

Лекция 2

**Элементы радиопередающих
устройств систем связи.**

Автогенераторы

Рассматриваемые вопросы

- 1 Колебательная характеристика автогенераторов
- 2 Режимы самовозбуждения автогенераторов
- 3 Автоматическое смещение в автогенераторах
- 4 Трёхточечные схемы автогенераторов
- 5 Кварцевые автогенераторы
- 6 RC-автогенераторы

1 Колебательная характеристика автогенераторов

Из уравнения баланса амплитуд $K_{yc} \cdot \beta_{oc} = 1$ можно получить выражение:

$$S_{CP} U_{mБЭ} = \frac{1}{\beta_{oc} Z_{KP}} U_{mБЭ}$$

где S_{cp} – средняя крутизна передаточной характеристики НЭ;

$U_{mБЭ}$ – напряжение база – эмиттер;

β_{oc} – коэффициент обратной связи;

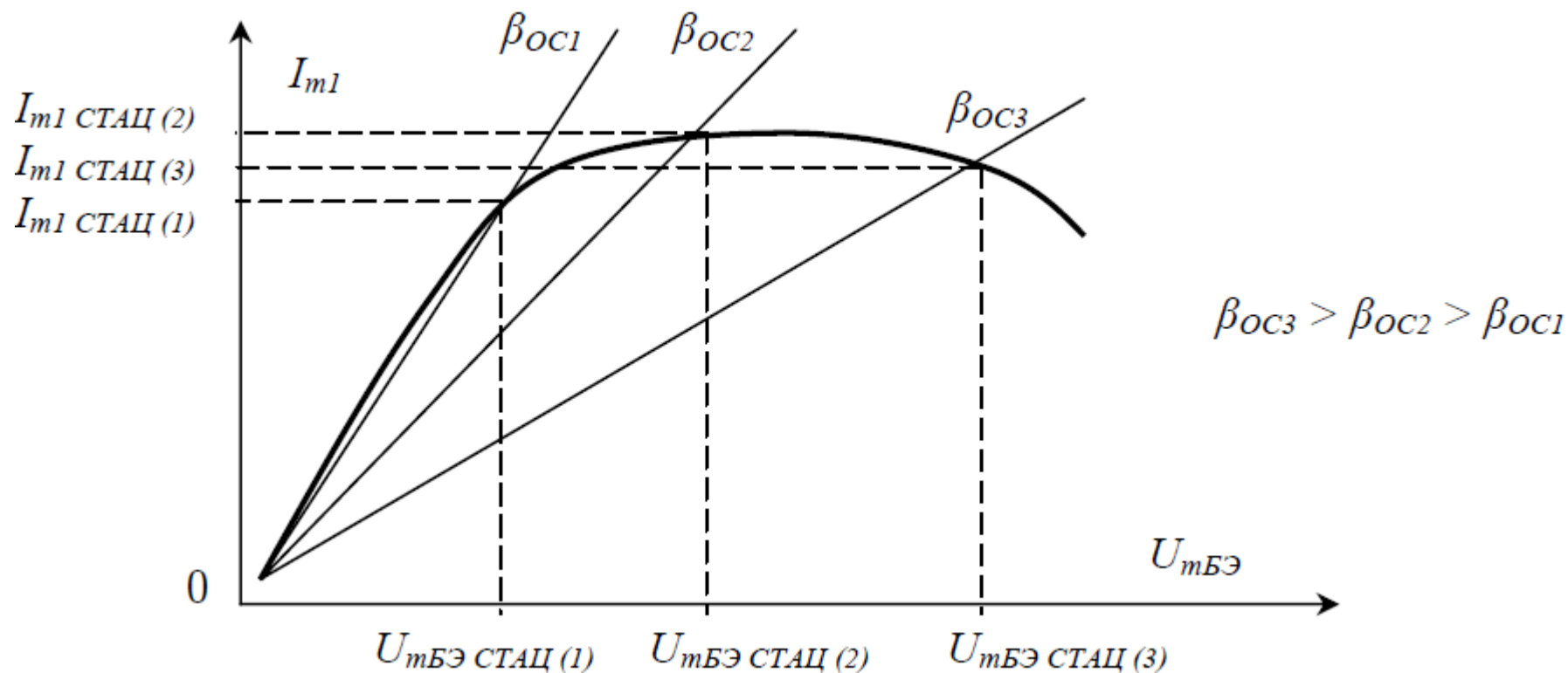
Z_{KP} – резонансное сопротивление контура.

Левая часть выражения характеризует активный нелинейный элемент (транзистор), т. е. энергию, вносимую в колебательный контур:

$$I_{m1} = S_{CP} U_{mБЭ}$$

Колебательная характеристика автогенераторов

Зависимость амплитуды первой гармоники тока I_{m1} усилительного элемента от амплитуды воздействия при постоянном смещении и разомкнутой цепи ОС называется **колебательной характеристикой**



Колебательная характеристика автогенераторов

Правая часть выражения характеризует пассивную часть схемы автогенератора – колебательный контур и цепь ПОС:

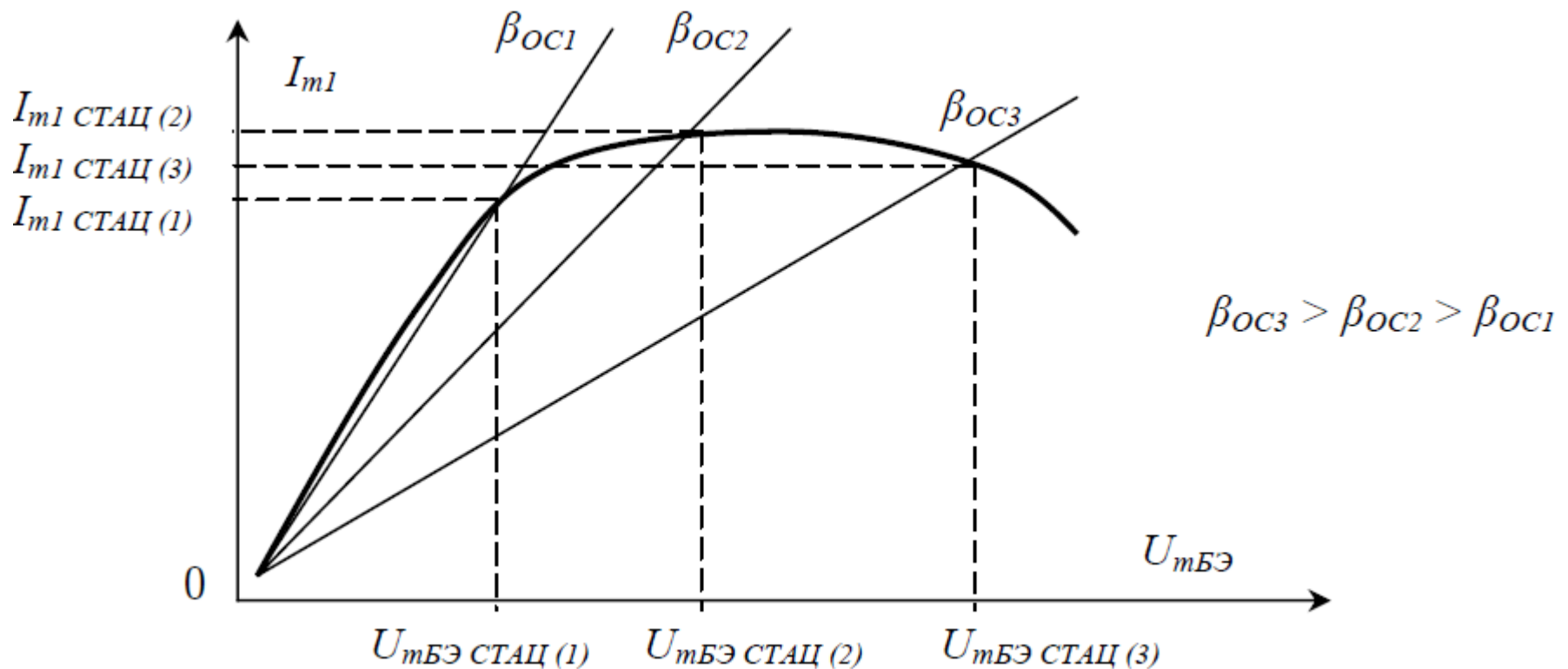
$$I_{m1} = \frac{1}{\beta_{OC} Z_{KP}} U_{mБЭ}$$

Это выражение является уравнением прямой линии, угол наклона которой зависит от β_{OC} и сопротивления контура при резонансе Z_{KP} , которое зависит от параметров контура L , C и R . Эту прямую называют **прямой ОС** (*прямой нагрузки*). Точка пересечения **колебательной характеристики** и **прямой ОС** даёт решение уравнения:

$$S_{CP} U_{mБЭ} = \frac{1}{\beta_{OC} Z_{KP}} U_{mБЭ}$$

Колебательная характеристика автогенераторов

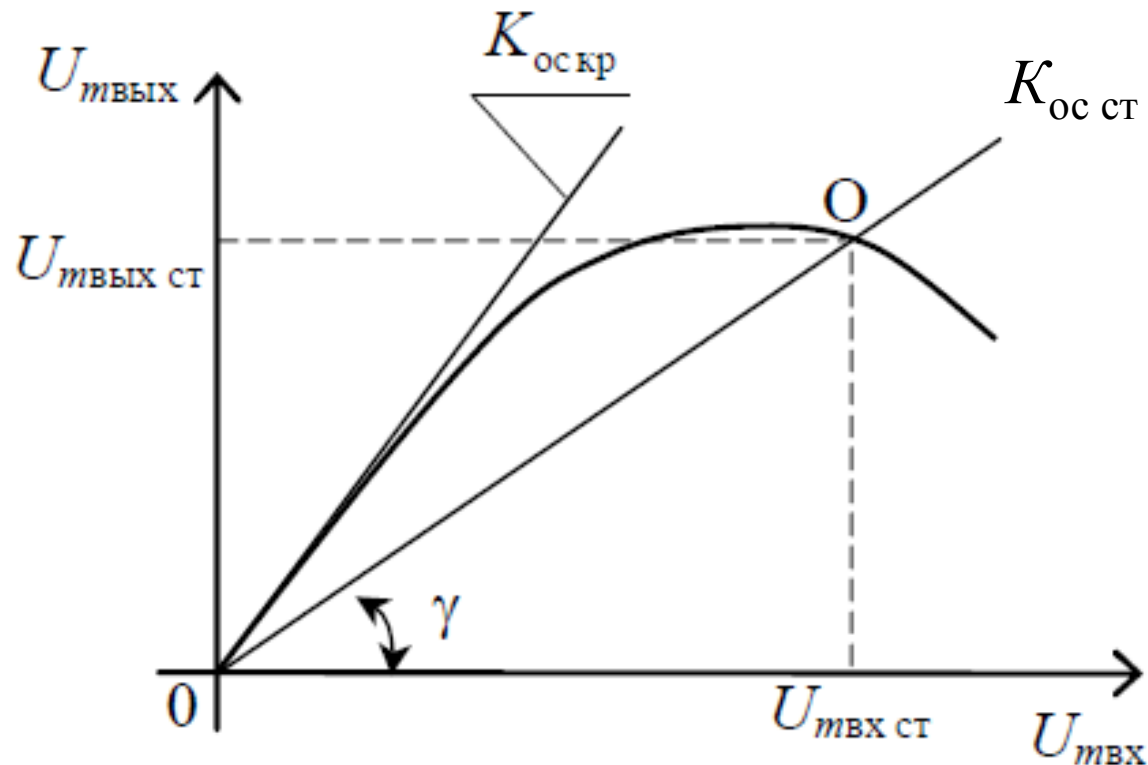
т. к. определяет стационарное значение амплитуды напряжения $U_{mБЭстат}$ и амплитуды первой гармоники тока контура $I_{m1стат}$



2 Режимы самовозбуждения автогенераторов

Различают два режима самовозбуждения: **мягкий** и **жёсткий**.

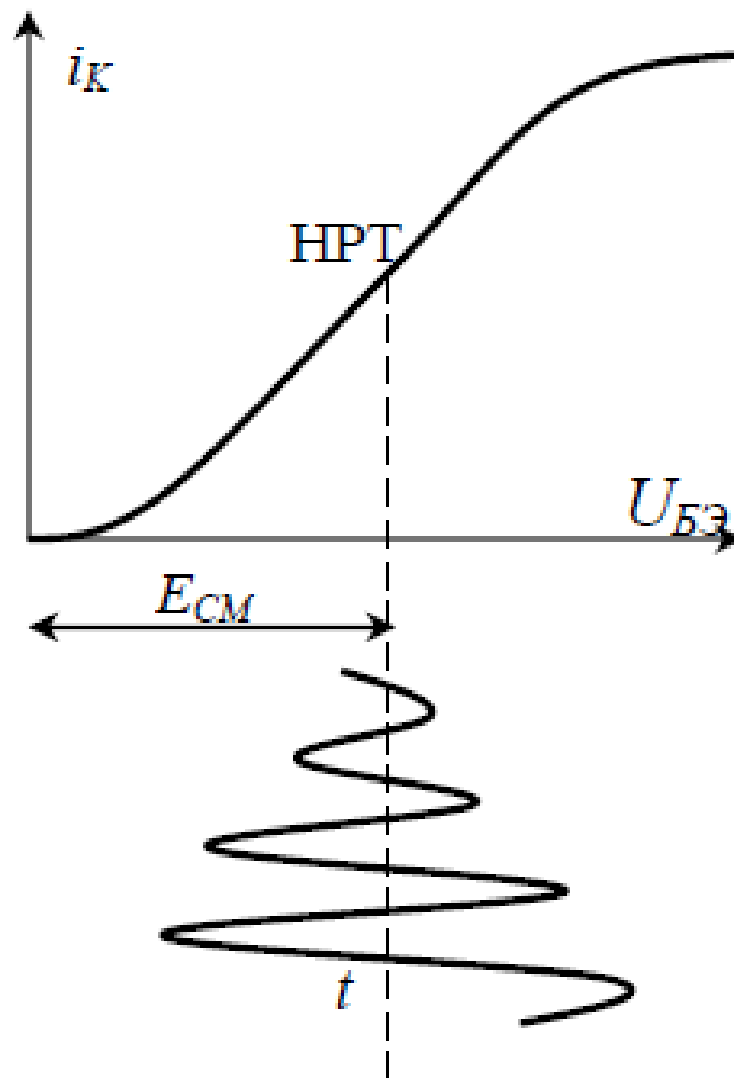
Мягкий режим возникает когда колебательная характеристика резонансного усилителя выходит из начала координат и имеет выпуклость в области малых амплитуд входного сигнала.



Колебательная характеристика

Режимы самовозбуждения автогенераторов

Условия возникновения **мягкого** режима самовозбуждения достигается путем подачи напряжения смещения, обеспечивающего положение начальной рабочей точки (НРТ) на середину наиболее линейного участка ВАХ транзистора (участка с большой крутизной передаточной характеристики).

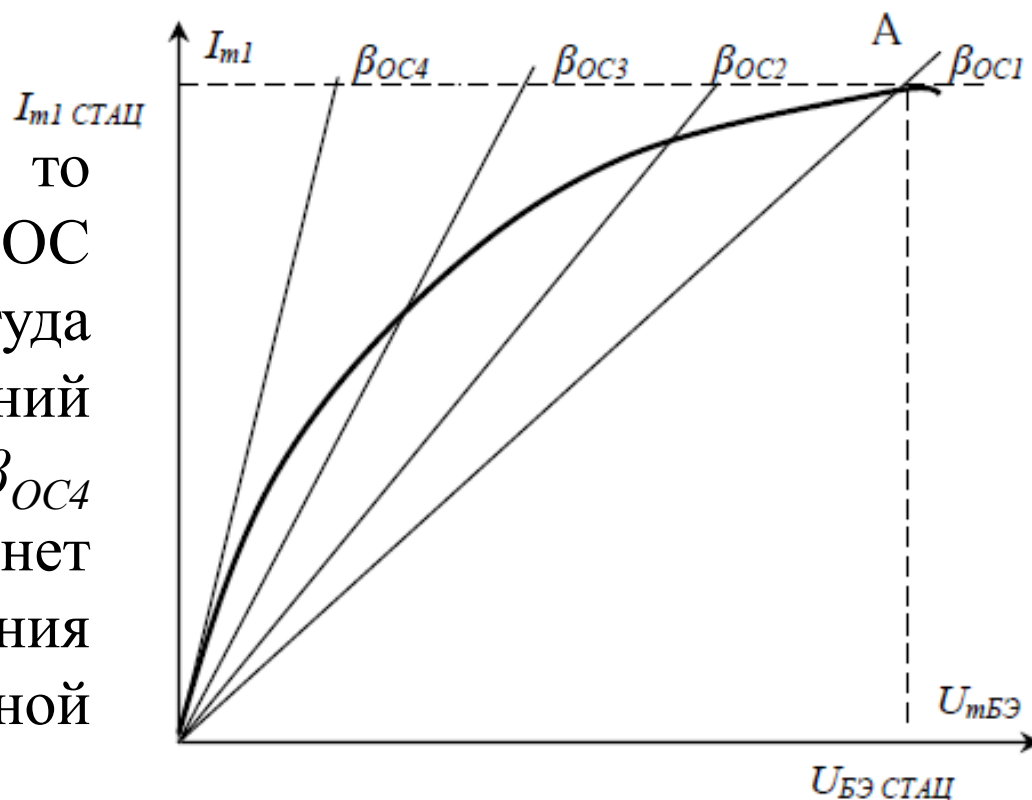


Режимы самовозбуждения автогенераторов

Правее точки А при β_{OC1} колебания возникать не будут, т. к. потери больше, чем вносимая энергия. Энергия потерь равна вносимой энергии по цепи ОС.

Точка А соответствует стационарному режиму АГ при β_{OC1} .

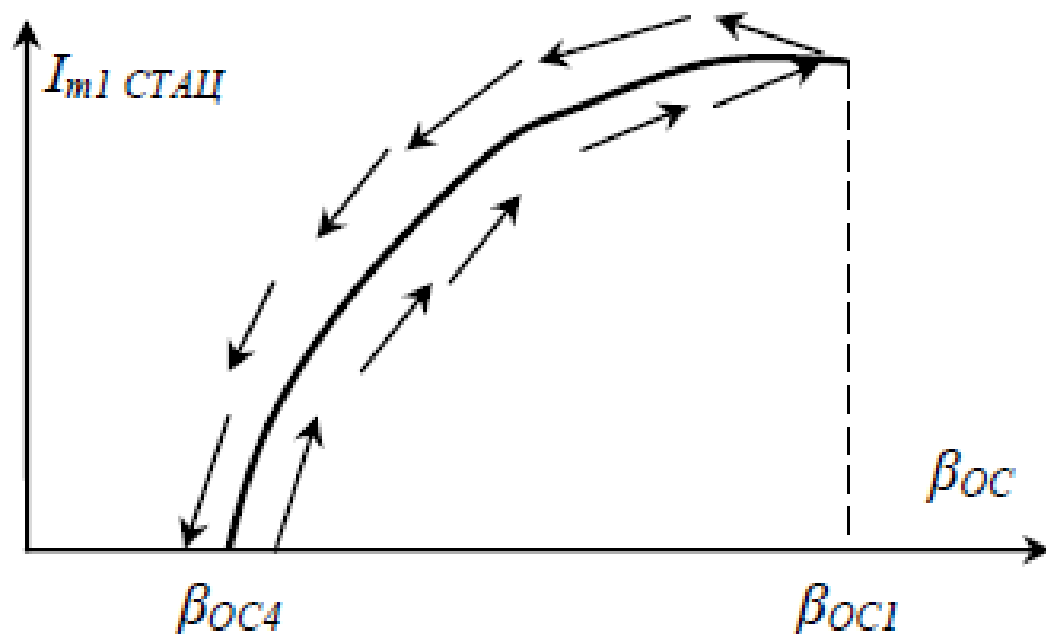
Если уменьшать β_{OC1} , то угол наклона прямой ОС увеличится, амплитуда стационарных колебаний уменьшится, и при β_{OC4} колебания исчезнут, т. к. нет общей точки пересечения прямой ОС с колебательной характеристикой.



Режимы самовозбуждения автогенераторов

Зависимость стационарной амплитуды первой гармоники тока I_{m1} от коэффициента обратной связи β_{OC} называется **регулирующей характеристикой**.

В мягком режиме колебания возникают и срываются при одном и том же значении β_{OC} .



Режимы самовозбуждения автогенераторов

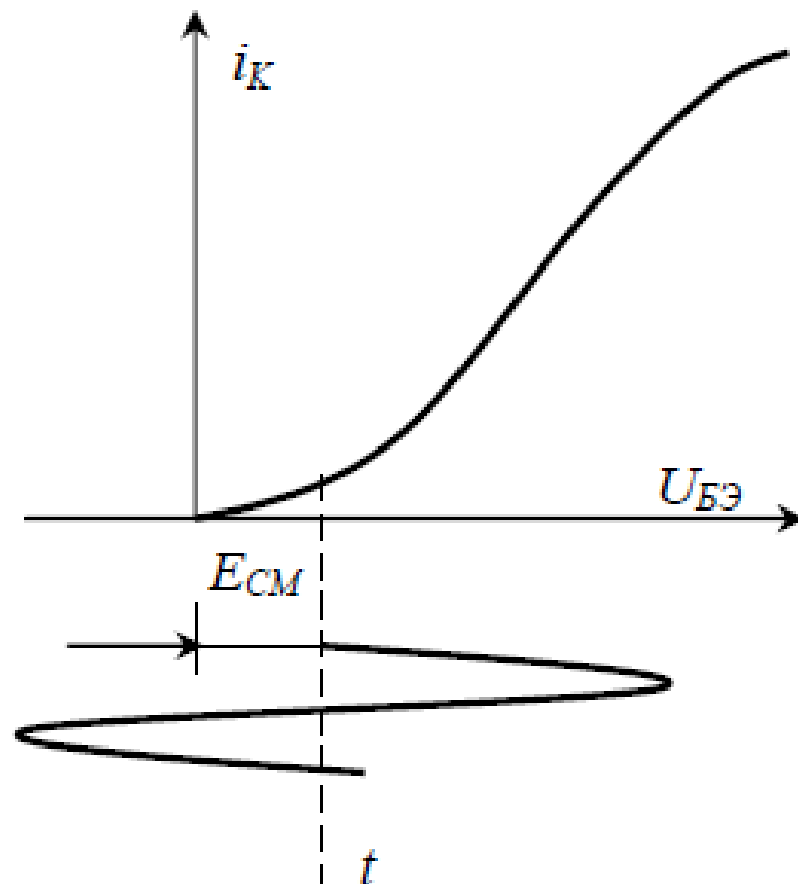
Достоинства мягкого режима заключаются в том, что колебания возбуждаются легко (мягко) при малом β_{OC} и имеется возможность плавно регулировать амплитуду колебаний изменением β_{OC} .

Недостаток мягкого режима заключается в том, что генератор работает без отсечки тока, в режиме энергетически невыгодном. На НЭ рассеивается большая мощность, он находится в тяжёлом тепловом режиме. КПД автогенератора низкий.

Режимы самовозбуждения автогенераторов

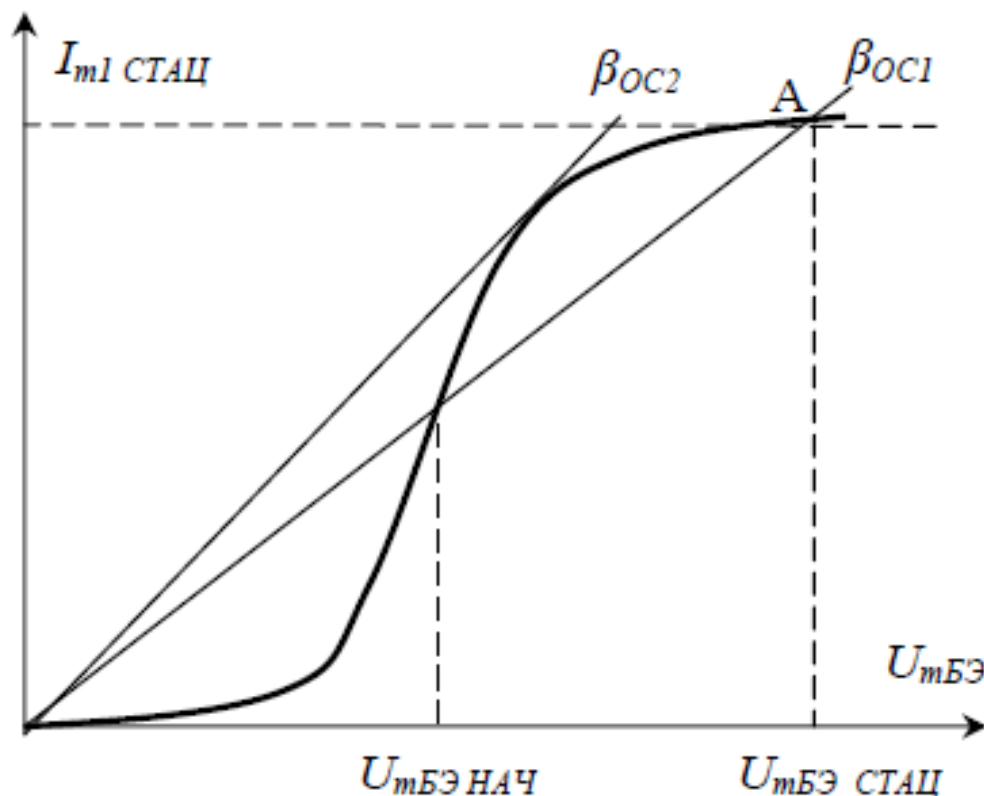
Жёсткий режим самовозбуждения АГ осуществляется при выборе начальной рабочей точки (НРТ) усиительного элемента на участке с малой крутизной.

В жёстком режиме колебательная характеристика имеет начальный участок с малой крутизной.



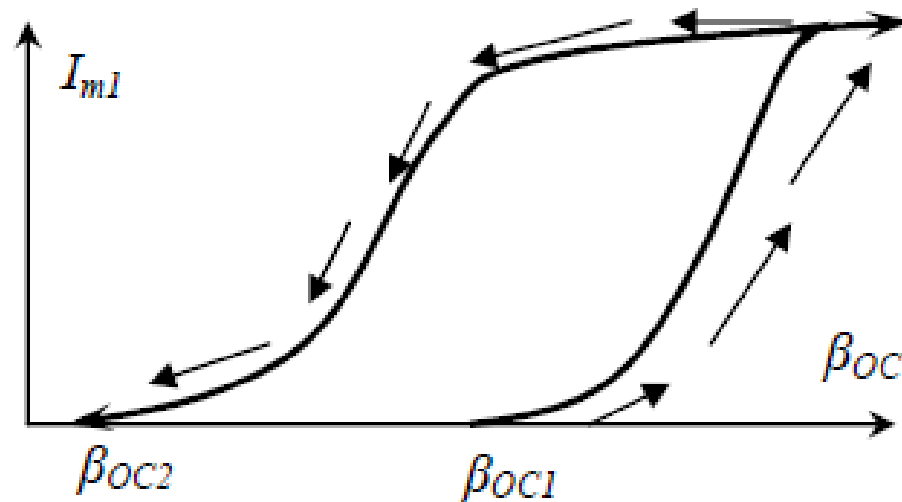
Режимы самовозбуждения автогенераторов

Поэтому при β_{OC1} колебания могут возникнуть только при внешнем возбуждении (толчке) с амплитудой большей, чем $U_{mБЭНАЧ}$, и будут нарастать до точки «А» $I_{m1СТАЦ}$.



Режимы самовозбуждения автогенераторов

Регулировочная характеристика при жёстком режиме отличается от мягкого режима. Возбуждение колебаний происходит при большем β_{OC} , по сравнению с β_{OC} срыва колебаний.



При «толчке» $U_{mБЭ.НАЧ}$ возбуждение колебаний осуществляется при β_{OC1} , а срыв – при β_{OC2} . Первоначальный толчок осуществляется за счёт возникновения колебаний в момент включения источника питания.

Если толчок в момент включения источника питания меньше $U_{mБЭ}$, колебания в АГ не возникнут.

Режимы самовозбуждения автогенераторов

Достоинством жёсткого режима является то, что автогенератор работает с отсечкой тока, т. е. в энергетически выгодном режиме с высоким КПД. Усилительный элемент работает в лёгком тепловом режиме.

Недостаток жёсткого режима заключается в том, что колебание возникает тяжело (жёстко) при определённом толчке и большом β_{OC} , амплитуда нарастает резко и трудно поддается регулировке.

3 Автоматическое смещение в автогенераторах

Для надежного запуска автогенератора точка покоя должна находиться на середине линейного участка ВАХ транзистора, что соответствует нулевому напряжению смещения между затвором и истоком полевого транзистора или положительному напряжению смещения база – эмиттер для биполярного транзистора. Однако этот режим характеризуется малым значением КПД. При переходе в стационарный режим целесообразно уменьшить напряжение смещения, так как это увеличит КПД автогенератора. Для того чтобы АГ возбуждался в мягком режиме, а в стационарном состоянии работал в энергетически выгодном жестком режиме (режиме с отсечкой тока), применяют автоматическое смещение на управляющий электрод усилительного элемента.

Автоматическое смещение в автогенераторах

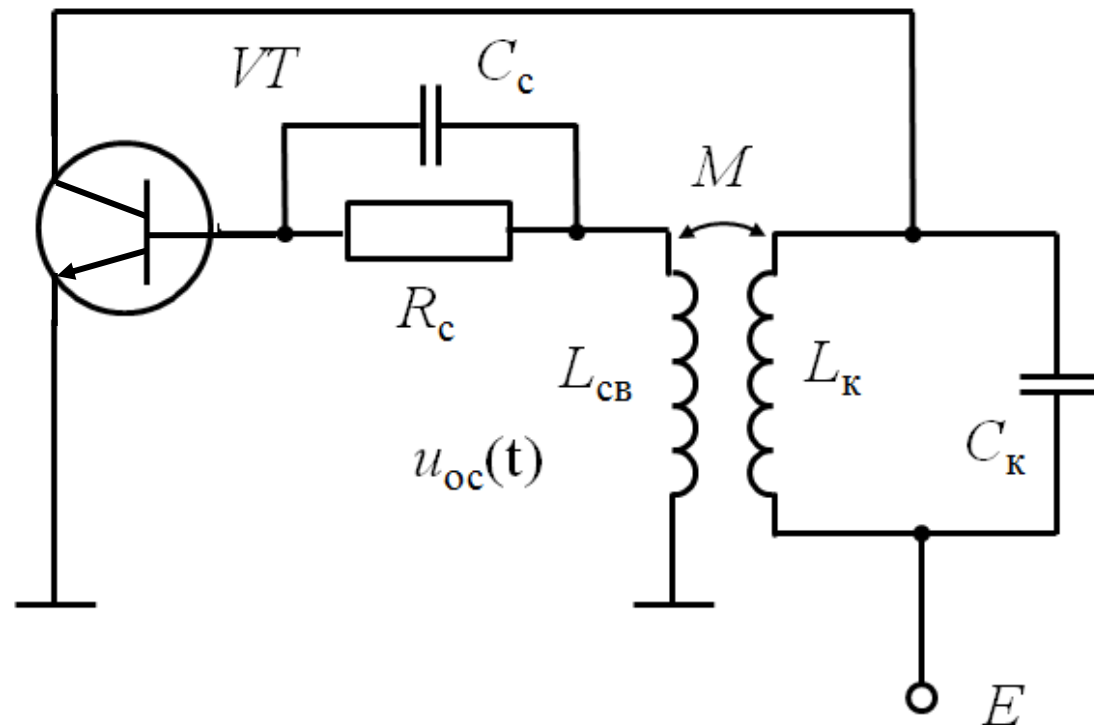
Цепь автоматического смещения можно реализовать с помощью резистора R_c и конденсатора C_c , которые включают параллельно в цепь затвора полевого или в цепь базы биполярного транзистора.

- коэффициент обратной связи:

$$K_{oc} = \frac{M}{L_K}$$

- резонансная частота контура

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}}$$



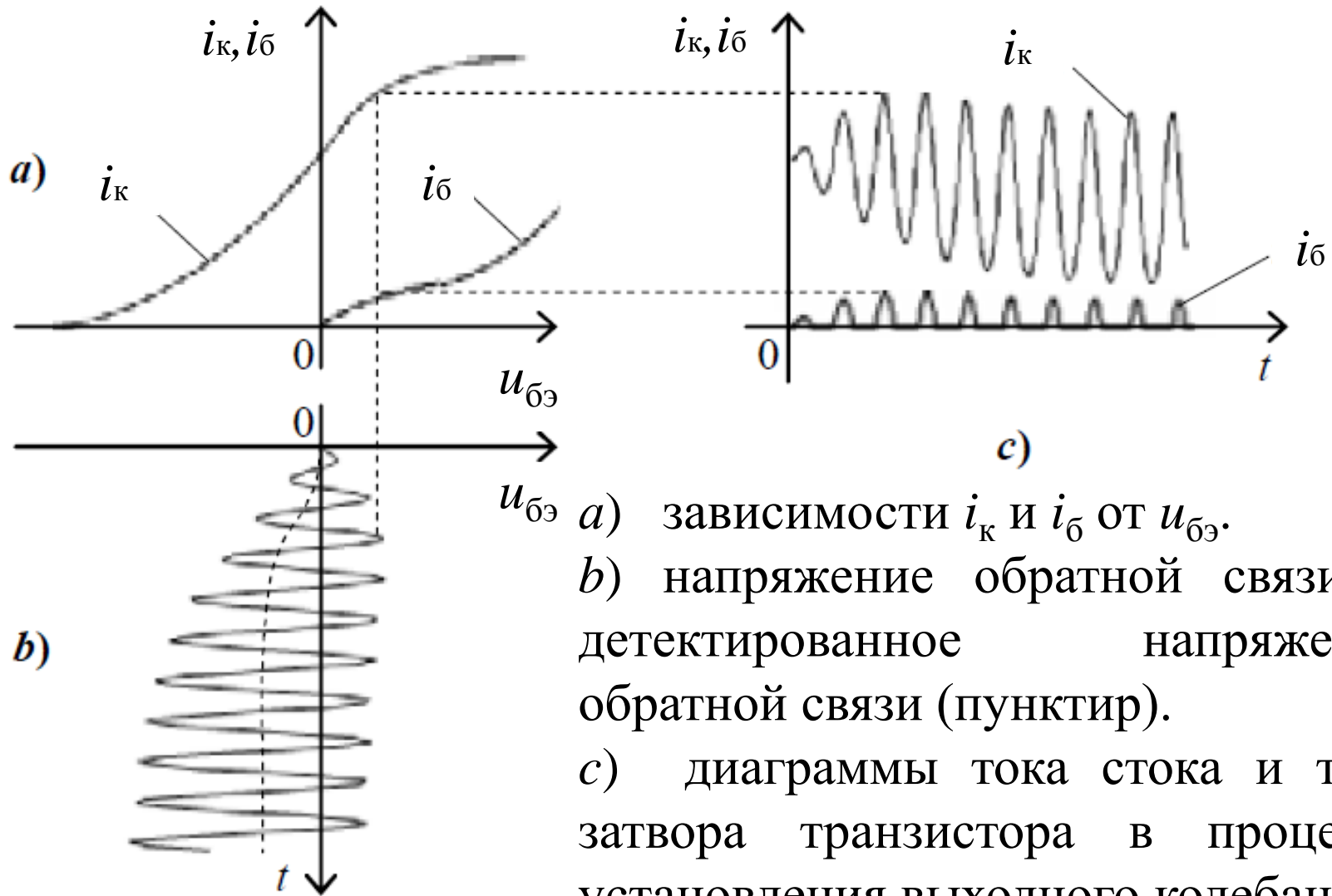
Автоматическое смещение в автогенераторах

Переход база-эмиттер биполярного транзистора представляет собой диод для тока базы. Этот диод совместно с сопротивлением R_c и конденсатором C_c образует амплитудный детектор. При запуске автогенератора на индуктивности связи $L_{св}$ возникает высокочастотное напряжение обратной связи.

Это напряжение преобразуется указанным амплитудным детектором в медленно изменяющееся напряжение.

При этом рабочая точка транзистора смещается в сторону его запираения.

Автоматическое смещение в автогенераторах



a) зависимости i_k и i_b от $u_{бэ}$.

b) напряжение обратной связи и детектированное напряжение обратной связи (пунктир).

c) диаграммы тока стока и тока затвора транзистора в процессе установления выходного колебания.

4 Трёхточечные схемы автогенераторов

Если колебательный контур автогенератора подключён к активному нелинейному элементу тремя точками, то такая схема АГ называется **трёхточечной**.

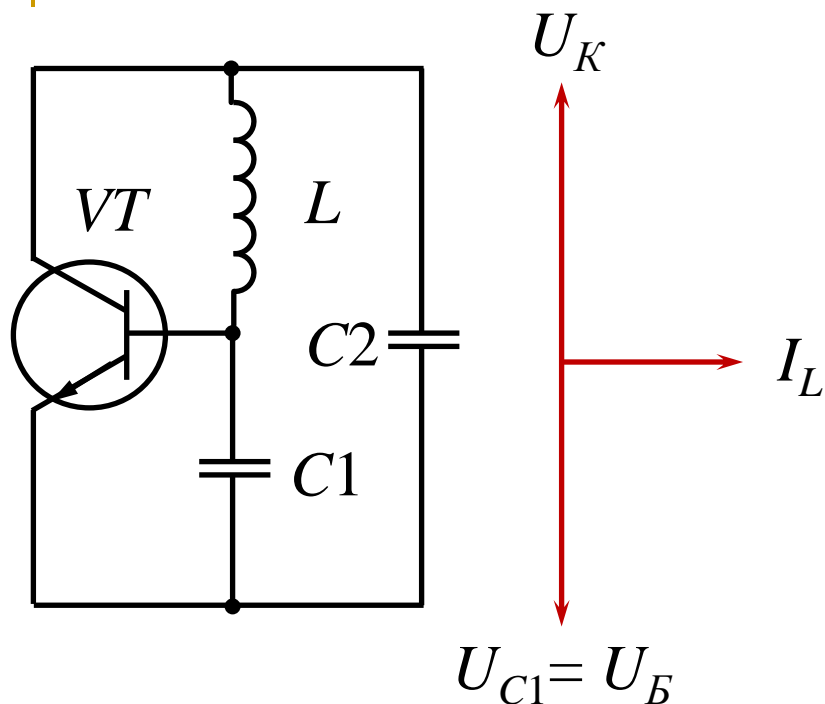
Фазовые условия в транзисторной трёхточечной схеме АГ с общим эмиттером в идеальном случае выполняются тогда, когда фазы напряжений на элементах контура, подключённых коллектору и базе, противоположны.

Учитывая, что сдвиг фаз в идеальном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ равен 180° , суммарный сдвиг фаз в кольце ОС будет равен 360° .

Это возможно в двух вариантах схемы автогенератора :

- первая называется **ёмкостной трёхточкой**,
- вторая называется **индуктивной трёхточкой**.

Трёхточечные схемы автогенераторов



Ёмкостная трёхочка и
ее фазовый портрет

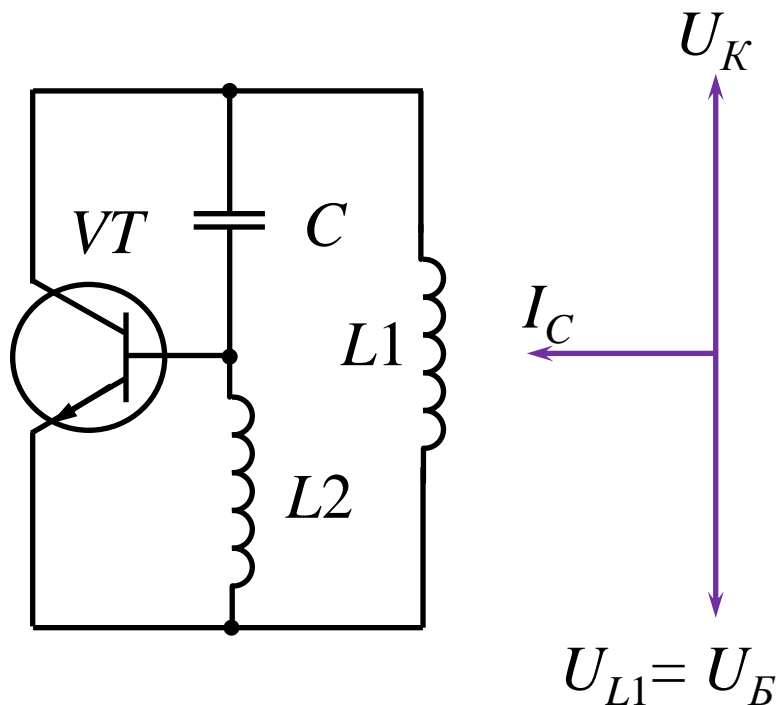
В ёмкостной трёхточечной схеме положительная ОС осуществляется за счёт ёмкостного делителя $C1, C2$.

Амплитудные условия самовозбуждения определяются соотношением ёмкостей $C2/C1$, чем оно меньше, тем глубже ПОС, обычно $C2 \ll C1$. Поэтому ёмкостью $C2$ определяется ёмкость контура $C_K \approx C2$.

$$f_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_K}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_2}}$$

Частота генерируемых колебаний

Трёхточечные схемы автогенераторов



В индуктивной трёхточечной схеме обратная связь автотрансформаторная.

Амплитудные условия самовозбуждения для этой схемы выполняются отношением $L1/L2$.

Чем больше это отношение, тем глубже ПОС.

Обычно $L1 \gg L2$.

Индуктивная трёхочка
и ее фазовый портрет

Частота генерируемых колебаний

$$f_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}$$

Трёхточечные схемы автогенераторов

Правило построения трёхточечных схем заключается в следующем:

- если между коллектором и базой индуктивный характер сопротивления, то между коллектором и эмиттером, базой и эмиттером ёмкостный характер сопротивления;
- если между коллектором и базой ёмкостный характер сопротивления, то между коллектором и эмиттером, базой и эмиттером индуктивный характер сопротивления.

В этих случаях в трёхточечных схемах АГ выполняются фазовые условия возбуждения электрических колебаний.

5 Кварцевые автогенераторы

Кварцевая пластина представляет собой в эквиваленте колебательную систему высокой добротности.

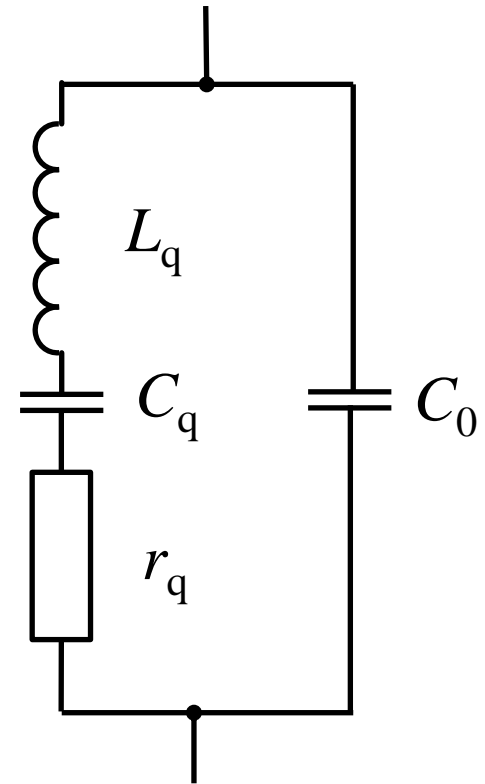
В такой колебательной системе резонанс наблюдается на двух частотах:

- последовательный резонанс на частоте

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}}$$

- параллельный резонанс на частоте

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0}}}$$

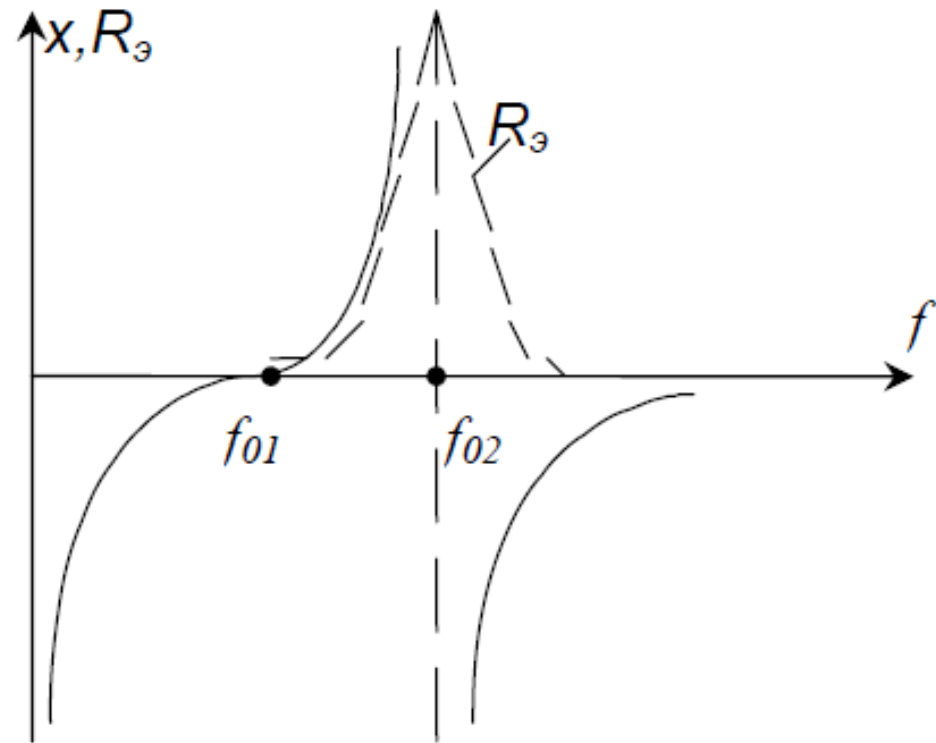


Кварцевые автогенераторы

Частоты f_{01} и f_{02} близки между собой и отличаются на 0,25 % от резонансной частоты при $C_0 / C_q \approx 2000$. На частоте f_{01} сопротивление кварцевого резонатора носит активный характер и имеет малую величину, на частоте f_{02}

сопротивление кварцевого резонатора носит активный характер и имеет большую величину.

В интервале частот $f_{01} - f_{02}$ сопротивление кварцевого резонатора носит индуктивный характер.



Кварцевые автогенераторы

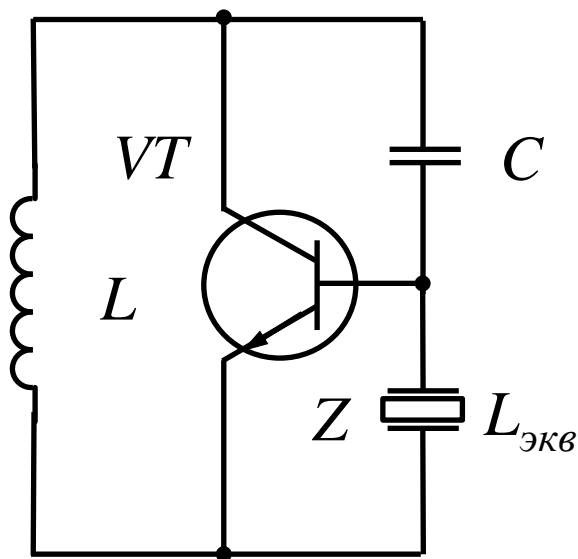
Вследствие того, что частоты f_{01} и f_{02} стабильны, то используя кварцевый резонатор в АГ в качестве последовательного колебательного контура или индуктивности, можно получить высокую стабильность частоты АГ. Относительная нестабильность частоты кварцевых АГ лежит в пределах $10^{-6} - 10^{-10}$.

Кварцевые генераторы широко применяются в технике связи для стабилизации частоты АГ. Для повышения стабильности частоты кварцевого генератора кварцевый резонатор или весь генератор помещают в термостат и питают генератор от стабилизированного источника питания.

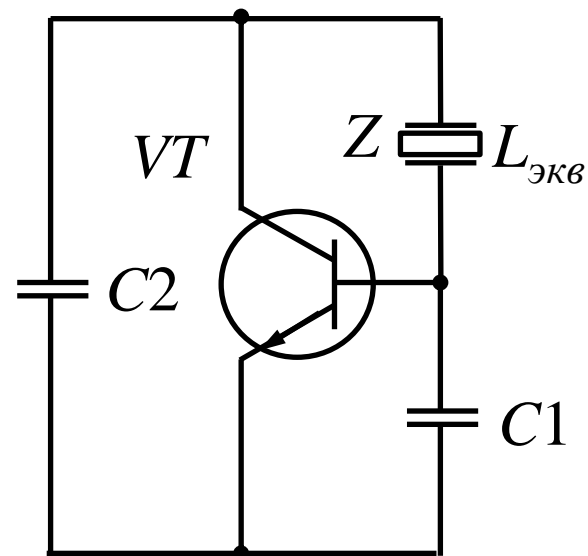
В кварцевых АГ, построенных по трёхточечной схеме, на генерируемой частоте кварцевая пластина имеет индуктивный характер сопротивления, т. е. $f_{\text{ГЕН}}$ лежит в пределах $f_{01} - f_{02}$.

Кварцевые автогенераторы

Осцилляторная схема кварцевого генератора, работающего на частоте параллельного резонанса (схема емкостной трёхточки).



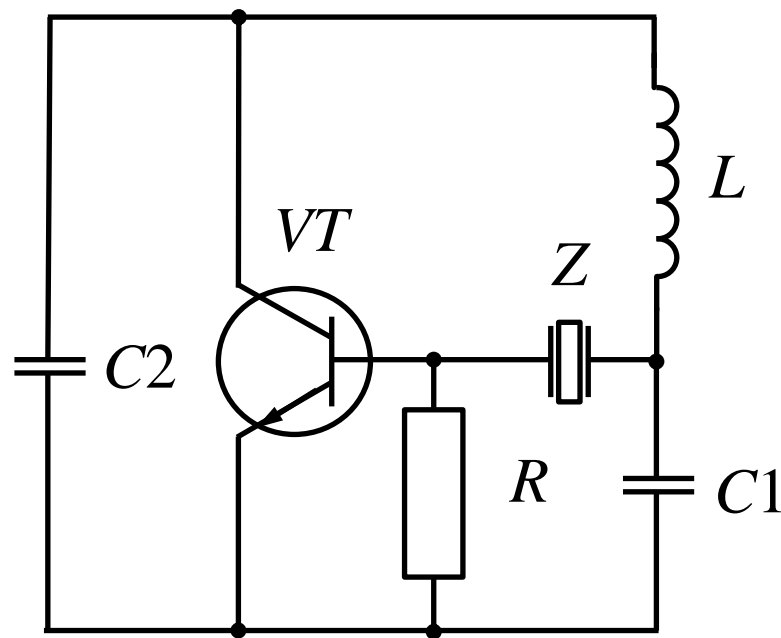
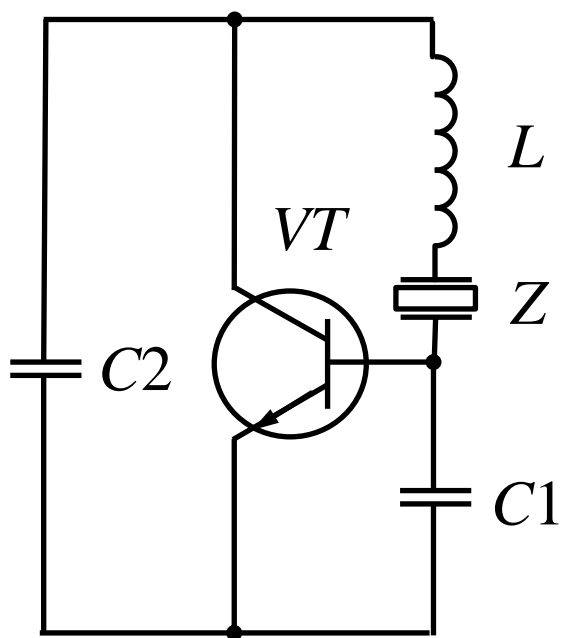
При включении кварцевого резонатора между базой и эмиттером, получается АГ по схеме индуктивной трёхточки



Кварцевые автогенераторы

Кварцевый резонатор на частоте f_{01} имеет малое активное сопротивление. Это свойство используется в схеме АГ, где кварцевый резонатор стоит в цепи ОС.

Схемы работающие на частоте последовательного резонанса:



6 RC-автогенераторы

LC – автогенераторы эффективны для получения высокочастотных колебаний. В соответствии с формулой Томпсона уменьшение частоты автоколебаний в таких автогенераторах возможно путем увеличением индуктивности L_k и емкости C_k колебательного контура.

Это приводит к существенному увеличению габаритов LC –автогенераторов на низких частотах. Поэтому для получения колебаний на частотах менее 100 кГц LC –автогенераторы не применяют.

Для этих целей широко используют **RC – автогенераторы**. Эти автогенераторы стоят на основе широкополосного (апериодического) усилителя, а в цепь обратной связи включают RC – фильтр.

РС-автогенераторы

Основой такого генератора является усилитель, имеющий равномерную частотную характеристику в широком диапазоне частот (идеальный усилитель). В реальных схемах роль идеального усилителя могут выполнять операционные усилители, или другие широкополосные усилители.

Сигнал с выхода усилителя через цепи обратной связи подается на его вход (обратная связь по напряжению).

Используется две цепи обратной связи – частотно-зависимая и частотно-независимая.

Частотно-независимая обратная связь задает коэффициент усиления широкополосного усилителя. Как правило, это резистивный делитель. Частотно-зависимая обратная связь обеспечивает возникновение автоколебаний на заданной частоте.

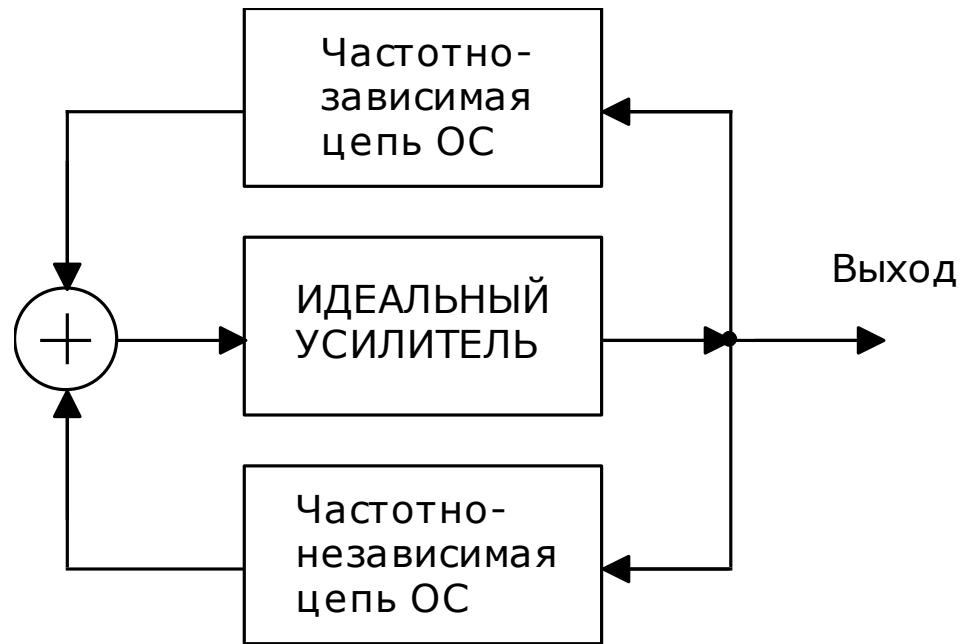
Как правило, это цепь с явно выраженным пиком амплитудно-частотной характеристики (максимумом или минимумом).

РС-автогенераторы

Структурная схема генератора практически не отличается от схемы избирательного усилителя (только отсутствует вход для подачи сигнала.)

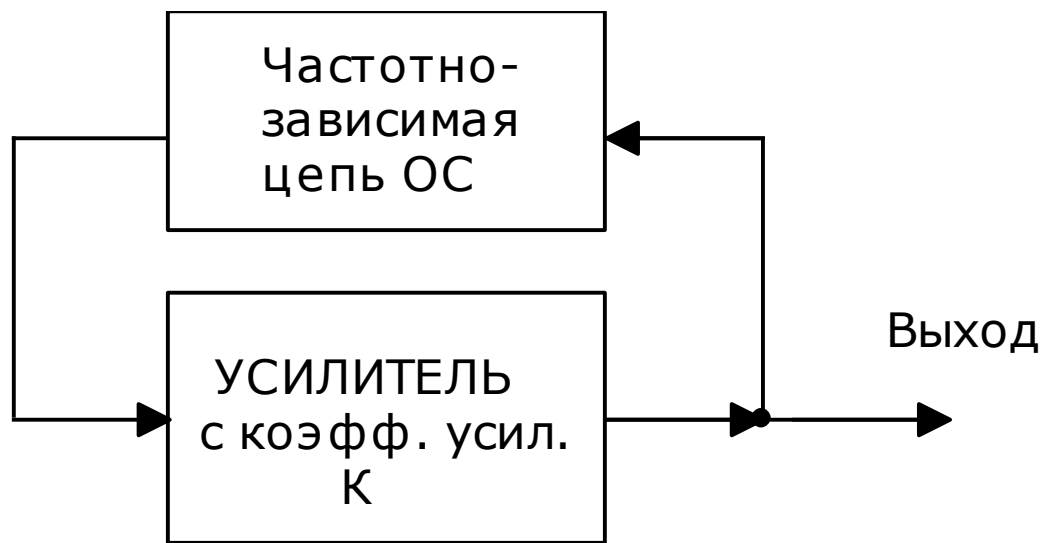
Практические схемы также почти не отличаются по структуре.

В каком режиме работает схема (избирательный усилитель или генератор) определяется лишь параметрами схемы (коэффициентом усиления). Если в схеме генератора повысить коэффициент усиления усилителя выше определенного значения, то возникнет генерация (самовозбуждение усилителя). Этот коэффициент усиления называют критическим коэффициентом усиления $K_{кр}$.



РС-автогенераторы

Для анализа работы генератора удобнее частотно-независимую цепь не выделять отдельно, а рассматривать вместе с идеальным усилителем в виде широкополосного усилителя с заданным коэффициентом усиления по напряжению K_U .



Обобщенная структура автогенератора

Для возникновения автоколебаний в генераторе должно быть выполнено два условия: **баланс фаз** и **баланс амплитуд**.

РС-автогенераторы

Если частотно-зависимая ОС на частоте предполагаемой генерации поворачивает фазу на 2π , то используется инвертирующий усилитель, который также поворачивает фазу на π , чтобы суммарный сдвиг фаз стал равным 2π (что обеспечивает выполнение условия **баланса фаз**).

Если частотно-зависимая обратная связь на частоте предполагаемой генерации поворачивает фазу на 0 или 2π , то используется неинвертирующий усилитель (что также обеспечивает выполнение **баланса фаз**).

Для обеспечения баланса амплитуд необходимо знать $K_{чз}$ – коэффициент передачи звена частотно-зависимой ОС на частоте предполагаемой генерации, а потом выбором соответствующей частотно-независимой ОС обеспечить необходимый коэффициент усиления усилителя.

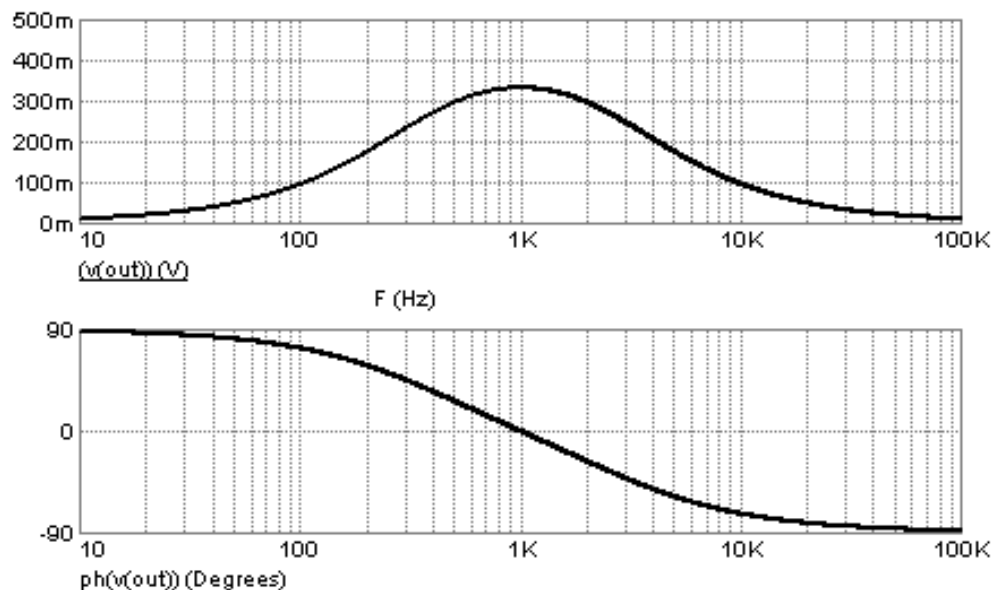
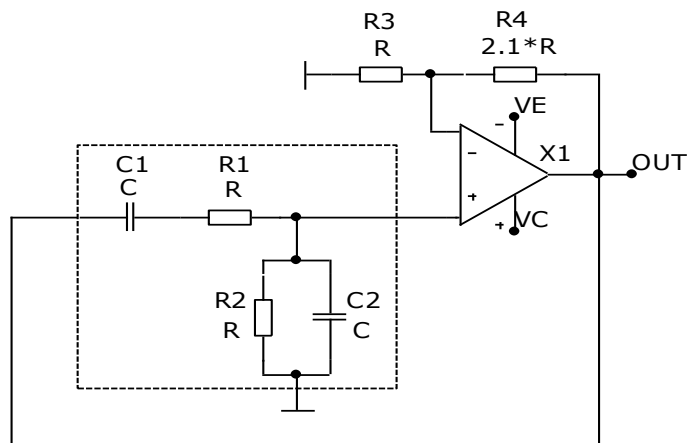
Условие соблюдения **баланса амплитуд** $K_U > 1 / K_{чз}$.

РС-автогенераторы

Значение $K_U=1/K_{\text{чз}}$ называют критическим коэффициентом усиления $K_{\text{кр}}$. Если $K_U < K_{\text{кр}}$, то автоколебания генераторе существовать не могут. Если $K_U = K_{\text{кр}}$, то они могут существовать, но не могут самопроизвольно возникнуть – при включении такого генератора колебания не возникнут. Но если их предварительно каким-либо образом создать, то они будут поддерживаться. Если $K_U > K_{\text{кр}}$, то колебания возникнут, и их амплитуда будет все время нарастать (теоретически до бесконечности, практически – до значений напряжения питания или других ограничивающих факторов).

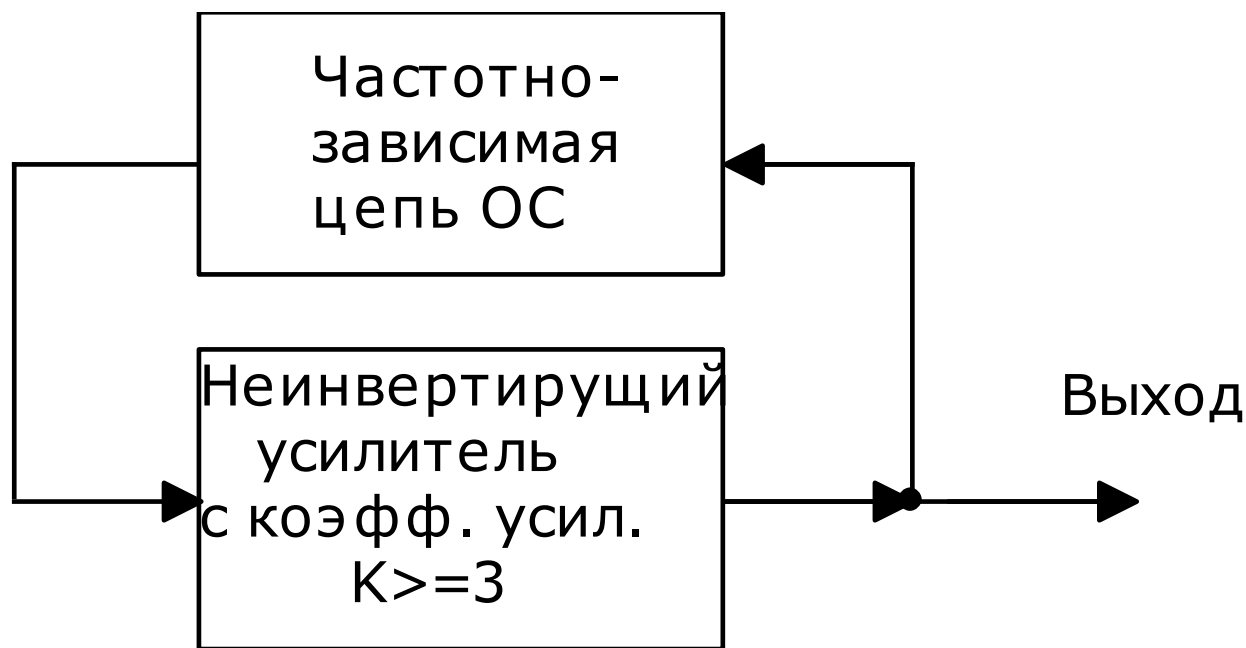
RC-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

Мост Вина на частоте квазирезонанса имеет максимум коэффициента передачи и поворот фазы, равный нулю. При построении генератора для соблюдения баланса фаз необходимо использовать неинвертирующий усилитель. Для моста Вина при $R_1=R_2=R$ и $C_1=C_2=C$ частота квазирезонанса $\omega_0 = 1/RC$, а коэффициент передачи на частоте квазирезонанса $U_{OUT}/U_{IN}=1/3$



RC-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

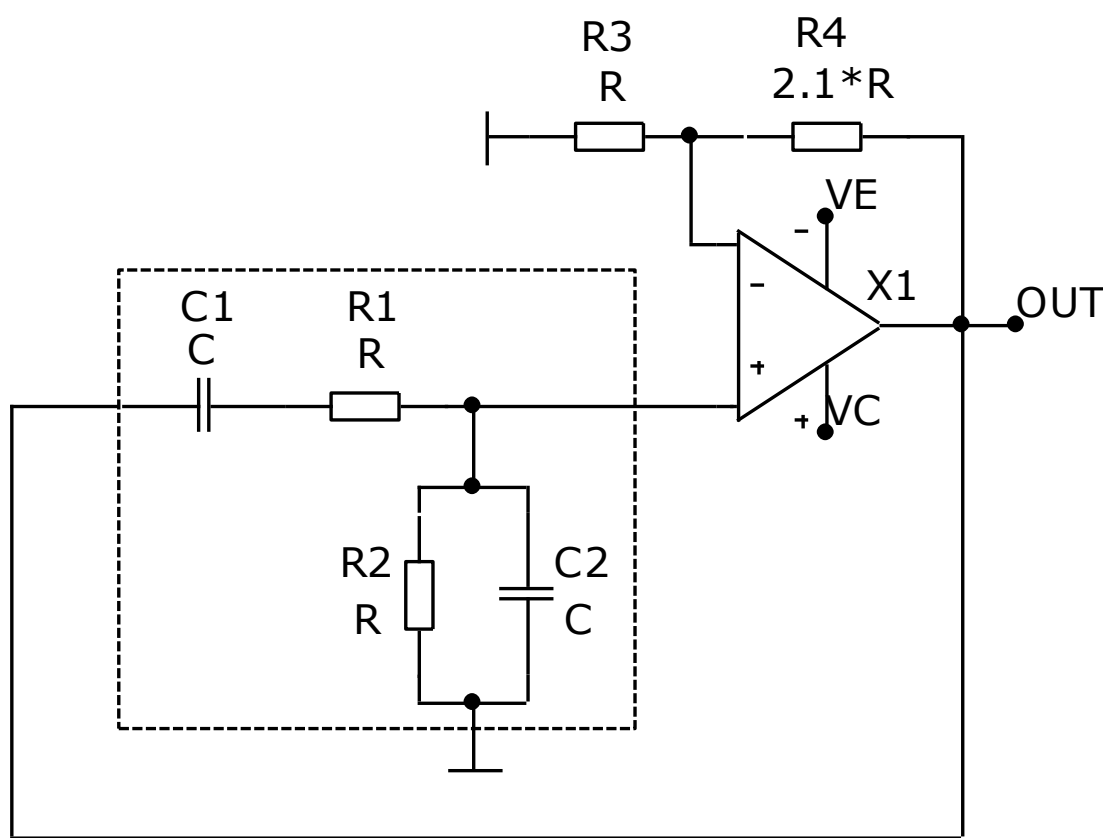
Для соблюдения баланса амплитуд коэффициент усиления усилителя должен быть больше 3. Критический коэффициент усиления $K_{кр}=3$. При таких условиях возникнет генерация на частоте квазирезонанса.



Структурная схема генератора с мостом Вина

RC-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

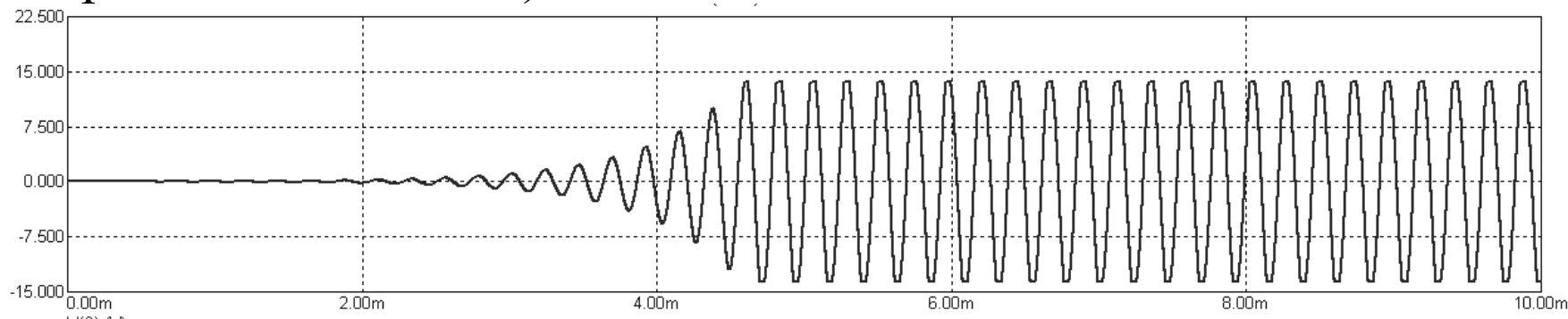
В случае симметричного сбалансированного моста $R1=R2=R$ и $C1=C2=C$, частота генерируемых колебаний (частота квазирезонанса):



$$\omega_0 = \frac{1}{RC} ;$$
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

РС-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

Для возникновения колебаний в автогенераторе с мостом Вина коэффициент усиления ОУ должен быть больше трех. Коэффициент усиления в этой схеме определяется делителем в цепи ОС, состоящий из резисторов $R3$ и $R4$. Частотно-зависимая ОС подключается к неинвертирующему входу. Если же $K_U > 3$, то колебания будут искаженными, поскольку теоретически их амплитуда должна расти до бесконечности, а на практике она будет ограничена нелинейными свойствами ОУ (передаточная характеристика имеет излом на уровне, определяемом напряжением питания).



РС-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

Если $K_U < 3$, то колебания не разовьются. Разрешить это противоречие и создать генератор с неискаженными синусоидальными колебаниями можно с использованием усилителя с АРУ. Поддержат колебания с постоянной амплитудой (меньшей уровня ограничения ОУ) можно с включением в цепь отрицательной обратной связи нелинейного элемента. (вместо резистора R3 или R4). В качестве такого нелинейного элемента можно использовать миниатюрную лампу накаливания (например, СМН-6.3). Сопротивление нити накаливания лампы сильно зависит от температуры накала, температура — от тока, а ток — от приложенного к лампе напряжения. При увеличении амплитуды выходного напряжения увеличивается напряжение, приложенное к лампе. Возрастает ток, а, следовательно, возрастает температура нити накаливания. В результате возрастает ее сопротивление. Коэффициент усиления усилителя с ООС уменьшается и уменьшается амплитуда выходного напряжения, т.е. происходит его стабилизация.

RC-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

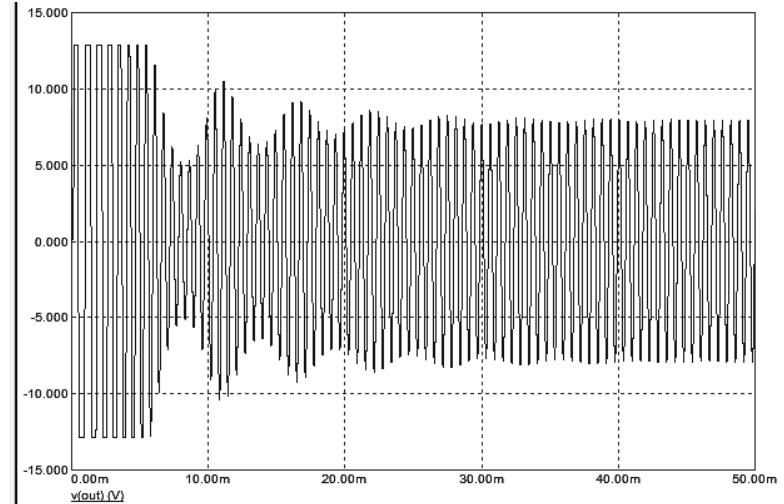
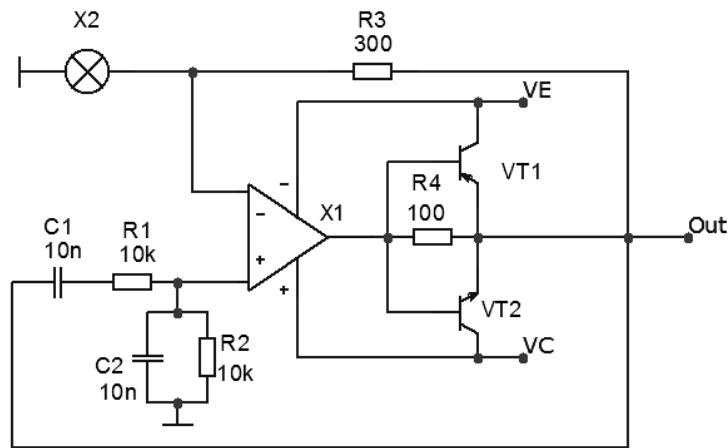
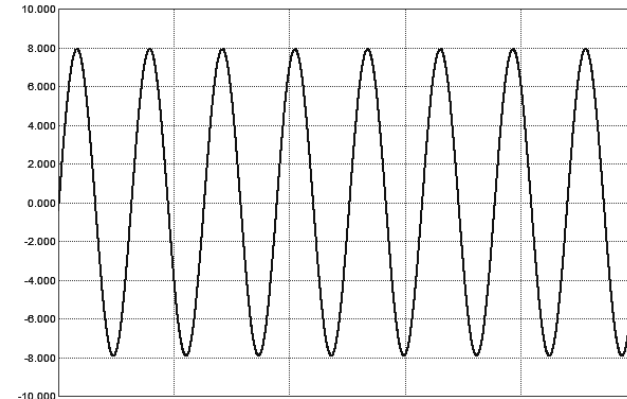
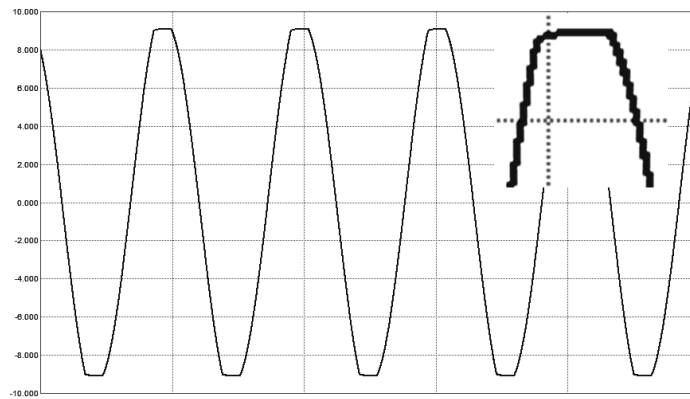


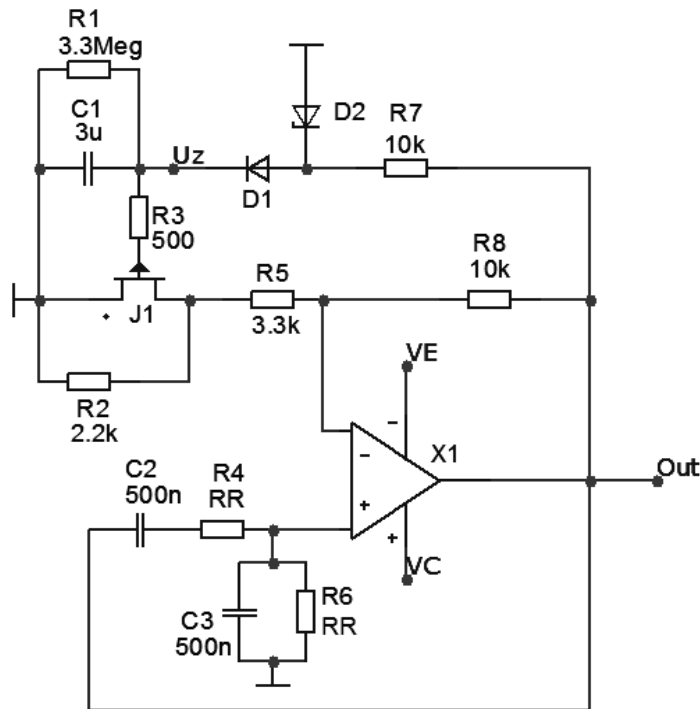
Схема генератора со стабилизацией амплитуды выходного напряжения



Выходное напряжение генератора в установившемся режиме
(без и со стабилизацией амплитуды)

РС-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

Помимо лампы накаливания могут использоваться другие нелинейные элементы (чаще всего – полевой транзистор, канал которого по сути является управляемым сопротивлением).



.Define RR 17.64K

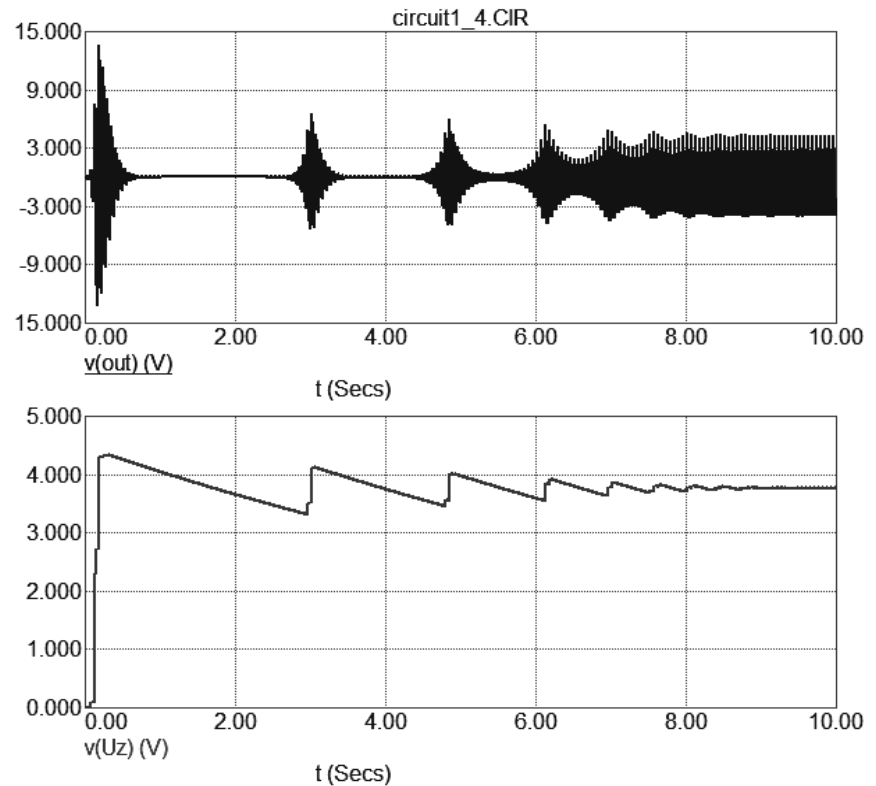
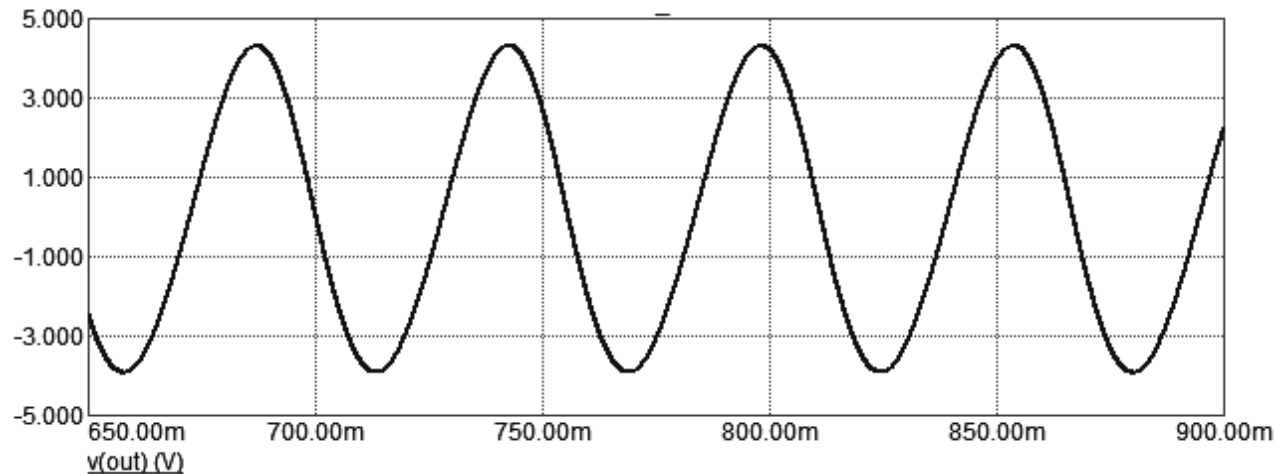


Схема с нелинейной ООС на полевом транзисторе

RC-автогенераторы. Генератор с мостом Вина

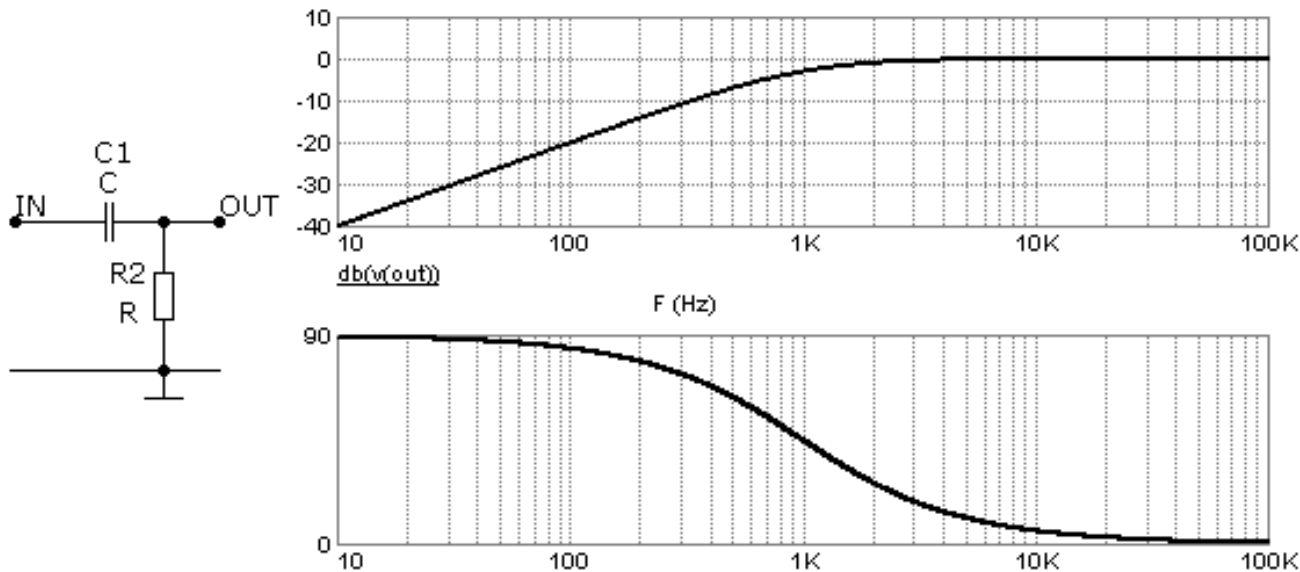
На затвор этого транзистора подается выпрямленное и отфильтрованное выходное напряжение, т.е. напряжение на затворе пропорционально амплитуде выходного напряжения. Стабилитрон $D2$ ограничивает максимально возможное напряжение на затворе, чтобы ускорить вывод схемы на режим. При большой постоянной времени цепи $R1C1$ возможно получение неискаженного сигнала даже на низких частотах.



Форма сигнала на частоте 20 Гц
в схеме с полевым транзистором

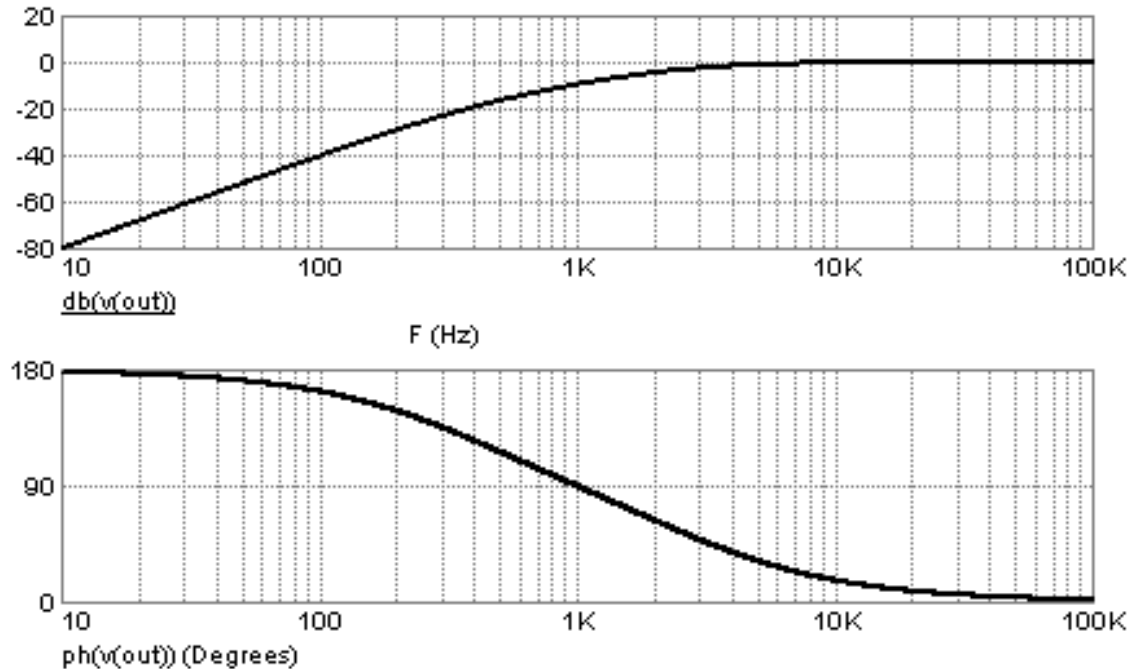
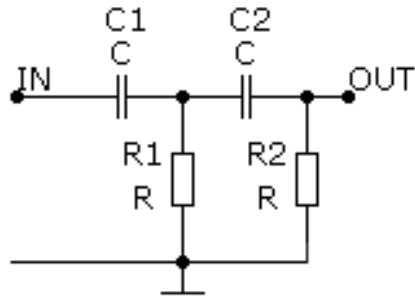
RC-автогенераторы. Генератор на инвертирующем ОУ

Если в цепи ОС происходит поворот фазы на $\pm 180^\circ$ для определенной частоты и усилитель инвертирует фазу входного сигнала, то можно получить избирательный усилитель или автогенератор. Цепь ОС подобного вида выполняется в виде соединения цепочек из R и C . Так как каждая ячейка такой цепи на конечной частоте дает фазовый сдвиг, равный $\pm 90^\circ$. Для дифференцирующей цепи имеем:



RC-автогенераторы. Генератор на инвертирующем ОУ

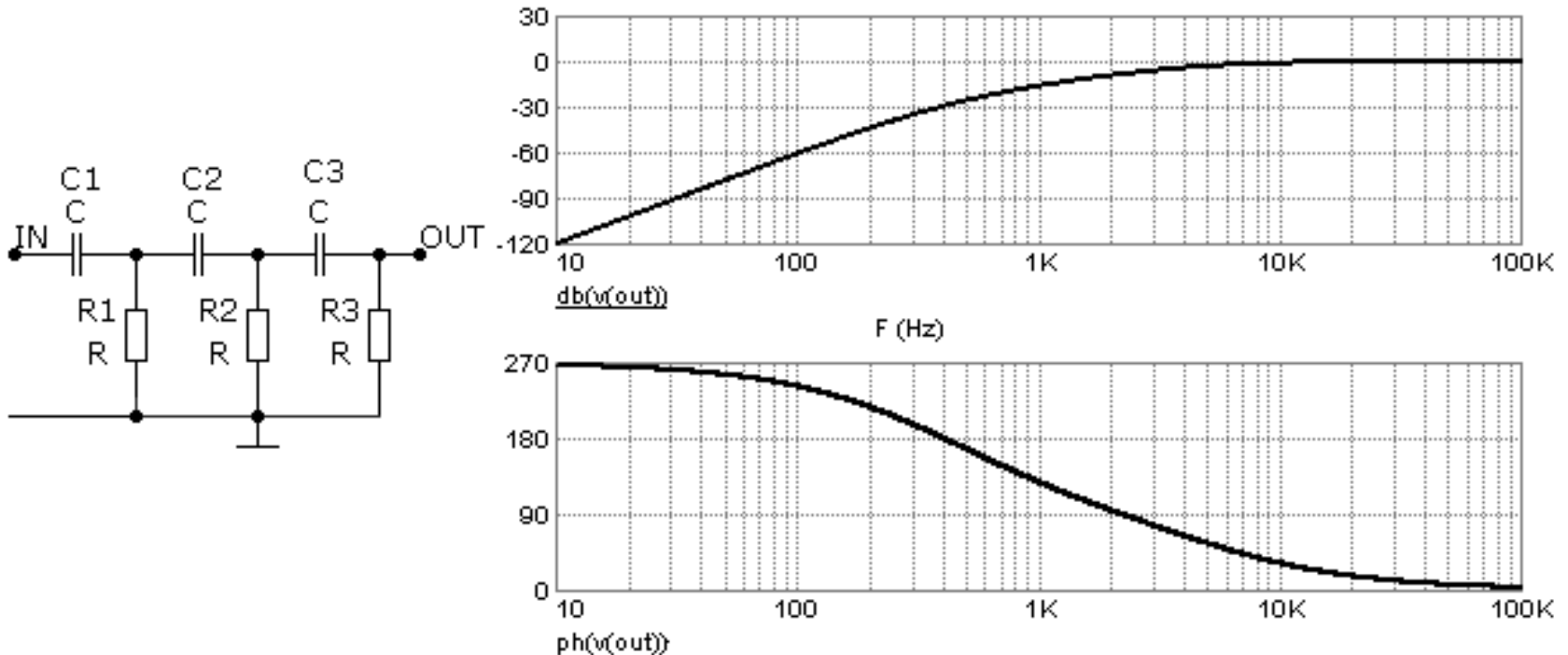
Если включить последовательно 2 такие цепочки, то сдвиг фаз будет стремиться к 180°



Но двух цепочек недостаточно для получения генератора. Фазовый сдвиг лишь стремится к 180° , но не достигает его. А в той области, где фазовый сдвиг близок к 180° коэффициент передачи очень мал (в этом примере -80 dB).

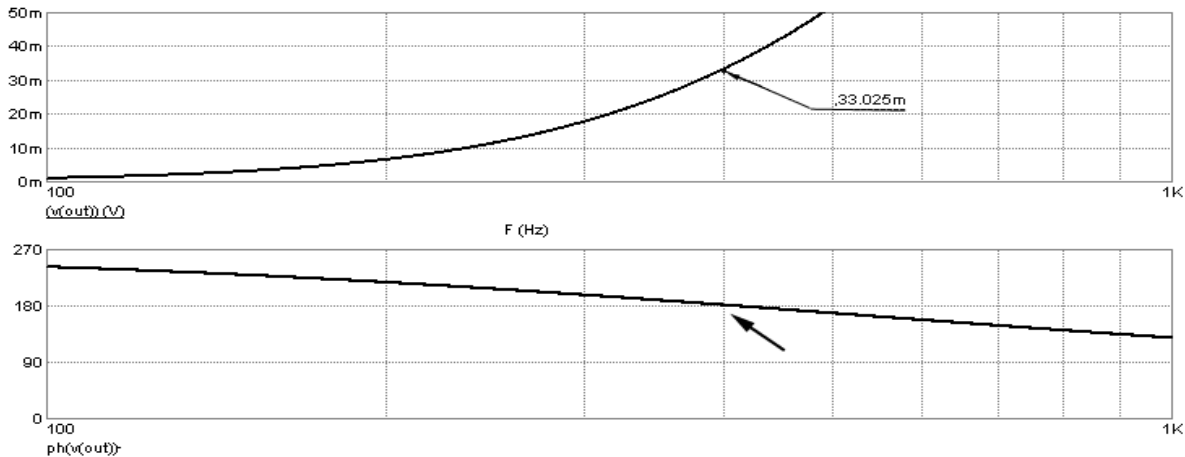
RC-автогенераторы. Генератор на инвертирующем ОУ

Практическое применение получили генераторы, в которых используется 3 или 4 фазосдвигающих RC -звена.



Баланс фаз (сдвиг на 180°) в этом примере выполняется на частоте 400 Гц .

РС-автогенераторы. Генератор на инвертирующем ОУ

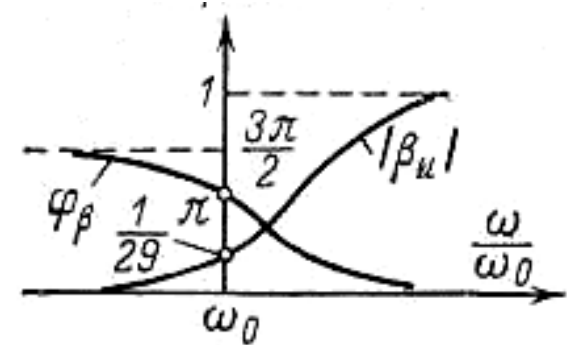


Коэффициент передачи на этой частоте составляет $1/29$ (т.е. примерно 0,033).

Если $C1=C2=C3=C$ и $R1=R2=R3=R$, то частота ω_0 определяется формулой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6}RC} \quad \text{Тогда} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} = \frac{1}{15,4RC}$$

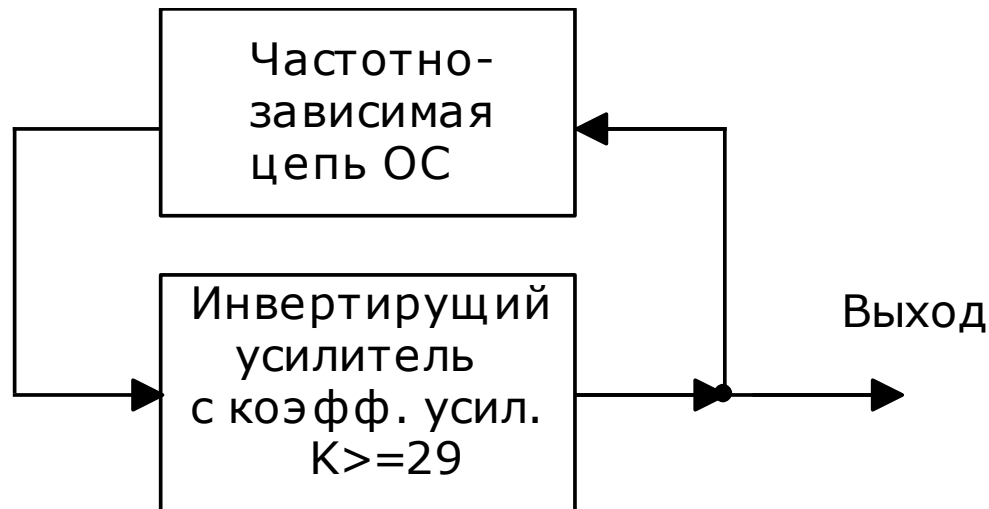
Совмещенные АЧХ и ФЧХ трех последовательных RC-цепей



RC-автогенераторы. Генератор на инвертирующем ОУ

Условие возникновения колебаний – $K_u > 29$. Частота колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6}RC}$

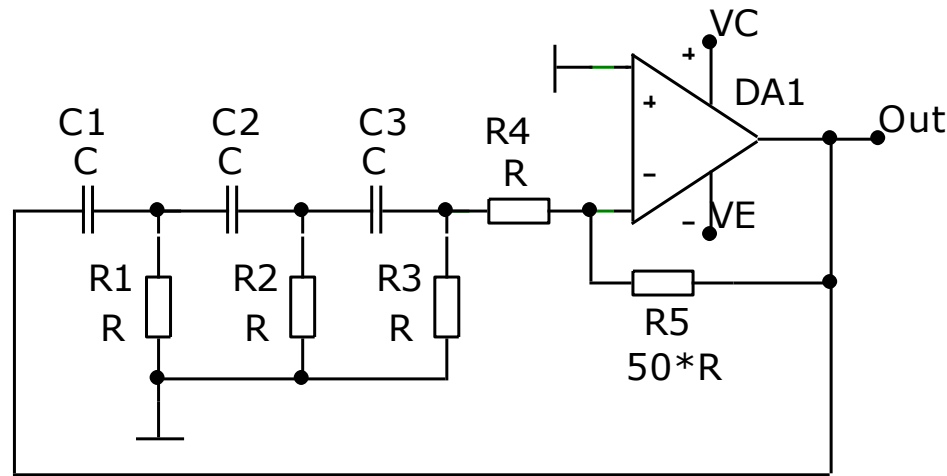
Поскольку коэффициент передачи звена частотно-зависимой ОС на частоте ω_0 равен $1/29$, то для соблюдения баланса амплитуд коэффициент усиления усилителя должен быть больше 29. Критический коэффициент усиления $K_{кр}=29$.



Структурная схема генератора с тремя RC-цепями

RC-автогенераторы. Генератор на инвертирующем ОУ

При практической реализации такой схемы на операционном усилителе к его инвертирующему входу подключают и цепь частотно-независимо обратной связи (резистивный делитель, задающий коэффициент усиления) и частотно-зависимую цепь (3 RC -звена). Коэффициент усиления усилителя в этой схеме определяется коэффициентом усиления ОУ в неинвертирующем включении: $K_U = R5/R4$



Практическая схема автогенератора.

РС-автогенераторы. Генератор с двойным Т-мостом

Двойной Т-мост на частоте квазирезонанса имеет явно выраженный минимум коэффициента передачи. Поворот фазы на этой частоте составляет 0° .

Для удовлетворения условия баланса фаз двойной Т-мост, казалось бы, нужно включать в цепь ПОС, а коэффициент усиления усилителя устремить к бесконечности.

Но при таком включении генератор окажется неработоспособным, поскольку коэффициент передачи двойного Т-моста на частоте, отличной от частоты квазирезонанса, стремится к единице.

Операционный усилитель оказывается охвачен глубокой ПОС на любых частотах, кроме частоты квазирезонанса. Т.е. его коэффициент усиления стремится к бесконечности.

При этом из-за наличия напряжения смещения усилитель сразу же входит в режим ограничения.

РС-автогенераторы. Генератор с двойным Т-мостом

А в этом режиме коэффициент усиления устремляется к нулю – развитие колебаний становится невозможным. Поэтому двойной Т-мост включают в цепь ОС, но ОУ дополнительно охватывают резистивной цепью ПОС.

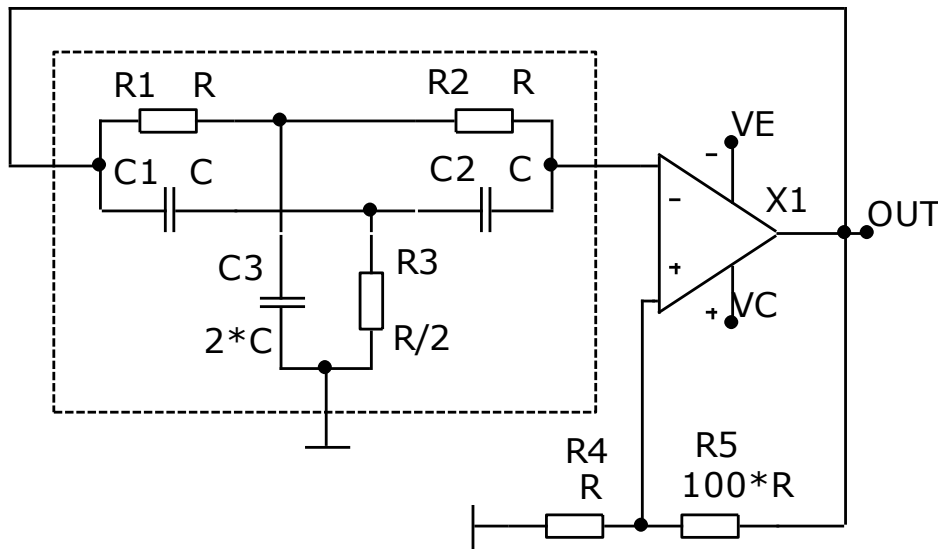
Для усилителя, охваченного ПОС справедливо выражение:

$$K_{OC} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{K}{1 - \beta_{oc} K}$$

Если $\beta_{oc} K$ становится больше 1, то коэффициент усиления системы (ОУ плюс обратная связь) меняет знак. Т.е. инвертирующий вход ОУ становится неинвертирующим.

При этом также продолжает действовать глубокая (100%) ООС через Т-мост, на всех частотах, кроме частоты квазирезонанса. В результате суммарный коэффициент усиления системы остается меньше 1 и только на частоте квазирезонанса он резко возрастает и возникают колебания.

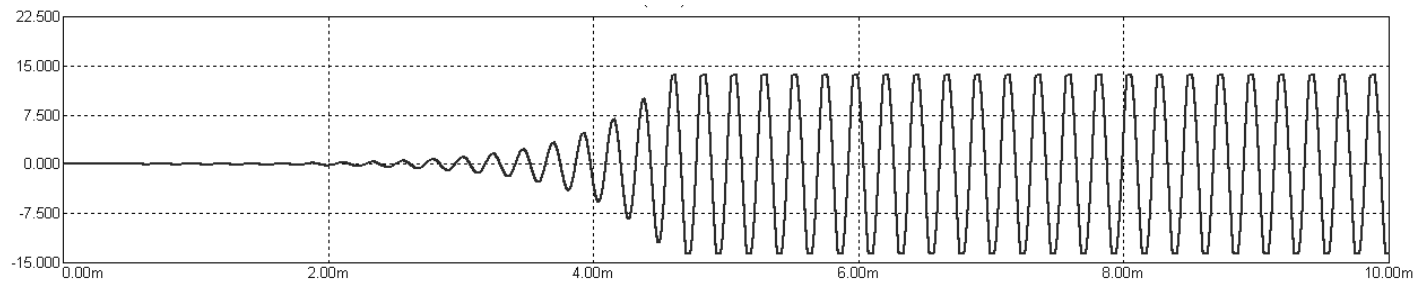
RC-автогенераторы. Генератор с двойным T-мостом



Практическая схема
генератора с T-мостом
Частота генерации
определяется частотой
квазирезонанса:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} ; f_0 = \frac{1}{2\pi RC} , \text{ где} \\ R = R1, C = C1$$

Развитие колебаний в
таком генераторе при подаче напряжения питания происходит
следующим образом



RC-автогенераторы

Кроме рассмотренных схем RC – автогенераторов, существуют RC – автогенераторы в цепь положительной обратной связи которых включен фазовращатель (пассивный – на RC – цепях, или активный – на ОУ или транзисторе).

Достоинство RC – автогенераторов: с их помощью можно генерировать колебания очень низких частот, вплоть до долей герца.

Недостаток RC – автогенераторов: низкая стабильность частоты на высоких частотах. Поэтому они преимущественно используются на низких частотах.

Литература

а) основная литература

1. Першин, В. Т. Основы радиоэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В. Т. Першин. - Мн. : Выш. Шк. 2006. - 436 с. - Режим доступа: URL http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=234977
 2. Красковский Л. Е., Мельникова Л. Я., Меремсон Ю. Л. Приемо-передающие устройства железнодорожной радиосвязи [Электронный ресурс]: Учебное пособие / А. Е. Красковский и др.; под ред. А. Е. Красковского. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. — 360 с. - Режим доступа: URL http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=227703&sr=1
 3. Акулиничев Ю. П. Теория и техника передачи информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю. П. Акулиничев, Л. С. Бернгардт. — Томск: Эль Контент, 2012. — 210 с. - Режим доступа: URL http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=208952&sr=1
-

б) дополнительная литература

1. Мелихов С. В. Аналоговое и цифровое радиовещание [Электронный ресурс]: Учебное пособие./ С. В. Мелихов. - Электрон. текстовые дан. – 2-е изд., испр. – Томск: Томск, гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2012.–233 с. - Режим доступа: URL http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=208686 .
2. Томаси У. Электронные системы связи [Электронный ресурс] / У. Томаси. - Электрон. текстовые дан. – М.: Техносфера, 2007. – 1360 с. - Режим доступа: URL http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view&book_id=135422.
3. Логвинов, В. В. Схемотехника телекоммуникационных устройств, радиоприемные устройства систем мобильной и стационарной радиосвязи, теория электрических цепей : лабораторный практикум - II на персональном компьютере : учеб. пособие для вузов / В. В. Логвинов, В. В. Фриск .— М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2011 .— 655 с. : ил. — (Библиотека студента) (4 экземпляра в библиотеке).

-
4. Логвинов, В. В. Схемотехника телекоммуникационных устройств, радиоприемные устройства систем мобильной и стационарной радиосвязи, теория электрических цепей : лабораторный практикум -II на персональном компьютере: учебное пособие для студентов, обуч. по направлению бакалавров и магистров 210700 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" / В. В. Логвинов, В. В. Фриск .— М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2013 .— 656 с. : ил. — (Библиотека студента) (5 экземпляров в библиотеке).
 5. Головин, О. В.. Устройства генерирования, формирования, приема и обработки сигналов : учеб. пособие по спец. "Средства связи с подвижными объектами" и "Радиосвязь, радиовещание и телевидение" / О.В. Головин .— М. : Горячая линия - Телеком, 2014 .— 782 с. : ил. (5 экземпляров в библиотеке).
 6. Компоненты и технологии. [Электронный ресурс] - Электрон. текстовые дан. 2011-2015. - Режим доступа: URL <http://elibrary.ru/issues.asp?id=9938>
-