

Радиопередающие устройства СМС

Лекция 10. Угловая модуляция (ЧМ и ФМ)

Общие сведения о модуляции

модуляцией называется процесс изменения одного или нескольких параметров (амплитуда, частота, мгновенная фаза) несущего радиочастотного колебания в соответствии с изменением параметров передаваемого информационного (модулирующего) сигнала.

Существует множество разновидностей модулированных сигналов, применяющихся в современных цифровых и аналоговых средствах радиосвязи (включая СМС)

Частотную и фазовую виды модуляции называют общим термином *угловая модуляция* (чаще всего используют в СМС)

$$u(t) = U_m \sin[\omega_0 t + \Phi(t)]$$

изменяется полная фаза $\varphi(t) = \omega_0 t + \Phi(t)$; $U_m = \text{const}$

Если модуляция осуществляется одним гармоническим тоном Ω

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t), \quad m — \text{индекс модуляции}$$

Модуляция **фазовая (ФМ)**, если индекс модуляции m пропорционален амплитуде модулирующего сигнала U_Ω и не зависит от его частоты Ω .

частотная (ЧМ), если девиация частоты (отклонение от среднего значения ω_0) - $\Delta\omega$ пропорциональна U_Ω (индекс модуляции m пропорционален U_Ω и обратно пропорционален Ω)

$$m = \begin{cases} kU_\Omega = \Delta\varphi & \text{для ФМ;} \\ kU_\Omega/\Omega = \Delta\omega/\Omega & \text{для ЧМ,} \end{cases} \quad \downarrow (6 \text{ дБ на октаву})$$

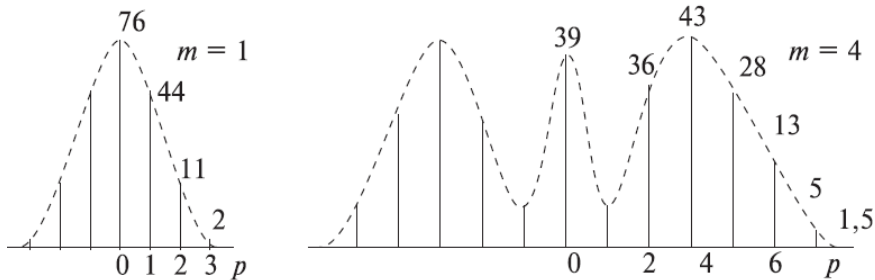
где k — коэффициент пропорциональности; $\Delta\varphi$ — девиация (отклонение от среднего значения) фазы

Мгновенное значение частоты

$$\omega = \begin{cases} d\varphi/dt = d[\omega_0 t + \Delta\varphi \sin \Omega t]/dt = \omega_0 + \Delta\varphi \Omega \cos \Omega t & \text{для ФМ;} \\ d\varphi/dt = d[\omega_0 t + \Delta\omega \sin \Omega t / \Omega]/dt = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t & \text{для ЧМ.} \end{cases}$$

Спектры ФМ и ЧМ колебаний (даже при модуляции одним тоном) линейчатые, содержат составляющую средней (несущей) частоты ω_0 и бесконечное множество составляющих боковых частот ($\omega_0 \pm p\Omega$, $p = 1, 2, 3, \dots$).

Относительные амплитуды составляющих спектра пропорциональны функциям Бесселя первого рода $J_p(m)$ порядка p от аргумента m . (См. Учебник по ОТС!)



Спектры сигналов при $m = 1, 4$ в процентах относительно немодулированной несущей

Ширина полосы частот Π , занимаемой сигналом с УМ (учитываются составляющие спектра с амплитудами не менее 1 %) определяется приближенным соотношением $\Pi \approx 2F_m(m + \sqrt{m} + 1)$

где $F_m = \Omega_m/2\pi$ — верхняя модулирующая частота

При $m \ll 1$ $\Pi \approx 2F_m$

При $m \gg 1$ $\Pi \approx 2mF_m = 2\Delta f_{\max}$

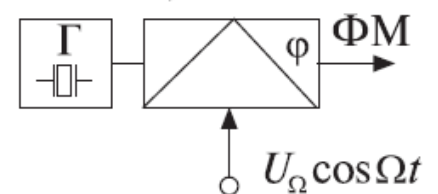
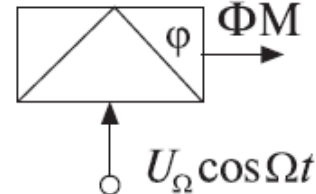
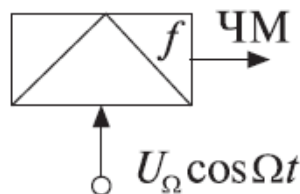
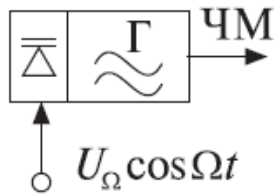
При ЧМ индекс модуляции $m = \Delta f/F_m \downarrow$ при $\uparrow F_m$. На верхних модулирующих частотах ухудшается отношение сигнал-шум

Частотные предискажения: при $\uparrow F_m \uparrow U\Omega$
(6 дБ на октаву). Т.е. переход к ФМ

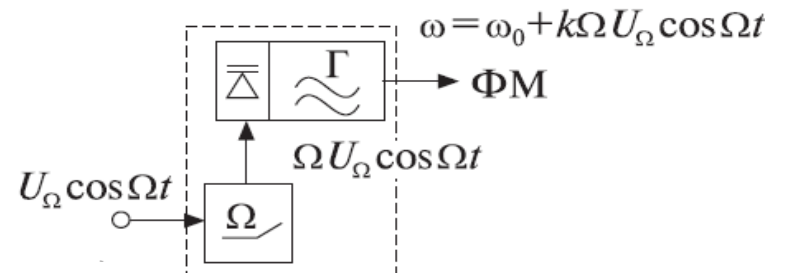
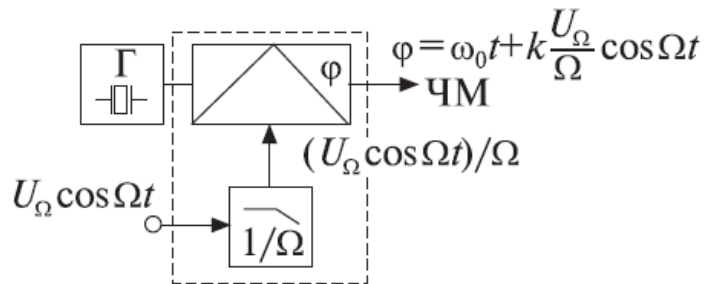
В РПрУ производится обратная коррекция

Способы получения сигналов с ЧМ и ФМ

Прямые методы



Косвенные методы



В основе **связь** ω и φ

$$\omega = d\varphi/dt$$

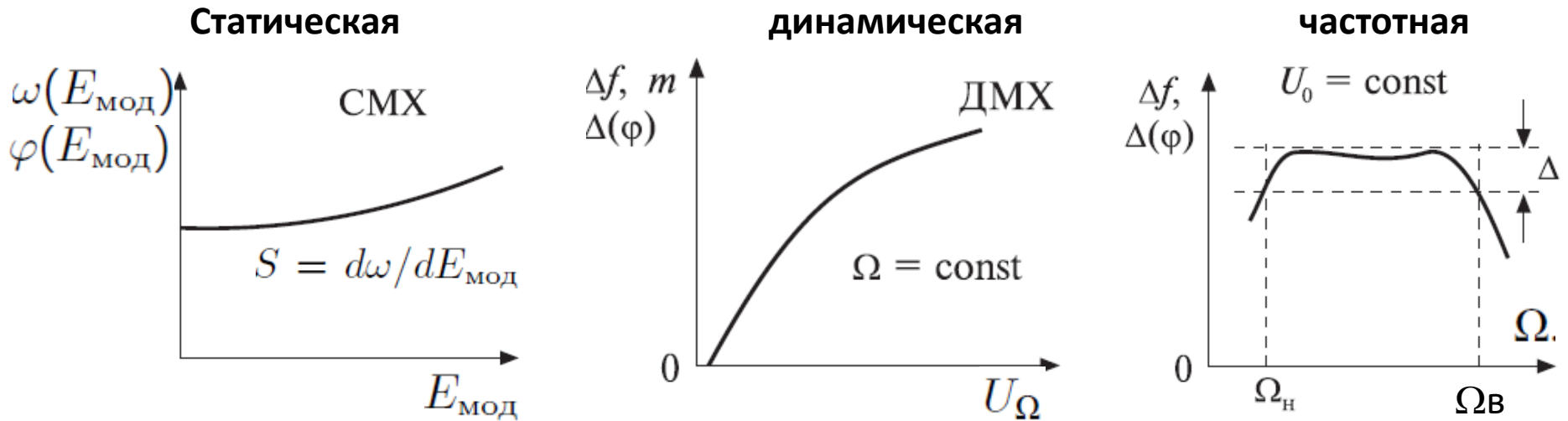
Необходима коррекция
АЧХ (спад 6 дБ/октава)

Интегрирующая RC-цепь

Необходима коррекция
АЧХ (рост 6 дБ/октава)

Дифференцирующая RC-цепь

Модуляционные характеристики при ФМ, ЧМ



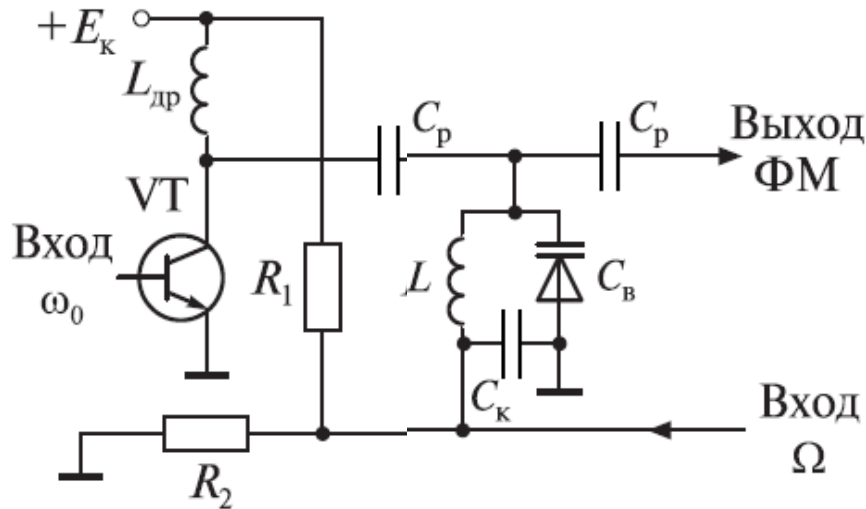
На вх. $u_{\text{м}}(t) = E_0 + U_{\omega} \cos \Omega t$

На вых. $\Delta\omega(t) = \Delta\omega_1 \cos \Omega t + \Delta\omega_2 \cos(2\Omega t + \Psi_2) + \Delta\omega_3 \cos(3\Omega t + \Psi_3) + \dots$

К.Н.И. $K_2 = \Delta\omega_2/\Delta\omega_1; \quad K_3 = \Delta\omega_3/\Delta\omega_1 \text{ и т. д.}$

Качество модуляции характеризуется еще уровнями шума, фона и динамическим диапазоном

Прямой способ получения ФМ



фазовый модулятор на расстраиваемом контуре

основные характеристики варикапа

$$C_{\text{в}} = C_0(1 + e_{\text{в}}/\varphi_{\text{к}})^{-\gamma} \quad (\varphi_{\text{к}} = 0,3 \dots 0,6 \text{ В})$$

$e_{\text{в}}$ — напряжение на p - n -переходе

C_0 — емкость варикапа при $e_{\text{в}} = 0$

γ — показатель нелинейности варикапа

$\gamma = 1/3$ - плавный переход

$\gamma = 1/2$ – резкий переход

$1/2 < \gamma < 1 \dots 3$ сверхрезкий переход

С ростом $\gamma \downarrow$ нелинейные искажения

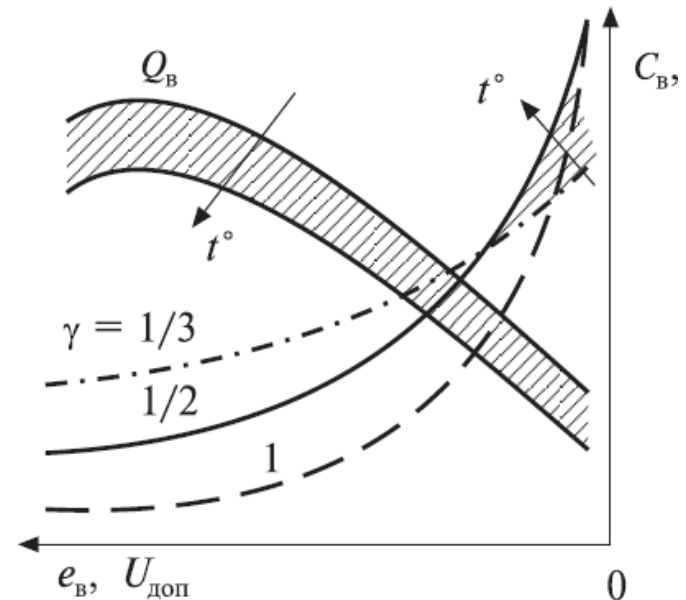
$$\phi = \arctg[(\omega_0/\omega_k - \omega_k/\omega_0)Q],$$

где Q — добротность контура

На уровне -3 дБ, фаза изменяется от -45° до 45° , а $K(p)$ от 1 до 0,707

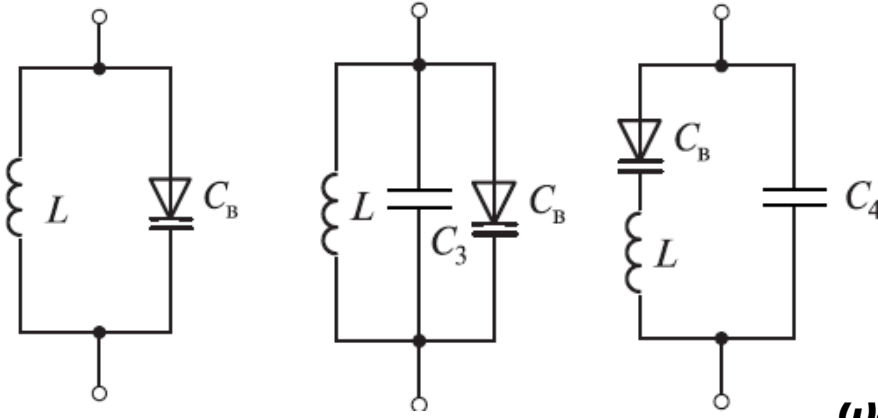
паразитная АМ !

Меры борьбы: амплитудный ограничитель, несколько контуров



Типовые зависимости

ЧМ в автогенераторах с варикапом. ГУН



Варианты включения варикапа

$$C_B = f_1(e) = C_0(1 + e/\varphi_K)^{-\gamma}$$

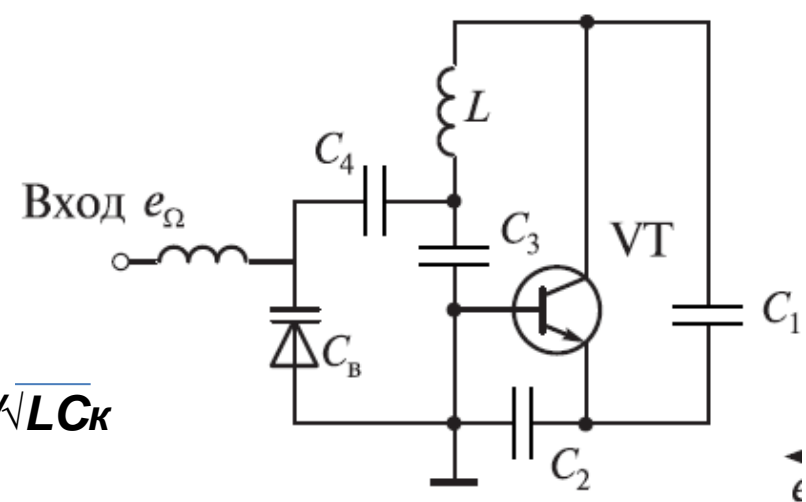
$$C_K = f_2(e) = \left[\frac{C_B + C_4}{C_B(C_3 + C_4) + C_3C_4} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right]^{-1}$$

Если $C_K \approx C_B$, ($C_1, C_2, C_4 \gg C_B$, $C_3 = 0$), а $\gamma = 2$, линейность максимальна. $C_K \sim e^2$, а $\omega \sim e$. При полном включении C_B – перестройка max. Но max. и его влияние (нестабильность, шумы, восприимчивость к наводкам и т.п.)

$$K_B = \frac{C_{B \max}}{C_{B \min}}$$

$$K_f = \omega_{AG \max} / \omega_{AG \min} = \sqrt{C_{\text{конт max}} / C_{\text{конт min}}}$$

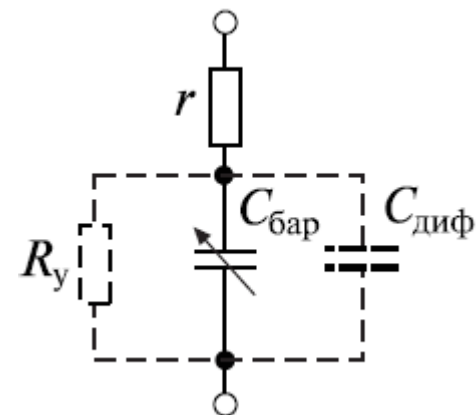
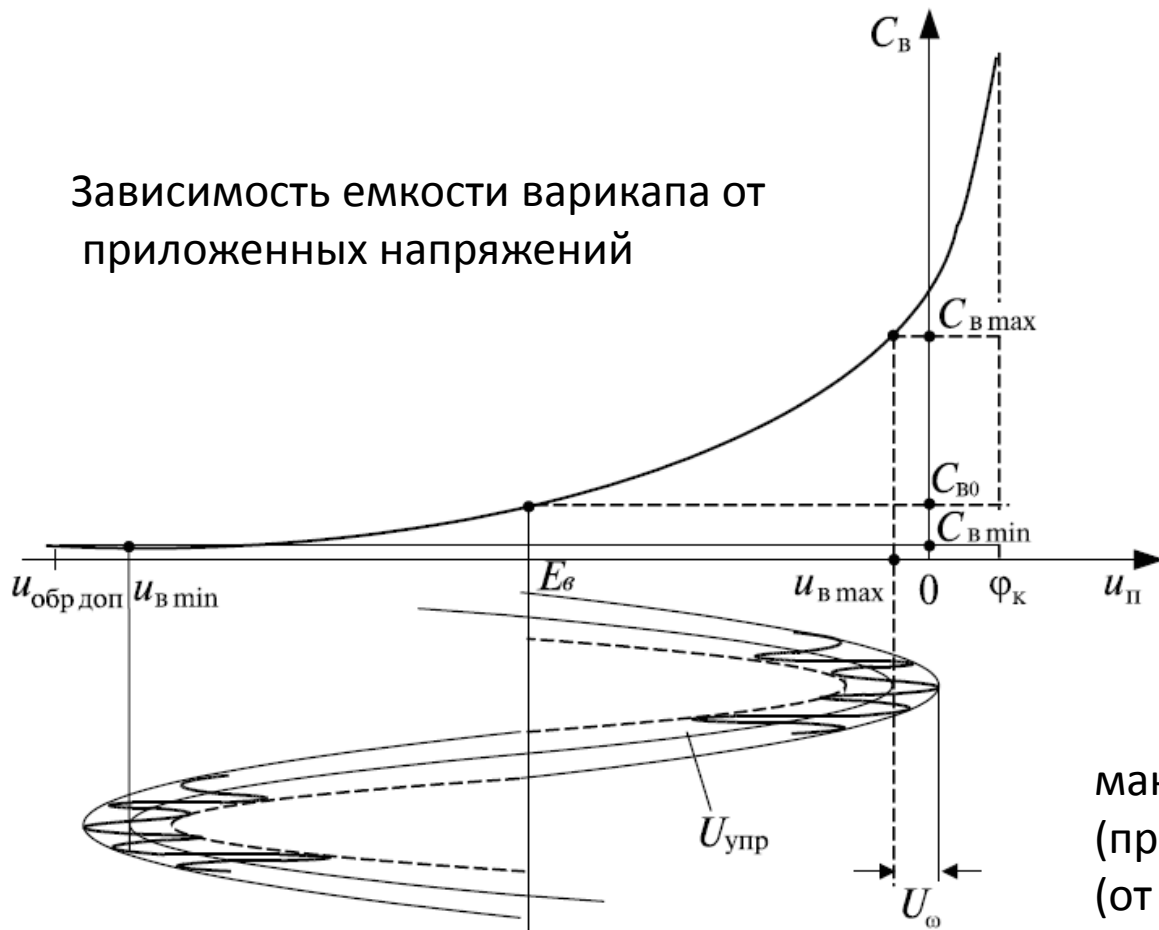
коэффициенты перестройки (перекрытия) по ёмкости и частоте



ГУН с варикапом.

Упрощённая схема Клаппа

Зависимость емкости варикапа от
приложенных напряжений



эквивалентная схема

$$Q_{\text{вар}} = 1/r\omega C_{\text{бар}}$$

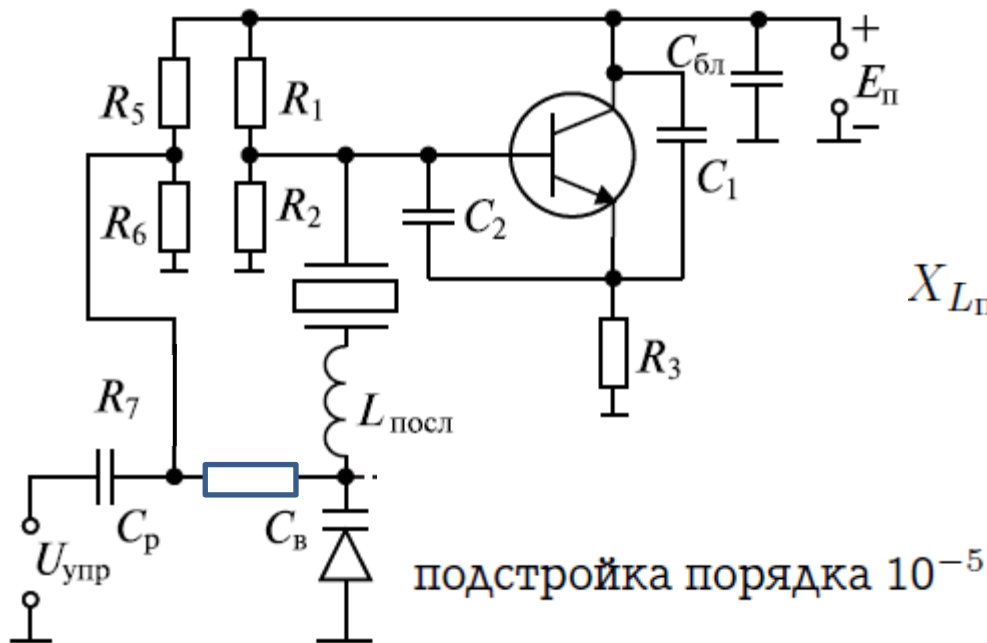
максимально допустимое обратное
(пробивное) напряжение $U_{\text{обр доп}}$,
(от 10 до 90) В

необходимо работать с запертым переходом
($U\omega + U_{\Omega} < |E_{\text{в}}|$). Обычно $U\omega \leq (0,1 \dots 0,2)(\phi_{\text{к}} + E_{\text{в}})$.
Находится из расчёта элементов АГ.

Например : $E_{\text{в}} = -5 \dots 10$ В; $U\omega = 1 \dots 5$ В; $U_{\Omega} = 0,5 \dots 2$ В

Стабилизация средней частоты за счёт ФАПЧ (ЧАПЧ). См. синтезаторы частот

ЧМ в АГ с кварцем



Узкополосная ЧМ (с малым индексом модуляции) в кварцевых АГ с помощью варикапов не очень высокого качества (как в ГУНах).

В схеме Клаппа в уравнение

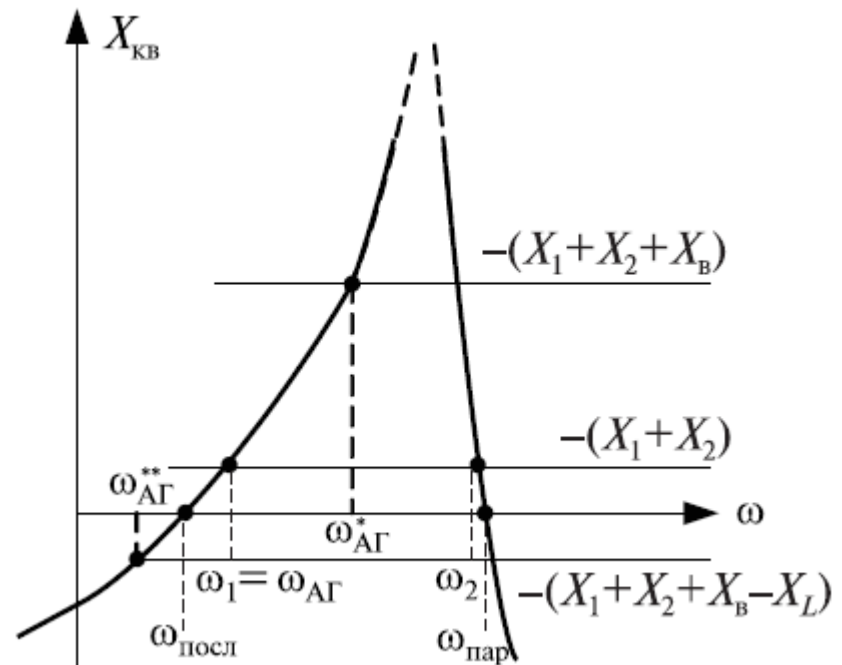
$$X_{\text{кв}}(\omega) + X_1(\omega) + X_2(\omega) = 0,$$

добавим $X_{\text{в}}(\omega) = 1/\omega C_{\text{в}}$.

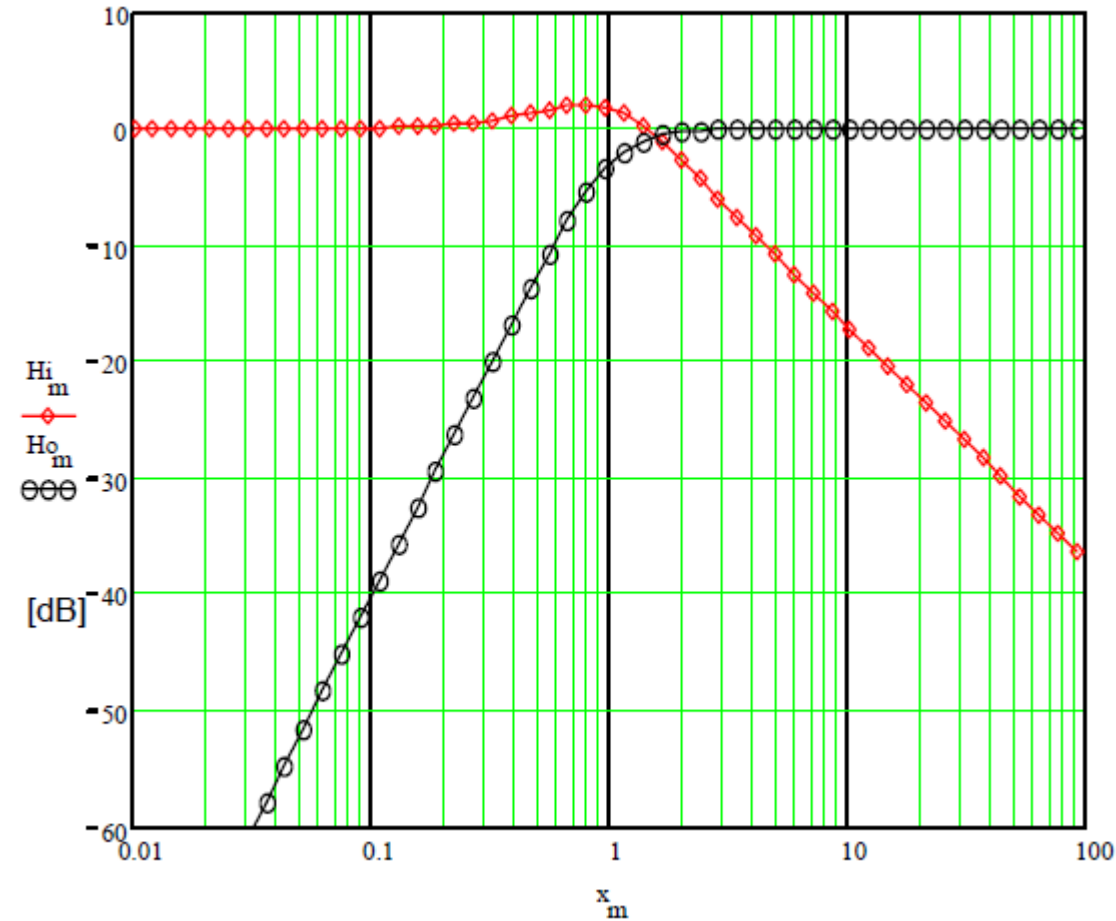
$$|X_{\text{в}}| \gg |X_1|, |X_2|$$

Для компенсации потерь при росте $\Gamma_{\text{кв}}$ вводят $L_{\text{посл}}$

$$X_{L_{\text{посл}}}(\omega) = \omega L_{\text{посл}} = |X_{\text{в}}(\omega)| = 1/\omega C_{\text{в}}$$



Стабилизация средней частоты. Влияние кольца ФАПЧ на ЧМХ



Модуляция возможна как со стороны ЭГ (ЧМ в КвГ или ФМ после ЭГ). При этом индекс \uparrow в N раз в кольце с ДПКД, так и в ГУН (изменением ёмкости варикапа).

The transfer function $H(jx)$ behaves as a **low pass filter** in respect to the noise and spurious signals accompanying the reference signal whereas $1 - H(jx)$ as a **high pass filter** in respect to the noise and spurious of the VCO

Transfer functions $H_i(jx) = 20\log(|H(jx)|)$ and $H_o(jx) = 20\log(|1-H(jx)|)$; of the 2nd order PLL loop of the type 2