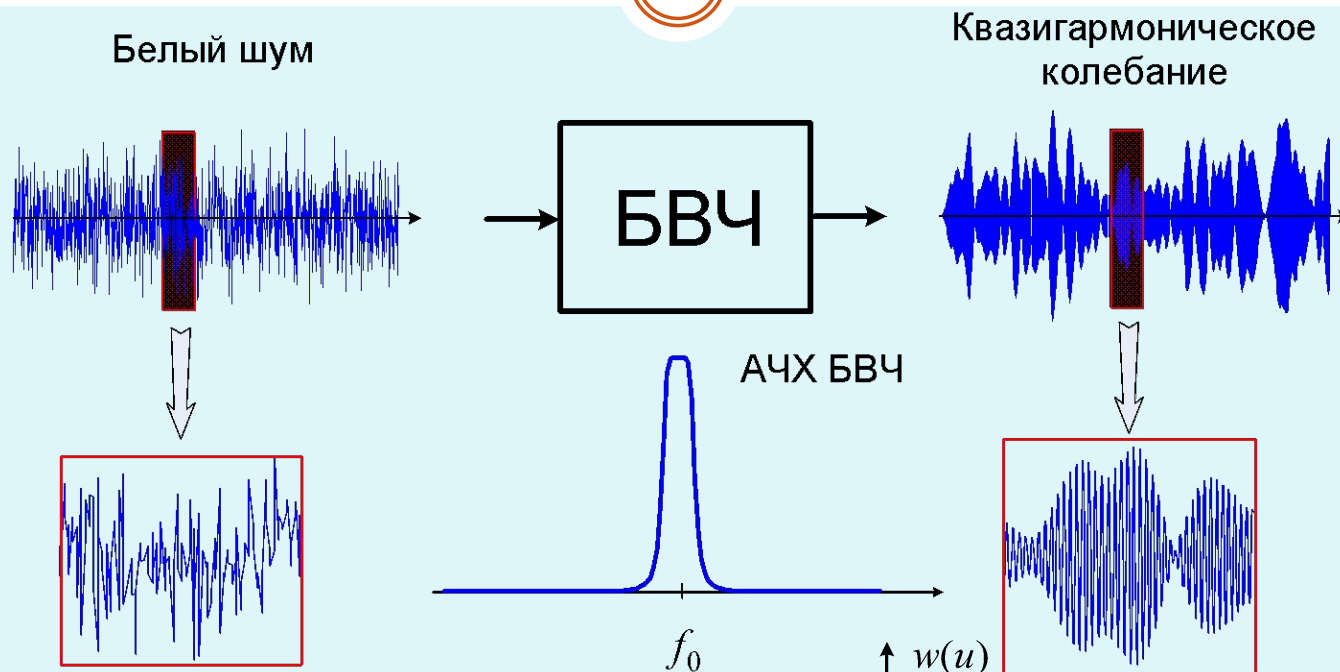
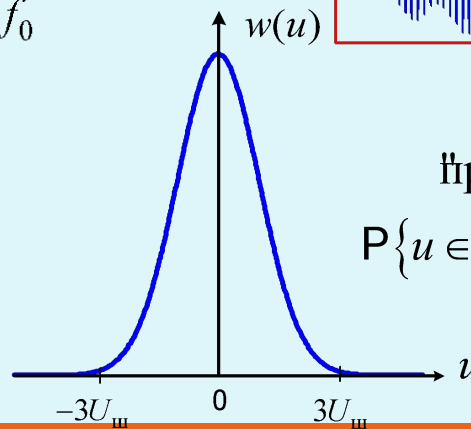


10.1. Статистические характеристики шума на выходе БВЧ



Плотность вероятности напряжения шума
нормальное распределение)

$$w(u) = \frac{1}{U_{\text{ш}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2U_{\text{ш}}^2}}$$



Правило 3-х σ "

$$P\{u \in [-3U_{\text{ш}}, 3U_{\text{ш}}]\} = 0,997$$

Автокорреляционная функция шума



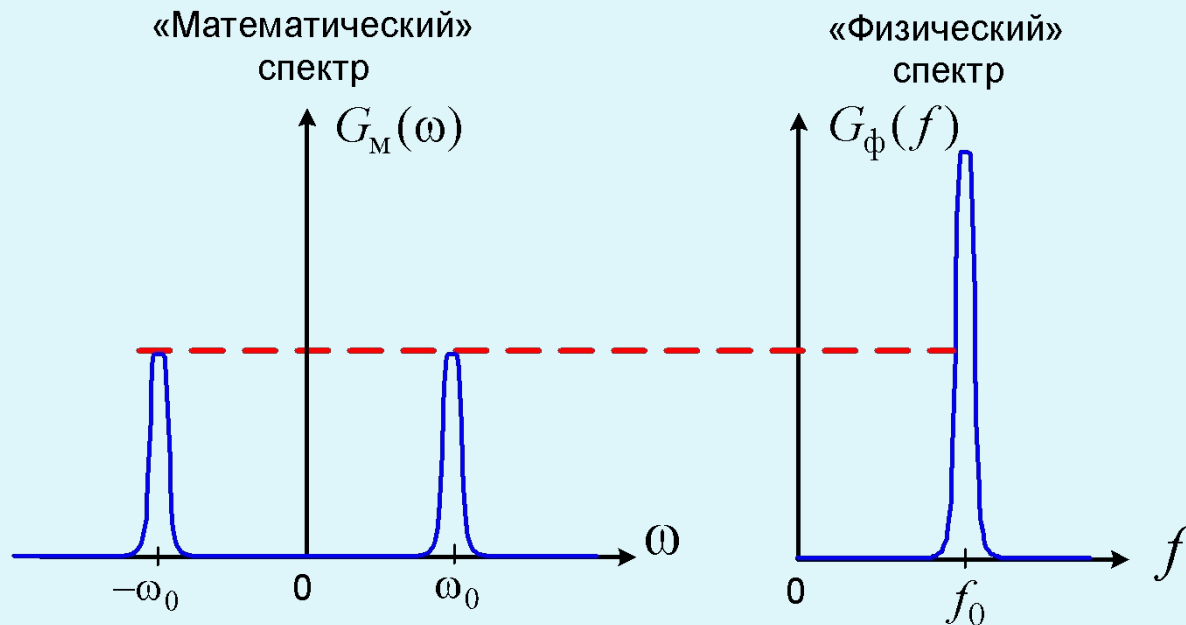
Теорема Винера-Хинчина

«Математический»
энергетический спектр

Автокорреляционная
функция (АКФ)

$$G_M(\omega) = F \{K(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{-j\omega\tau} d\omega$$

$$K(\tau) = F^{-1} \{G_M(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$



$$G_{\phi}(f) = 2G_M(2\pi f)$$

$$G_M(\omega) = \frac{1}{2} G_{\phi}\left(\frac{|\omega|}{2\pi}\right)$$

Автокорреляционная функция шума



$$K(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_M(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} G_M(\omega) \cos \omega\tau d\omega = \int_0^{\infty} G_\Phi(f) \cos(2\pi f\tau) df$$

Приближённое выражение при симметричной АЧХ БВЧ

АЧХ БВЧ: $K(f) = K_0 \kappa(f)$  Энергетический спектр: $G_\Phi(f) = G_0 K_0^2 \kappa^2(f)$

$$\begin{aligned} K(\tau) &= G_{\text{БВЧ}} K_0^2 \int_0^{\infty} \kappa^2(f) \cos(2\pi f\tau) df = G_0 K_0^2 \int_{-f_0}^{\infty} \kappa^2(F) \cos(2\pi f\tau + 2\pi F\tau) dF \approx \\ &\approx G_{\text{БВЧ}} K_0^2 \left\{ \left[\int_{-\infty}^{\infty} \kappa^2(F) \cos(2\pi F\tau) dF_0 \right] \cos(2\pi f_{\text{НЧ}}\tau) - \left[\int_{-\infty}^{\infty} \kappa^2(F) \sin(2\pi F\tau) dF_0 \right] \sin(2\pi f\tau) \right\} = \\ &= 2G_{\text{БВЧ}} K_0^2 \left[\int_0^{\infty} \kappa^2(F) \cos(2\pi F\tau) dF \right] \cos(2\pi f\tau) \end{aligned}$$

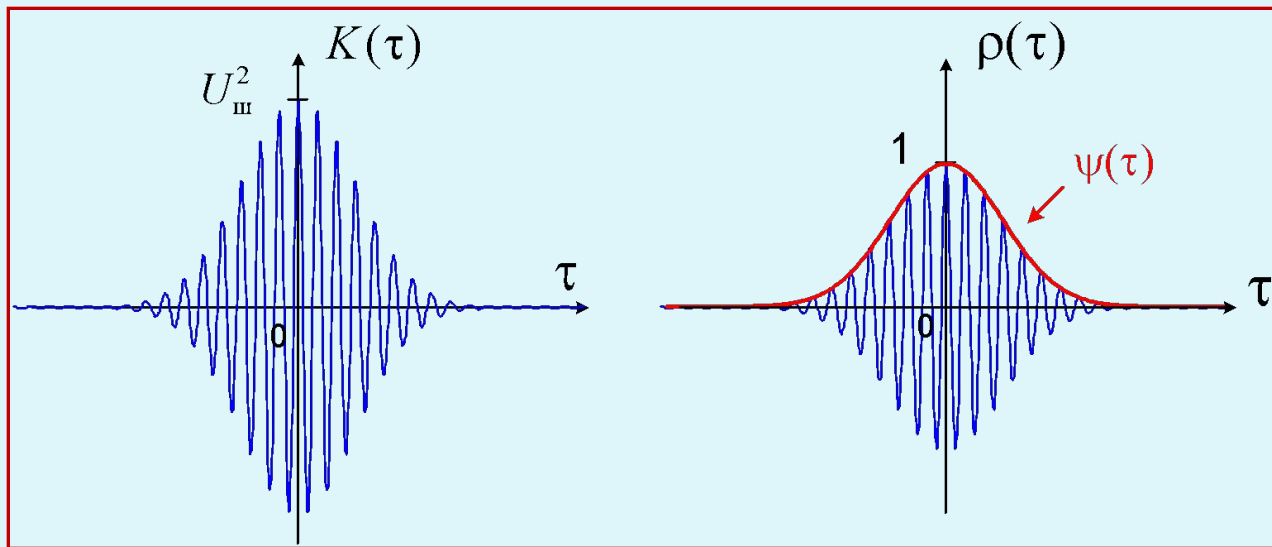
Автокорреляционная функция шума



$$K(\tau) = U_{\text{ш}}^2 \psi(\tau) \cos(2\pi f_0 \tau)$$

$U_{\text{ш}}^2 = K(0)$ — среднеквадратическая мощность шума на выходе БВЧ

$$\psi(\tau) = \frac{2}{\Pi_{\text{ш}}} \int_0^{\infty} \Pi_{\text{ш}}^2(f) \cos(2\pi f \tau) df$$



10.2. Воздействие сигнала и шума на линейный АД



Статистические характеристики низкочастотных квадратурных составляющих шума

Шум - квазигармоническое колебание:

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) = U(t) \cos \varphi(t) \cdot \cos \omega_0 t - U(t) \sin \varphi(t) \cdot \sin \omega_0 t = U^c(t) \cdot \cos \omega t - U^s(t) \cdot \sin \omega t$$

Свойства квадратурных составляющих шума:

Нормальные случайные процессы с

нулевым математическим ожиданием:

$$\overline{U_{\text{ш}}^s(t)} = \overline{U_{\text{ш}}^c(t)} = 0$$

Дисперсия $\overline{[U_{\text{ш}}^s(t)]^2} = \overline{[U_{\text{ш}}^c(t)]^2} = U_{\text{ш}}^2$

АКФ $K_{U_{\text{ш}}^c}(\tau) = K_{U_{\text{ш}}^s}(\tau) = U_{\text{ш}}^2 \psi(\tau) \Rightarrow (K) \tau = K_{U_{\text{ш}}^c} \cos \omega_0 \tau = K_{U_{\text{ш}}^s} \cos \omega_0 \tau$

В) совпадающие моменты времени $\overline{U_{\text{ш}}^s(t) U_{\text{ш}}^s(t)} = 0$

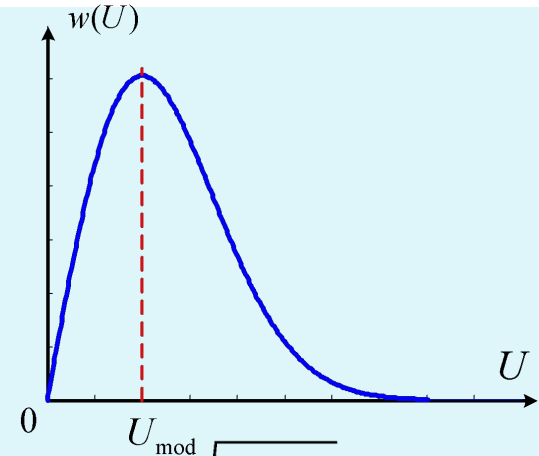
Обгибающая $(U) t = \sqrt{(\overline{U_{\text{ш}}^s(t)})^2 + (\overline{U_{\text{ш}}^c(t)})^2}$

Статистические характеристики огибающей шума на выходе БВЧ

Распределение Релея $w(U) = \frac{U}{U_{\text{ш}}^2} e^{-\frac{U^2}{2U_{\text{ш}}^2}}, \quad U \geq 0$

Мода: $U_{\text{mod}} = U$

Среднее значение: $\bar{U} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} U_{\text{ш}} \approx 1,25 U_{\text{ш}} > U_{\text{mod}}$



Дисперсия: $\sigma_U^2 = \frac{4-\pi}{2} U_{\text{ш}}^2 \approx 0,43 U_{\text{ш}}^2$ СКО: $\sigma_U = \sqrt{\frac{4-\pi}{2}} U_{\text{ш}} \approx 0,66 U_{\text{ш}}$

АКФ: $K_U(\tau) = \overline{[U(t) - \bar{U}(t)][U(t+\tau) - \bar{U}(t+\tau)]} = \sigma_U^2 \rho_U(\tau)$

Нормированная огибающая АКФ:

$$\rho_U(\tau) = \frac{\pi}{4-\pi} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 \psi^2(\tau) + \left(\frac{1}{2 \cdot 4} \right)^2 \psi^4(\tau) + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} \right)^2 \psi^6(\tau) + \dots \right] \approx$$

$$\approx 0,915 \psi^2(\tau) + 0,057 \psi^4(\tau) + 0,014 \psi^6(\tau) + \dots \approx \psi^2(\tau)$$

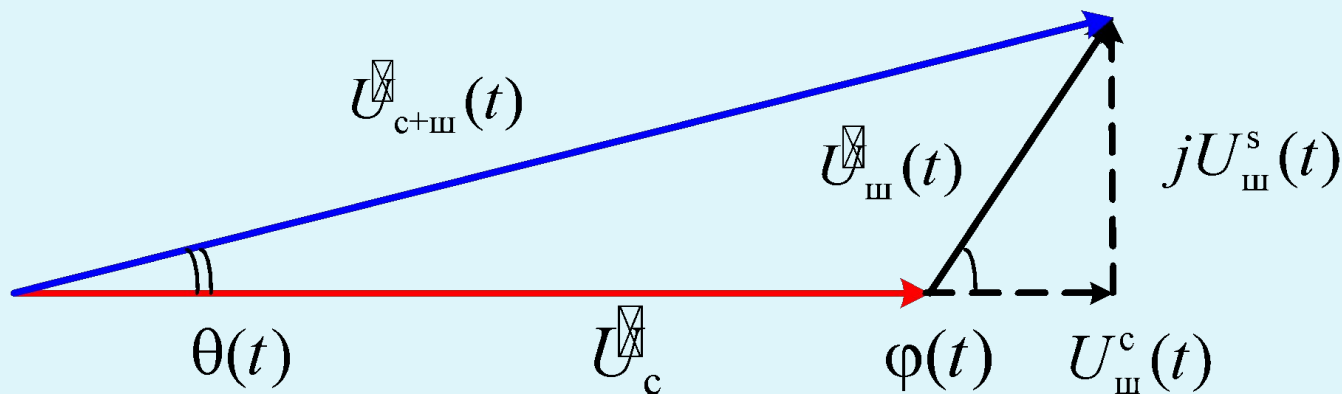
Статистические характеристики огибающей суммы сигнала и шума на выходе БВЧ



Сигнал $u_c(t) = U_c \cos \omega_0 t$, шум $u_{ш}(t) = U_{ш}^c(t) \cos \omega_0 t - U_{ш}^s(t) \sin \omega_0 t$

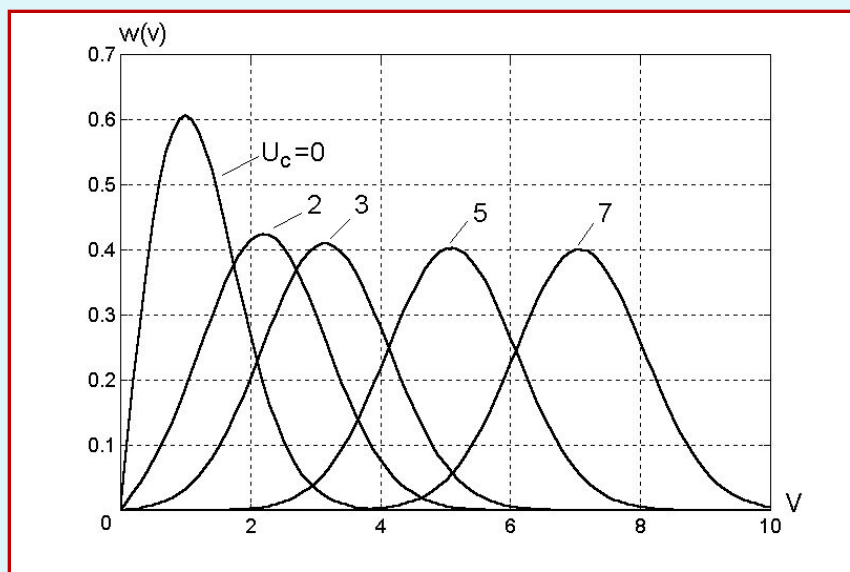
$$u_c(t) + u_{ш}(t) = [U_{ш}^c(t) + U_c] \cos \omega_0 t - U_{ш}^s(t) \sin \omega_0 t = V(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)]$$

Огибающая с+ш $V(t) = \sqrt{[U_c + U_{ш}^c(t)]^2 + U_{ш}^s(t)^2}$



Статистические характеристики огибающей суммы сигнала и шума на выходе БВЧ

Распределение Райса $w(V) = \frac{V}{U_{\text{ш}}^2} I_0 \left(\frac{V U_c}{U_{\text{ш}}^2} \right) e^{-\frac{V^2 + U_c^2}{2U_{\text{ш}}^2}}, \quad V \geq 0$



Сигнал отсутствует $U_c = 0 : I_0(0) = 1 \Rightarrow$

$$w(V) = \frac{V}{U_{\text{ш}}^2} e^{-\frac{V^2}{2U_{\text{ш}}^2}}$$

– распределение Релея

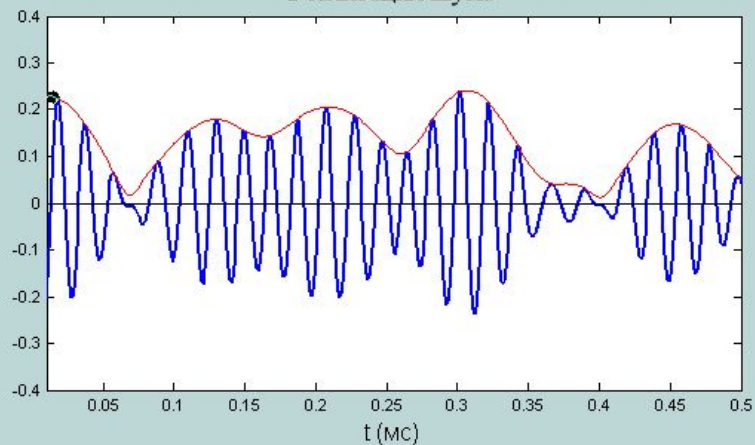
Отношение сигнал-шум $a = \frac{U_c}{U_{\text{ш}}} \gg 1 : I_0(x) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}} \Rightarrow$

$$w(V) \approx \frac{1}{U_{\text{ш}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(V-U_c)^2}{2U_{\text{ш}}^2}}$$

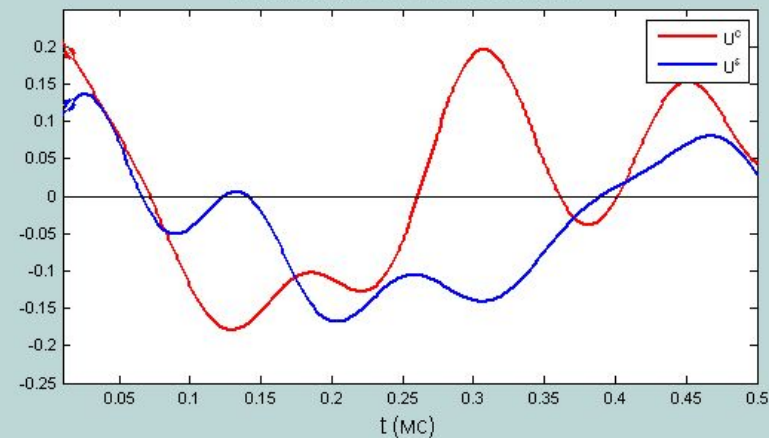
Нормальное распределение

Шум на выходе БВЧ ($U_c=0$)

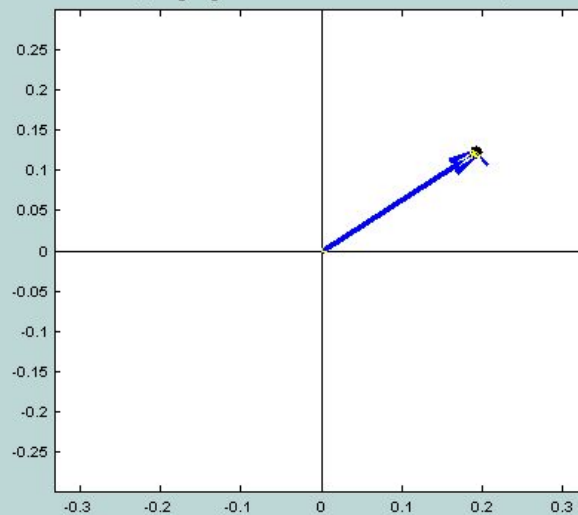
Реализация шума



Квадратурные составляющие

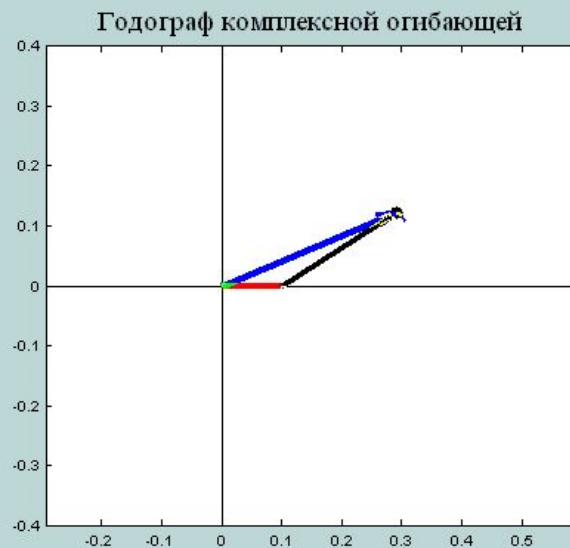
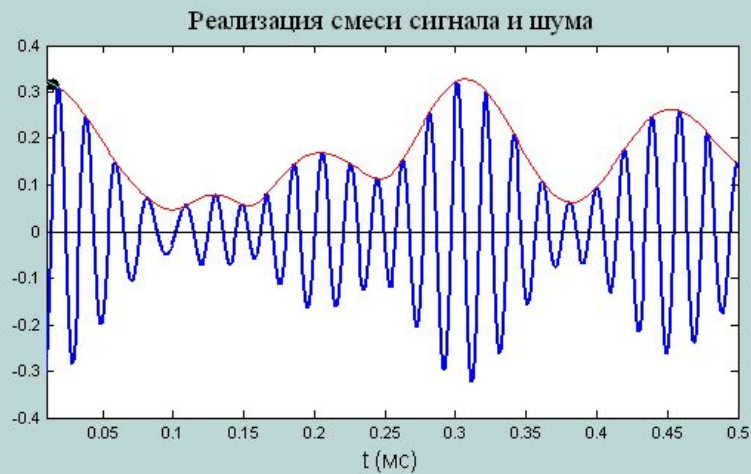


Годограф комплексной огибающей



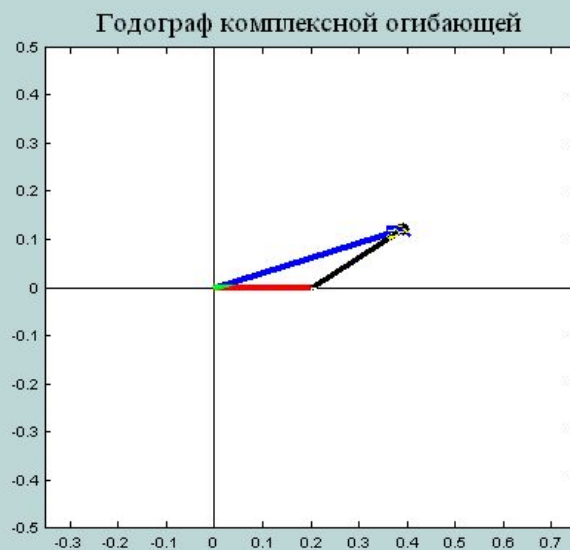
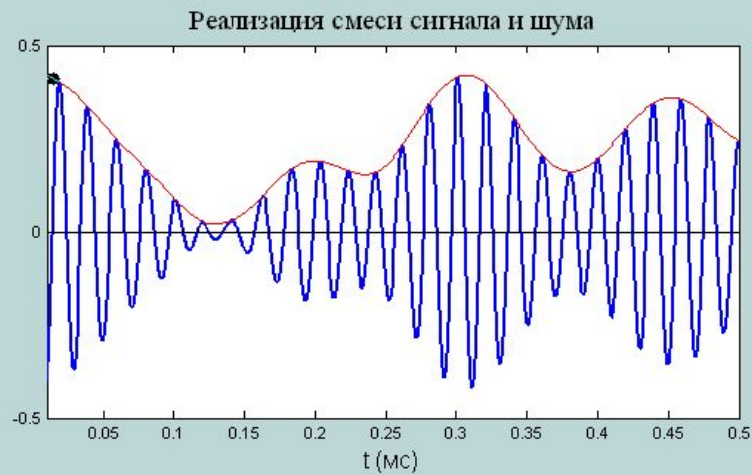
$$U_{ш} = 0,1$$

Сигнал + шум на выходе БВЧ ($U_c=0,1$)



$$U_{ш}=0,1$$

Сигнал + шум на выходе БВЧ ($U_c=0,2$)

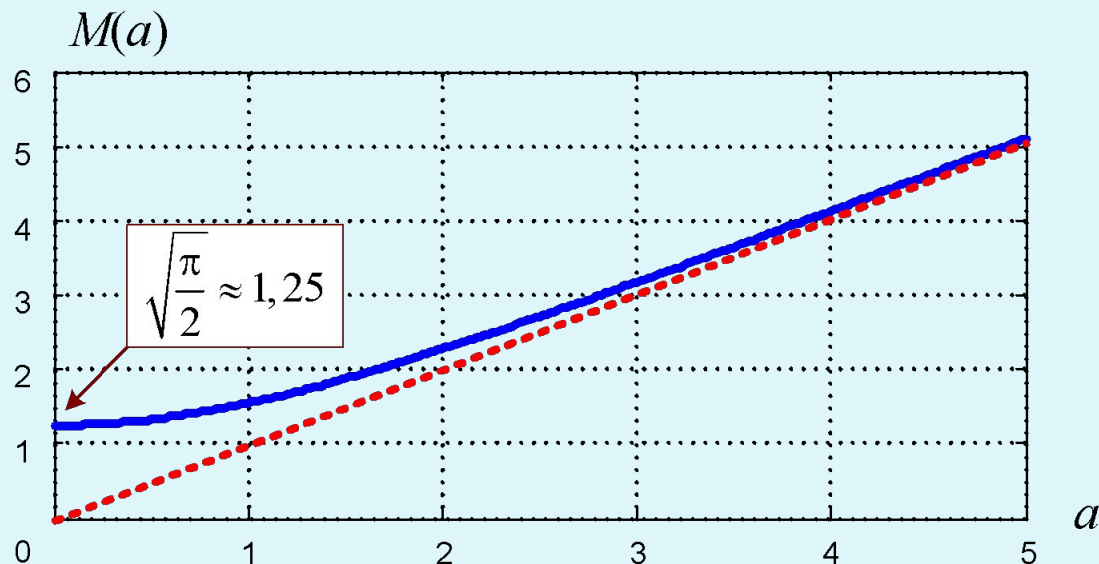


$$U_{ш}=0,1$$

Математическое ожидание (среднее значение) огибающей



$$\bar{M} = a \int_0^{\infty} V_{\text{Райса}}(V) M(V) dV = U_{\text{ш}} \quad (), \quad 1 \leq I = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[\left(1 + \frac{a^2}{2} \right) {}_0F_1\left(\frac{a^2}{4}\right) + \frac{a^2}{2} {}_1F_1\left(\frac{a^2}{4}\right) \right]$$



При $a = 0$: $M(a) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \approx 1,25$,

при $a \ll 1$: $M(a) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \frac{a^2}{4} \right)$,

при $a > 1$: $M(a) \approx \sqrt{a^2 + 1}$,

при $a \gg 1$: $M(a) \approx a$

Среднее значение напряжения на выходе АД:

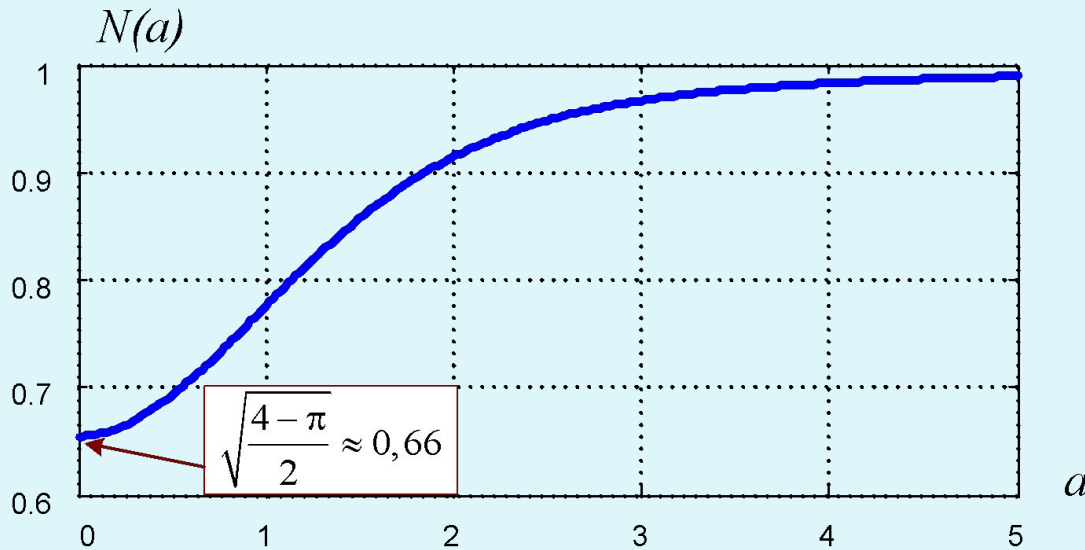
$$\bar{M}_d \neq K_d \bar{V} = K_d U_{\text{ш}} \quad ()$$

Среднеквадратичное отклонение (эффективное значение случайной составляющей)



$$\sigma_V = \sqrt{\int_0^\infty (U_{\text{ш}} e^{-V})^2 w_{\text{Райса}}(V) dV} = U_{\text{ш}} N(a),$$

$$N(a) = \sqrt{1 + a^2 - M^2 a}$$



При $a = 0$: $N(a) = \sqrt{\frac{4-\pi}{2}} \approx 0,66,$

при $a \gg 1$: $N(a) \approx 1$

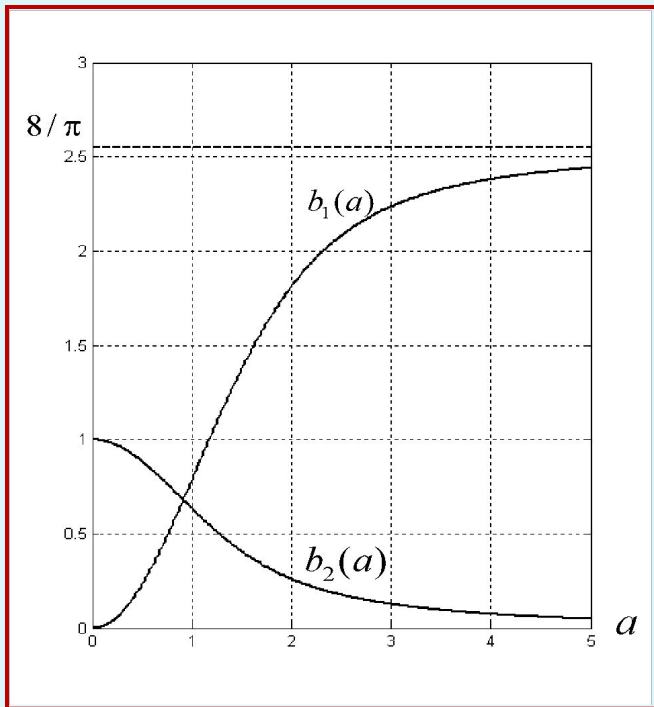
Эффективное напряжение шума на выходе АД: $\sigma_{U_{\text{д}}} = K_{\text{д}} \sigma_V = K_{\text{д}} U_{\text{ш}} N(a)$

Автокорреляционная функция огибающей



$$K_V(\tau) \approx \frac{4-\pi}{2} U_{\text{ш}}^2 [b_1(a) \cdot \psi(\tau) + b_2(a) \cdot \psi^2(\tau)] = K_{V1}(\tau) + K_{V2}(\tau),$$

$$K_{V\text{ш}}(\tau_1) = \frac{4-\pi}{2} U^2 b(a) \cdot \psi(\tau), \quad K_{V\text{ш}}(\tau_2) = \frac{4-\pi}{2} U^2 b(a) \cdot \psi^2(\tau),$$



$$\text{где } b_1(a) = \left\{ a e^{-\frac{a^2}{4}} \left[I_0\left(\frac{a^2}{4}\right) + I_1\left(\frac{a^2}{4}\right) \right] \right\}^2,$$

$$b_2(a) = \left[e^{-\frac{a^2}{4}} I_0\left(\frac{a^2}{4}\right) \right]^2 + \left[e^{-\frac{a^2}{4}} I_1\left(\frac{a^2}{4}\right) \right]^2$$

$$\text{При } a = 0: \quad b_1(a) = 0, \quad b_2(a) = 1,$$

$$\text{при } a \gg 1: \quad b_1(a) \approx \frac{8}{\pi} \approx 2,55, \quad b_2(a) \approx 0$$

Энергетический спектр огибающей



«Математический» спектр огибающей:

$$G_{V_M}(\omega) = F \{K_V(\tau)\} \approx F \{K_{V1}(\tau)\} + F \{K_{V2}(\tau)\} = G_{V1M}(\omega) + G_{V2M}(\omega)$$

$$G_{V_M}(\omega) = F \left\{ \frac{4-\pi}{2} b_1(a) \cdot \underbrace{U^2 \psi(\tau)}_{K_{U_{III}^c}(\tau)} \right\} = \frac{4-\pi}{2} b_1(a) F \{K_{U_{III}^c}(\tau)\} = \frac{4-\pi}{2} b_1(a) G_{U_{III}^c M}(\omega)$$

$$G_{V_M}(\omega) = F \left\{ \frac{4-\pi}{2} b_2(a) \cdot \underbrace{U^2 \psi^2(\tau)}_{\frac{1}{U^2} [K_{U_{III}^c}(\tau)]^2} \right\} = \frac{4-\pi}{2U_{III}^2} b_2(a) F \{K_{U_{III}^c}(\tau) \cdot K_{U_{III}^c}(\tau)\} =$$

$$= \frac{4-\pi}{2U_{III}^2} b_2(a) [G_{U_{III}^c M}(\omega) * G_{U_{III}^c M}(\omega)]$$

«Физический» спектр огибающей: $G_V(f) = 2G_{V_M}(2\pi f) = G_{V1}(f) + G_{V2}(f)$

Энергетический спектр в случае прямоугольной АЧХ БВЧ



$$G_{V_{\text{ш}}}(f) = b_1(a)(4 - \pi)G_0K_0^2, \quad f \in [0, \Pi_{\text{ш}}/2]$$

$$G_{V_{\text{ш}}}(f) = b_2(a)(4 - \pi)G_0K_0^2 \frac{\Pi_{\text{ш}} - f}{\Pi_{\text{ш}}}, \quad f \in [\Pi_{\text{ш}}/2, \Pi_{\text{ш}}]$$

G_0 – спектральная плотность белого шума на входе БВЧ

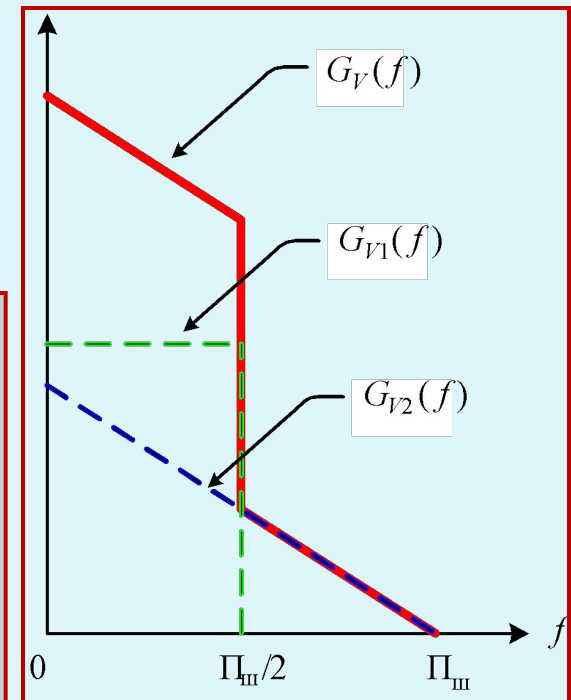
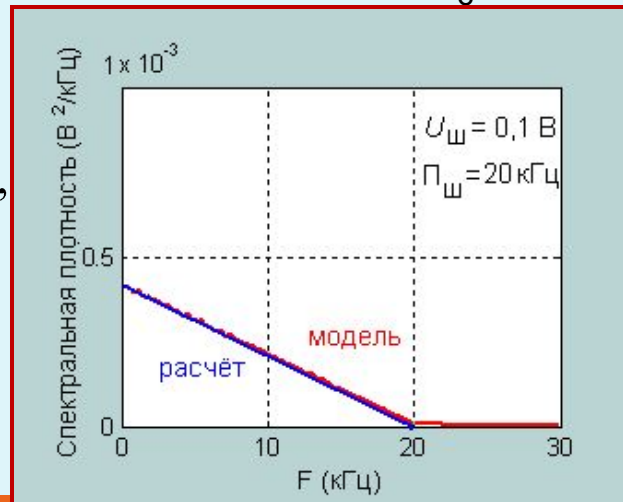
K_0 – коэффициент усиления БВЧ по напряжению

$\Pi_{\text{ш}}$ – шумовая полоса пропускания БВЧ

Энергетический спектр огибающей шума ($U_c=0$)

$$G_U(f) = (4 - \pi)G_0K_0^2 \frac{\Pi_{\text{ш}} - f}{\Pi_{\text{ш}}}, \quad f \in [0, \Pi_{\text{ш}}]$$

$$f \in [0, \Pi_{\text{ш}}]$$



Отношение сигнал-шум на выходе линейного АД



Сигнал на выходе АД – приращение постоянной составляющей $\overline{\Delta U_d}$ выходного напряжения, обусловленное модуляцией сигнала.

Шум – случайная составляющая выходного напряжения.

Детекторная характеристика при наличии шума – зависимость $\overline{\Delta U_d}(U_c)$

$$\overline{\Delta U_d} = K_d (\bar{V} - \bar{U}) =$$

$$= K_d \left(M(a) U_{\text{ш}} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} U_{\text{ш}} \right)$$

Условия расчёт отношения сигнал-шум на выходе АД:

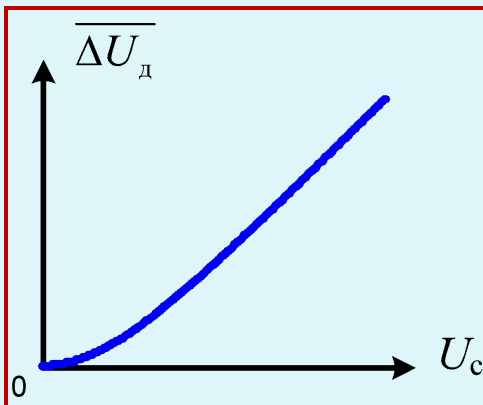
1) на входе АД: АМ сигнал с коэфф. модуляции m ;

2) отношение сигнал-шум на входе АД:

$$q_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{несущей}}}{P_{\text{шума.вх}}}$$

3) отношение сигнал-шум на выходе АД:

$$q_{\text{вых}} = \frac{P_{\text{ш-гарм.}}}{P_{\text{шума.вых}}}$$



$$a \ll 1: \quad q_{\text{вых}} \approx m^2 \frac{\pi}{2 \cdot (4 - \pi)} \cdot q_{\text{вх}}^2 \approx 1,8 m^2 \cdot q_{\text{вх}}^2$$

$$a \gg 1: \quad q_{\text{вых}} \approx m^2 q_{\text{вх}}$$

Вывод формул при 100%-й АМ ($m=1$)

$$a \ll 1$$

$$\overline{\Delta U_d} = K_d U_{\text{ш}} \left(M(a) - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \right) \approx$$

$$\approx K_d U_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{a^2}{4} = K_d U_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{4} \left(\frac{U_c}{U_{\text{ш}}} \right)^2 = \frac{K_d}{4 U_{\text{ш}}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} U_0^2 (1 + \cos \Omega_m t)^2$$

Амплитуда 1-й гармоники:

$$\overline{\Delta U_{d(1)}} \approx \frac{K_d U_0^2}{2 U_{\text{ш}}} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

СКО шума:

$$\sigma_{U_d} = K_d U_{\text{ш}} N(a) \approx$$

$$\approx K_d U_{\text{ш}} \sqrt{\frac{4 - \pi}{2}}$$

$$q_{\text{вых}} = \frac{P_{\text{1-гарм.}}}{P_{\text{шума.вых}}} = \frac{\overline{\Delta U_{d(1)}}^2}{2 \sigma_{U_d}^2}$$

$$U_c = U_0 (1 + \cos \Omega_m t)$$

$$\Rightarrow q_{\text{вых}} = \frac{\overline{\Delta U_{d(1)}}^2}{2 \sigma_{U_d}^2} \approx \frac{\left(\frac{K_d U_0^2}{2 U_{\text{ш}}} \right)^2 \frac{\pi}{2}}{2 \left(K_d U_{\text{ш}} \right)^2 \frac{4 - \pi}{2}} =$$

$$= \frac{\pi}{2(4 - \pi)} \left(\frac{U_0^2}{2 U_{\text{ш}}^2} \right)^2 \approx 1,8 q_{\text{вх}}^2$$

$$a \gg 1$$

$$\overline{\Delta U_d} \approx K_d U_{\text{ш}} \left(a - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \right) \approx$$

$$\approx K_d U_{\text{ш}} a = K_d U_c$$

Амплитуда 1-й гармоники:

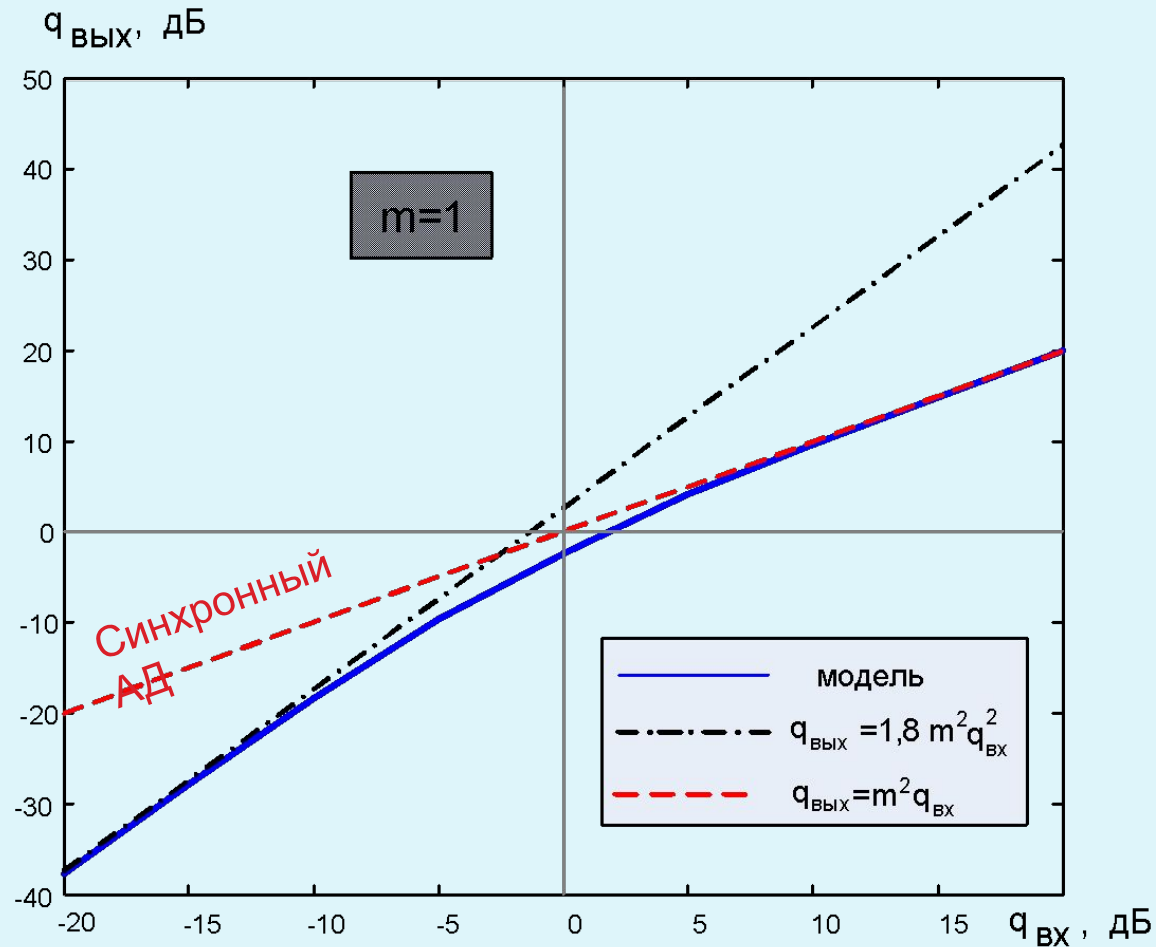
$$\overline{\Delta U_{d(1)}} \approx K_d U_0$$

СКО шума:

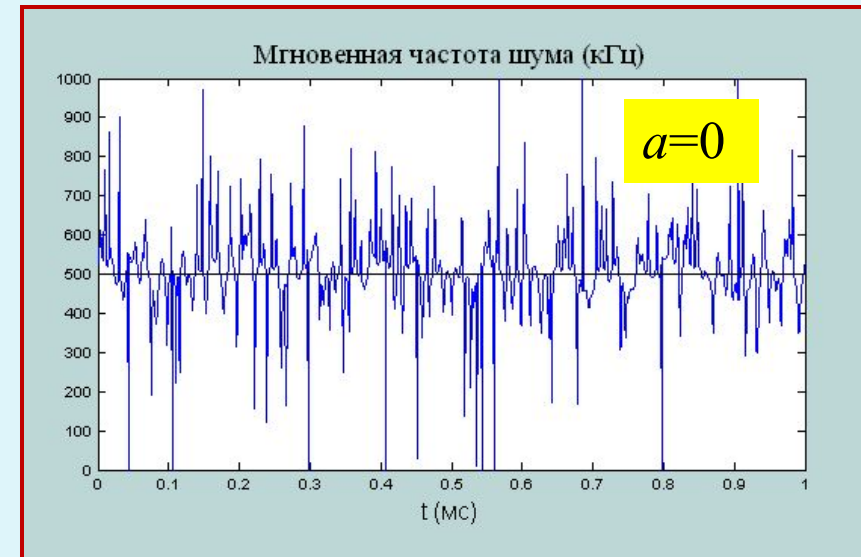
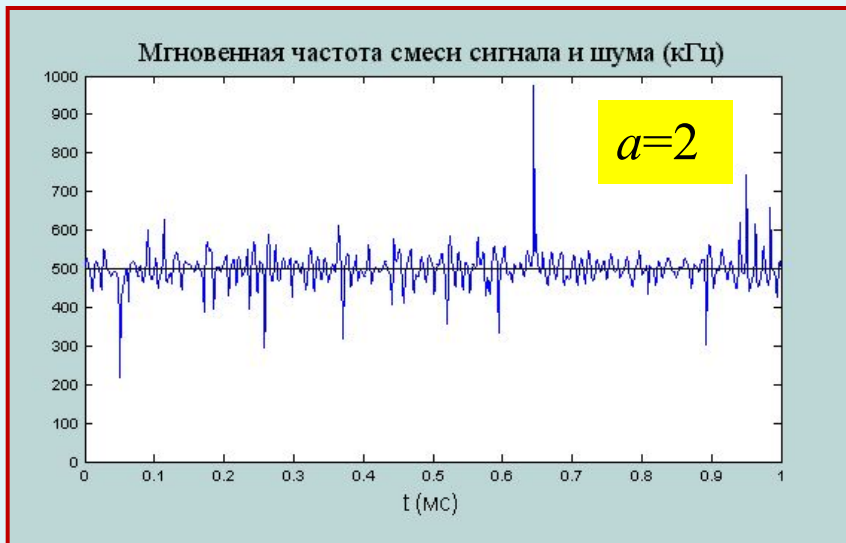
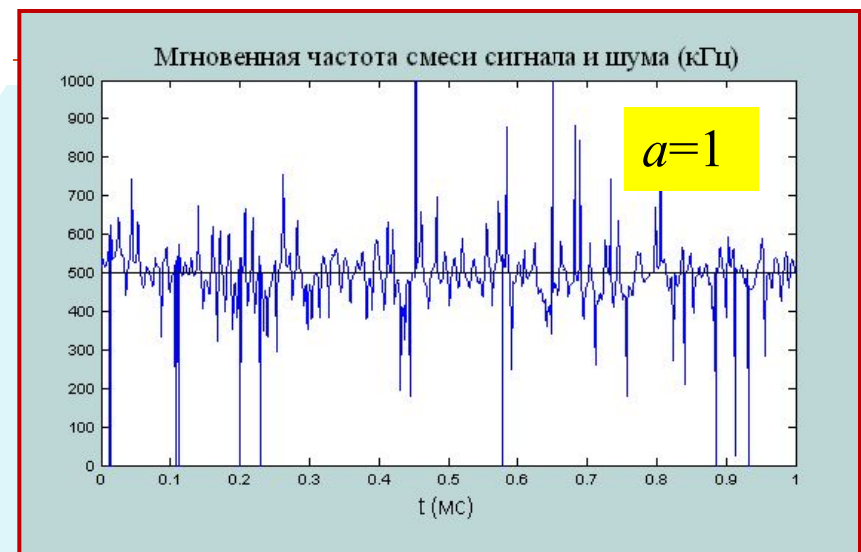
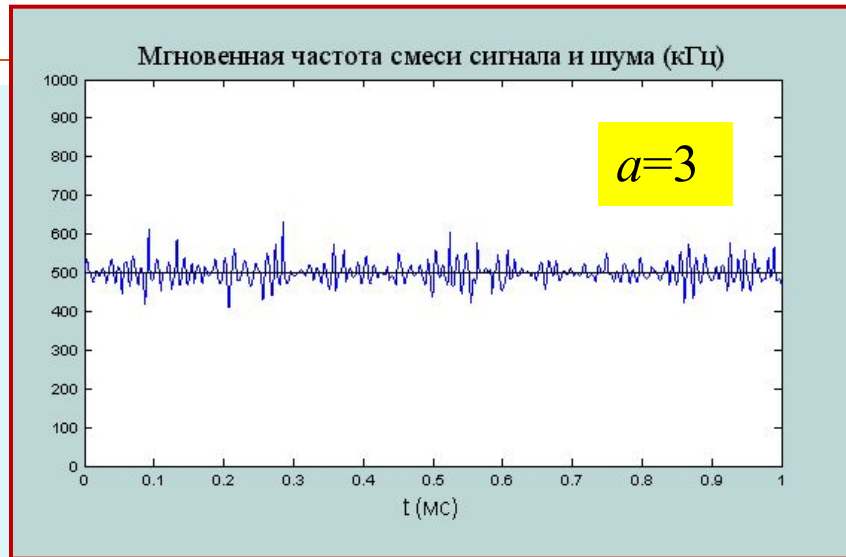
$$\sigma_{U_d} = K_d U_{\text{ш}} N(a) \approx K_d U_{\text{ш}}$$

$$\Rightarrow q_{\text{вых}} = \frac{\overline{\Delta U_{d(1)}}^2}{2 \sigma_{U_d}^2} \approx \frac{U_0^2}{2 U_{\text{ш}}^2} = q_{\text{вх}}$$

Зависимость $q_{\text{ВЫХ.ДБ}} (q_{\text{ВХ.ДБ}})$



10.3. Воздействие сигнала и шума на ЧД



Статистические характеристики мгновенной частоты смеси сигнала и шума



Сигнал + шум $u_c(t) + u_{ш}(t) = U_0 \cos \omega_0 t + U(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) = V(t) \cos(\omega_0 t + \theta(t))$

Мгновенная круговая частота:

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\theta(t)}{dt}$$

**Плотность вероятности
мгновенной частоты шума:**

$$w(\omega) = \frac{-\psi_0''}{2 \left[(\omega - \omega_0)^2 - \psi_0'' \right]^{3/2}},$$

$$\psi_0'' = \left. \frac{d^2 \psi(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0}$$

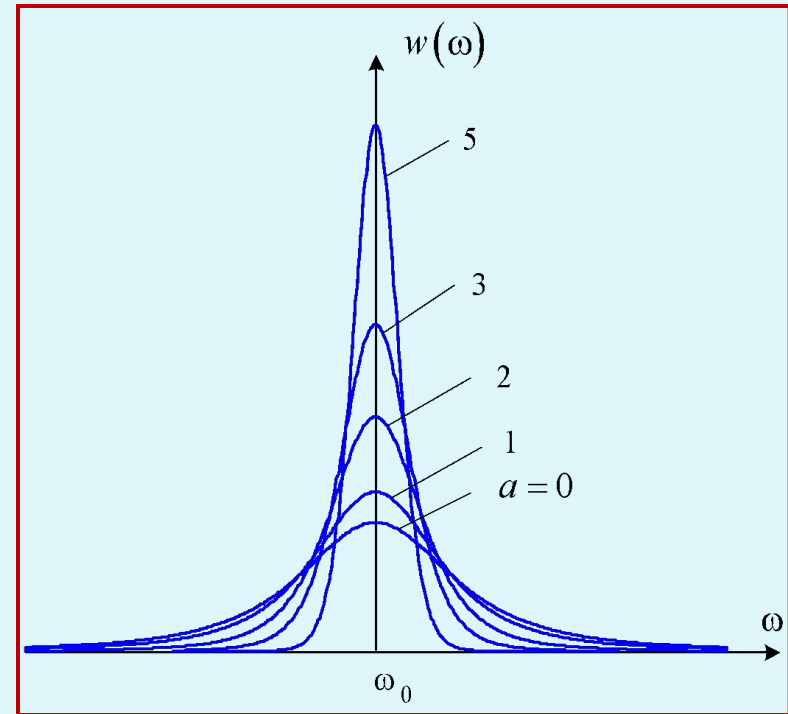
**Математическое
ожидание:**

$$\bar{\omega} = \omega_0$$

СК $\sigma_\omega = \sqrt{(\omega - \omega_0)^2} \rightarrow \infty$

О:
**Среднее абсолютное
отклонение:**

$$S_\omega = |\omega - \omega_0| = \sqrt{-\psi_0''}$$

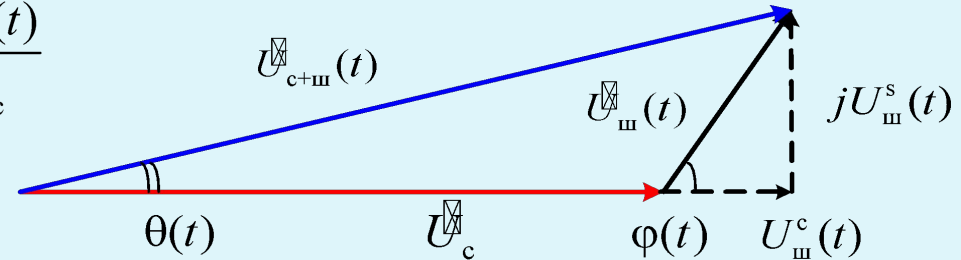


АКФ и энергетический спектр мгновенной частоты при $a \gg 1$



$$\theta(t) = \arctg \frac{U_{\text{ш}}^S(t)}{U_c + U_{\text{ш}}^C(t)} \approx \arctg \frac{U_{\text{ш}}^S(t)}{U_c} \approx \frac{U_{\text{ш}}^S(t)}{U_c}$$

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \approx \frac{1}{U_c} \frac{dU_{\text{ш}}^S(t)}{dt}$$



АКФ производной процесса $X(t)$: $K_{X'}(\tau) = -K_X''(\tau) \Rightarrow K_{\Delta\omega}(\tau) = -K_{\theta}''(\tau) \approx -\frac{1}{U_c^2} K_{U_{\text{ш}}^S}''(\tau)$

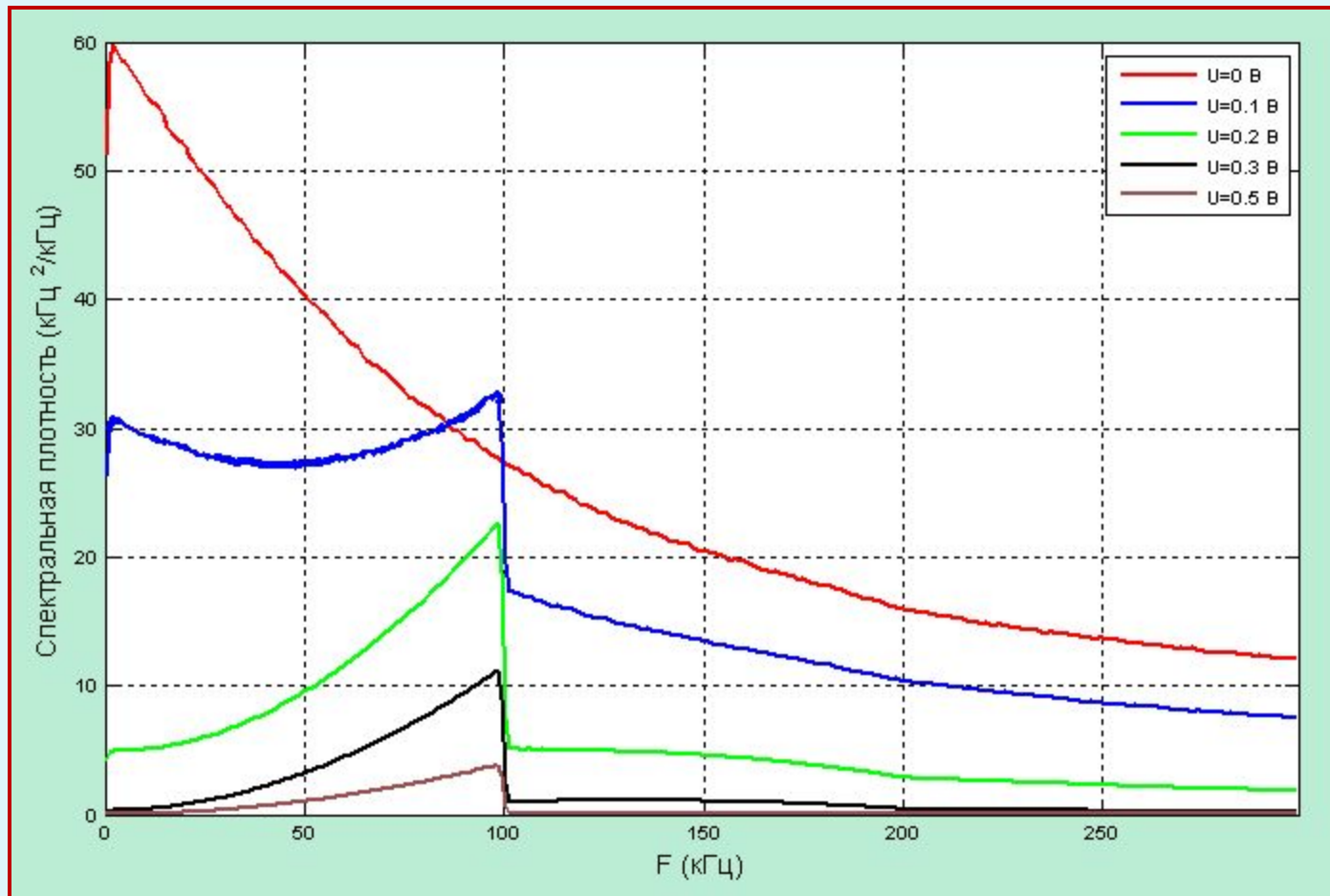
Математический" спектр круговой частоты (теорема Винера-Хинчина):

$$G_{\Delta\omega}(\Omega) = F\{K_{\Delta\omega}(\tau)\} \approx -\frac{1}{U_c^2} F\{K_{U_{\text{ш}}^S}''(\tau)\} = -\frac{1}{U_c^2} (j\Omega)^2 F\{K_{U_{\text{ш}}^S}(\tau)\} = \frac{\Omega^2}{U_c^2} G_{U_{\text{ш}}^S}(\Omega)$$

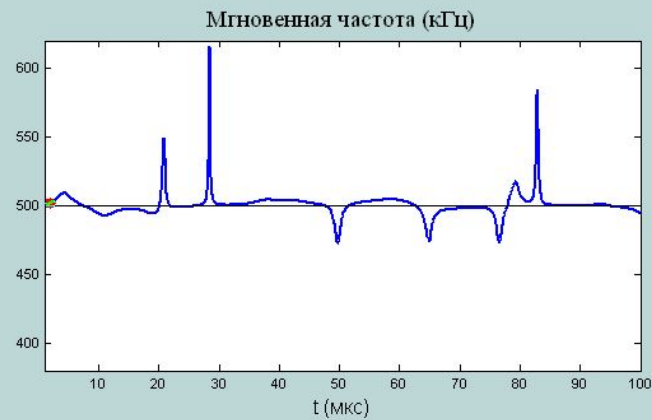
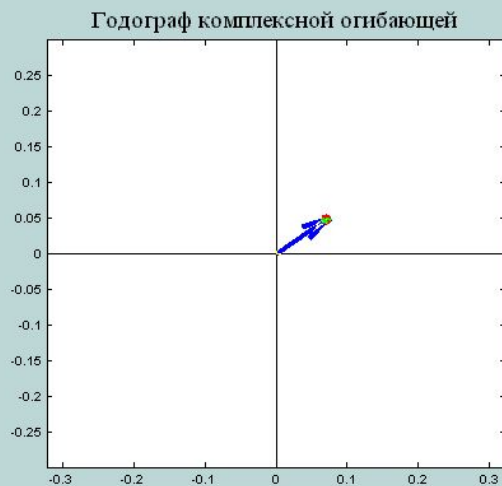
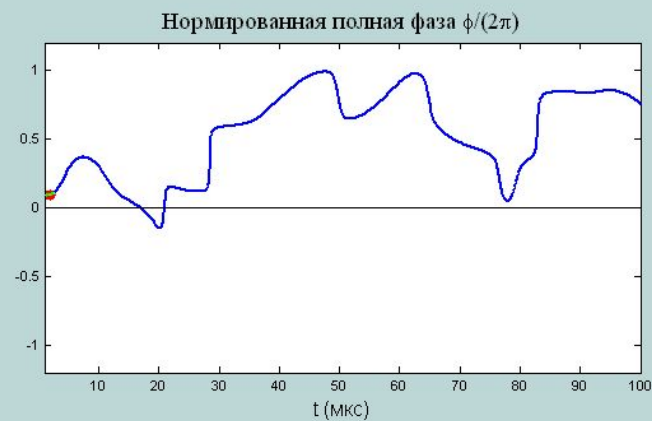
Физический" спектр частоты: т.к. $F = \frac{\Omega}{2\pi}$, то $G_{\Delta f}(F) = 2G_{\Delta\omega}(2\pi F) =$

$$= 2\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 G_{\Delta\omega}(2\pi F) \approx 2\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \frac{(2\pi F)^2}{U_c^2} G_{U_{\text{ш}}^S}(2\pi F) = \frac{F^2}{U_c^2} \cdot 2G_{U_{\text{ш}}^S}(2\pi F) = \frac{F^2}{U_c^2} G_{U_{\text{ш}}^S}(F)$$

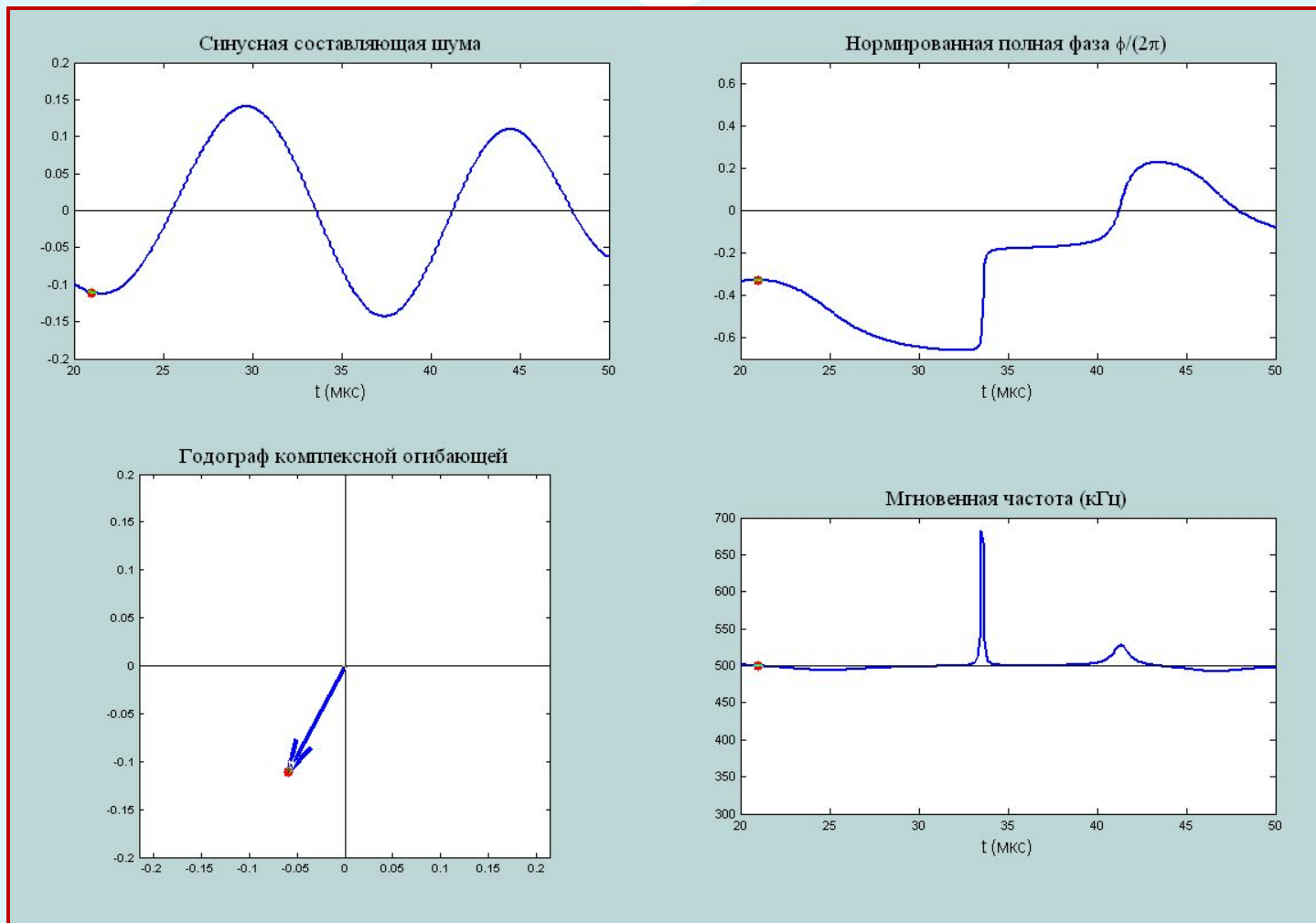
Энергетический спектр мгновенной частоты смеси сигнала и шума (прямоугольная АЧХ БВЧ)



Аномальные выбросы мгновенной частоты шума



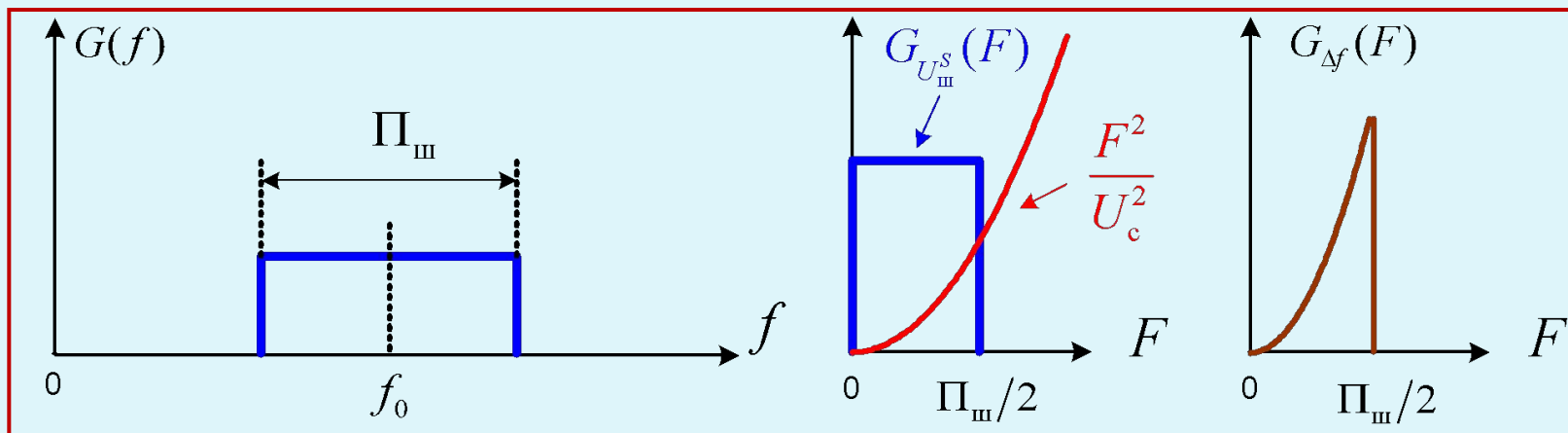
Аномальный выброс



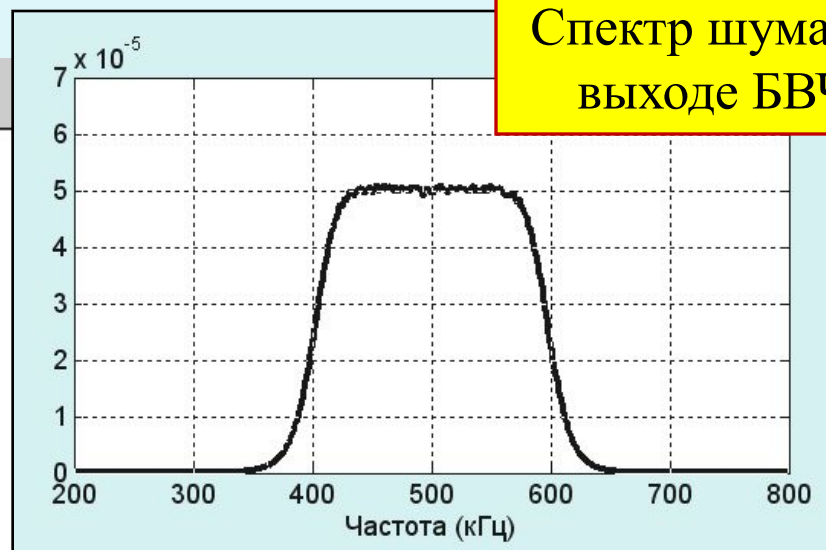
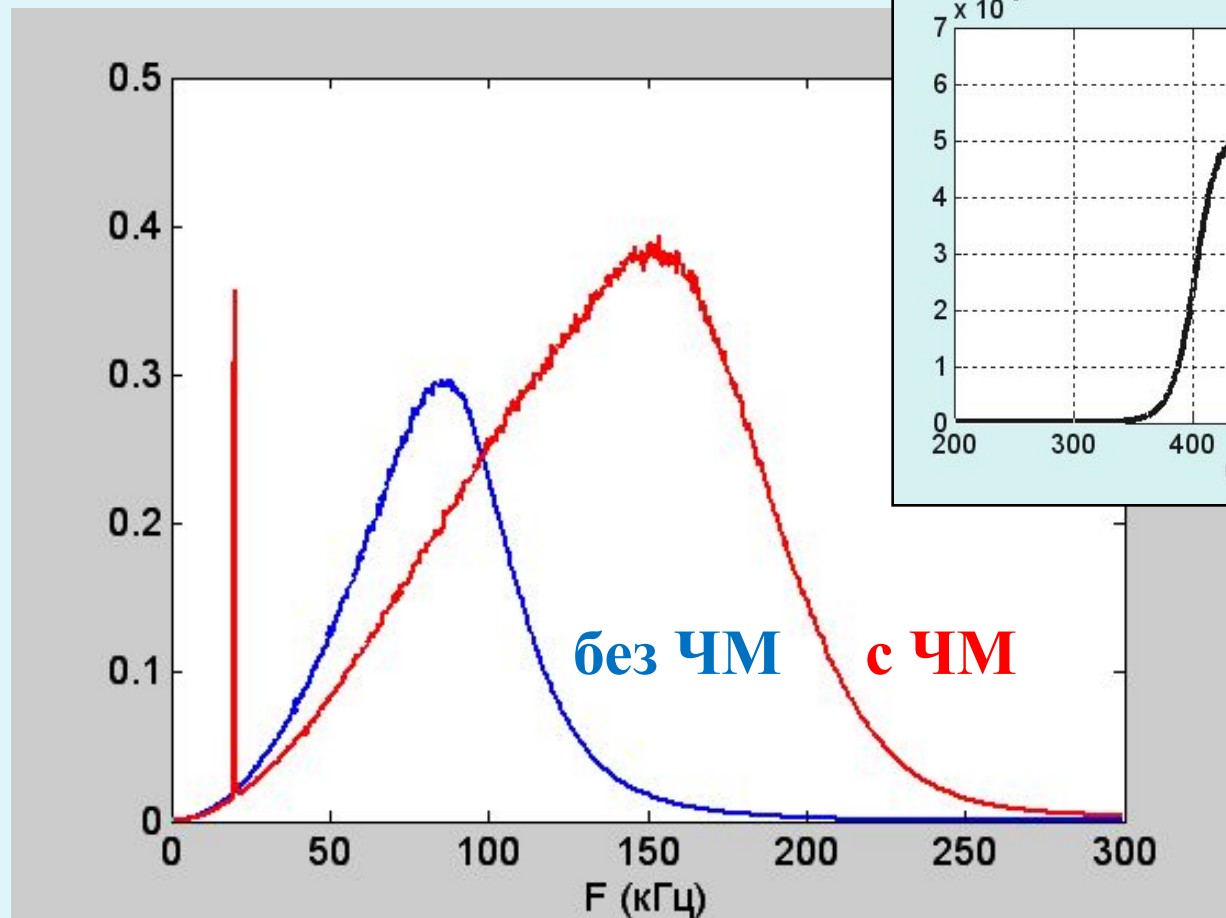
Энергетический спектр мгновенной частоты при $a \gg 1$



$$G_{\Delta f}(F) \approx \frac{F^2}{U_c^2} G_{U_{\text{ш}}}^S(F)$$



Энергетический спектр напряжения на выходе ЧД ($a = 10$)

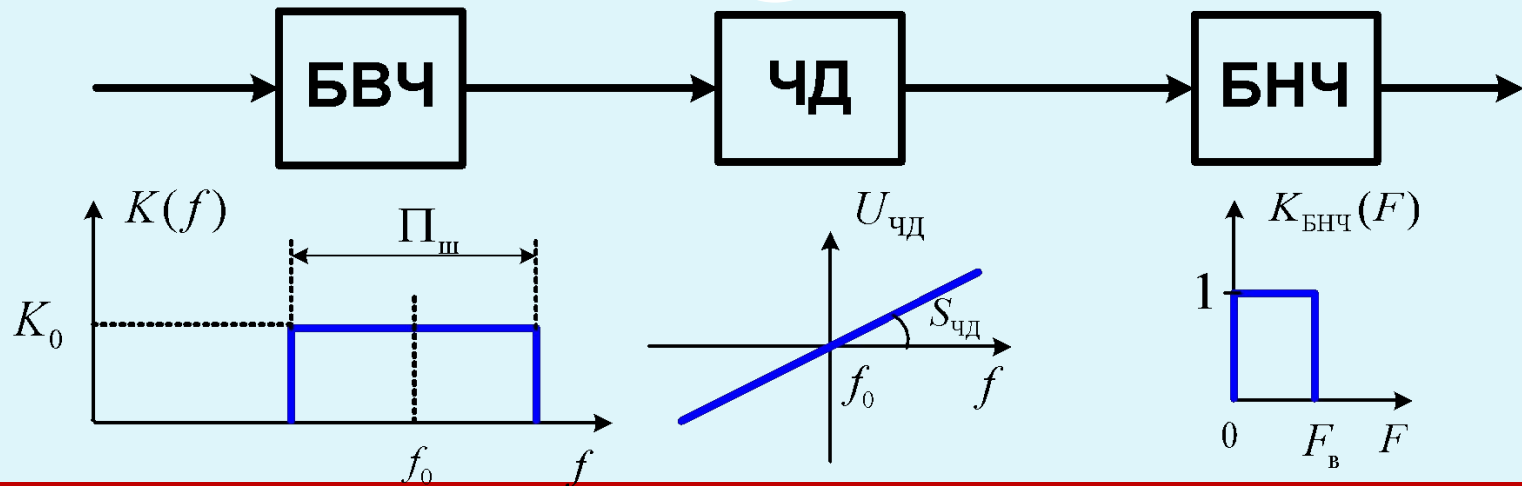


$$\beta_{\text{ЧМ}} = 5$$

$$F_M = 200 \text{ кГц}$$

$$\Delta f_m = 100 \text{ кГц}$$

Отношение сигнал-шум на выходе приёмника ЧМ сигнала



**Условия расчёта
отношения
сигнал-шум:**

$\left\{ \begin{array}{l} \text{на входе ЧД } a = U_c / U_{\text{ш}} \gg 1 \\ \text{гармоническая ЧМ сигнала } f(t) = f_{\text{д}} + \Delta f_m \cos 2\pi F t \\ \text{индекс модуляции } \beta_{\text{ЧМ}} \gg 1 \Rightarrow \text{полоса БВЧ } \Pi_{\text{ш}} = 2 \Delta f_m \\ \text{верхняя граничная частота БНЧ } F_B = F_M \end{array} \right.$

Сигнал – математическое ожидание напряжения на выходе БНЧ при действии на входе приёмника смеси **ЧМ сигнала** и белого шума

Шум – случайная составляющая напряжения на выходе БНЧ при действии на входе приёмника смеси **немодулированного сигнала** и белого шума

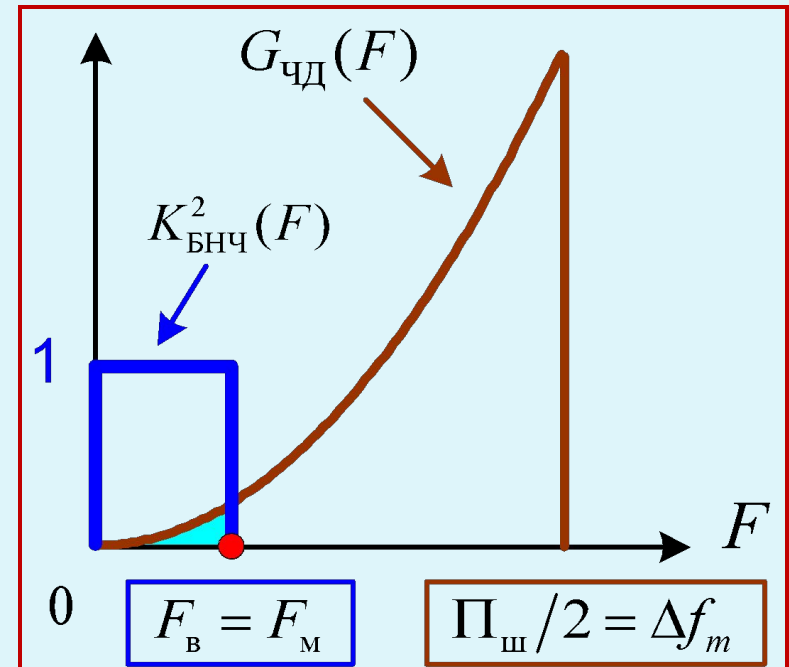
Вывод формулы при $a \gg 1$

$$q_{\text{ВЫХ}} = \frac{P_{\text{с. ВЫХ}}}{P_{\text{ш. ВЫХ}}} = \frac{U_{\text{с. ВЫХ}}^2}{2\sigma_{\text{ш. ВЫХ}}^2}$$

Сигнал $u_{\text{с. ВЫХ}}(t) = \overline{K_{\text{БНЧ}} S_{\text{ЧД}} (f(t) - f_0)} \approx K_{\text{БНЧ}} S_{\text{ЧД}} (f_c(t) - f_0) \Big|_{K_{\text{БНЧ}}=1} = S_{\text{ЧД}} \Delta f_m \cos 2\pi F_m t$
т.к. $a \gg 1$

Амплитуда сигнала $U_{\text{с. ВЫХ}} = S_{\text{ЧД}} \Delta f_m$

$$\begin{aligned} \text{Дисперсия шума } \sigma_{\text{ш. ВЫХ}}^2 &= \int_0^\infty G_{\text{БНЧ}}(F) dF = \\ &= \int_0^\infty K_{\text{БНЧ}}^2(F) G_{\text{ЧД}}(F) dF = \int_0^{F_M} G_{\text{ЧД}}(F) dF \approx \\ &\approx \int_0^{F_M} S_{\text{ЧД}}^2 \frac{F^2}{U_c^2} G_{U_{\text{ш}}}^{\text{с}}(F) dF = \int_0^{F_M} S_{\text{ЧД}}^2 \frac{F^2}{U_c^2} \cdot 2K_0^2 G_0 dF = \\ &= \frac{2K_{\text{ЧД}}^2 G_0 S^2}{U_c^2} \cdot \frac{F_M^3}{3} \end{aligned}$$



Вывод формулы при $a \gg 1$ (окончание)

$$q_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{с. ВЫХ}}^2}{2\sigma_{\text{ш. ВЫХ}}^2} = \frac{(S_{\text{ЧД}} \Delta f_m)^2}{2 \cdot \frac{2K_{\text{ЧД}}^2 G_0 S^2}{U_c^2} \cdot \frac{F_M^3}{3}} =$$

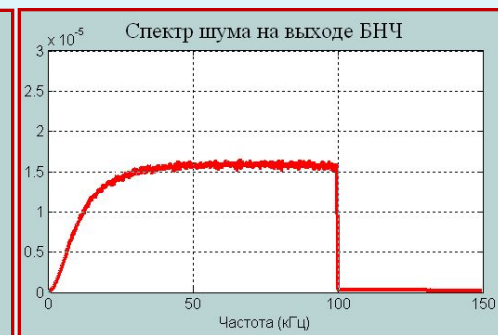
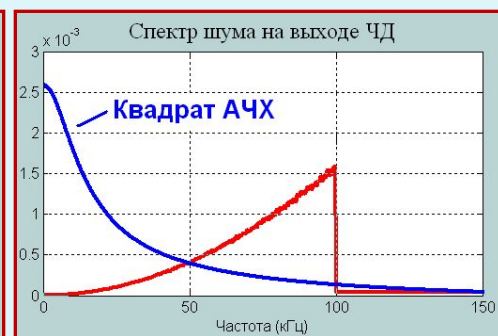
$$= \frac{(S_{\text{ЧД}} \Delta f_m)^2}{2 \cdot \frac{2K_{\text{ЧД}}^2 G_0 S^2}{U_c^2} \cdot \frac{F_M^3}{3}} \cdot \frac{\Delta f_m}{\Delta f_m} =$$

$$= 3 \frac{U_c^2 / 2}{K_{\text{ВВЧ}}^2 G_{\text{ш}} \Pi_{\text{ш}}} \beta_{\text{ЧМ}}^3 = 3q_{\text{ВХ}} \beta_{\text{ЧМ}}^3$$

$$q_{\text{ВЫХ}} = 3q_{\text{ВХ}} \beta_{\text{ЧМ}}^3$$

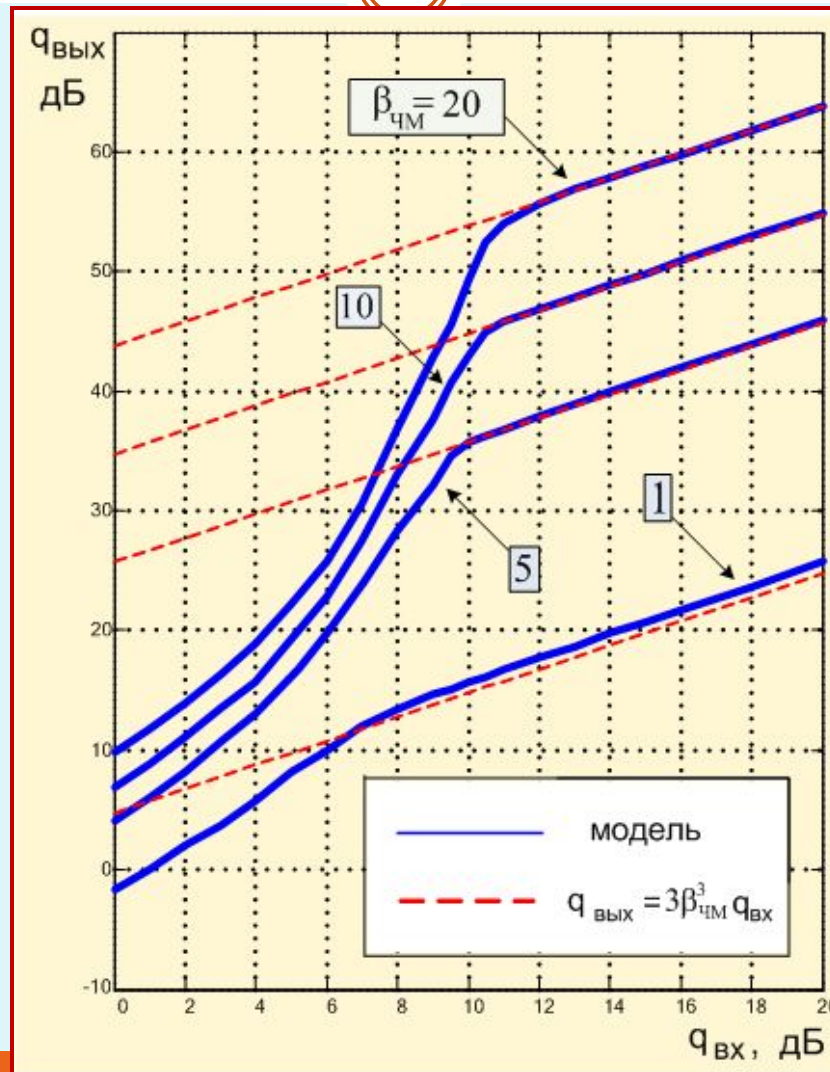
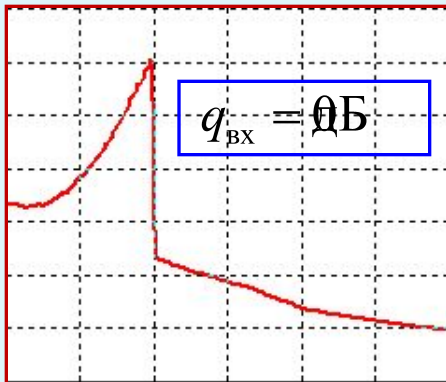
(при $a \gg 1$)

Влияние формы АЧХ БНЧ

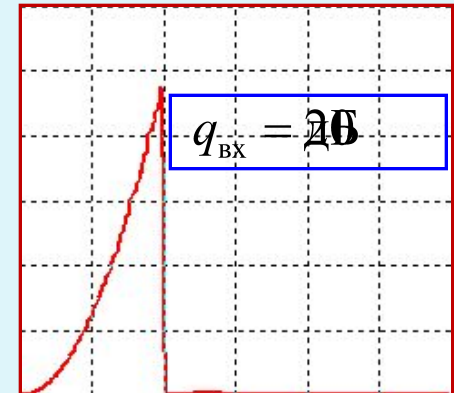


Пороговые кривые $q_{\text{ВЫХ}} (q_{\text{ВХ}})$

Подпороговая
область



Надпороговая
область



Порог:

$$q_{\text{ВХ. П}} = 12 \text{ дБ}$$

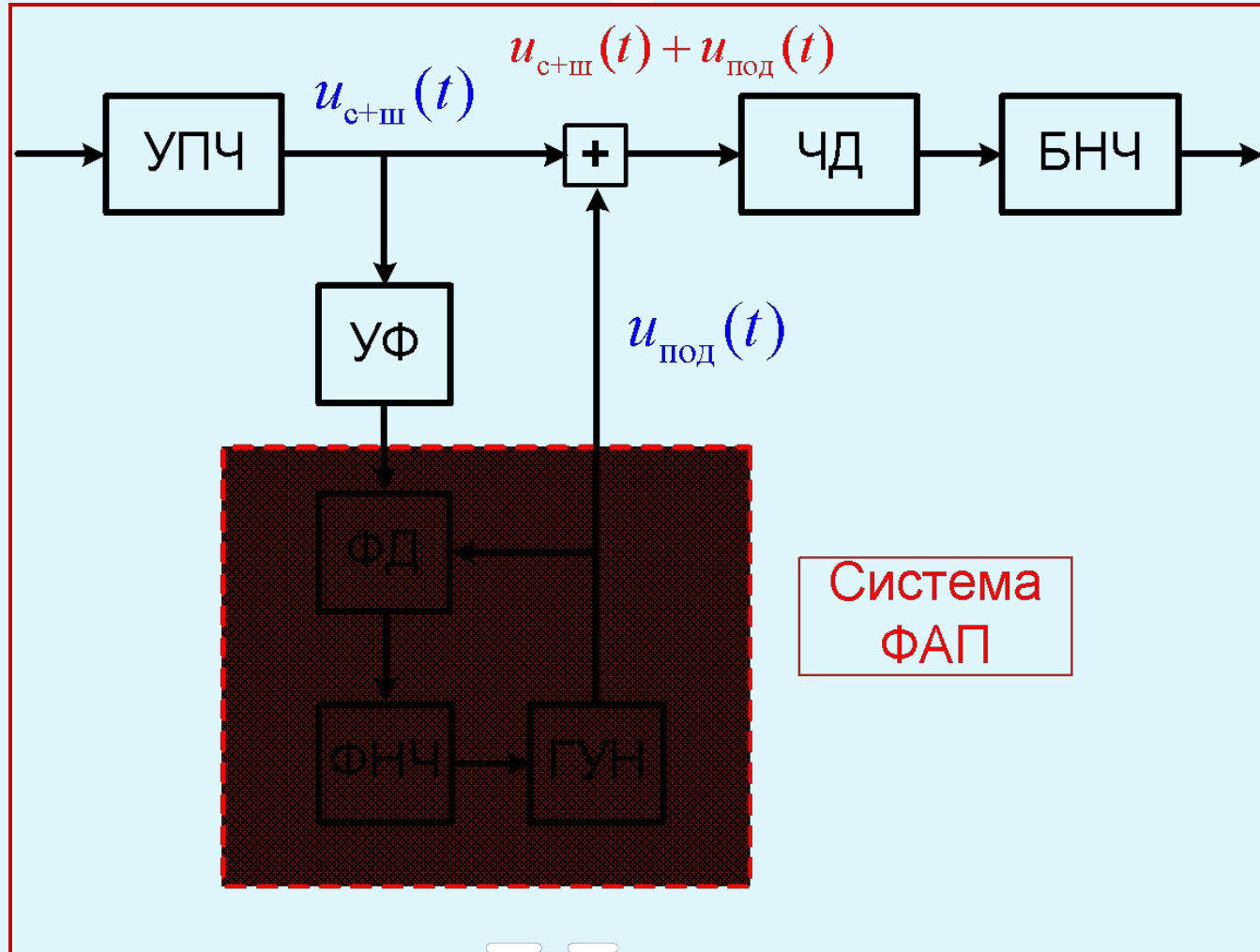
$$a_{\text{П}} = 3 - 5$$

Методы повышения качества приёма ЧМ сигнала



Задача	Метод
1. Выравнивание отношения сигнал-шум на выходе приёмника в интервале частот	Предыскажение модулирующего колебания и частотная коррекция демодулированного колебания
2. Уменьшение порогового отношения сигнал-шум путём увеличения амплитуды несущей	Синхронный приём (регенерация несущей)
3. Уменьшение порогового отношения сигнал-шум путём уменьшения мощности шума на входе ЧД	Приём с обратной связью по частоте (ОСЧ)

Метод синхронного приёма (регенерация несущей)



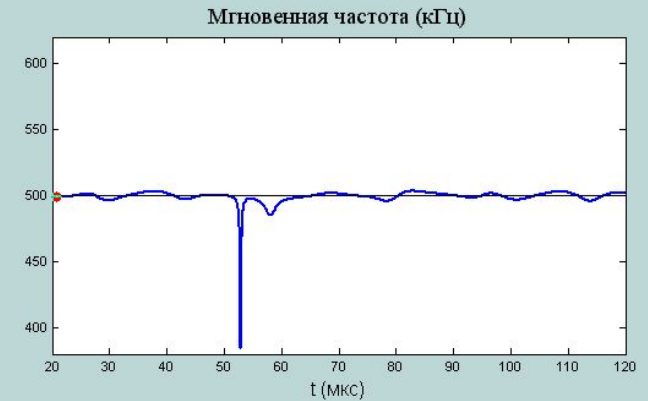
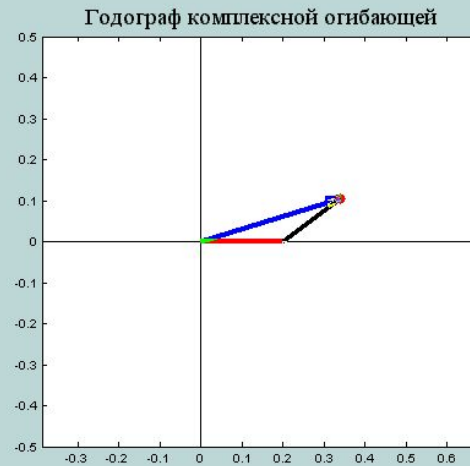
Смесь сигнала без ЧМ и шума



**Без
«подкачки»**

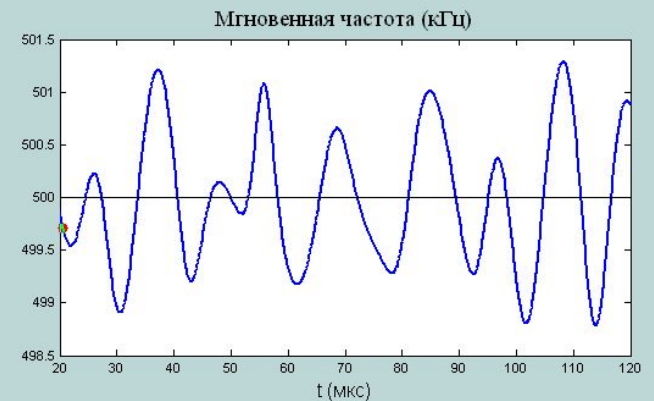
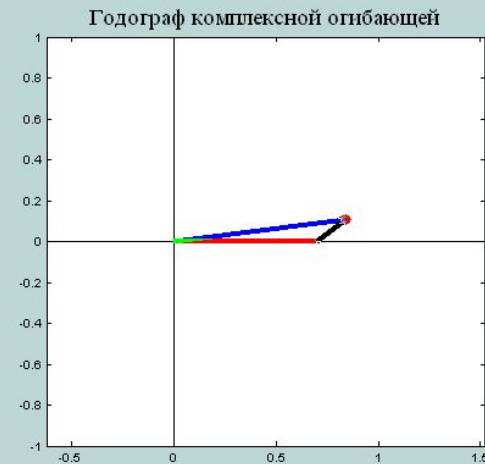
$$U_{\text{ш}} = 0,1$$

$$U_{\text{с}} = 0,2$$



С «подкачкой»

$$U_{\text{под}} = 0,5$$



Смесь ЧМ сигнала и шума



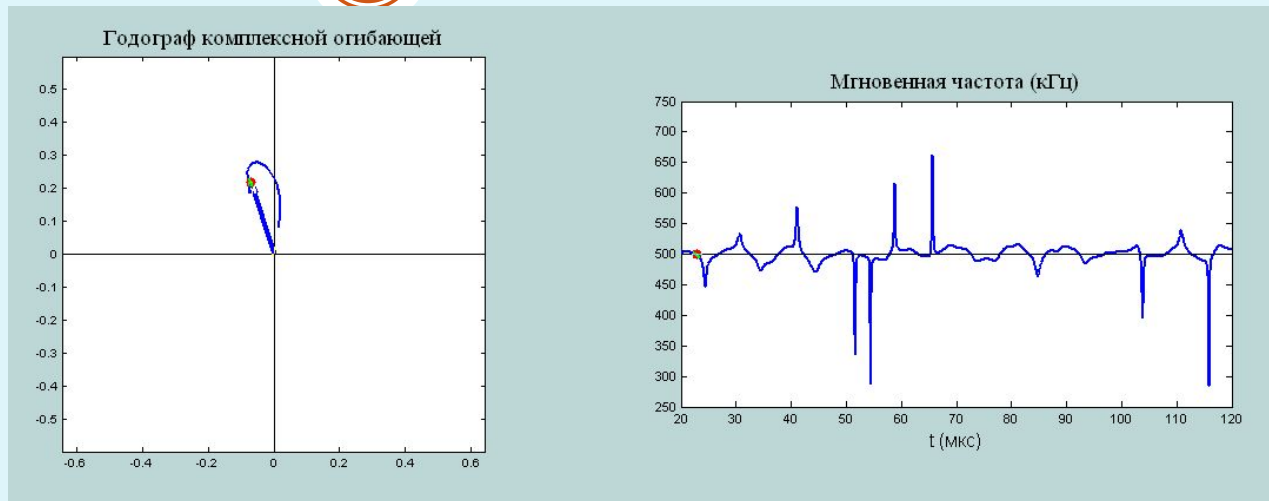
Без

«подкачки»

$$U_{\text{ш}} = 0,1$$

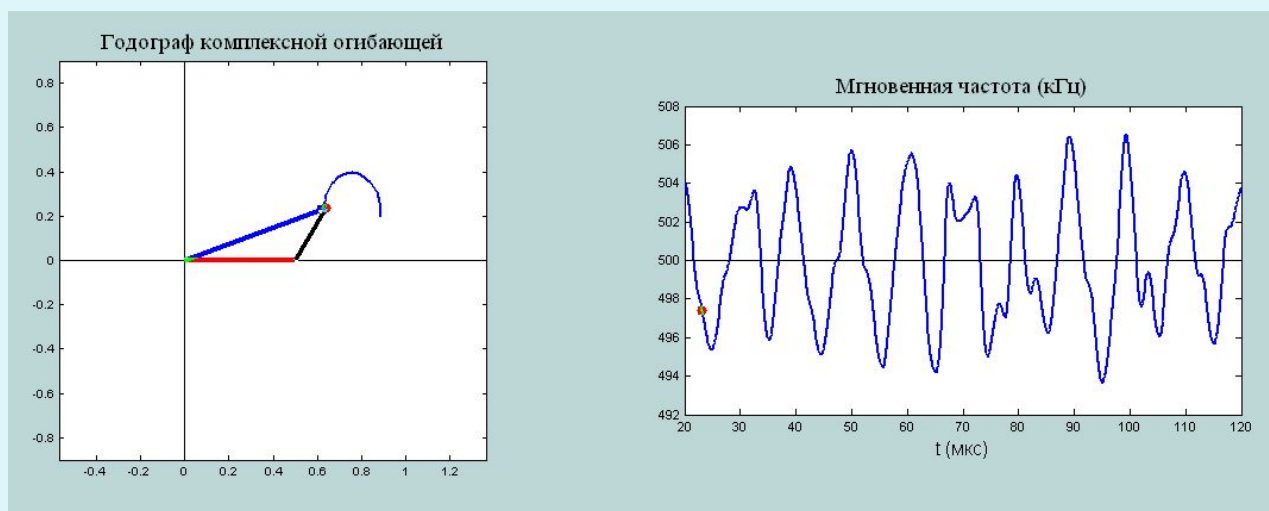
$$U_{\text{с}} = 0,2$$

$$\beta_{\text{ЧМ}} = \pi/2 \approx 1,6$$



С «подкачкой»

$$U_{\text{под}} = 0,5$$



Нелинейные искажения закона ЧМ (гармоническая ЧМ)

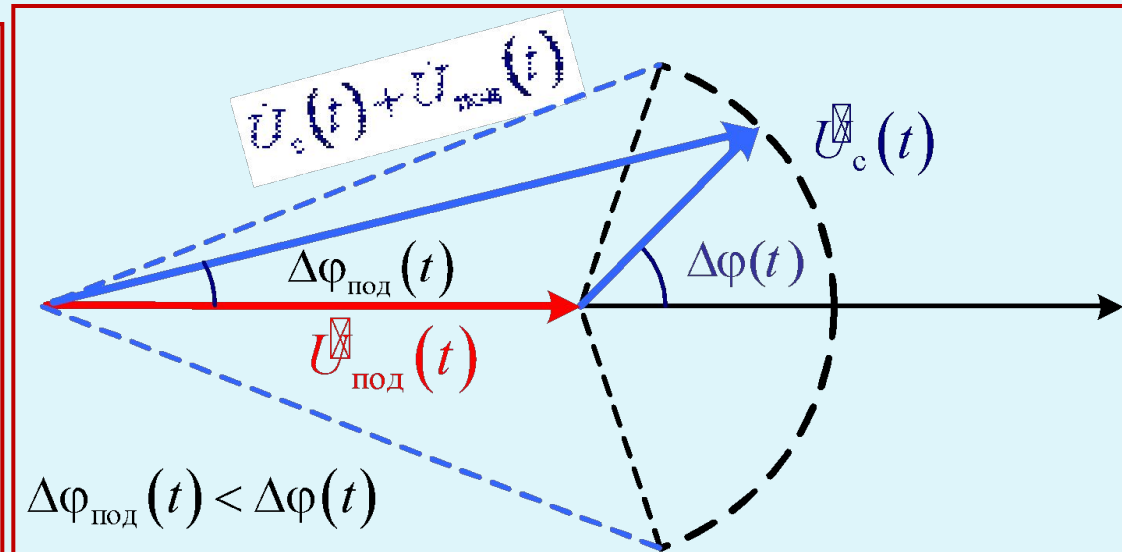
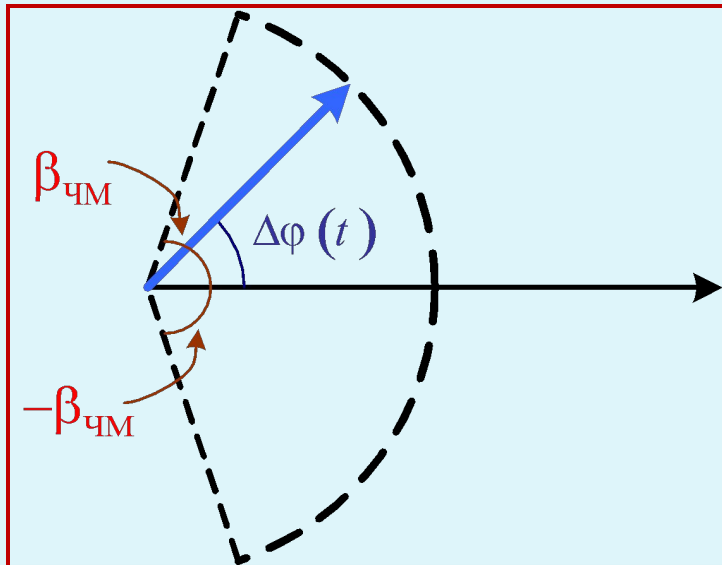


Частота $\omega(t) = \omega_{\text{М}} + \Delta\omega_m \cos \Omega t$

Полная фаза $\varphi(t) = \omega_{\text{М}} t + \beta \sin \Omega t = \omega t + \Delta\varphi(t)$

$$\Delta\varphi(t) = \Delta\varphi_{\text{max}} \sin \Omega t$$

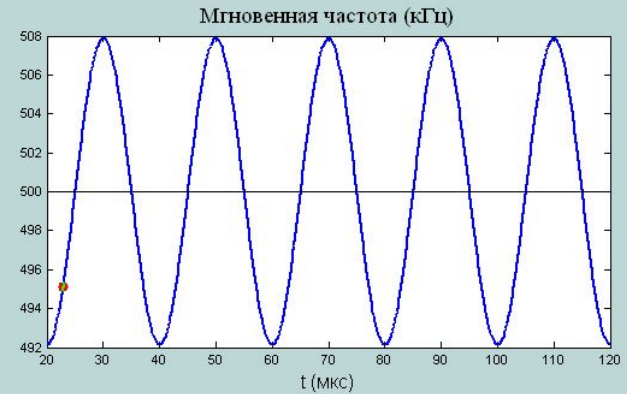
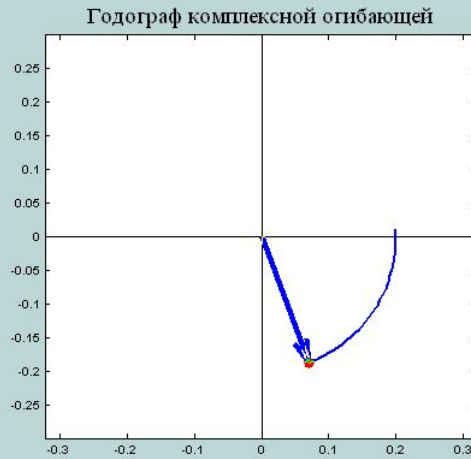
$$\Delta\varphi_{\text{max}} = \beta$$



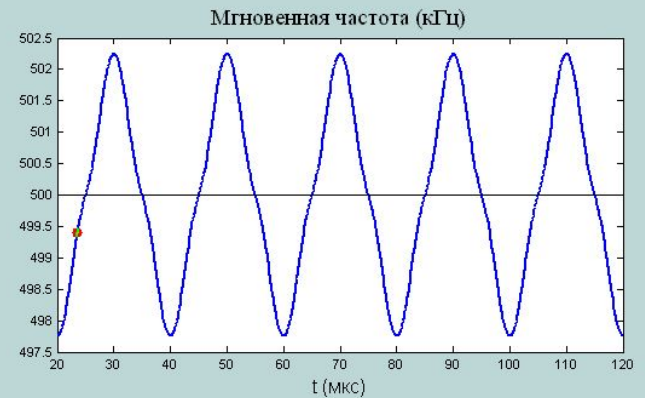
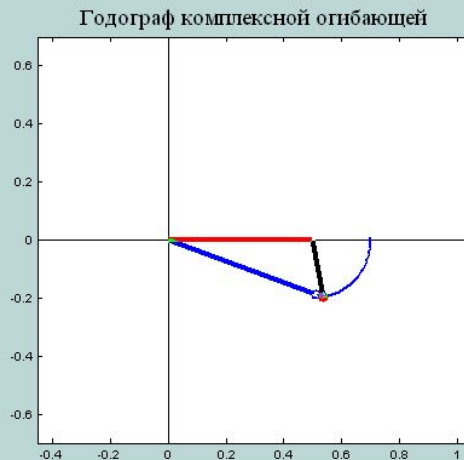
ЧМ сигнал, $\beta_{\text{ЧМ}} = \pi/2$



**Без
«подкачки»**



**С
«подкачкой»**

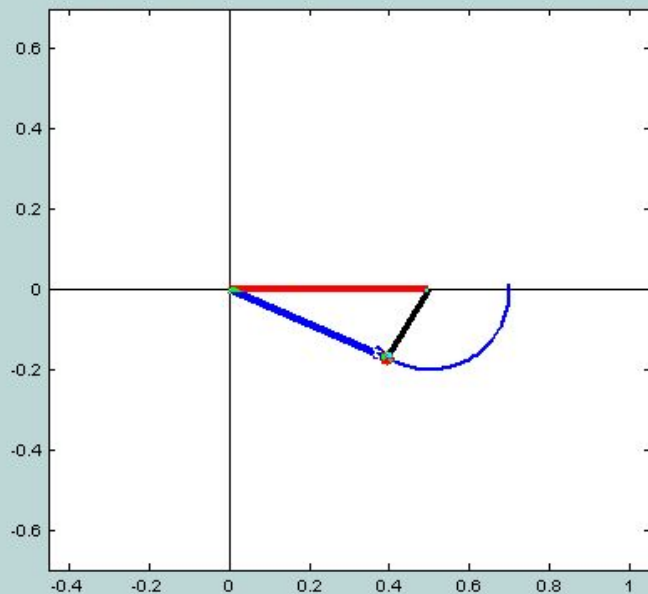


ЧМ сигнал, $\beta_{\text{ЧМ}} > \pi/2$

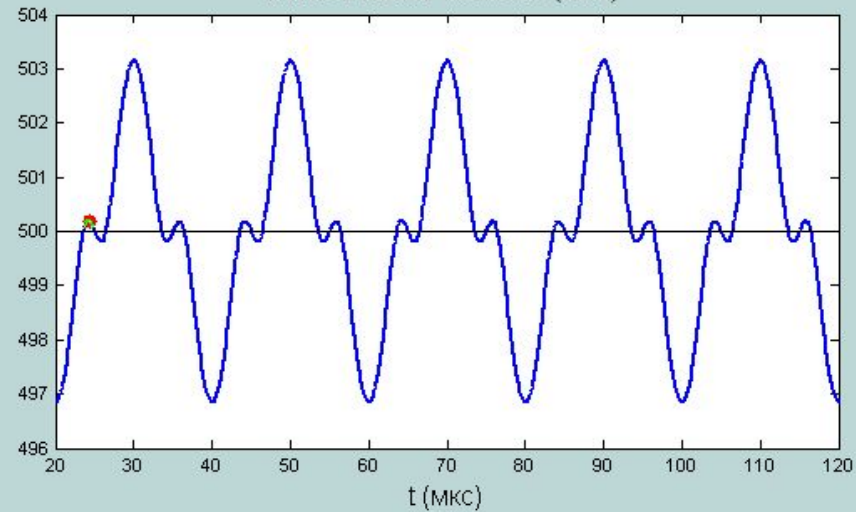


С «подкачкой»

Годограф комплексной огибающей



Мгновенная частота (кГц)



Приём с обратной связью по частоте (ОСЧ)

