
- ширина спектра частот, занимаемого радиосигналом, Δf_{pc} ;
- максимальный (пиковый) U_{\max} , минимальный U_{\min} и средний U_{cp} уровни радиосигнала;
- максимальная (пиковая) P_{\max} , минимальная P_{\min} и средняя P_{cp} мощности радиосигнала;
- пикфактор радиосигнала $\pi = \frac{U_{\max}}{U_{cp}}$ или $\pi^2 = \frac{P_{\max}}{P_{cp}}$;
- динамический диапазон радиосигнала $D = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$ или $D^2 = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$;
- скорость передачи сигнала v_c ;
- длительность элементарной посылки ; τ

и дополнительно для периодических дискретных радиосигналов:

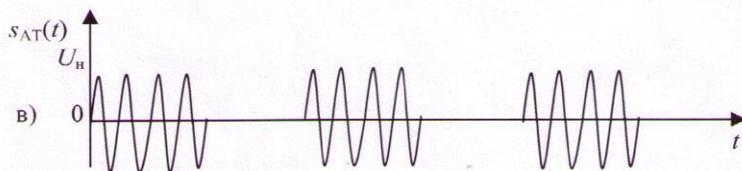
- период T ;
- скважность q .



2.1. Радиосигналы с амплитудной манипуляцией (АТ)

При амплитудной манипуляции при передаче посылки «нажатие» («1») формируется отрезок несущего сигнала $s_H(t)$ длительности τ , а при передаче посылки «отжатие» («0») на интервале τ несущий сигнал отсутствует, т.е. его амплитуда равна нулю.

Аналитическое и графическое представление радиосигнала АТ «точки»:



$$s_{AT}(t) = \begin{cases} U_H \cos 2\pi f_H t, & \text{если посылка "1";} \\ 0, & \text{если посылка "0".} \end{cases}$$

Представление спектра амплитуд радиосигнала АТ:

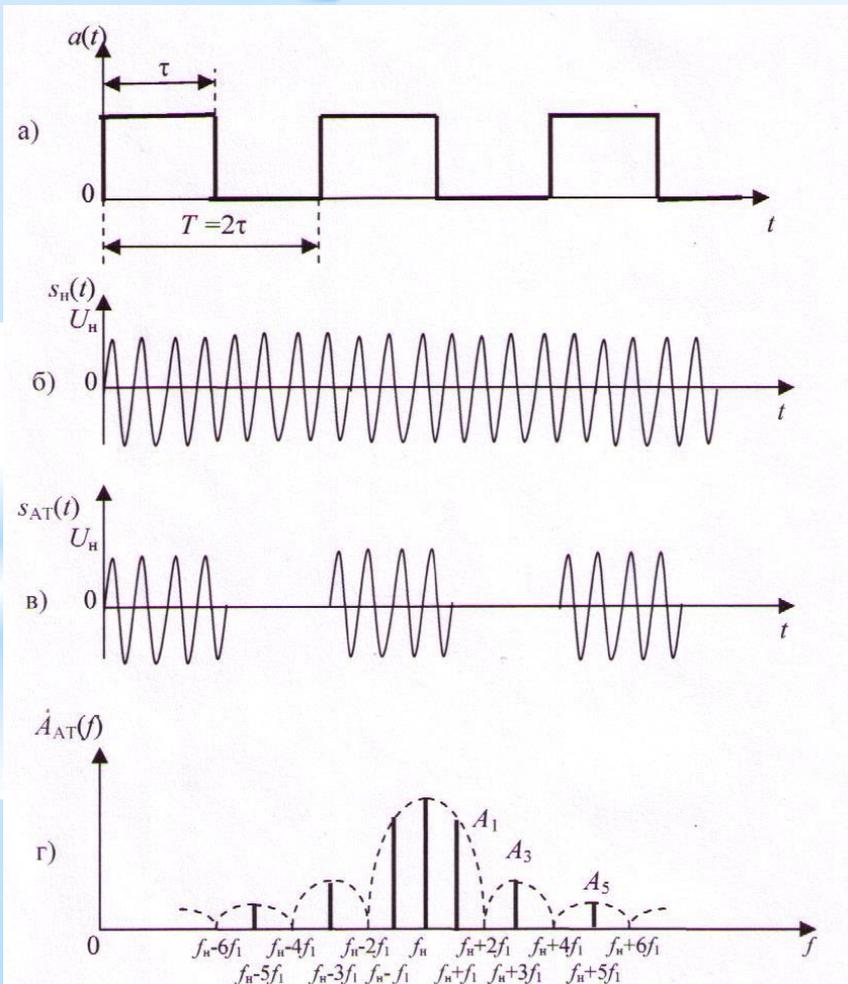
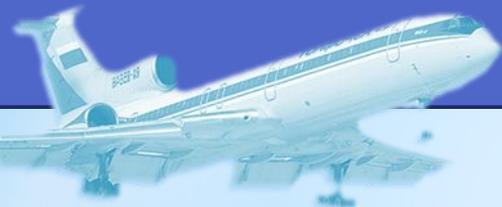
1. Спектр амплитуд ПЭС перенести в область радиочастот и разместить его симметрично с одной и с другой стороны относительно частоты несущего колебания f_H .
2. Составляющая спектра амплитуд на частоте несущего колебания f_H равна

$$A(f_H) = \frac{U_H}{q}.$$

3. Максимум огибающей спектра амплитуд радиосигнала АТ равен

$$A_{\text{макс огиб}}(f_H) = \frac{U_H}{q^*}.$$





Временное (в) и спектральное (спектр амплитуд) (г) представления радиосигнала АТ при манипуляции несущего колебания (б) ПЭС «точки» (а)

Ширина спектра частот радиосигнала АТ определяется по формуле

$$\Delta f_{\text{АТ}} = 2\Delta F_{\text{ДПЭС}} = 2(3\dots 5) F_{\text{ман}}$$

Максимальный и средний уровни радиосигнала АТ «точки» равны:

$$U_{\text{АТ макс}} = U_{\text{н}}; \quad U_{\text{АТ ср}} = \frac{U_{\text{н}}}{2\sqrt{2}}$$

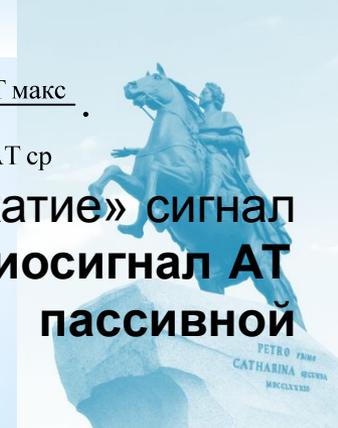
Максимальная и средняя мощности радиосигнала АТ «точки» (на сопротивлении 1 Ом) равны:

$$P_{\text{АТ макс}} = U_{\text{н}}^2; \quad P_{\text{АТ ср}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{8}$$

Пикфактор радиосигнала АТ «точки» равен:

$$\pi = \frac{U_{\text{АТ макс}}}{U_{\text{АТ ср}}}; \quad \pi^2 = \frac{P_{\text{АТ макс}}}{P_{\text{АТ ср}}}$$

При передаче посылки «отжатие» сигнал не излучается, поэтому радиосигнал АТ называют сигналом с пассивной паузой.



2.2. Радиосигналы с частотной манипуляцией (ЧТ)

При формировании сигналов частотной манипуляции (ЧТ) посылкам «отжатие» соответствуют отрезки гармонических колебаний, имеющие на длительности посылки значение частоты, равное $f_{\text{отж}}$, а посылкам «нажатие» соответствуют отрезки гармонических колебаний, имеющие на длительности посылки значение частоты, равное $f_{\text{наж}}$.

Аналитическое представление радиосигнала ЧТ:

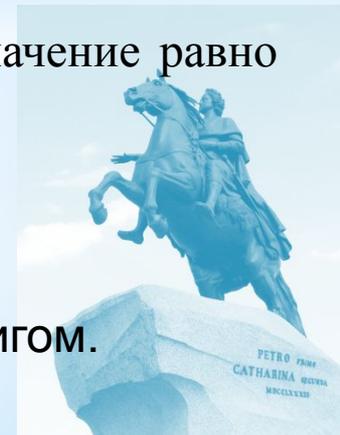
$$s_{\text{ЧТ}}(t) = \begin{cases} U_{\text{н}} \cos 2\pi f_{\text{наж}} t, & \text{если передана "1";} \\ U_{\text{н}} \cos 2\pi f_{\text{отж}} t, & \text{если передан "0".} \end{cases}$$

При частотной манипуляции при передаче посылок «отжатие» и «нажатие» излучается сигнал, поэтому **радиосигнал ЧТ называют сигналом с активной паузой.**

Как правило, значение частоты $f_{\text{наж}}$ выше значения $f_{\text{отж}}$, их среднее значение равно частоте настройки РЭС $f_{\text{настр}}$, т.е.

$$f_{\text{настр}} = \frac{f_{\text{наж}} + f_{\text{отж}}}{2}.$$

а величина $f_{\text{наж}} - f_{\text{отж}} = \Delta f_{\text{сдв}}$ - сдвигом частоты или частотным сдвигом.

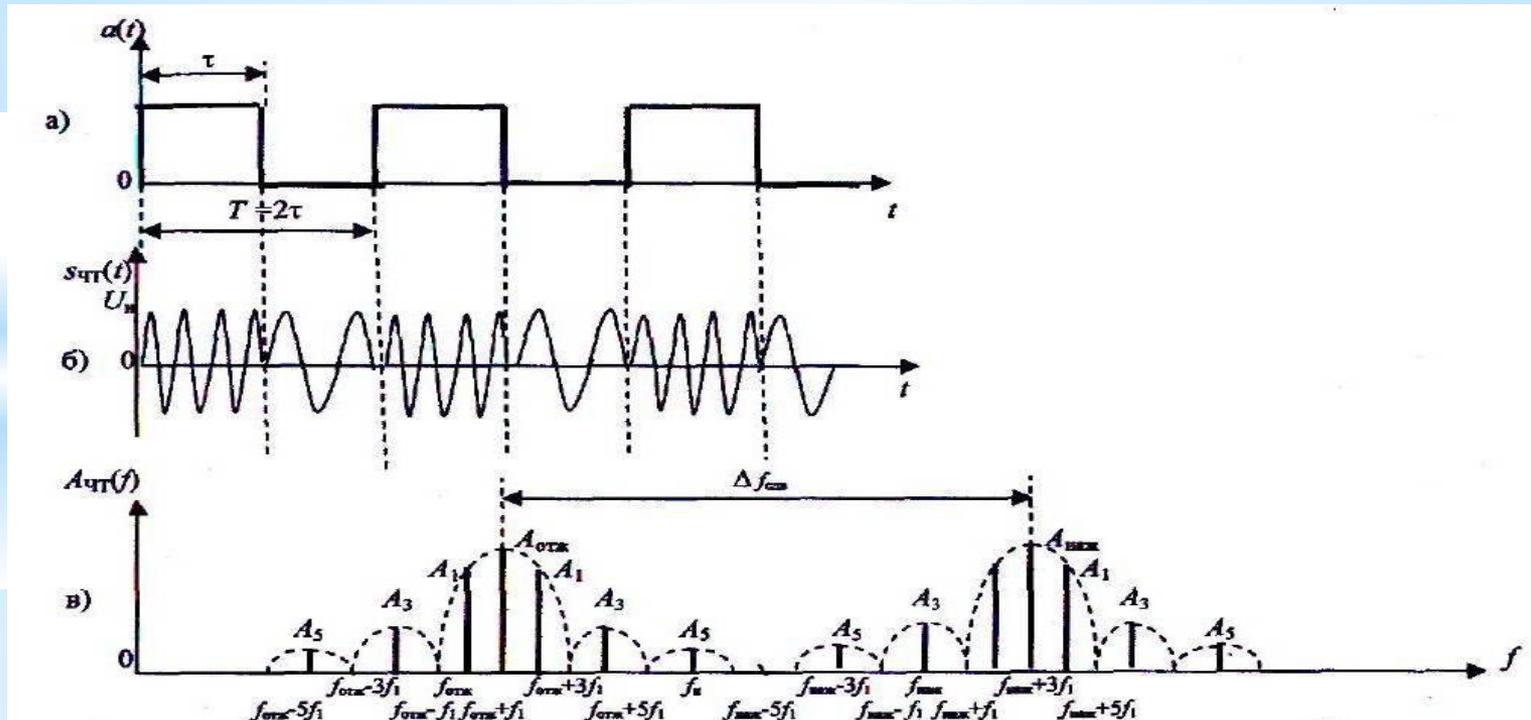




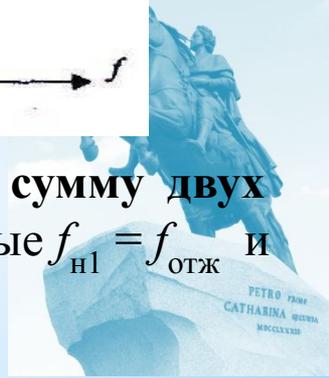
Стандартное значение частотного сдвига $\Delta f_{\text{сдв}}$ выбирают с учетом скорости передачи посылок ПЭС ν :

$$\Delta f_{\text{сдв}} \geq (2...3)\nu.$$

Принцип формирования радиосигнала ЧТ $s_{\text{ЧТ}}(t)$ и его спектр амплитуд для ПЭС «точки» приведены на рисунке.

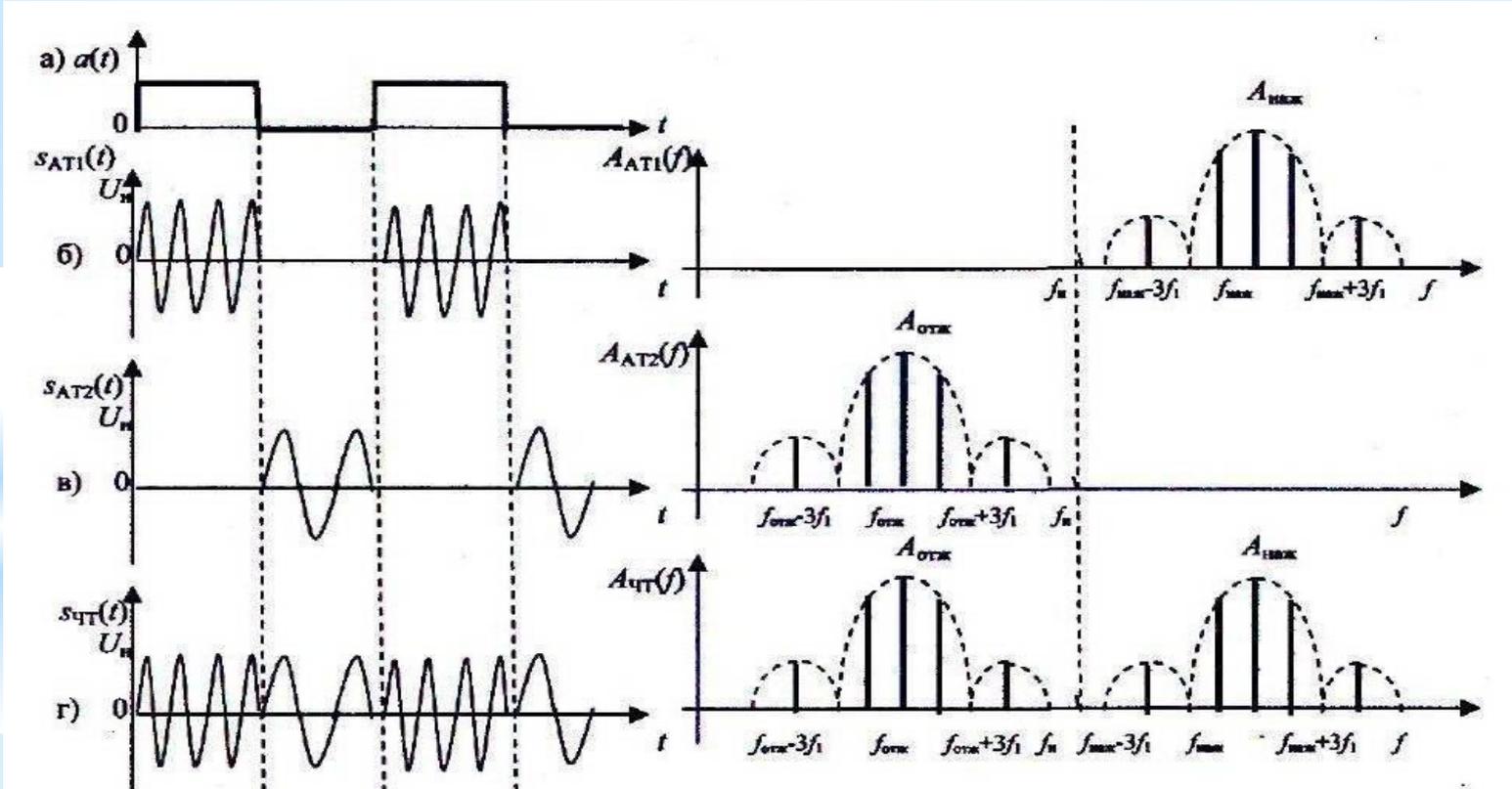


Из рисунка следует, что радиосигнал ЧТ можно представить как сумму двух сигналов АТ: $s_{\text{АТ1}}(t)$ и $s_{\text{АТ2}}(t)$, имеющих частоты несущих колебаний, равные $f_{\text{н1}} = f_{\text{отж}}$ и $f_{\text{н2}} = f_{\text{наж}}$ соответственно.





Временные и спектральные представления радиосигнала ЧТ (г) как суммы двух сигналов АТ (б, в) при манипуляции ПЭС «точки» (а) приведены на рисунке.



Из рисунка следует, что временное и спектральное представления радиосигнала ЧТ представляет собой геометрическую сумму соответствующих компонентов двух радиосигналов $s_{AT1}(t)$ и $s_{AT2}(t)$.

При этом, скважность q_{AT1} сигнала $s_{AT1}(t)$ равна скважности исходного ПЭС, а скважность q_{AT2} сигнала $s_{AT2}(t)$ определяют по формуле: $q_{AT2} = T / (T - \tau_{наж})$.





Рассмотренный способ формирования радиосигнала ЧТ называется **способом формирования радиосигнала ЧТ с разрывом фазы**, так как гармонические колебания с частотами $f_{отж}$ и $f_{наж}$ формируются разными генераторами.

Возможен способ формирования радиосигнала ЧТ без разрыва фазы. В этом случае гармонические колебания с частотами $f_{отж}$ и $f_{наж}$ формируются одним генератором, но его частота изменяется в зависимости от вида передаваемых посылок за счет изменения емкости конденсатора в колебательном контуре генератора.

Ширина спектра частот радиосигнала ЧТ определяется по формуле:

$$\Delta f_{\text{ЧТ}} = \Delta f_{\text{АТ}} + \Delta f_{\text{сдв}} = (6 \dots 10) F_{\text{ман}} + \Delta f_{\text{сдв}},$$

где $F_{\text{ман}} = 1/T_{1:1}$.

Максимальный и средний уровни радиосигнала ЧТ равны:

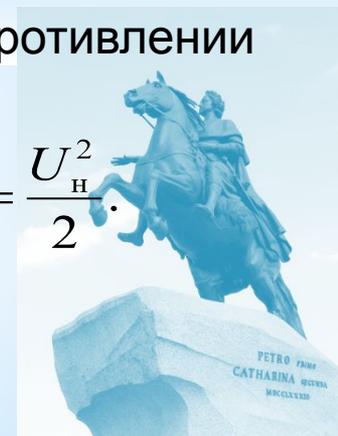
$$U_{\text{ЧТмакс}} = U_{\text{н}}; \quad U_{\text{ЧТср}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}}.$$

Максимальная и средняя мощности радиосигнала ЧТ (на сопротивлении 1 Ом) равны:

Пикфактор радиосигнала ЧТ равен:

$$P_{\text{ЧТмакс}} = U_{\text{н}}^2; \quad P_{\text{ЧТср}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{2}.$$

$$\pi_{\text{ЧТ}} = \frac{U_{\text{ЧТмакс}}}{U_{\text{ЧТср}}} = 1,41; \quad \pi_{\text{ЧТ}}^2 = \frac{P_{\text{ЧТмакс}}}{P_{\text{ЧТср}}} = 2.$$



2.3. Радиосигналы с фазовой манипуляцией (ФТ)

При формировании сигналов фазовой манипуляции (ФТ) посылкам «нажатие» и «отжатие» ставятся в соответствие отрезки высокочастотных гармонических колебаний, начальные фазы которых отличаются на π (противофазные колебания).

Аналитическое представление радиосигнала ФТ «точки» имеет вид:

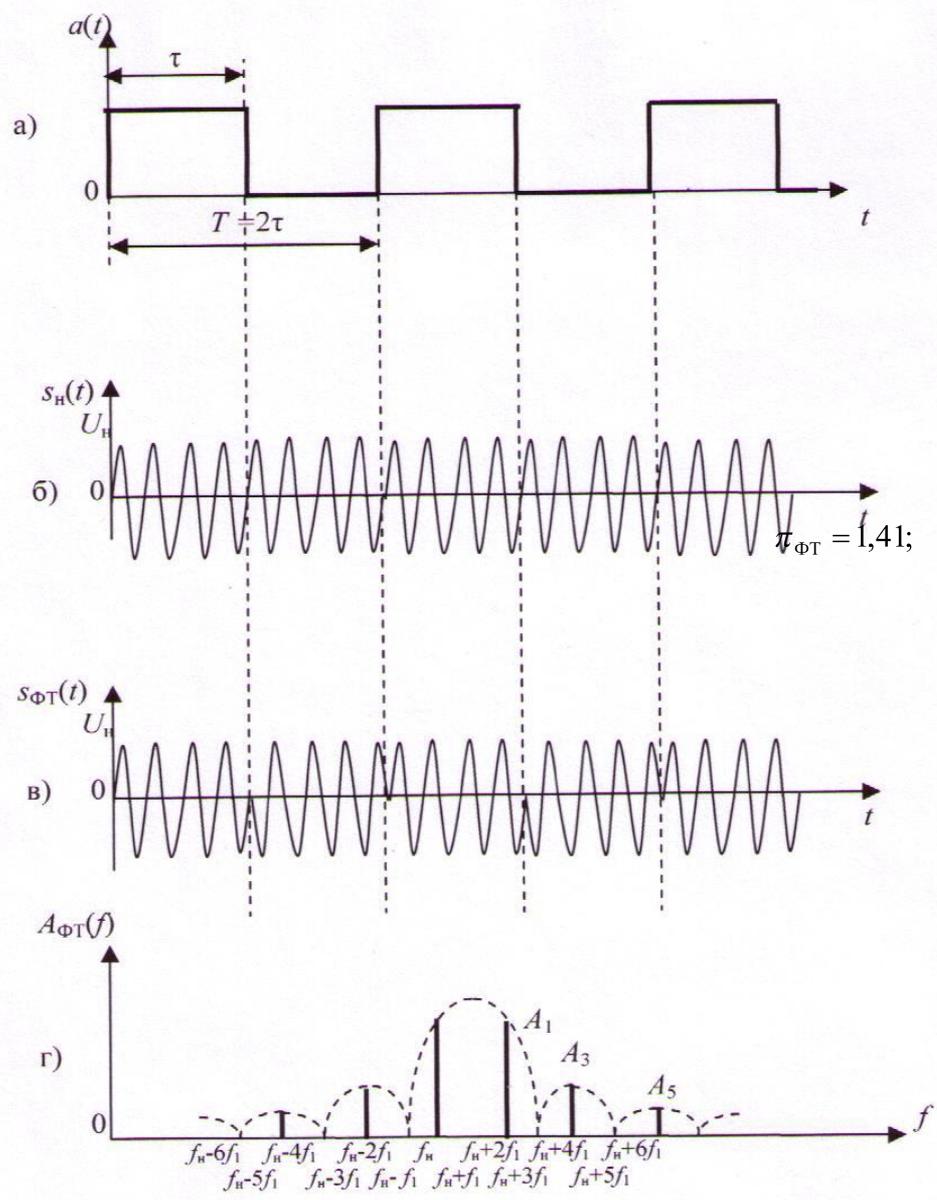
$$s_{\text{ФТ}}(t) = \begin{cases} U_{\text{н}} \cos 2\pi f_{\text{н}} t, & \text{если передана "1";} \\ U_{\text{н}} \cos(2\pi f_{\text{н}} t + \pi), & \text{если передан "0".} \end{cases}$$

Радиосигнал ФТ тоже называют **сигналом с активной паузой**.

Радиосигнал ФТ, подобно радиосигналу ЧТ, можно представить как сумму двух сигналов с амплитудной манипуляцией $s_{\text{АТ1}}(t)$ и $s_{\text{АТ2}}(t)$, несущие колебания которых имеют противоположные фазы.

В этом случае спектр сигнала ФТ представляет собой геометрическую сумму всех спектральных компонентов радиосигналов $s_{\text{АТ1}}(t)$ и $s_{\text{АТ2}}(t)$ **кроме компонентов на несущей частоте**. Компоненты на несущей частоте вычитаются, т.к. они имеют противоположные фазы.





Из рисунка ясен принцип формирования радиосигнала ФТ, а также его временное представление (в) и его спектр амплитуд (г).

Ширина спектра частот радиосигнала ФТ определяется по формуле

$$\Delta f_{\text{ФТ}} = \Delta f_{\text{АТ}}$$

Максимальный и средний уровни радиосигнала ФТ равны:

$$U_{\text{ФТмакс}} = U_{\text{н}}; \quad U_{\text{ФТср}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{2}}$$

Максимальная и средняя мощности радиосигнала ФТ (на сопротивлении 1 Ом) равны:

$$P_{\text{ФТмакс}} = U_{\text{н}}^2; \quad P_{\text{ФТср}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{2}$$

Пикфактор радиосигнала ФТ равен:

$$\pi_{\text{ФТ}} = 1,41; \quad \pi_{\text{ФТ}}^2 = 2.$$



2.4. Радиосигналы с относительной фазовой манипуляцией (ОФТ)

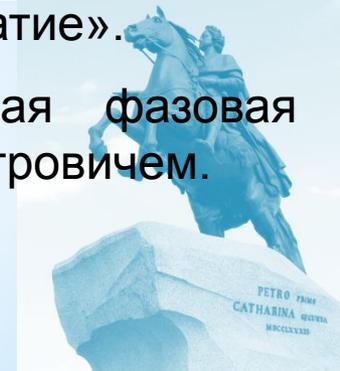
Использование радиосигналов ФТ наталкивается на затруднения при их обработке в приемной КОА из-за неопределенности значения начальной фазы принимаемых колебаний после их распространения в СРС.

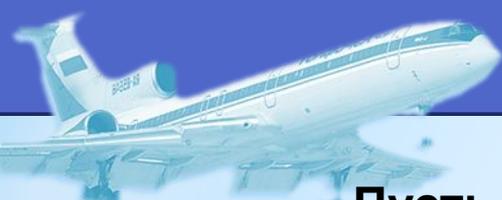
Эта неопределенность приводит к ошибкам при приеме посылок, а в случае изменения начальной фазы принимаемого ФТ радиосигнала на π происходит так называемый «перескок фазы», приводящий к «обратной работе», т.е. вместо посылки «нажатие» принимается посылка «отжатие», а вместо посылки «отжатие» принимается посылка «нажатие».

В этом случае неправильный прием будет либо до конца передачи информации, либо до следующего «перескока» фазы.

Факт смены фазы посылки однозначно можно определить только в том случае, если изменение фазы посылки на π происходит при передаче посылки определенного вида: либо посылки «нажатие», либо посылки «отжатие».

На использовании этой особенности основана относительная фазовая манипуляция (ОФТ), предложенная отечественным ученым Н.Т. Петровичем.





Пусть изменение фазы посылки на π происходит при передаче посылки «отжатие».

В этом случае при передаче посылки «нажатие» фаза передаваемой посылки радиосигнала равна фазе предыдущей посылки радиосигнала, а при передаче посылки «отжатие» фаза передаваемой посылки радиосигнала противоположна фазе предыдущей посылки радиосигнала.

Для простоты технической реализации **формирование радиосигнала ОФТ осуществляется в два этапа:**

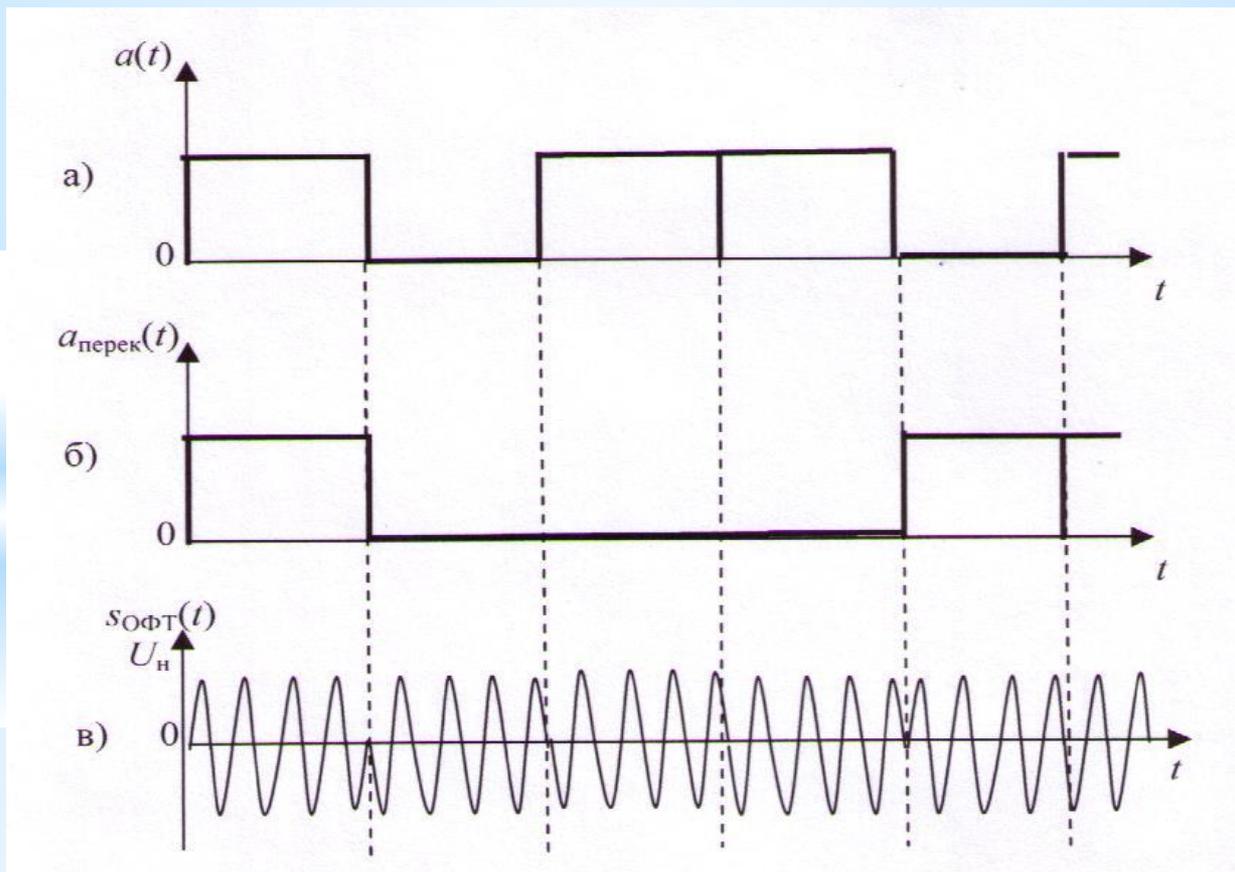
1 этап – перекодирование передаваемого ПЭС в устройстве перекодирования (УП). При перекодировании в УП полярность посылки, формируемой на выходе УП, равна полярности предыдущей посылки, если на вход УП поступает посылка «нажатие», и изменяется на противоположную относительно полярности предыдущей посылки, если на вход УП поступает посылка «отжатие»,

2 этап – формирование радиосигнала ОФТ методом фазовой манипуляции, т.е. модуляция фазы несущего колебания перекодированным ПЭС методом фазовой манипуляции (ФТ).

Отсюда следует, что спектрально-временные характеристики ОФТ-радиосигнала аналогичны соответствующим характеристикам радиосигнала ФТ, полученным по перекодированному ПЭС.

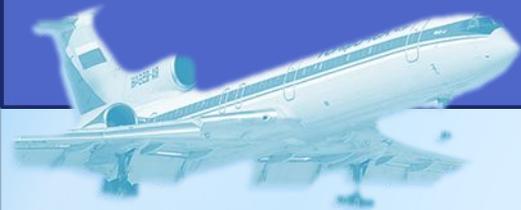


Принцип формирования радиосигнала ОФТ в 2 этапа:



- формирование перекодированного ПЭС (б) из исходного ПЭС (а);
- формирование радиосигнала ОФТ (в) путем модуляции фазы несущего колебания перекодированным ПЭС (б) методом фазовой телеграфии.





Выводы

1. Основными характеристиками дискретных ПЭС, позволяющих определить все их временные и спектральные характеристики, являются уровни посылок «нажатие» $U_{\text{наж}}$ и «отжатие» $U_{\text{отж}}$, скорость передачи сигнала v_c , ширина спектра сигнала $\Delta F_{\text{ПЭС}}$ и период двоичной последовательности T и скважность q для периодических сигналов.
2. Основными характеристиками дискретных модулированных радиосигналов являются несущая частота f_n , вид модуляции (класс радиоизлучения), ширина спектра частот $\Delta f_{\text{рс}}$, средний $U_{\text{ср}}$ уровень радиосигнала, средняя $P_{\text{ср}}$ мощность радиосигнала, пикфактор радиосигнала $\pi_{\text{рс}}$, скорость передачи сигнала v_c и период T и скважность q для периодических дискретных радиосигналов.
3. Из анализа характеристик рассмотренных дискретных радиосигналов с амплитудной, частотной, фазовой и относительной фазовой манипуляцией следует:
 - при равных уровнях несущего сигнала средняя мощность радиосигналов ФТ и ОФТ в 4 раза больше средней мощности радиосигнала АТ и равна средней мощности радиосигнала ЧТ;
 - ширина спектра радиосигналов ФТ и ОФТ равна ширине спектра радиосигнала АТ и практически в 2 раза меньше, чем у сигнала ЧТ.

