

Лекция 9. Стабилизация частоты

Мгновенная частота

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt},$$

Средняя частота (за время измерения от t до $t + \tau$)

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} f(t) dt$$

Абсолютная нестабильность

$$\Delta f = f_{\text{ср}2} - f_{\text{ср}1},$$

Относительная нестабильность

$$\varepsilon = \Delta f / f_{\text{АГ}} = (f_{\text{ср}2} - f_{\text{ср}1}) / f_{\text{ср}1}.$$

Кратковременная нестабильность измеряется за очень короткое время (обычно менее 1 с)

Она определяется быстрыми флуктуационными изменениями частоты автогенератора, вызываемыми тепловыми, дробовыми и фликкер шумами. Определяются высокочастотной частью спектра $S\omega(\omega)$.

Долговременная нестабильность средней частоты $\Delta f_{\text{ср}}$ АГ, проявляющаяся за временные интервалы наблюдения более одной секунды (часа, сутки, месяца, года и более).

Связана с воздействием на параметры автогенератора медленных и сверхмедленных, **дестабилизирующих факторов** (изменениями температуры, атмосферного давления и влажности окружающей среды, вибрациями, нестабильностью напряжения источника питания, старением ЭП и реактивных элементов контура и других элементов схемы АГ, нестабильностью его нагрузки, создаваемой последующими каскадами).

Две основные **причины нестабильности частоты** АГ, обусловленные непосредственным изменением резонансной частоты его контура $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и изменениями параметров схемы в петле положительной обратной связи - фос .

1. Влияние изменения параметров L и C контура АГ.

$$\Delta\omega = \frac{1}{\sqrt{(L + \Delta L)(C + \Delta C)}} - \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx -\frac{\omega_0}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad \varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right)$$

Температурные коэффициенты индуктивности (ТКИ) и емкости (ТКЕ)

$$\alpha_L \approx \frac{\Delta L}{L} \Delta t^\circ; \quad \alpha_C \approx \frac{\Delta C}{C} \Delta t^\circ$$

Обычно ТКИ на уровне $10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$. ТКЕ того же порядка или меньше

Некоторые конденсаторы, обладающие отрицательным ТКЕ позволяют скомпенсировать положительные значения ТКИ индуктивностей – **термокомпенсация**. Полная термокомпенсация возможна только при определенной температуре и на одной рабочей частоте

Более эффективным является непосредственное **термостатирование** АГ, при котором обеспечивается постоянство температуры АГ при значительных изменениях температуры окружающей среды. **Недостаток** - значительно (в разы) увеличение массогабаритных размеров устройства в целом, а также резкое (в разы) увеличение потребляемой АГ вместе с термостатом мощности.

2. Действие дестабилизирующих факторов $\Delta\alpha$ на цепь обратной связи

чтобы **баланс фаз** $\varphi(\omega_{AG}, \alpha_0) = 2\pi m$ сохранился при действии $\Delta\alpha$, частота ω_{AG} должна также измениться на малую величину $\Delta\omega$

$$\varphi(\omega_{AG} + \Delta\omega, \alpha_0 + \Delta\alpha) = 2\pi m$$

Разлагая левую часть уравнения в ряд Тейлора по степеням $\Delta\omega$ и $\Delta\alpha$ в окрестности

$$\varphi(\omega_{AG}, \alpha_0) = 2\pi m$$

$$\varphi(\omega_{AG}, \alpha_0) + \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right]_{\substack{\omega=\omega_{AG} \\ \alpha=\alpha_0}} \Delta\omega + \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \right]_{\substack{\omega=\omega_{AG} \\ \alpha=\alpha_0}} \Delta\alpha + \dots = 2\pi m$$

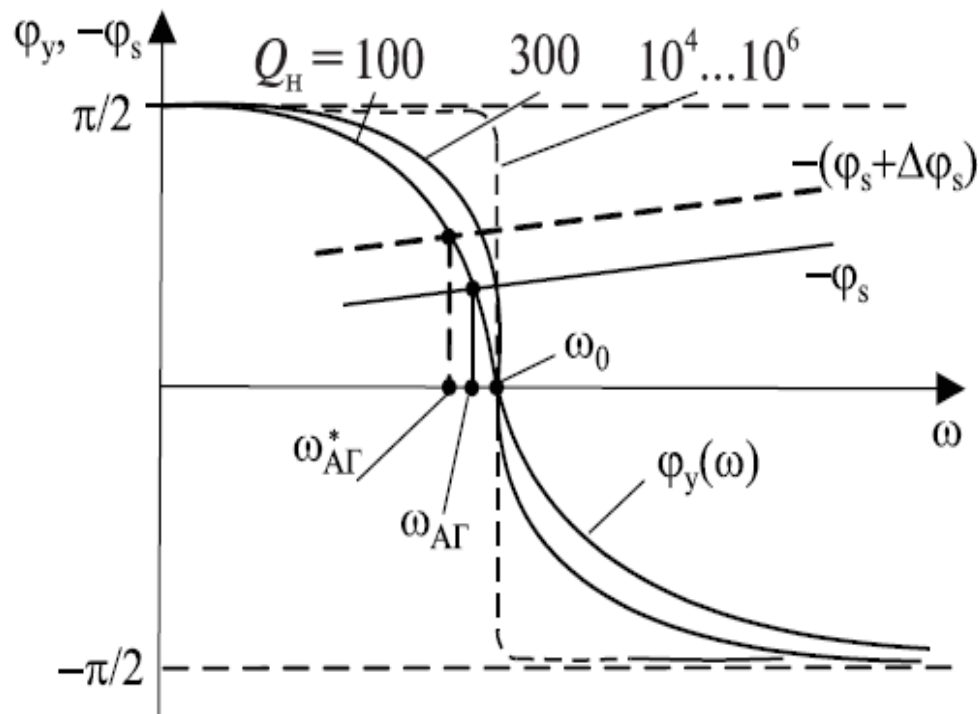
Изменение суммарного набег фазы, вызванное изменением параметра α

$$\Delta\varphi = - \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \right]_{\substack{\omega=\omega_{AG} \\ \alpha=\alpha_0}} \Delta\alpha = \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right]_{\substack{\omega=\omega_{AG} \\ \alpha=\alpha_0}} \Delta\omega$$

Отсюда, поделив на ω_{AG} найдём ε

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{AG}} = -\Delta\varphi / \omega_{AG} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right]_{\substack{\omega=\omega_{AG} \\ \alpha=\alpha_0}}$$

Стабильность частоты АГ при заданном значении $\Delta\varphi$ тем выше, чем резче суммарный фазовый сдвиг зависит от частоты автоколебаний



Стабильность частоты АГ при заданном значении $\Delta\varphi$ тем выше, чем резче суммарный фазовый сдвиг зависит от частоты автоколебаний.

Повышать добротность!

Наиболее резкая зависимость у ФЧХ контура. Чем ближе частота автогенератора ω_{AG} к резонансной частоте контура ω_0 , тем выше значения $d\varphi/d\omega$ и выше стабильность частоты.

Необходимо уменьшать φ_s , т.е. **использовать высокочастотные транзисторы с максимальной граничной частотой ω_s** . Тогда $\omega_{AG} \approx \omega_0$

$$\varphi_s + \varphi_y(\omega) = 0.$$

$$\varphi_y(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2(\omega - \omega_0)Q_H}{\omega_0}$$

После дифференцирования получим

$$\left. \frac{\partial \varphi_z}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_{AG}} \approx -\frac{2Q_H}{\omega_0}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\omega_{AG}} = -\Delta\varphi / 2Q_H$$

С соблюдением всех мер в LC АГ удаётся снизить ε

$$\Delta\omega \approx 10^{-4}$$

Автогенераторы с кварцевыми резонаторами

Позволяют на несколько порядков (практически до $10^{-6} \dots 10^{-9}$ и более) снизить ε

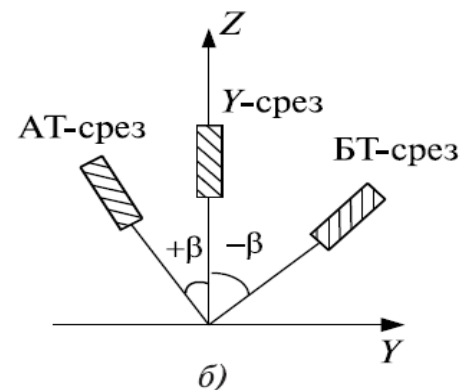
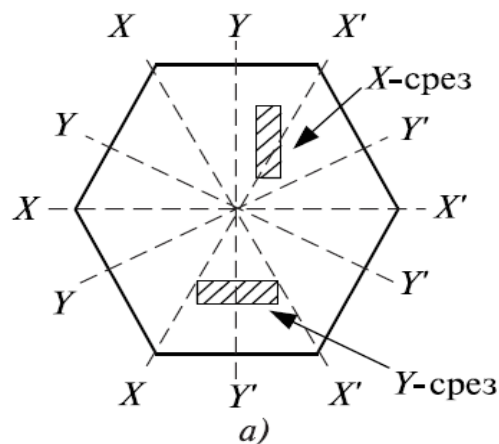
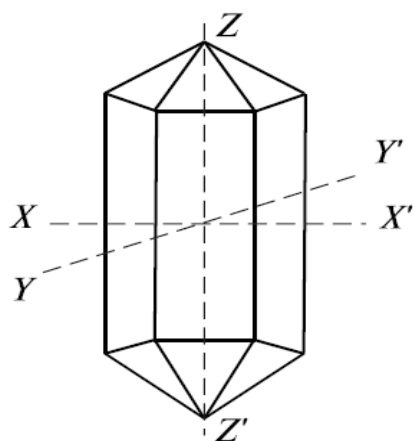
Добротность эквивалентного колебательного контура достигает $10^5 \dots 10^7$ и более, с одновременно мало изменяющимися параметрами от воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Устройство и принцип действия кварцевого резонатора

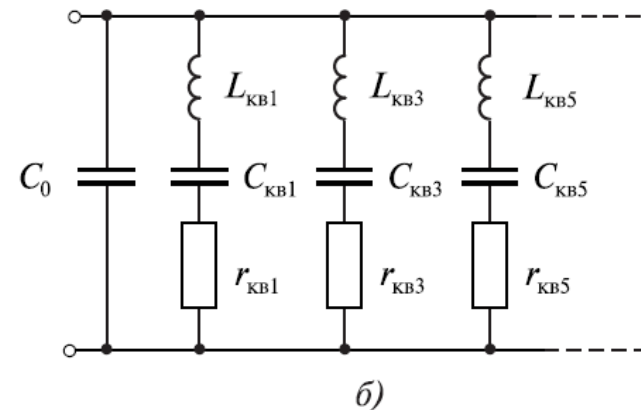
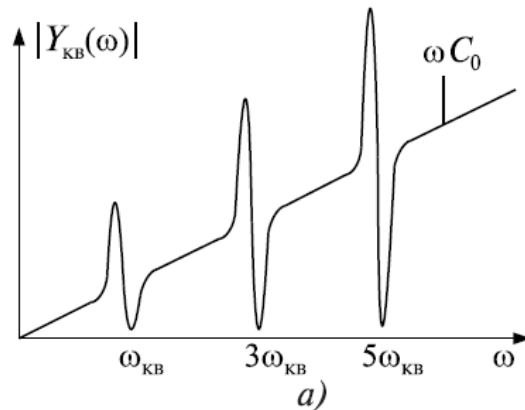
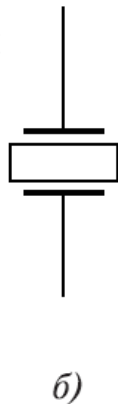
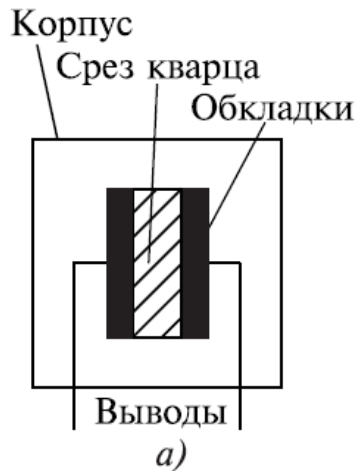
Кварцевая пластина преобразует подводимое к ней электрическое колебание в механическое и наоборот (пьезоэлектрический эффект)

Природный кварцевый минерал (пъезокварц) представляет собой кристаллическую двуокись кремния SiO_2 . Искусственно полученные кристаллы по параметрам даже превосходят природные.

Частоты АГ на кварцевых резонаторах от нескольких сотен Герц до УВЧ (500. . . 1000 МГц) зависят от размеров резонатора (от 50 мм до 50 мкм и менее) и видов механических колебаний. колебания как на основной частоте, так и на частотах **нечетных гармоник** от $n = 3; 5; 7; \dots$ и до $n = 21; 23; 25$ на частотах от ≈ 5 МГц до ≈ 1000 МГц. Кристаллы кварца имеют **форму**:



ОСИ:
оптическая ZZ' ;
электрические XX' ;
механические YY'



Эквивалентная схема кварцевого резонатора на гармониках:

Конструкция (а) и обозначение в схеме кварцевого резонатора (б)

Основная частота механических колебаний

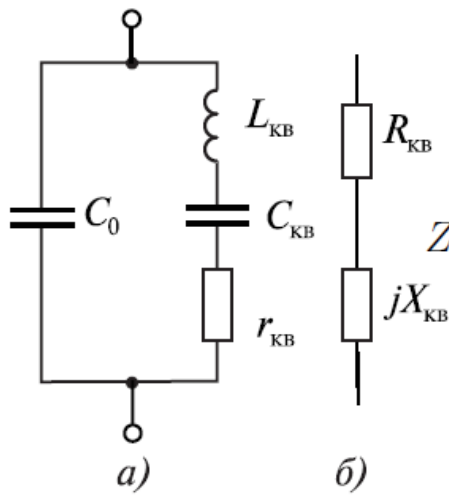
$f_{кв} = M/d$, где $M = 1,6 \dots 3$ МГц·мм (зависит от типа среза),
 d — толщина пластины среза, мм ($d > 0,1$ мм — **хрупкость!**)
 $f_{кв}$ не выше ≈ 17 МГц для среза АТ и ≈ 25 МГц для среза БТ

$L_{квn}$ отражает массу кварцевой пластины
 $C_{квn}$ — величину, обратную упругости пластины,
 $r_{квn}$ сопротивление учитывает потери
 C_0 — емкость кварцедержателя или металлизации

При работе на **механических гармониках**

АГ сразу (без умножителей) работает до 250. . . 300 МГц.

Добротность на частотах 3 и 5 гармоник даже выше в 1,5. . . 2,0 раза, чем на основной.



На основной частоте ω_{KB}

$$L_{KB} = 10^{-2} \dots 10 \text{ Гн}, C_{KB} = 10^{-2} \dots 10^{-5} \text{ пФ} \quad r_{KB} = 5 \dots 50 \text{ Ом}$$

$$C_0 = 1 \dots 8 \text{ пФ}.$$

$$Z_{KB}(\omega) = R_{KB}(\omega) + jX_{KB}(\omega).$$

$$Z_{KB}(\omega) = 1 / (j\omega C_0 + 1 / (j\omega L_{KB} + 1 / j\omega C_{KB} + r_{KB}))$$

$$\omega_{KB} = 1 / \sqrt{L_{KB} C_{KB}}.$$

$$\omega_{Посл} \geq \omega_{KB} = 1 / \sqrt{L_{KB} C_{KB}};$$

$$\omega_{Пар} \leq 1 / \sqrt{\frac{L_{KB} C_0 C_{KB}}{C_0 + C_{KB}}} = \omega_{KB} \sqrt{1 + \frac{C_{KB}}{C_0}} \approx \left(1 + 0,5 \frac{C_{KB}}{C_0}\right) \omega_{KB}$$

знаки равенства при $r_{KB} \rightarrow 0$.

$$\Delta\omega = \omega_{Пар} - \omega_{Посл} \approx \omega_{KB} 0,5 C_{KB} / C_0 \quad \Delta\omega / \omega_{KB} = 10^{-3} \dots 10^{-5}$$

индуктивное сопротивление

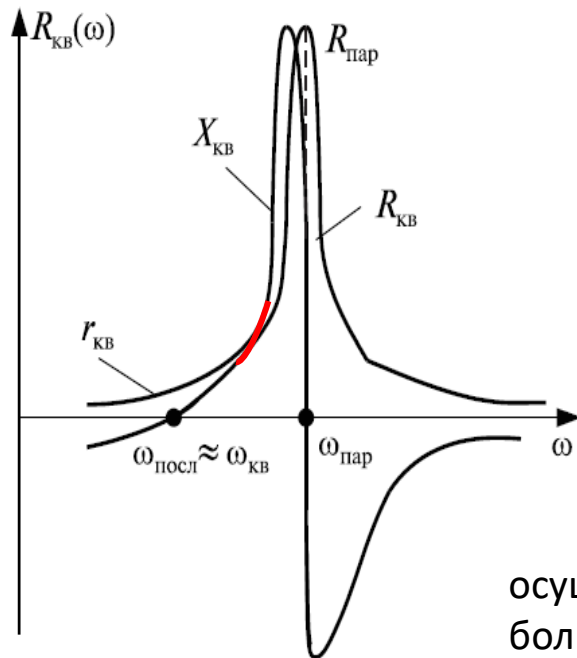
$$\rho_{KB} = \omega_{KB} L_{KB} = 1 / \omega_{KB} C_{KB} = \sqrt{L_{KB} / C_{KB}}$$

$$Q_{KB} = \rho_{KB} / r_{KB} \quad \text{от сотен тысяч до } 1 \dots 10 \text{ миллионов}$$

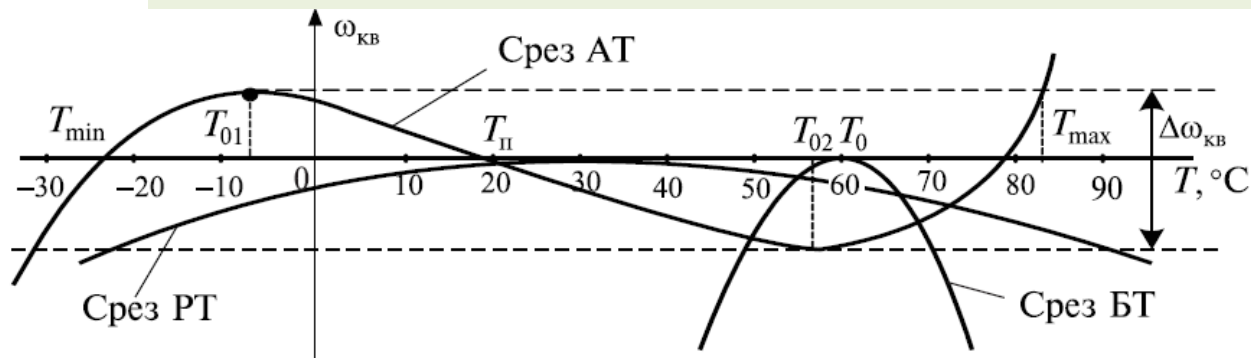
$$R_{Пар}(\omega_{Пар}) = 1 / (\omega_{KB} C_0)^2 r_{KB}.$$

осуществляется трансформация малого сопротивления $r_{KB} \rightarrow 0$ в большое сопротивление $R_{Пар} \rightarrow \infty$ (Г-цепочка в виде двухзвенного ФНЧ)

Упрощённая эквивалентная схема



Температурная зависимость частоты кварцевого резонатора.



ТКЧ кварца со срезом АТ
не более $\approx n10^{-6}$

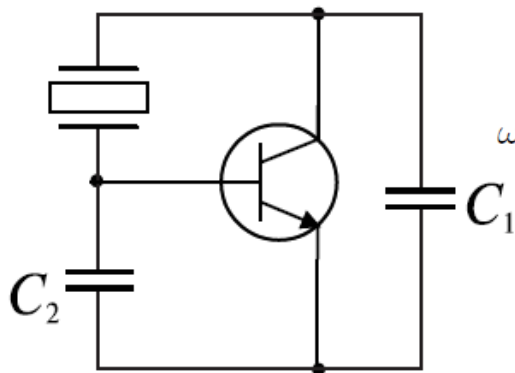
срезы БТ и РТ для
термостатированных АГ

годовое изменение частоты, обусловленное **старением** $\approx 1 * 10^{-6}$

предельный уровень мощности АГ $\approx 1 \dots 2$ мВт (для прецизионных резонаторов не более 10 мкВт)

Схемы кварцевых автогенераторов

осцилляторные и фильтровые схемы



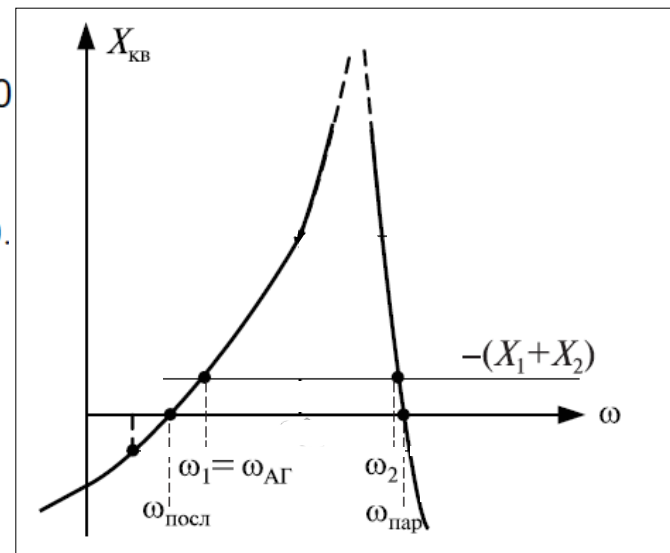
$$X_{\text{кв}}(\omega) + X_1(\omega) + X_2(\omega) = 0$$

Без учёта емкости C_0

$$\omega_{\text{АГ}} L_{\text{кв}} - \frac{1}{\omega_{\text{АГ}} C_{\text{кв}}} - \frac{1}{\omega_{\text{АГ}} C_1} - \frac{1}{\omega_{\text{АГ}} C_2} = 0.$$

$$\omega_{\text{АГ}} \approx \omega_{\text{кв}} \left(1 + \frac{1}{2} C_{\text{кв}} \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} \right)$$

Автоколебания возможны только
на частоте $\omega_{\text{АГ}} = \omega_1 \approx \omega_{\text{кв}}$.



По схеме емкостной трехточки

На частоте $\omega_2 = \omega_{\text{пар}}$ генерация невозможна. Очень большая резистивная составляющая (нет баланса амплитуд)

Фильтровые схемы АГ с кварцевым резонатором

кварцевый резонатор включается в цепь обратной связи трехточечного АГ в виде очень узкополосного полосового фильтра, который приближает частоту АГ к частоте $\omega_{\text{кв}} \approx \omega_{\text{полс}}$

через кварцевый резонатор протекает гораздо меньший ток по сравнению с контурным током эквивалентного резонансного контура осцилляторной схемы (в Q_n раз)

реальная опасность **паразитной** «бескварцевой» **автогенерации** с использованием емкости C_0 , а не самого резонатора. Её исключают **компенсацией** или **нейтрализацией** действия статической емкости C_0 .

Для **компенсации** к резонатору подключают параллельно или последовательно индуктивность $L_{\text{комп}}$, чтобы контур, образованный ей и C_0 , резонировал на частоте используемой гармоники

В схемах с **нейтрализацией** емкостная проводимость кварца компенсируется проводимостью емкости специального нейтринного конденсатора $C_{\text{нейтр}} = C_0$

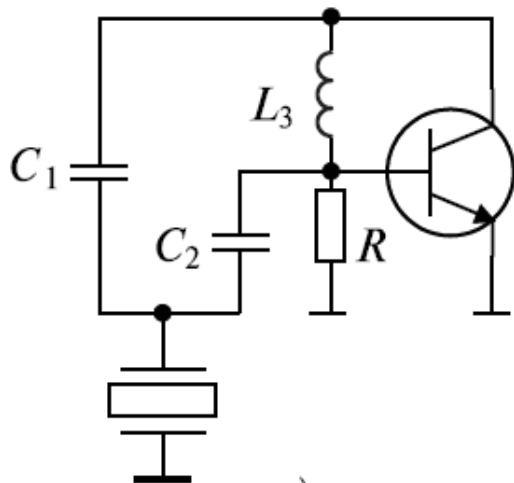
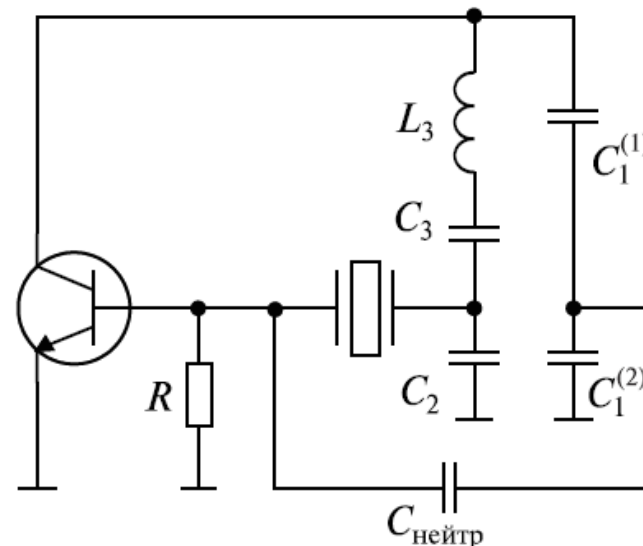


Схема с кварцевым резонатором в цепи ОС

Схемы АГ с кварцевым резонатором в цепи ОС в реализуют на предельно высоких частотах (до 250... 300 МГц) с использованием его на гармониках до $n \approx 9$ и выше.



Нейтрализация емкости C_0 в схеме Клаппа