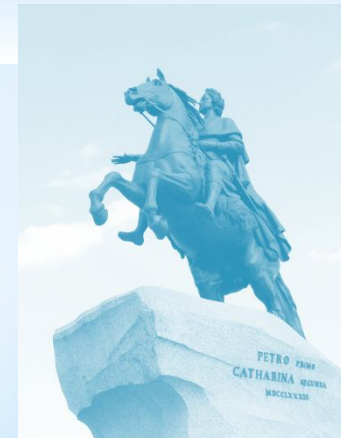


Лекция 1/4. Непрерывные сигналы

2014 г



1. Непрерывные первичные электрические сигналы

Непрерывные ПЭС широко применяют в РЭС АЭС для передачи речевых (телефонных) сообщений или других сообщений, преобразованных в сигнал стандартного телефонного канала.

Непрерывные ПЭС могут быть детерминированными и случайными, периодическими и непериодическими процессами.

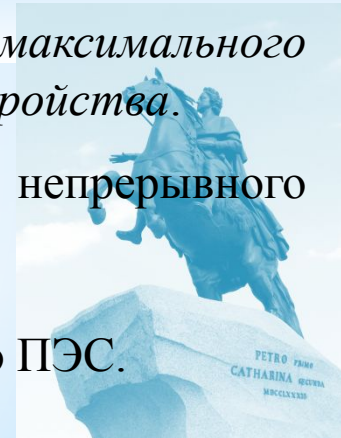
Для инженерной оценки и расчетов в процессе эксплуатации РЭС как правило не требуется детальная информация о характеристиках сигнала, а достаточно знать следующие характеристики непрерывного ПЭС:

- ширина полосы занимаемых частот ΔF ;
- среднее $U_{\text{ср}}$ и максимальное (пиковое) $U_{\text{макс}}$ значения уровня сигнала;
- среднее $P_{\text{ср}}$ и максимальное (пиковое) $P_{\text{макс}}$ значение мощности сигнала;
- пикфактор π ;
- динамический диапазон D - представляющий логарифм отношения максимального и минимального возможных значений величины входного параметра устройства.

Аналитическое выражение для временного представления непрерывного непериодического ПЭС имеет вид

$$a(t) = U(t)\cos\varphi(t),$$

где $U(t)$ и $\varphi(t)$ – мгновенная огибающая и мгновенная фаза непрерывного ПЭС.

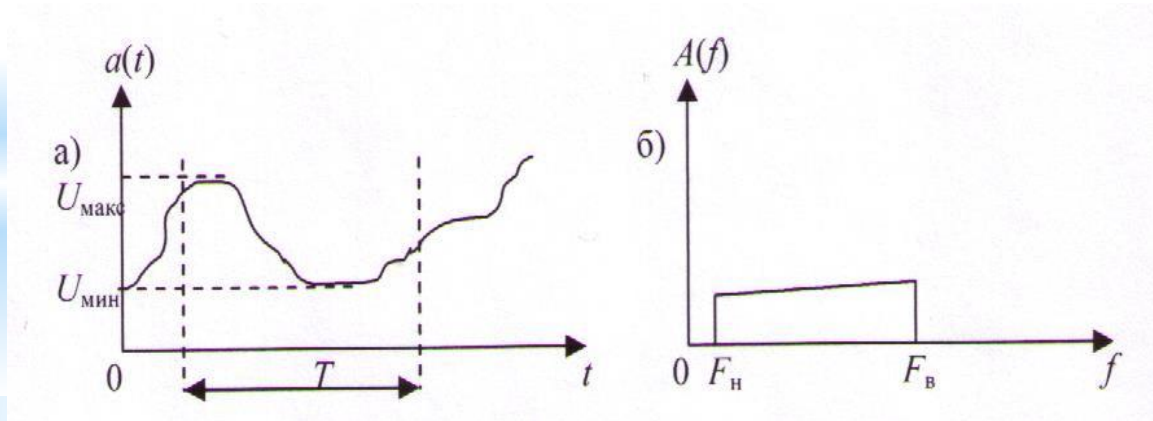


Ширина спектра частот непрерывного первичного сигнала ΔF определяется как разность между верхней $F_{\text{В}}$ и нижней $F_{\text{Н}}$ частотами спектра сигнала:

$$\Delta F = F_{\text{В}} - F_{\text{Н}}.$$

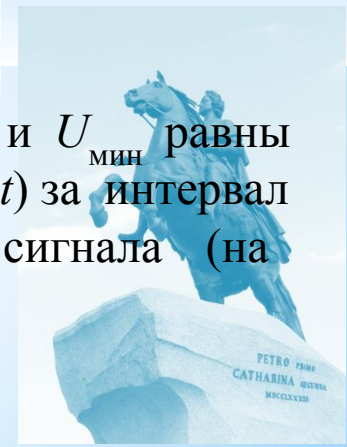
В общем случае непрерывный непериодический ПЭС имеет сплошной спектр в полосе частот ΔF .

Временное и спектральное представление непрерывного ПЭС приведено на рисунке.



Максимальный и минимальный уровни непрерывного сигнала $U_{\text{макс}}$ и $U_{\text{мин}}$ равны соответственно максимальным и минимальным значениям сигнала $a(t)$ за интервал наблюдения T . Тогда максимальная и минимальная мощности сигнала (на сопротивлении нагрузки 1 Ом) соответственно равны

$$P_{\text{макс}} = U_{\text{макс}}^2 ; \quad P_{\text{мин}} = U_{\text{мин}}^2.$$



Средняя мощность $P_{\text{ср}}$ сигнала $a(t)$, а также среднее квадратическое (действующее) $U_{\text{ср}}$ и среднее $U_{\text{ср}}^*$ значения этого сигнала за интервал наблюдения T определяются соответственно выражениями:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt; \quad U_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}; \quad U_{\text{ср}}^* = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt.$$

Пикфактор непрерывного ПЭС:

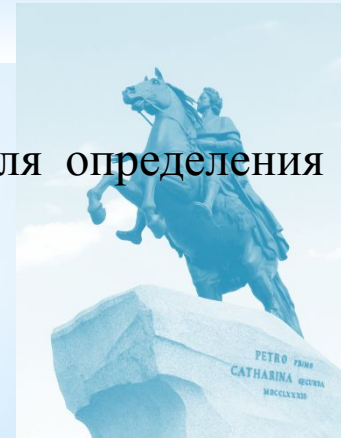
$$\pi = \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{ср}}}; \quad \pi^2 = \frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{ср}}}.$$

При расчетах и измерениях уровня и мощности сигнала и связанных с ними характеристик иногда удобно уровни сигнала представлять в относительных единицах, выраженных в логарифмической форме: в децибелах (дБ) или в неперах (Нп) ($1 \text{ Нп} = 20 \lg e \text{ дБ} \approx 8,7 \text{ дБ}$). Для децибелов используется десятичная система логарифмов, а для неперов – натуральная.

В десятичной системе логарифмов имеем:

$$U_{\text{дБ}} = 20 \log \frac{U}{U_{\text{э}}}; \quad P_{\text{дБ}} = 10 \log \frac{P}{P_{\text{э}}}.$$

где $P_{\text{э}}$, $U_{\text{э}}$ – значения мощности и напряжения, взятые как эталон для определения мощности и напряжения сигнала (помехи).





Пикфактор сигнала π определяется как отношение максимального (пикового) уровня сигнала к среднему:

$$\pi_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{ср}}} = U_{\text{макс дБ}} - U_{\text{ср дБ}} = 10 \lg \frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{ср}}} = P_{\text{макс дБ}} - P_{\text{ср дБ}}.$$

Динамический диапазон D равен отношению пикового уровня сигнала к минимальному уровню:

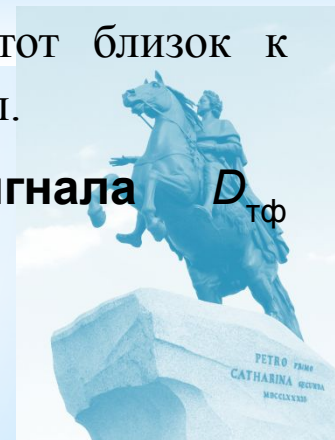
$$D_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{мин}}} = U_{\text{макс дБ}} - U_{\text{мин дБ}} = 10 \lg \frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{мин}}} = P_{\text{макс дБ}} - P_{\text{мин дБ}}.$$

Параметры первичного телефонного сигнала зависят от особенностей передаваемого сообщения.

Международный союз электросвязи (МСЭ) рекомендует для передачи телефонных сообщений эффективно передаваемую полосу частот 300...3400 Гц, т.е. $F_{\text{н тф}} = 300$ Гц, $F_{\text{в тф}} = 3400$ Гц и $\Delta F_{\text{тф}} = 3100$ Гц.

Пикфактор первичного телефонного сигнала в этой полосе частот близок к пикфактору шума и равен $\pi_{\text{тф}} \approx 3,3$, т.е. $\pi_{\text{тф дБ}} \approx 10$ дБ или $\pi_{\text{тф Нп}} = 1,15$ Нп.

Динамический диапазон первичного телефонного сигнала $D_{\text{тф}}$ равен 26...35 дБ





Непрерывный ПЭС с приведенными выше параметрами называется **стандартным сигналом тональной частоты** (сигналом ТЧ или ТЧ-сигналом), а канал передачи информации, предназначенный для передачи таких сигналов, – **стандартным каналом тональной частоты** (каналом ТЧ или ТЧ-каналом).

Для каналов ТЧ определены следующие виды передаваемых сигналов:

- рабочий сигнал ТЧ;
- контрольный сигнал.

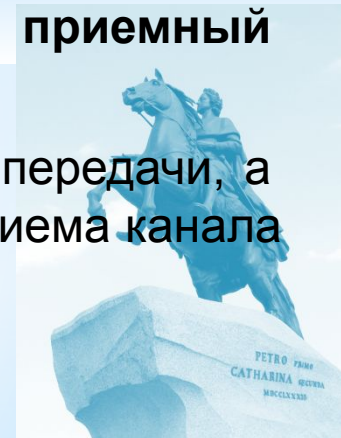
Рабочий сигнал ТЧ – это сигнал ТЧ $a_{\text{ТЧ}}(t)$, содержащий передаваемую информацию.
Контрольный сигнал – это гармоническое колебание заданной частоты, используемое для контроля работоспособности канала ТЧ и его регулировки:


$$a_{\text{КС}}(t) = U_{\text{КС}} \cos 2\pi F_{\text{КС}} t,$$

где $U_{\text{КС}}$ и $F_{\text{КС}}$ – амплитуда и частота непрерывного контрольного сигнала. Как правило, $F_{\text{КС}} = 1000$ Гц.

Для каналов систем передачи ТЧ определены **передающий и приемный уровни** сигналов.

Передающим называют уровень сигнала на входе КОА в тракте передачи, а **приемным** уровнем – уровень сигнала на выходе КОА в тракте приема канала передачи информации.





Различают следующие уровни сигналов в канале ТЧ:

- рабочий уровень;
- номинальный уровень;
- измерительный уровень.

Рабочий уровень сигнала ТЧ равен среднему (действующему) значению сигнала ТЧ.

Номинальный уровень – это максимально допустимое (пиковое) значение сигнала в канале ТЧ.

Измерительный уровень – это уровень контрольного сигнала, используемый при контроле работоспособности канала ТЧ и его регулировки.

В стандартном канале ТЧ первичный ТФ сигнал должен иметь, как правило, следующие **рабочие уровни сигнала**:

$U_{\text{раб}}^{\text{прд}} = -23 \text{ дБ} (-2,65 \text{ Нп})$ - передающий уровень;

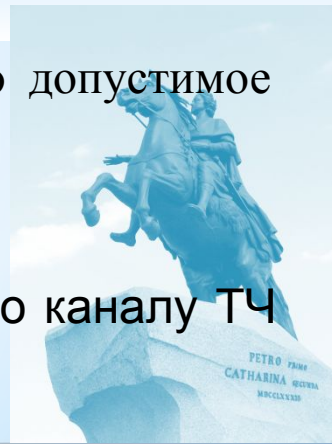
$U_{\text{раб}}^{\text{прм}} = -6 \text{ дБ} (-0,65 \text{ Нп})$ - приемный уровень.

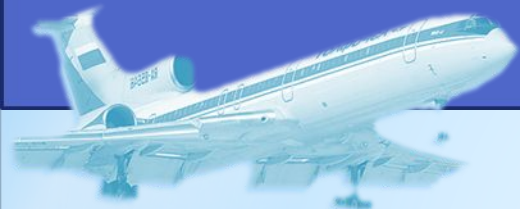
Номинальный уровень контрольного сигнала – это максимально допустимое (пиковое) значение контрольного сигнала в канале ТЧ:

$U_{\text{ном}}^{\text{прд}} = -13 \text{ дБ} (-1,5 \text{ Нп})$ - передающий уровень;

$U_{\text{ном}}^{\text{прм}} = +4 \text{ дБ} (+0,5 \text{ Нп})$ - приемный уровень.

Контрольный сигнал номинальным уровнем можно передавать по каналу ТЧ не более 6 с.



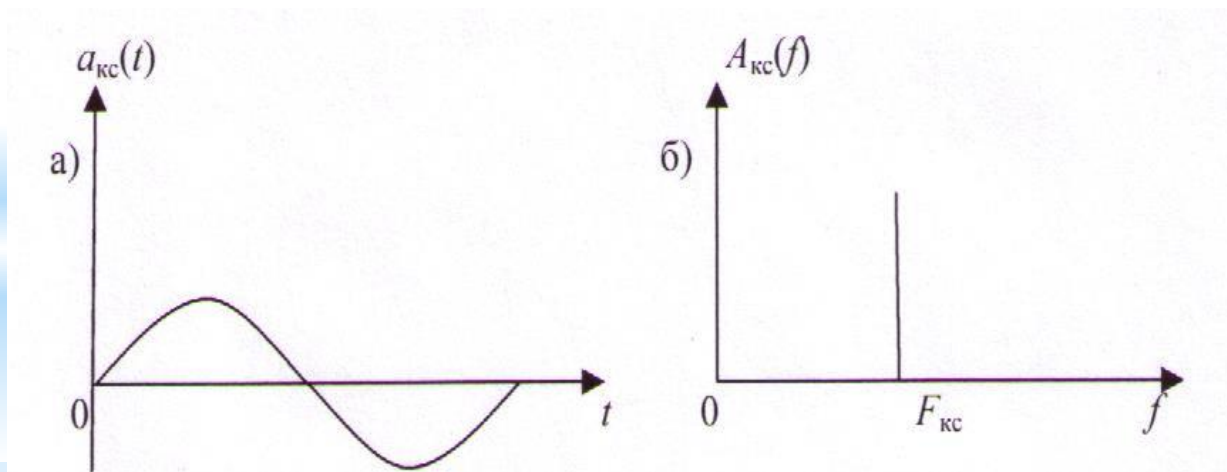


Регулировка канала ТЧ осуществляется контрольным сигналом, подаваемым в канал **измерительным уровнем**:

$U_{\text{изм}}^{\text{прд}} = -23 \text{ дБ} (-2,65 \text{ Нп})$ - передающий уровень;

$U_{\text{изм}}^{\text{прм}} = -6 \text{ дБ} (-0,65 \text{ Нп})$ - приемный уровень.

Временное и спектральное представление непрерывного контрольного ПЭС



2. Непрерывные модулированные сигналы

Непрерывный модулированный сигнал (непрерывный радиосигнал) формируется в результате модуляции одного или нескольких параметров несущего гармонического колебания по закону первичного или преобразованного первичного электрического сигнала.

Параметры несущего гармонического колебания - амплитуда, частота и фаза.

Основными и широко распространенными в авиационной электросвязи видами модуляции являются амплитудная и частотная модуляции.

Рассмотрим спектрально-временные представления непрерывных радиосигналов при модуляции несущего колебания

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

непрерывным контрольным сигналом

$$a_{KC}(t) = U_{KC} \cos 2\pi F_{KC} t,$$

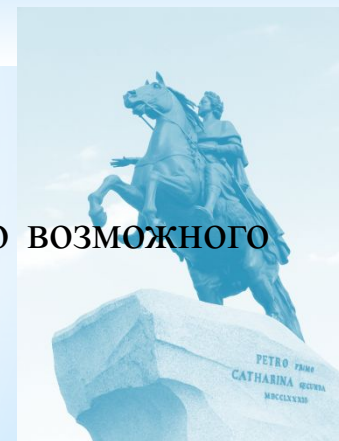
где U_H , f_H – амплитуда и частота несущего колебания;

U_{KC} , F_{KC} – амплитуда и частота контрольного сигнала.



Основные характеристики непрерывных радиосигналов:

- несущая частота f_H ;
- вид модуляции (класс радиоизлучения);
- ширина спектра частот, занимаемого радиосигналом, Δf_{pc} ;
- нижнюю F_H и верхнюю F_B частоты спектра непрерывного ПЭС;
- максимальный (пиковый) U_{\max} , минимальный U_{\min} и средний $U_{\text{ср}}$ уровни радиосигнала;
- максимальная (пиковая) P_{\max} , минимальная P_{\min} и средняя $P_{\text{ср}}$ мощности радиосигнала;
- динамический диапазон радиосигнала $D = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$ или $D^2 = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$;
- пикфактор радиосигнала $\pi_{pc} = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ср}}}$ или $\pi_{pc}^2 = \frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}$;
- фактор модуляции $m_{\text{мод}}$, который определяет величину максимально возможного изменения модулируемого параметра несущего колебания.



2.1. Радиосигналы с амплитудной модуляцией

Радиосигналы с амплитудной модуляцией широко используются в РЭС авиационной воздушной электросвязи ВЧ- и ОВЧ-диапазонов для связи диспетчеров с экипажами воздушных судов.

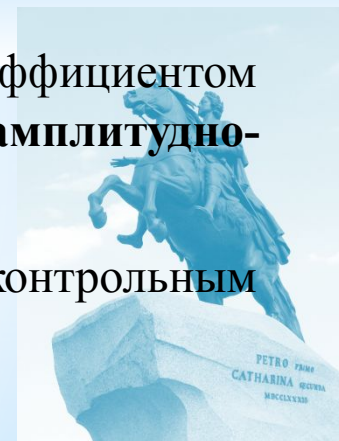
При амплитудной модуляции (АМ) амплитуда U_H несущего колебания $s_H(t) = U_H \cos 2\pi f_H t$ изменяется по закону изменения первичного электрического сигнала $a(t) = U(t) \cos \varphi(t)$:

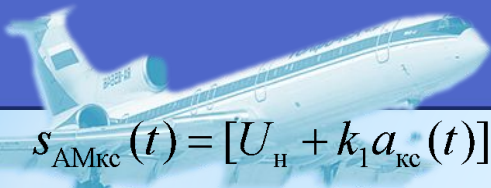
$$s_{AM}(t) = [U_H + k_1 a(t)] \cos 2\pi f_H t = [U_H + k_1 U(t) \cos \varphi(t)] \cos 2\pi f_H t = U_H [1 + m_{AM}(t) \cos \varphi(t)] \cos 2\pi f_H t,$$

где $m_{AM}(t) = \frac{k_1 U(t)}{U_H}$ коэффициент амплитудной модуляции;
 k_1 – коэффициент, выбираемый таким, чтобы $k_1 U(t) \leq U_H$.

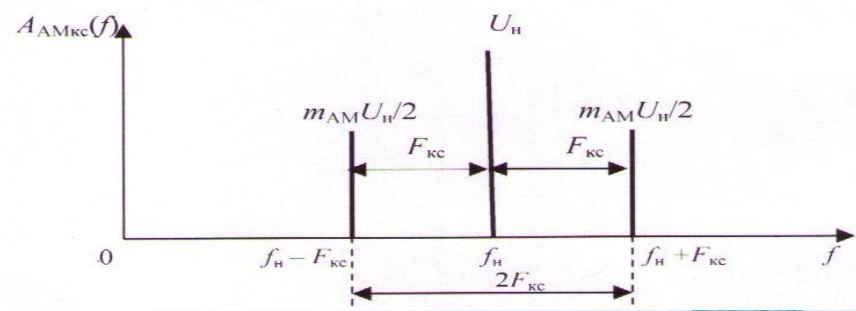
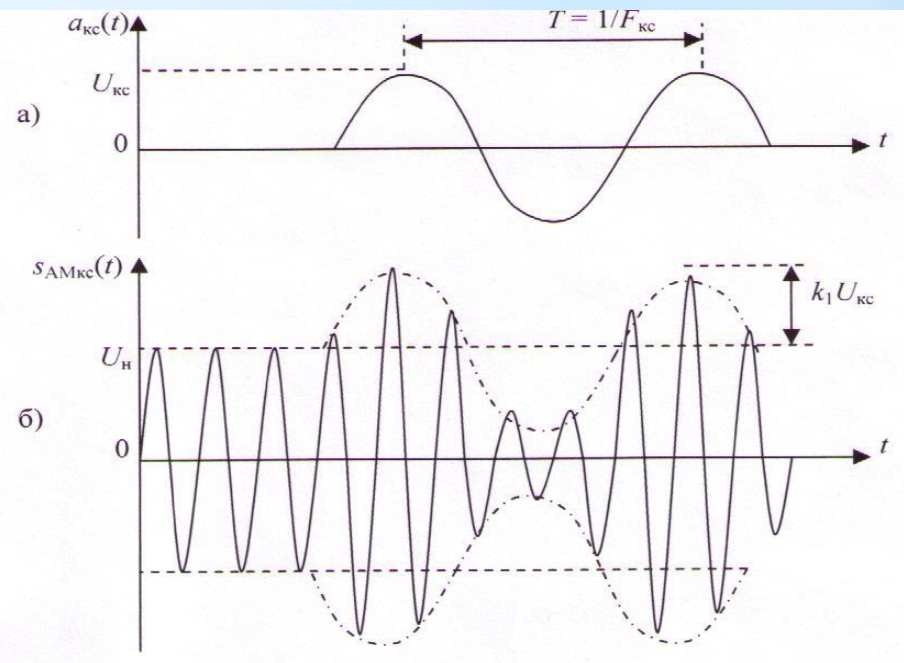
Коэффициент амплитудной модуляции m_{AM} , называемый также коэффициентом глубины модуляции, является фактором модуляции для амплитудно-модулированного сигнала.

При амплитудной модуляции несущего сигнала $s_H(t) = U_H \cos 2\pi f_H t$ контрольным сигналом $a_{KC}(t) = U_{KC} \cos 2\pi F_{KC} t$ получим:





$$\begin{aligned}
 s_{AM_{KC}}(t) &= [U_H + k_1 a_{KC}(t)] \cos 2\pi f_H t = \\
 &= [U_H + k_1 U_{KC} \cos 2\pi F_{KC} t] \cos 2\pi f_H t = \\
 &= U_H \left(1 + \frac{k_1 U_{KC}}{U_H} \cos 2\pi F_{KC} t\right) \cos 2\pi f_H t = \\
 &= U_H (1 + m_{AM} \cos 2\pi F_{KC} t) \cos 2\pi f_H t = \\
 &= U_H \cos 2\pi f_H t + m_{AM} U_H \cos 2\pi F_{KC} t \cos 2\pi f_H t = \\
 &= U_H \cos 2\pi f_H t + \frac{m_{AM} U_H}{2} \cos 2\pi (f_H + F_{KC}) t + \\
 &+ \frac{m_{AM} U_H}{2} \cos 2\pi (f_H - F_{KC}) t.
 \end{aligned}$$

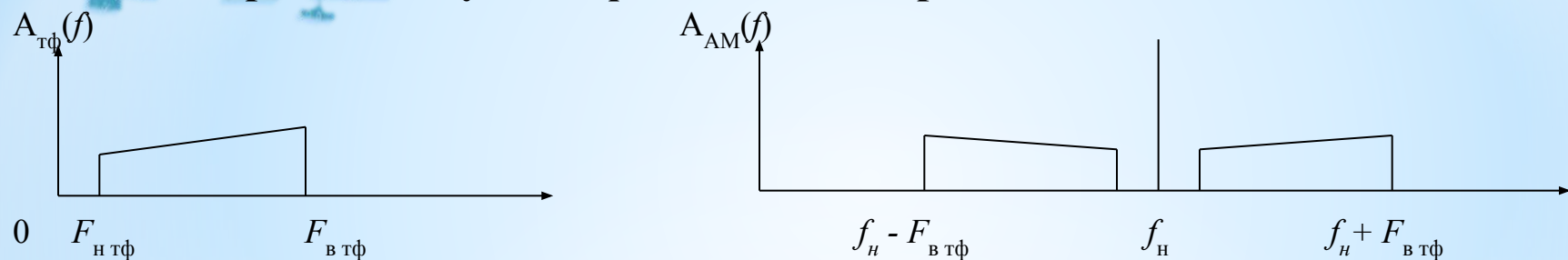


Временное представление контрольного ПЭС (а) и спектрально-временное представление контрольного АМ-сигнала (б) приведены на рисунке.

Принцип построения спектра амплитуд АМ-сигнала аналогичен принципу построения спектра амплитуд АТ-сигнала, т.е. для построения спектра амплитуд радиосигнала АМ необходимо спектр непрерывного ПЭС перенести в область радиочастот и расположить его симметрично по обе стороны относительно частоты несущего колебания.



Тогда спектры амплитуд телефонного ПЭС и радиосигнала АМ имеют вид



Ширина спектра частот амплитудно-модулированного сигнала при модуляции телефонным ПЭС определяется выражением

$$\Delta f_{\text{АМ}} = 2 F_{\text{в тф}}$$

Для контрольного амплитудно-модулированного сигнала его пиковая и средняя мощности и пикфактор соответственно равны

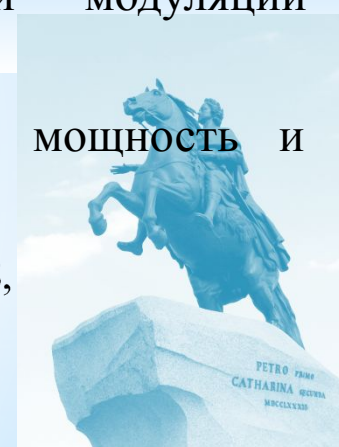
$$P_{\text{АМмакс кс}} = P_{\text{АМмакс}} = 4U_{\text{н}}^2; \quad P_{\text{АМср кс}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{2} + \frac{m_{\text{АМмакс}}^2 U_{\text{н}}^2}{4} = \frac{3U_{\text{н}}^2}{4}, \quad \pi_{\text{АМкс}}^2 = \frac{P_{\text{АМмакс кс}}}{P_{\text{АМср кс}}} = 5,33,$$


где $m_{\text{АМмакс}}$ – максимальное значение коэффициента амплитудной модуляции ($m_{\text{АМмакс}} = 1$)

Для телефонного амплитудно-модулированного сигнала средняя мощность и пикфактор соответственно равны

$$P_{\text{АМср тт}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{2} + \frac{m_{\text{АМмакс}}^2 U_{\text{н}}^2}{2\pi_{\text{тф}}^2} = \frac{U_{\text{н}}^2}{2} \left(1 + \frac{1}{\pi_{\text{тф}}^2}\right); \quad \pi_{\text{АМтт}}^2 = \frac{P_{\text{АМмакс}}}{P_{\text{АМср тт}}} = \frac{8\pi_{\text{тф}}^2}{1 + \pi_{\text{тф}}^2} \approx 8,$$

где $\pi_{\text{тф}} \approx 3,3$ – пикфактор модулирующего телефонного ПЭС.





Таким образом, передатчик АМ-сигналов в пиковые моменты времени (когда модулирующий сигнал максимальный) излучает среднюю мощность, которая почти в восемь раз меньше, чем пиковая мощность передатчика в режиме излучения несущего сигнала, т.е. **передатчик АМ-сигналов практически всегда недоиспользуется по мощности.**

Для инженерной оценки целесообразно использовать сравнение средних (действующих) мощностей АМ-сигнала и несущего сигнала передатчика. В этом случае они отличаются почти в 4 раза.

При $m_{AM} > m_{AMmax}$ происходит перемодуляция несущего сигнала, приводящая к нелинейным искажениям передаваемого сигнала.

Из анализа аналитического и спектрального представлений АМ-сигнала следует, что информация о передаваемом ПЭС содержится только в боковых полосах, причем в равной мере. Следовательно, нет необходимости передавать все три компонента радиосигнала АМ, а достаточно передать только спектральные составляющие его нижней или верхней боковых полос. Формирование радиосигнала такого вида получило название однополосной модуляции.



2.2. Радиосигналы с однополосной модуляцией

Выделим из аналитического представления АМ-радиосигнала колебание верхней боковой полосы:

$$s_{\text{вбп}}(t) = \frac{m_{\text{АМ}} U_{\text{н}}}{2} \cos[2\pi f_{\text{н}} t + \varphi(t)]$$

Радиосигнал такого вида в общем случае называется **радиосигналом с однополосной модуляцией** или **однополосным радиосигналом** $s_{\text{ОМ}}(t)$.

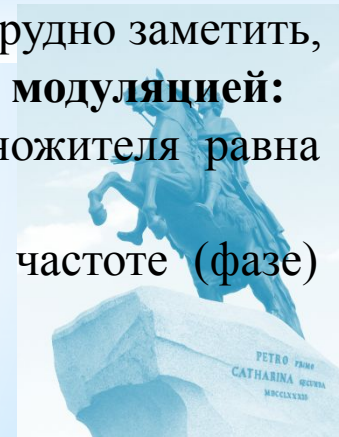
Так как
$$m_{\text{АМ}} = \frac{k_1 U(t)}{U_{\text{н}}},$$

то аналитическое представление радиосигнала с однополосной модуляцией (ОМ) примет вид:

$$s_{\text{вбп}}(t) = kU(t) \cos[2\pi f_{\text{н}} t + \varphi(t)].$$

Так как первичный электрический сигнал равен $a(t) = U(t)\cos\varphi(t)$, то нетрудно заметить, что **ОМ-сигнал – это радиосигнал с амплитудно-частотной (фазовой) модуляцией:**

- мгновенная амплитуда ОМ-сигнала с точностью до постоянного множителя равна мгновенной амплитуде модулирующего ПЭС;
- изменение частоты ОМ-сигнала относительно $f_{\text{н}}$ равно мгновенной частоте (фазе) модулирующего ПЭС.

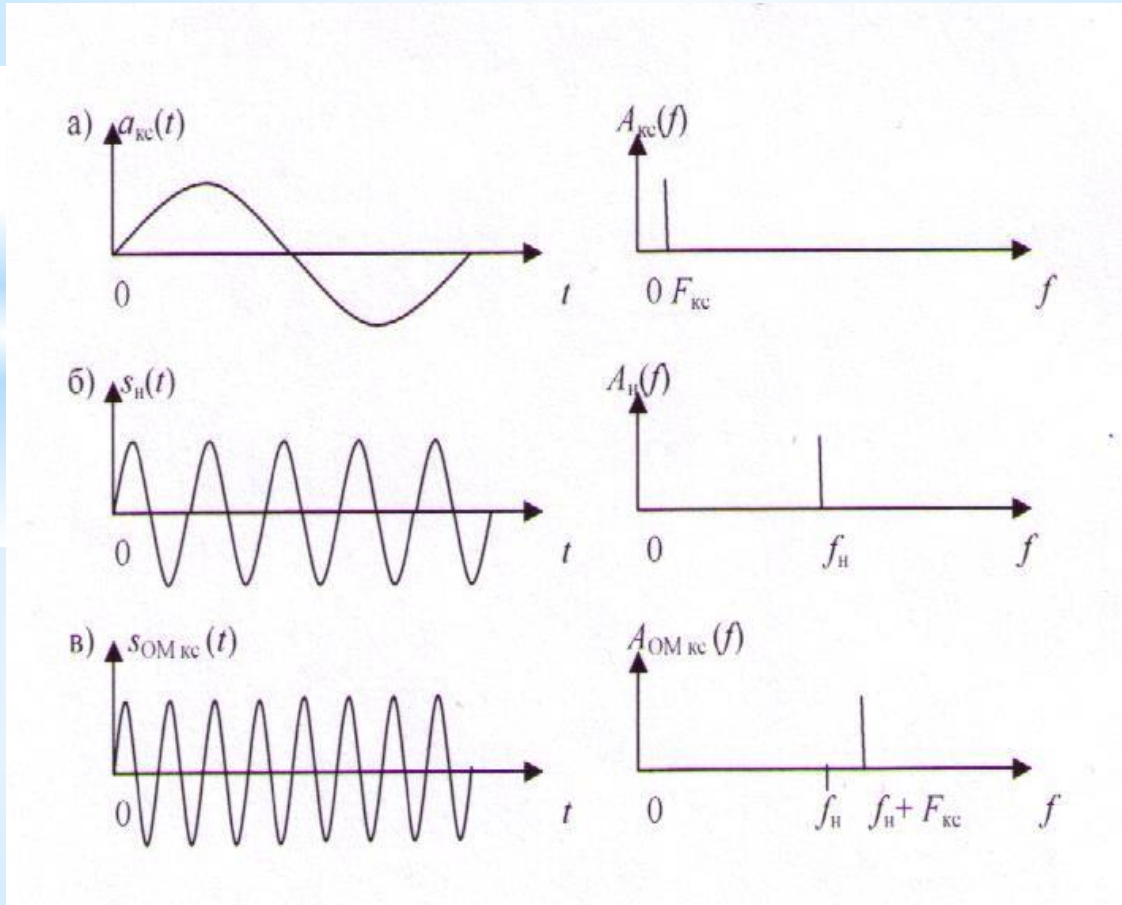




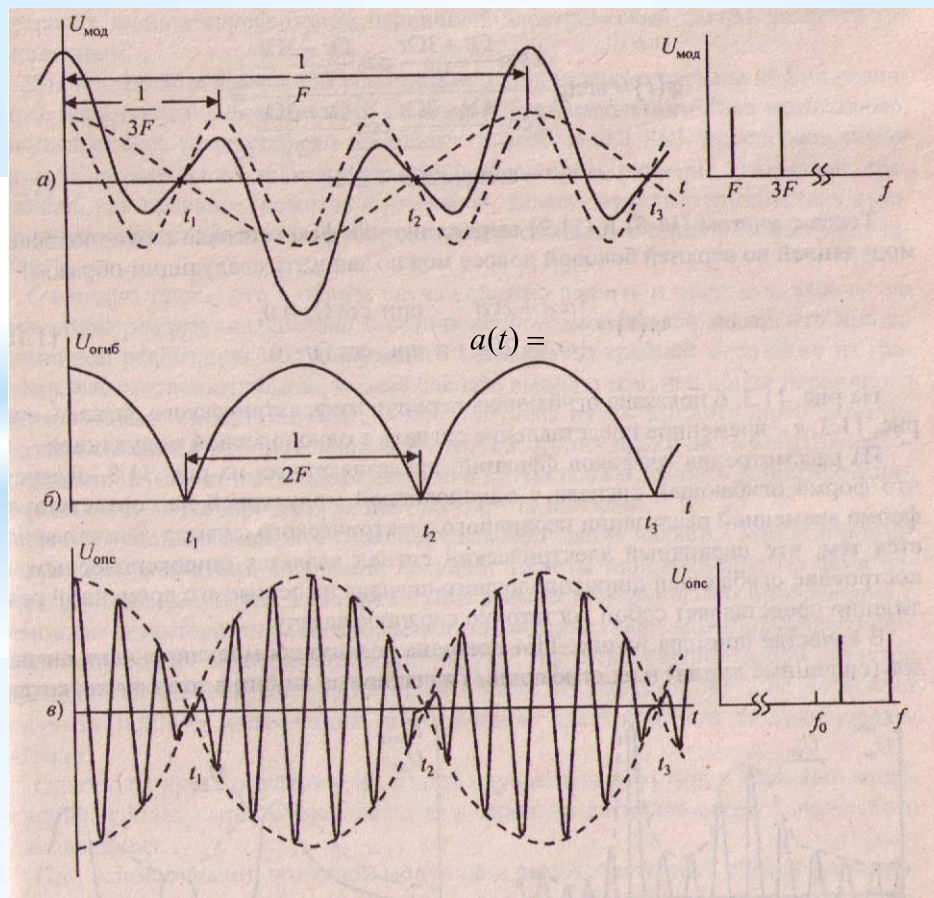
При модуляции несущего колебания контрольным ПЭС $a_{\text{КС}}(t) = U_{\text{КС}} \cos 2\pi F_{\text{КС}} t$ получим:

$$s_{\text{ВБП КС}}(t) = k U_{\text{КС}} \cos 2\pi (f_{\text{Н}} + F_{\text{КС}}) t.$$

На рисунке приведены временные и спектральные представления несущего колебания и контрольных ПЭС и ОМ-сигнала.



На рисунке приведены временные и спектральные представления двухтонового ПЭС и ОМ-сигнала, а также огибающая ОМ-сигнала.





При однополосной модуляции, в отличие от амплитудной модуляции, практически вся мощность несущего сигнала используется для передачи полезного сообщения.

Средняя мощность телефонного ОМ-сигнала определяется выражением

$$P_{\text{ОМ ср тт}} = \frac{P_{\text{н}}}{\pi^2_{\text{тф}}}$$

Так как ОМ-сигнал является сигналом с амплитудно-частотной модуляцией, **то возможно увеличение средней мощности ОМ-сигнала** путем ограничения его амплитуды.

Амплитудное ограничение ОМ-сигнала называется клиппированием, и оно позволяет уменьшить пикфактор ОМ-сигнала до значения $\pi_{\text{ОМ клип}} = 1,41$. Тогда средняя мощность клиппированного ОМ-сигнала **возрастет почти в 5 раз**.

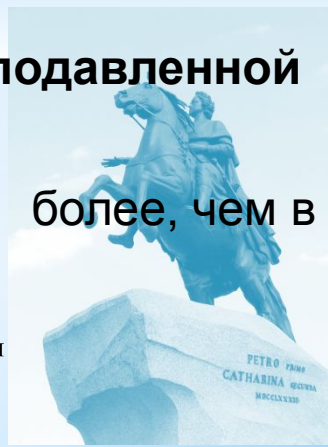
Таким образом, **средняя мощность ОМ-сигнала, с учетом применения клиппирования**, может превышать среднюю мощность АМ-сигнала в 20 и более раз.

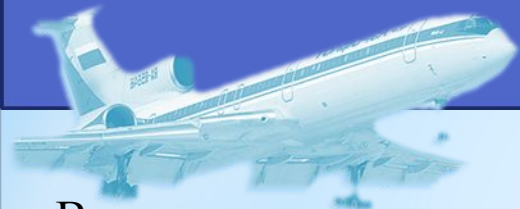
Рассмотренный ОМ-сигнал является **однополосным сигналом с подавленной несущей**, т.к. составляющая его спектра на несущей частоте равна 0.

Ширина спектра частот этого ОМ-сигнала 2 раза уже спектра АМ-сигнала.

$$\Delta f_{\text{ОМ под}} = \Delta F_{\text{ПЭС}} = F_{\text{в}} - F_{\text{н}}$$

более, чем в





В некоторых случаях необходимо, чтобы часть несущего колебания уровнем 10% или 60% присутствовала в спектре ОМ-сигнала. Такие ОМ-сигналы называют **однополосным сигналом с ослабленной несущей**.

Если остаток несущей **равен 10%**, то такой сигнал называют **однополосным сигналом с пилот-сигналом**.

ОМ-сигналы с пилот-сигналом используют для передачи информации на быстро перемещающиеся объекты (например, на воздушные суда).

Если остаток несущей **равен 60%**, то такой сигнал называют **однополосным сигналом с полной несущей**.

ОМ-сигналы с полной несущей могут приниматься радиоприемниками АМ-сигналов.

ОМ-сигналы с ослабленной несущей имеют энергетические характеристики хуже, чем у ОМ-сигнала с подавленной несущей, т.к. часть энергии передатчика тратится на излучение составляющей спектра на несущей частоте. **Кроме того, ОМ-сигналы с ослабленной несущей** занимают более широкую полосу частот:

$$\Delta f_{\text{ОМ осл}} = F_{\text{в}}$$



Радиосигналы с частотной модуляцией

Частотная модуляция (ЧМ) – это процесс изменения частоты несущего гармонического колебания $s_H(t) = U_H \cos 2\pi f_H t$ по закону модулирующего сигнала $a(t) = U(t) \cos \varphi(t)$.

При ЧМ мгновенная частота модулированного колебания $f(t)$ может быть представлена в виде

$$f(t) = f_H + k_1 a(t) = f_H + k_1 U(t) \cos \varphi(t),$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности.

Мгновенная частота $f(t)$ и мгновенная фаза ЧМ-радиосигнала связаны соотношением:

$$\Phi(t) = 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau$$

Тогда радиосигнал ЧМ можно представить в виде

$$s_{\text{ЧМ}}(t) = U_H \cos 2\pi f(t)t = U_H \cos \Phi(t) = U_H \cos \left(2\pi f_H t + 2\pi k_1 \int_0^t U(\tau) \cos \varphi(\tau) d\tau \right).$$

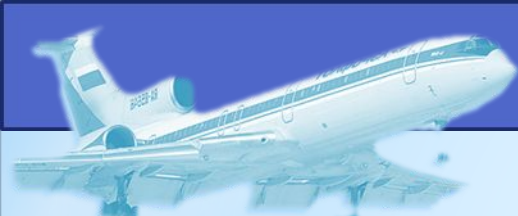
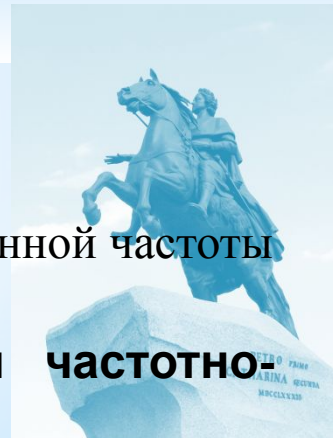
Пусть модулирующий сигнал – контрольный сигнал $a_{\text{КС}}(t) = U_{\text{КС}} \cos 2\pi F_{\text{КС}} t$.

В этом случае мгновенная частота равна

$$f(t) = f_H + k_1 a_{\text{КС}}(t) = f_H + k_1 U_{\text{КС}} \cos 2\pi F_{\text{КС}} t,$$

где $k_1 U_{\text{КС}} = \Delta f_{\text{Д}}$ – **девиация частоты**, т.е. максимальное отклонение мгновенной частоты от ее центрального значения f_H .

Девиация частоты $\Delta f_{\text{Д}}$ является фактором модуляции для частотно-модулированного сигнала



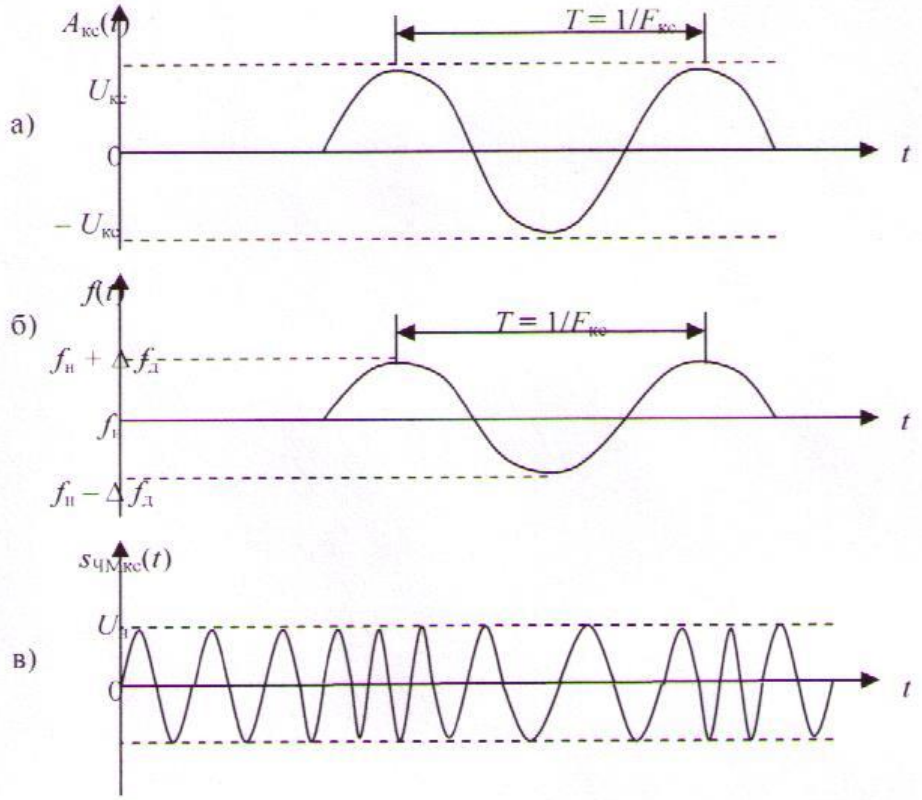


Тогда аналитическое представление контрольного ЧМ-радиосигнала имеет вид

$$s_{\text{ЧМ КС}}(t) = U_{\text{н}} \cos\left(2\pi f_{\text{н}} t + 2\pi k_1 U_{\text{КС}} \int_0^t \cos 2\pi F_{\text{КС}} \tau d\tau\right) = U_{\text{н}} \cos\left(2\pi f_{\text{н}} t + \frac{\Delta f_{\text{д}}}{F_{\text{КС}}} \sin 2\pi F_{\text{КС}} t\right),$$

где $m_f = \frac{\Delta f_{\text{д}}}{F_{\text{КС}}}$ индекс частотной модуляции при модуляции контрольным сигналом.

На рисунке приведены временные представления первичного контрольного сигнала (а), мгновенной частоты ЧМ-сигнала (б) и ЧМ-сигнала (в)





Определим спектры ЧМ-сигналов для случаев $m_f \ll 1$ и $m_f \gg 1$ при модуляции несущего колебания контрольным сигналом

Пусть $m_f \ll 1$, тогда

$$s_{\text{ЧМ КС}}(t) = U_H \cos(2\pi f_H t + m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t) = U_H [\cos 2\pi f_H t \cos(m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t) - \sin 2\pi f_H t \sin(m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t)],$$

но $\cos(m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t) \approx 1$; $\sin(m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t) \approx m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t$, тогда

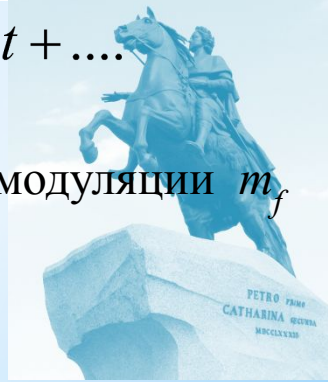
$$\begin{aligned} s_{\text{ЧМ КС}}(t) &= U_H \cos 2\pi f_H t - U_H m_f \sin 2\pi f_H t \sin 2\pi F_{\text{КС}} t = \\ &= U_H \cos 2\pi f_H t + \frac{m_f U_H}{2} \cos 2\pi (f_H + F_{\text{КС}}) t - \frac{m_f U_H}{2} \cos 2\pi (f_H - F_{\text{КС}}) t. \end{aligned}$$

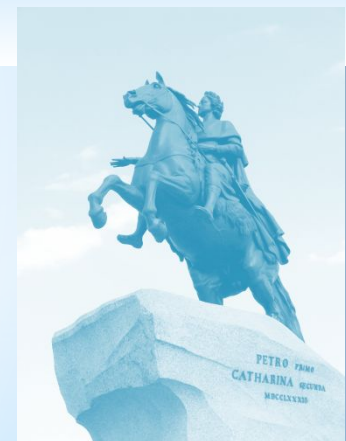
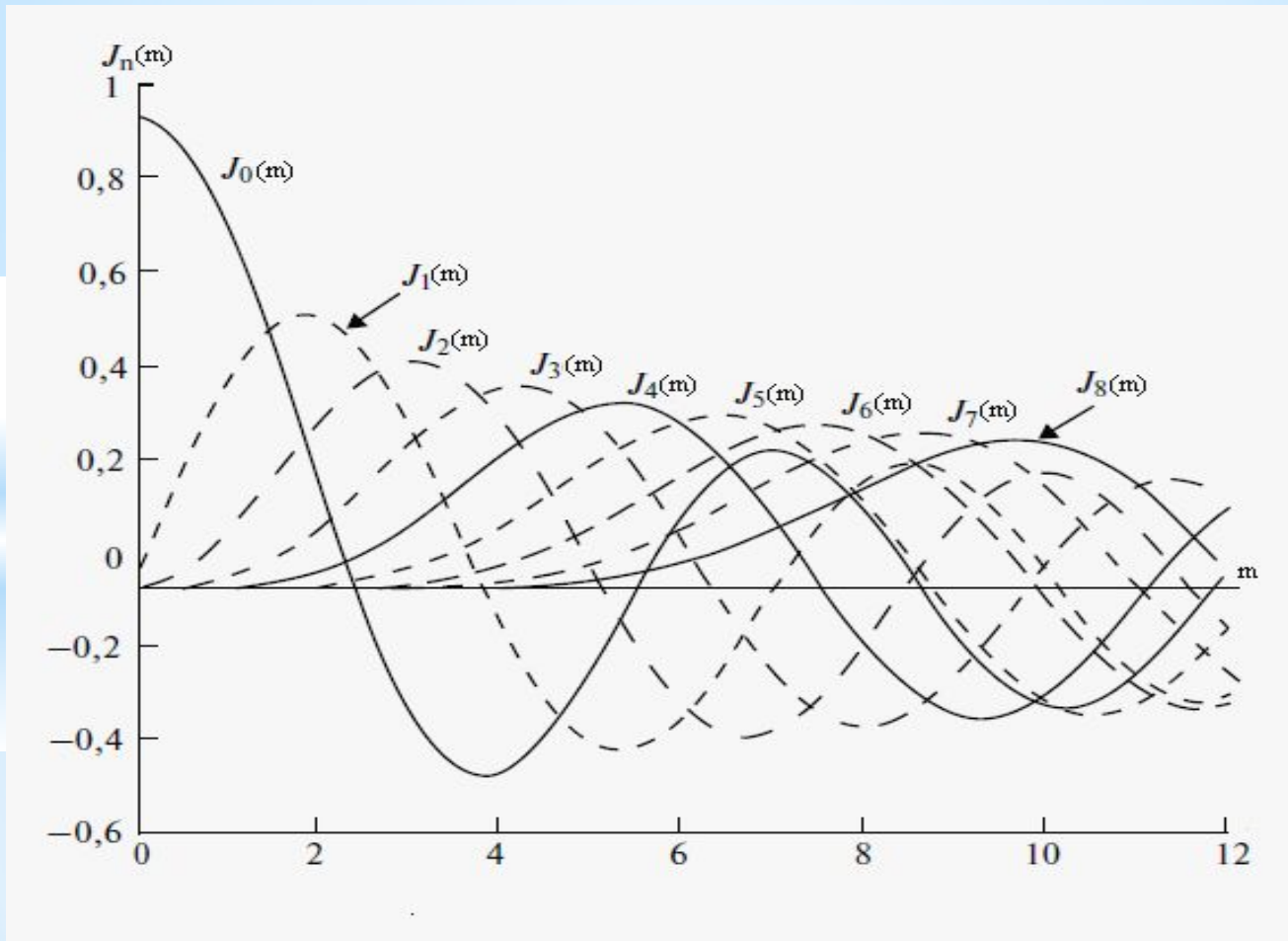
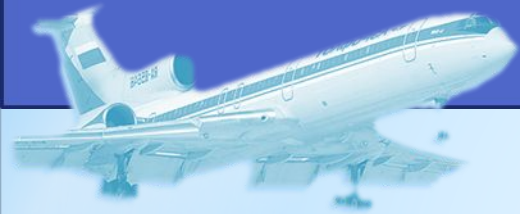
Пусть $m_f \gg 1$, тогда

$$\cos(m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t) = J_0(m_f) + 2J_2(m_f) \cos 2\pi 2F_{\text{КС}} t + 2J_4(m_f) \cos 2\pi 4F_{\text{КС}} t + \dots;$$

$$\sin(m_f \sin 2\pi F_{\text{КС}} t) = 2J_1(m_f) \cos 2\pi F_{\text{КС}} t + 2J_3(m_f) \cos 2\pi 3F_{\text{КС}} t + \dots$$

Зависимость функций Бесселя первого рода k -го порядка от индекса модуляции m_f показана на рисунке.



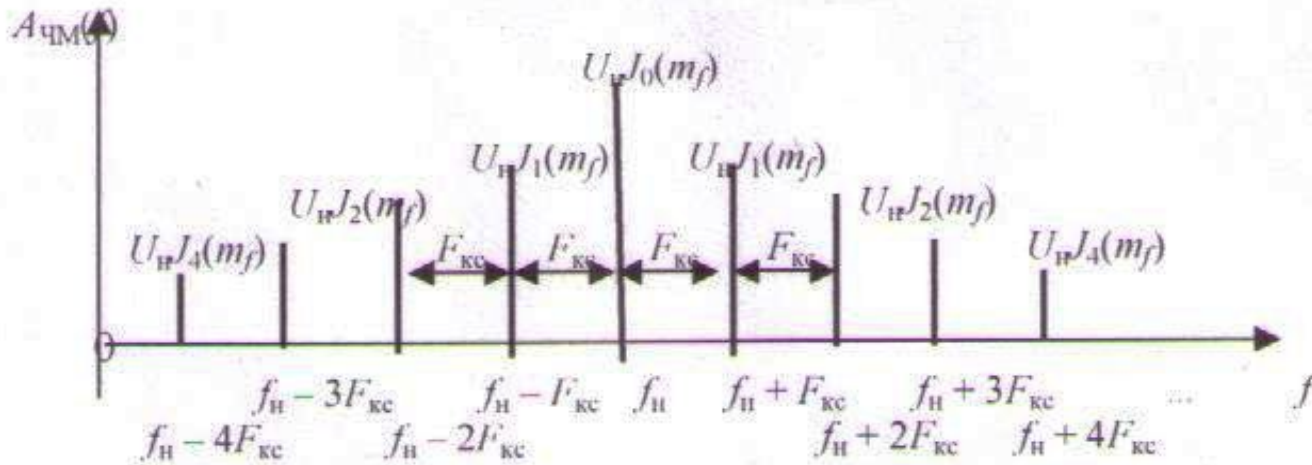




В этом случае ЧМ-радиосигнал имеет в вид

$$s_{\text{ЧМкС}} = U_{\text{H}} \{ J_0(m_f) \cos 2\pi f_{\text{H}} t + J_1(m_f) [\cos 2\pi (f_{\text{H}} + F_{\text{кС}}) t - \cos 2\pi (f_{\text{H}} - F_{\text{кС}}) t] + \\ + J_2(m_f) [\cos 2\pi (f_{\text{H}} + 2F_{\text{кС}}) t + \cos 2\pi (f_{\text{H}} - 2F_{\text{кС}}) t] + \dots \}$$

На рисунке представлен спектр амплитуд сигнала с частотной модуляцией



Ширина спектра частот сигнала ЧМ теоретически бесконечна, но реально имеет смысл учитывать лишь ту полосу частот, в пределах которой составляющие спектра имеют заметный уровень. **На практике наиболее часто используют формулу Манаева**, которая учитывает составляющие спектра, уровень которых не менее 1% от уровня несущего колебания U_H :

$$\Delta f_{\text{ЧМ}} = 2F_B (1 + m_f + \sqrt{m_f}), \text{ при } m_f > 1,5.$$

Если $m_f \gg 1$, то

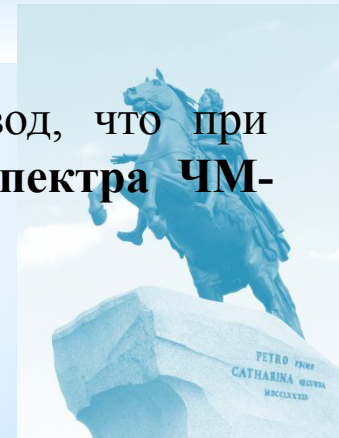
$$\Delta f_{\text{ЧМ}} \approx 2F_B m_f = 2\Delta f_d.$$

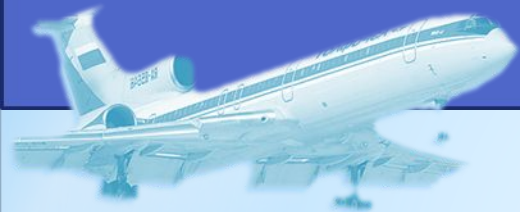
При $m_f \gg 1$ ширина спектра ЧМ-сигнала не зависит от модулирующей частоты, что и определяет широкое применение ЧМ в технике передачи информации. С ростом F_B увеличивается расстояние между составляющими спектра и уменьшается их число, т.к. $\Delta f_{\text{ЧМ}}$ не зависит от F_B .

Если $m_f \ll 1$, то

$$\Delta f_{\text{ЧМ}} \approx 2F_B.$$

Сравнивая, характеристики ЧМ- и ОМ-сигналов можно сделать вывод, что при равенстве их средних мощностей **спектр ОМ-сигнала много уже спектра ЧМ-сигнала.**





Радиосигналы с фазовой модуляцией

Фазовая модуляция (ФМ) – это процесс изменения фазы несущего гармонического колебания по закону модулирующего сигнала.

Пусть несущее гармоническое колебание $s_H(t) = U_H \cos 2\pi f_H t$ модулируется контрольным ПЭС, изменяющимся по закону $a_{KC}(t) = U_{KC} \cos 2\pi F_{KC} t$.

Тогда изменение фазы ФМ-сигнала описывается выражением

$$\Phi(t) = 2\pi f_H t + k a_{KC}(t) = 2\pi f_H t + k U_{KC} \cos 2\pi F_{KC} t,$$

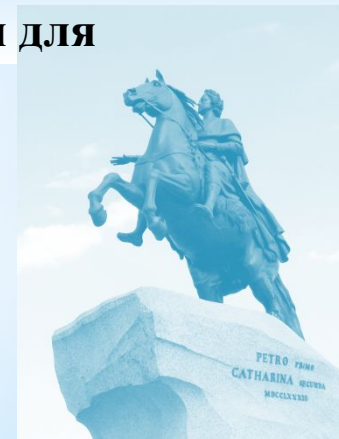
где k – коэффициент пропорциональности;

$k U_{KC} = m_\varphi$ – индекс фазовой модуляции.

В этом случае контрольный фазомодулированный сигнал можно представить в виде

$$s_{\text{ФМкк}} = U_H \cos(2\pi f_H t + m_\varphi \cos 2\pi F_{KC} t).$$

Индекс фазовой модуляции m_φ определяет максимальное отклонение мгновенной фазы от ее центрального значения $2\pi f_H t$ и **является фактором модуляции для фазомодулированного сигнала.**





Ширина спектра частот сигнала ФМ теоретически бесконечна, а практически определяется по формуле

$$\Delta f_{\text{ФМ}} = 2F_{\text{в}}(1 + m_{\varphi} + \sqrt{m_{\varphi}}), \text{ при } m_{\varphi} > 1,5.$$

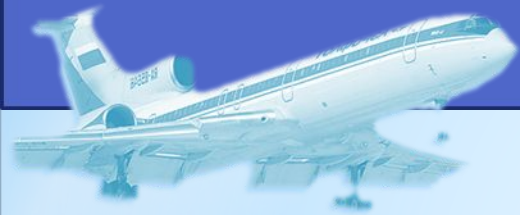
Если $m_{\varphi} \gg 1$, то $\Delta f_{\text{ФМ}} = 2F_{\text{в}} m_{\varphi}$.

При $m_{\varphi} \gg 1$ ширина спектра ФМ-сигнала зависит от модулирующей частоты: с ростом $F_{\text{в}}$ спектр ФМ-сигнала расширяется, т.к. m_{φ} не зависит от модулирующей частоты.

Если $m_{\varphi} \ll 1$, то $\Delta f_{\text{ФМ}} = 2F_{\text{в}}$.

Энергетические характеристики ФМ-сигнала такие же, как у ЧМ-сигнала.





Выводы

1. Основными характеристиками непрерывных ПЭС, позволяющих определить их временные и спектральные характеристики, являются ширина полосы занимаемых частот $\Delta F_{\text{непр}}$, средние $U_{\text{ср непр}}$ и максимальные (пиковые) $U_{\text{макс непр}}$, уровни сигнала и пикфактор $\pi_{\text{непр}}$. В некоторых случаях необходимо знание динамического диапазона $D_{\text{непр}}$.
2. Основными характеристиками непрерывных модулированных радиосигналов являются несущая частота $f_{\text{н}}$, вид модуляции (класс радиоизлучения), ширина спектра частот радиосигнала $\Delta f_{\text{рс}}$, максимальный, средний и минимальный уровни радиосигнала $U_{\text{макс}}$, $U_{\text{ср}}$ и $U_{\text{мин}}$, пикфактор радиосигнала $\pi_{\text{рс}}$, динамический диапазон $D_{\text{рс}}$ и фактор модуляции.
3. Из анализа характеристик рассмотренных непрерывных радиосигналов с амплитудной, однополосной, частотной и фазовой модуляцией следует:
 - при равных уровнях несущего сигнала средняя мощность радиосигналов ОМ, ЧМ и ФМ в 5 раз больше средней мощности радиосигнала АМ;
 - ширина спектра радиосигнала ОМ не менее чем в 2 раза уже ширины спектра радиосигнала АМ и значительно уже, чем спектр сигналов ЧМ и ФМ.

