

МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.П. ОГАРЕВА  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ И ХИМИИ

КАФЕДРА РАДИОТЕХНИКИ

**БАРДИН В.М.**

**РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА.**

**АВТОГЕНЕРАТОРЫ**

**САРАНСК – 2006**

Печатается на основании решения учебно-методической комиссии Института физики и химии.

УДК 621.396

**Радиопередающие устройства. Автогенераторы // Методическая разработка.**

Составитель – Бардин В.М., к.т.н., профессор кафедры радиотехники.

В методической разработке рассмотрены вопросы, связанные с изучением одного из разделов курса «Устройство генерирования и формирования радиосигналов» Разработка предназначена для студентов, обучающихся на специальности 654200, но может быть полезна и студентам других специальностей при изучении курса радиотехники.

**Научный редактор** – Логунов М.В., к.ф.-м.н., зав. кафедрой радиотехники.

**Рецензент** – Беспалов Н.Н., к.т.н., доцент кафедры автоматике.

© Институт физики и химии Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарева, 2005

Тираж 200 экз.

## **Введение**

Настоящее учебно-методическое издание является продолжением серии подобных изданий, предназначенных для студентов специальности «Радиотехника», изучающих курс «Устройство генерирования и формирования радиосигналов». В методической разработке рассматриваются принципы работы и схемные решения автогенераторов, которые являются обязательным узлом любого радиопередающего устройства.

Содержание разработки в основном отражает содержание соответствующего раздела лекционного курса, но не заменяет его. Предполагается, что студенты будут использовать данную разработку и при подготовке к выполнению соответствующей лабораторной работы.

Автор надеется, что подобные учебно-методические материалы будут особенно полезны студентам заочной формы обучения, доступ которых к учебной литературе по специальным дисциплинам в силу ряда причин ограничен.

## 1. Общие принципы работы автогенераторов.

Автогенератором называется нелинейное устройство, преобразующее энергию источника питания постоянного тока в энергию высокочастотных колебаний. Причем эти колебания возникают самопроизвольно, при отсутствии внешних воздействий. Автогенератор состоит из усилителя, колебательной системы и цепи положительной обратной связи (рис. 1).

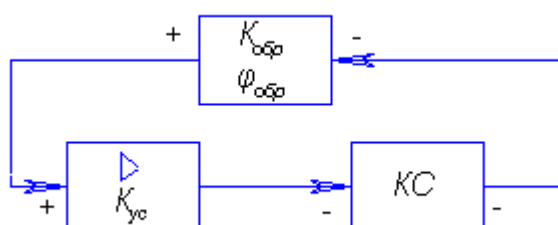


Рис. 1 Функциональная схема автогенератора.

Существование незатухающих колебаний в автогенераторе возможно при выполнении двух условий: баланса амплитуд и баланса фаз.

$$\left. \begin{aligned} K_{yc} \times K_{обр} &= 1 \\ \varphi_{yc} + \varphi_{обр} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

где,  $K_{yc}$ ,  $\varphi_{yc}$  – коэффициент передачи и фазовый сдвиг в усилителе,  
 $K_{обр}$ ,  $\varphi_{обр}$  – коэффициент передачи и фазовый сдвиг в цепи обратной связи.

Баланс амплитуд – это условие поступления определенного количества энергии от источника питания в контур, достаточной для компенсации всех потерь в контуре и поддержания колебаний незатухающими. Баланс фаз означает, что ток от источника питания, проходя через транзистор, должен совпадать по фазе с контурным током.

Другими словами, передача энергии в контур должна происходить в такт с частотой возникших в нем колебаний и в требуемом количестве. Аналогом колебательной системы могут быть обычные качели. Для того, чтобы колебания качелей были незатухающими необходимо компенсировать потери в системе путем своевременного и достаточного по величине поступления энергии. Если усилитель инвертирует усиливаемые колебания, то напряжение обратной связи снимаемое с контура (или другой избирательной цепи), также должно быть инвертировано.

Инерционные свойства усилительного элемента могут быть причиной дополнительного фазового сдвига колебаний, который также должен быть скомпенсирован цепью обратной связи. На рис. 2 приведены амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики LC контура. Из рисунка следует, что изменение частоты влечет за собой изменение фазы колебаний и наоборот.

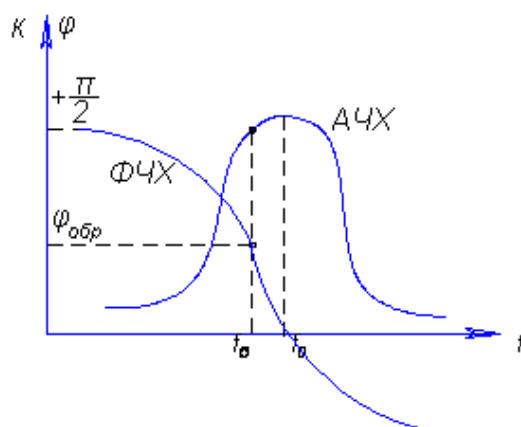


Рис.2 АЧХ и ФЧХ автогенератора.

В результате при  $\varphi_{yc} \neq 0$  и соответственно  $\varphi_{обр} \neq 0$  в автогенераторе устанавливаются колебания с частотой  $f_6 \neq f_0$ , где  $f_0$  – резонансная частота избирательной цепи.

В большинстве случаев ограничение амплитуды в усилителе (или отдельном звене) сопровождается искажением формы колебаний. Поэтому избирательная цепь автогенератора выполняет еще одну функцию: фильтрует колебания, выделяя первую гармонику.

Коэффициент передачи в цепи автогенератора – величина непостоянная, зависящая от амплитуды колебаний. Для малых амплитуд  $K_{yc} \times K_{обр} > 1$ , благодаря чему амплитуда возникающих в автогенераторе колебаний будет возрастать. В процессе установления колебаний их амплитуда ограничивается в усилительном элементе за счет снижения крутизны его характеристики и за счет увеличения потерь в колебательной системе.

Процесс возникновения, нарастания и установления колебаний можно проследить с помощью колебательной характеристики и линии обратной связи. Колебательной характеристикой называется зависимость амплитуды первой гармоники выходного тока усилительного элемента от амплитуды управляющего напряжения на его входе. Рассмотрим вид этой зависимости на примере транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

Вид колебательной характеристики  $I_{к1} = \psi(U_{бэ})$  зависит от положения рабочей точки на проходной характеристике транзистора (рис.3)

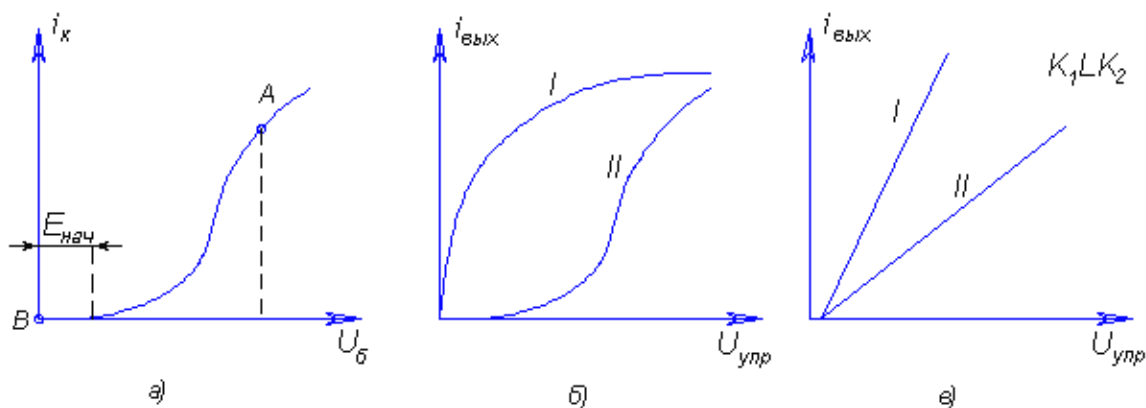


Рис. 3 Характер колебательных характеристик усилительного элемента и характеристики цепи обратной связи.

При работе транзистора в линейном режиме усиления (режим колебаний класса А), когда рабочая точка А выбрана на середине линейного участка проходной характеристики, колебательная характеристика имеет выпуклую форму (кривая I на рис.3.б). При увеличении амплитуды входного напряжения, амплитуда выходного тока сначала достаточно быстро возрастает вследствие постоянства крутизны. Затем рост выходного тока замедляется из-за нелинейности нижнего и верхнего изгиба характеристики транзистора. Если рабочая точка на проходной характеристике транзистора выбрана в области отсечки выходного тока (точка В), то колебательная характеристика начинается несколько правее нуля. Она имеет нижний изгиб, соответствующий нелинейному нижнему участку проходной характеристики и соответственно – верхний изгиб.

Линией обратной связи называется графически выраженная зависимость напряжения обратной связи от тока в выходной цепи транзистора. Поскольку цепь обратной связи линейна, то линия обратной связи представляет прямую линию, восходящую из начала координат (рис. 3.в). Чтобы проследить процесс возникновения, нарастания и установления колебаний необходимо совместить колебательную характеристику и линию обратной связи (рис.4)

Различают два возможных режима самовозбуждения: мягкий и жесткий. В режиме мягкого самовозбуждения рабочая точка транзистора находится на середине крутого участка проходной характеристики и поэтому даже самые малые изменения напряжения на входе вызовут заметные изменения тока на выходе. Допустим, что в контуре появился ток  $I_1$  (например, за счет включения источника питания). Этот ток по цепи обратной связи создаст на входе напряжение  $U_1$ . Такое напряжение в соответствии с колебательной характеристикой вызывает в выходной цепи ток  $I_2$ . При токе  $I_2$  во входной цепи автогенератора в соответствии с линией обратной связи наводится напряжение  $U_2$  и т.д. Колебания в контуре будут нарастать до значения, определенного точкой «В» пересечения колебательной характеристики и линии обратной связи. Точка «В» соответствует режиму установившихся колебаний. В этой точке выполняется условие баланса амплитуд. Действительно, если по каким-либо причинам ток на выходе транзистора уменьшится до значения  $I_4$ , то он через цепь обратной связи будет создавать напряжение  $U_4$  и колебания снова возрастут до установившегося значения. Если же за счет внешнего воздействия ток в контуре увеличится до значения большего, чем  $I_{уст}$ , то потери в контуре возрастут и напряжение, наведенное по цепи обратной связи, уменьшится. Амплитуда колебаний снизится до установившегося значения. Таким образом, в режиме мягкого возбуждения колебания в автогенераторе возникают после включения источника питания самостоятельно и плавно нарастают до установившегося значения.

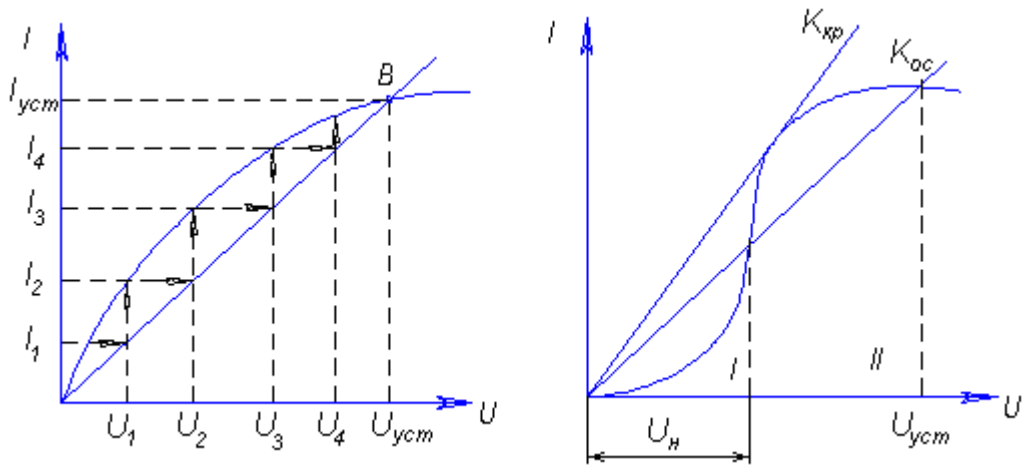


Рис.4 Механизмы возникновения колебаний в автогенераторе.

Если рабочая точка на проходной характеристике транзистора выбрана в области отсечки выходного тока, то колебательная характеристика пересечется с линией обратной связи в двух точках. В области I кривая проходит над прямой – это значит, что потери в контуре превышают пополнения энергии и колебания не возникают. В области II колебания будут нарастать. Из этого следует, что в режиме жесткого возбуждения колебания автоматически возникнуть не могут. Для того, чтобы они возникли необходимо во входную цепь транзистора подать напряжение с величиной  $U_{возб} > U_H$ . Только после такого «жесткого» толчка колебания возникают и быстро нарастают. Такой режим самовозбуждения называется жестким.

Одним из условий самовозбуждения генератора является достаточная величина напряжения обратной связи, которая определяется коэффициентом обратной связи. С уменьшением этого коэффициента амплитуда установившихся колебаний также уменьшается. Наименьшая связь, при которой колебания еще существуют, называется критической.

## 2. Схемы автогенераторов.

Существует несколько схем автогенераторов, но наибольшее распространение получили так называемые трехточечные схемы, в которых активный элемент (например, транзистор) подключен к колебательной системе в трех точках.

В обобщенном виде такая схема изображена на рис. 5.а

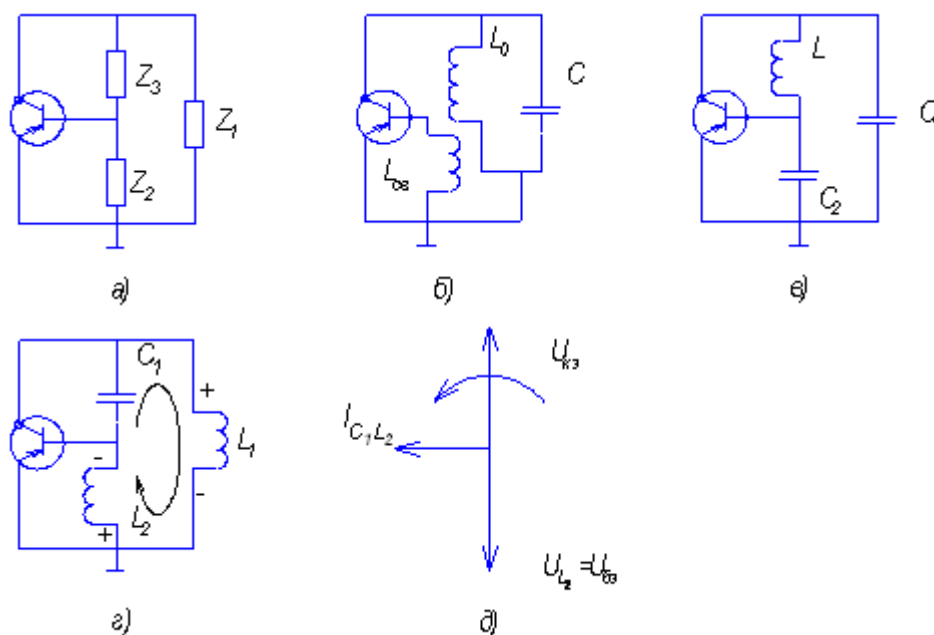


Рис.5 Трехточечные схемы автогенераторов.

Для того, чтобы в этих схемах выполнялось условие баланса фаз (напряжение на коллекторе транзистора и на его базе должны быть противофазны) необходимо, чтобы реактивные сопротивления между эмиттером и базой ( $Z_2$ ) и эмиттером и коллектором ( $Z_1$ ) были одного знака, а реактивность  $Z_3$  – противоположного знака. Возможны три варианта схемных решений, где обеспечивается условие баланса фаз: трансформаторная схема (рис.5.б), емкостная трехточка (рис.5.в), индуктивная трехточка (рис.5.г). Покажем справедливость приведенного правила на примере индуктивной трехточки. Под действием напряжения  $U_{кз}$  в цепи  $Z_3$   $Z_2$  протекает некоторый ток. Поскольку индуктивность катушки связи  $L_2$  намного меньше индуктивности  $L_1$ , а  $Z_{C1} = Z_{L1} + Z_{L2}$ , то  $Z_{C1} \gg Z_{L2}$ . Следовательно, реактивное сопротивление цепи  $Z_3$   $Z_2$  ( $C_1 L_2$ ) будет емкостным. Поэтому ток в цепи  $C_1 L_2$  будет опережать напряжение  $U_{кз}$  на  $90^\circ$ . Этот ток, протекая через катушку  $L_2$ , создает на ней падение напряжения  $U_{L2}$ , опережающее ток  $L_2$  на  $90^\circ$ . Но напряжение  $U_{L2}$  – это напряжение обратной связи. Таким образом, напряжение на коллекторе и базе транзистора оказывается сдвинутым на  $180^\circ$ , т.е. они противофазны. Сдвиг фаз между напряжением на коллекторе транзистора и напряжением на его базе можно объяснить и по-другому. Допустим, что в данный момент ток в контуре протекает так, как показано стрелкой на рис.5.г. Поскольку общее напряжение на индуктивном контуре делится между  $L_1$  и  $L_2$  пропорциональ-



но их сопротивлениям, то напряжение на базе транзистора оказывается противофазе с напряжением на коллекторе.

Трехточечные автогенераторы обычно выполняются по схеме с общим эмиттером, хотя могут быть собраны и по схемам с общей базой и общим коллектором.

В реальных схемах автогенераторов к максимально необходимым элементам должны быть добавлены элементы, обеспечивающие режим работы транзистора по постоянному току. На рис.6 приведены схемы автогенераторов, выполненных по вариантам индуктивной и емкостной трехточки.

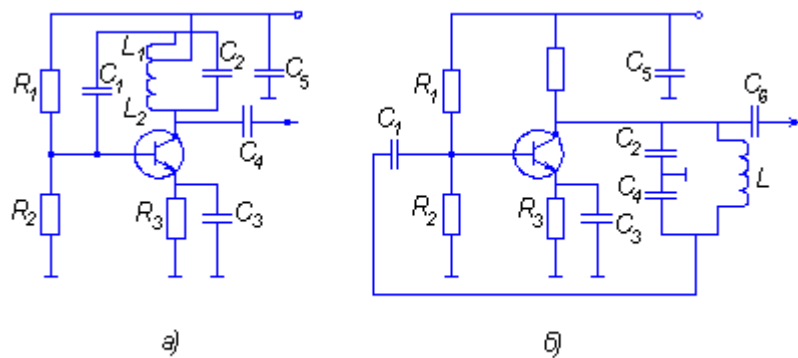


Рис.6 Примеры выполнения автогенераторов по схеме индуктивной (а) и емкостной (б) трехточки.

В этих схемах режим работы по постоянному току задается резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Напряжение обратной связи в схеме 6.а снимается с катушки  $L_1$  и через  $C_1$  поступает на базу, в схеме 6.б – напряжение на базу поступает с  $C_4$  через  $C_1$ . В схеме 6.а общая точка между катушками  $L_1$ ,  $L_2$  заземлена по переменному току через емкость  $C_5$ . Поэтому напряжения на катушках  $L_1$  и  $L_2$  оказываются противофазными, что обеспечивает выполнение условия баланса фаз. Баланс амплитуд обеспечивается подбором числа витков катушки  $L_1$ .

Аналогичные схемы решения могут быть выполнены и на полевых транзисторах.

### 3. Нестабильность частоты автогенератора.

Нестабильность частоты автогенератора характеризуется ее относительным изменением

$$\Sigma = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \quad (2)$$

Различают два вида нестабильности частоты: долговременную и кратковременную. Под долговременной нестабильностью понимают нестабильность, связанную с изменением частоты из-за старения элементов, а также из-за изменения их параметров под действием факторов окружающей среды: температуры, влажности, давления и др. Кратковременная нестабильность определяется быстрыми флуктуационными изменениями частоты автогенератора, вызванными тепловыми и дробовыми шумами. Условно принимают, что нестабильность частоты, проявляющаяся за время меньшее одной секунды, относится к кратковременной.

Для оценки ухода частоты автогенератора можно использовать уравнение баланса фаз.

$$\varphi_S + \varphi_{oc} + \varphi_k = \varphi(\omega) = 2\pi n, (n=0, 1, 2, \dots), \quad (3)$$

где  $\varphi_S$  – сдвиг фаз в транзисторе,

$\varphi_{oc}$  – сдвиг фаз в цепи обратной связи,

$\varphi_k$  – сдвиг фаз в контуре.

Если под действием дестабилизирующих факторов изменится на малую величину  $\Delta\alpha$  какой либо параметр  $\alpha_0$  (например емкость контура) автогенератора, то при сохранении баланса фаз должна на малую величину  $\Delta\omega$  измениться его частота  $\omega_0$ . Если в невозмущенном режиме

$$\varphi(\omega_0, \alpha_0) = 2\pi n,$$

то при возмущениях

$$\varphi(\omega_0 + \Delta\omega, \alpha_0 + \Delta\alpha) = 2\pi n$$

Условие баланса фаз в малых приращениях можно записать так:

$$\varphi(\omega_0, \alpha_0) + \frac{\partial\varphi}{\partial\omega} \Delta\omega + \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha} \Delta\alpha = 2\pi n \quad (4)$$

или

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\omega} \Delta\omega + \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha} \Delta\alpha = 0 ; \text{ откуда}$$

$$\Delta\omega = -\frac{\partial\varphi}{\partial\alpha}\Delta\alpha / \frac{\partial\varphi}{\partial\omega} \quad (5)$$

Изменение суммарного набега фазы, вызванное изменением параметра  $\alpha$

$$\Delta\varphi = \Delta\alpha \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha} \quad (6)$$

с учетом (5) и (6) получим относительное изменение частоты автогенератора

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -\frac{\Delta\varphi}{\frac{\omega\partial\varphi}{\partial\omega}} \quad \left| \begin{array}{l} \omega = \omega_0 \\ \alpha = \alpha_0 \end{array} \right. \quad (7)$$

Из этого выражения следует, что стабильность частоты автогенератора при заданном значении  $\Delta\varphi$  тем выше, чем круче фазочастотная характеристика колебательного контура автогенератора.

А она, как известно, зависит от эквивалентной добротности контура. Эту связь в первом приближении можно отобразить соотношением

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\omega} \approx \frac{2Q}{\omega_0}, \quad (8)$$

тогда

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\Delta\varphi}{2Q}. \quad (9)$$

Итак, частота колебаний автогенератора определяется колебательной системой, содержащей резонансный LC контур с подключенными к нему элементами (нагрузка, монтажные емкости и индуктивность) и активным прибором. Если под действием каких-либо факторов изменятся параметры контура, то появится сдвиг фаз  $\Delta\varphi$ , который приведет к изменению частоты автогенератора.

В инженерной практике для оценки нестабильности частоты автогенератора можно пользоваться формулой:

$$\varepsilon = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (10)$$

Из этого выражения следует, что для создания высокостабильных автогенераторов необходимо применять емкости и индуктивности с малыми температурными коэффициентами, вводить дополнительные термокомпенсирующие элементы, применять термостатирование. При изменениях температуры окружающей среды изменяются не только  $L_k$  и  $C_k$ , но и активные и реактивные составляющие параметров транзистора, что так же влияет на параметры контура, а, следовательно, и на частоту автогенератора. Аналогичное влияние на транзистор оказывают и колебания напряжения источника питания.

#### 4. Автогенераторы с кварцевым резонатором.

Автогенераторы с LC контурами обеспечивают уровень нестабильности частоты порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$ . Этого в большинстве случаев бывает недостаточно. Лучшую стабилизацию обеспечивает применение кварцевых резонаторов.

Из кристалла кварца под определенными углами к его оси вырезают тонкие пластинки, обладающие особыми свойствами. В частности, температурным коэффициентом частоты (ТКЧ) близким к нулю. Для включения кварцевой пластинки в электрическую цепь две ее противоположные грани металлизуют. Если к этим металлизированным граням приложить переменное электрическое поле, то в пластине возникнут упругие механические колебания. Эти колебания, в свою очередь, за счет пьезоэффекта вызывают появление на гранях электрического потенциала. Как всякое упругое тело, кварцевая пластина имеет собственную резонансную частоту механических колебаний, зависящую от размеров пластины. Чем тоньше пластина, тем выше частота. Но у пластины есть определенный предел механической прочности, который и определяет верхнюю частоту собственных колебаний (максимум до 30 МГц). Правда, пластину можно возбуждать и на частотах нечетных гармоник (3, 5, 7...). При совпадении частоты приложенного внешнего напряжения с частотой собственных колебаний кварца наступает явление резонанса. Амплитуда механических колебаний, а, следовательно, и амплитуда пьезотока резко возрастают. Такое поведение кварца в переменном электрическом поле аналогично поведению электрического колебательного LC контура. Поэтому эквивалентную электрическую схему кварцевого резонатора можно представить в виде, приведенном на рис. 7.

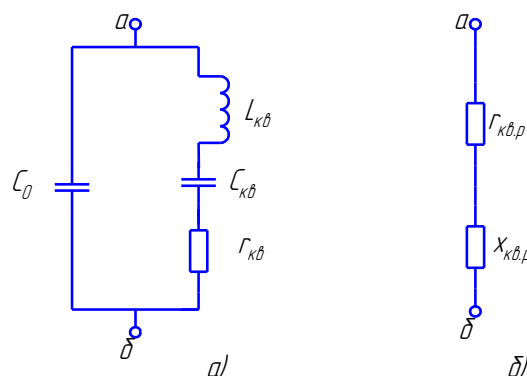


Рис.7 Эквивалентная схема кварцевого резонатора

$C_0$  – емкость кварцедержателя,  $L_{кв}$ ,  $C_{кв}$ ,  $r_{кв}$  – собственные параметры кварцевой пластины.

Величина  $L_{кв}$  лежит в пределах от десятых долей до единиц Генри, емкость  $C_{кв}$  – в пределах сотых долей ПФ,  $r_{кв}$  – от единиц до сотен Ом,  $C_0 \approx 5-50$  ПФ.

При такой большой индуктивности  $L_{кв}$  и малой емкости  $C_{кв}$  характеристическое сопротивление  $\rho_{кв} = \sqrt{L/C}$  получается очень большим. Поэтому величина и добротность  $Q = \frac{\rho_{кв}}{r_{кв}}$  эквивалентного контура кварца, которая может до-

стигать 10000 и более, в то время как добротность обычных контуров редко превышает 100-200. Колебательный контур, соответствующий эквивалентной схеме кварцевого резонатора, имеет две резонансные частоты: частоту последовательного резонанса в ветви, образованной динамическими параметрами кварца  $\omega_{кв} = 1/\sqrt{L_{кв}C_{кв}}$  и частоту параллельного резонанса всего контура с учетом емкости кварцедержателя  $C_0$ :

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_{кв}C_{кв}C_0/(C_{кв} + C_0)} = \omega_{кв} \sqrt{1 + \frac{C_0}{C_{кв}}}$$

Отношение  $C_{кв}/C_0 \approx 0,001-0,01$ . Поэтому  $\omega_0$  и  $\omega_{кв}$  отличаются незначительно.

Эквивалентную схему кварцевого резонатора можно представить в виде последовательного соединения активного и реактивного сопротивлений (рис. 7.б). Зависимость сопротивления такой цепи от частоты приведена на рис.8.

Из характера этой зависимости следует, что в интервале частот  $\omega_{кв} - \omega_0$  кварцевый резонатор является индуктивностью, а для остальных частот – емкостью. Резонансная характеристика параллельного контура очень острая, так как добротность контура велика. Поэтому резонансная частота  $\omega_{кв}$  находится далеко за пределами полосы частот параллельного контура.

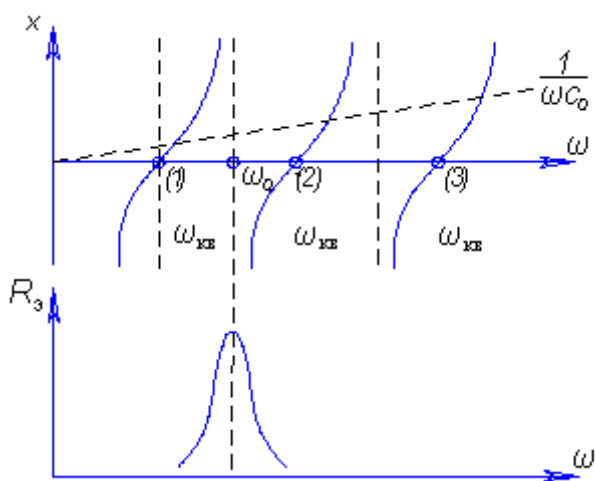


Рис. 8 Характер изменения сопротивления кварцевого резонатора от частоты

Свойства кварца иметь высокооборотное индуктивное сопротивление в весьма узком диапазоне частот используется для стабилизации частоты автогенераторов. Иногда для стабилизации частоты кварц применяется и как высокодобротный последовательный контур. Поэтому различают две группы кварцевых автогенераторов: осцилляторные и фильтровые. В осцилляторных схемах кварц выполняет роль индуктивности. Наиболее часто используется схема емкостной трехточки, которая обладает лучшей стабильностью частоты и, кроме того, в схеме отсутствуют катушки индуктивности. Упрощенные трехточечные схемы автогенераторов приведены на рис. 9.а схемы с необходимыми дополнительными элементами на рис.10.

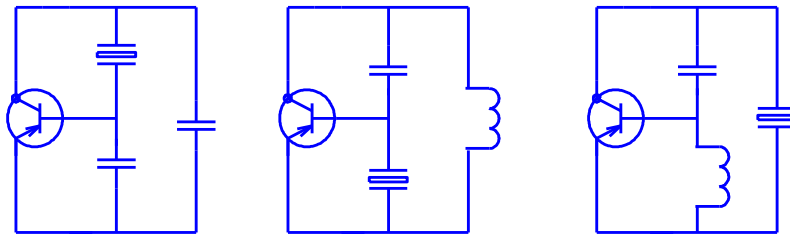


Рис.9 Упрощенные схемы автогенераторов с кварцем

Нестабильность частоты в осцилляторных схемах составляет  $10^{-5} - 10^{-6}$ .

В фильтровых схемах кварцевый резонатор включается последовательно в цепь обратной связи, соединяющей базу, эмиттер или коллектор транзистора с колебательным контуром автогенератора. На частотах, отличающихся от резонансной частоты кварца, сопротивление резонатора, являющегося элементом обратной связи, большое и комплексное, а коэффициент обратной связи мал. Поэтому условие самовозбуждения на таких частотах не выполняется и колебания не возникают. На основной частоте последовательного резонанса ( $\omega_{\text{кв}}^{(1)}$ ) или на нечетной гармонике кварц обладает только небольшим активным сопротивлением. Поэтому цепь обратной связи замыкается и в схеме возбуждаются незатухающие колебания. Один из возможных вариантов такого автогенератора приведен на рис. 10.б.

На частотах выше 20 МГц толщина кварцевой пластины становится слишком малой и обеспечить ее механическую прочность весьма сложно. Поэтому на частотах выше 10 МГц обычно используются кварцевые резонаторы, работающие на высших механических гармониках. Для исключения возможности генерации на частотах гармоник, отличающихся от заданной, схемы дополняют контурами, нарушающими условие самовозбуждения для всех других гармоник. Одна из таких схем приведена на рис. 11. Здесь параллельный контур  $C_1L_2$ , имея индуктивный характер сопротивления на частотах более низких, чем требуется, исключает возможность выполнения на них условия баланса фаз. Сопротивление последовательного контура  $C_2L_1$  на частотах выше требуемой, носит индуктивный характер и не допускает на них самовозбуждения. Таким образом, баланс фаз выполняется только на частотах требуемой гармоники.

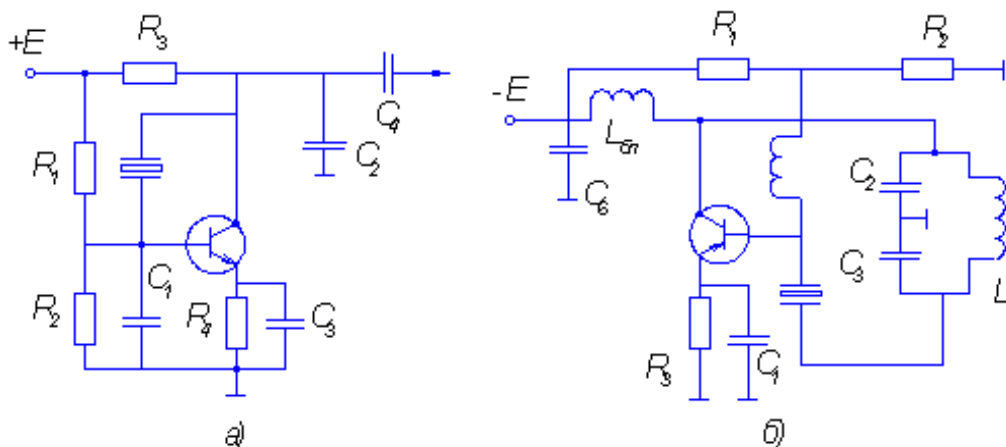


Рис.10 Электрические схемы автогенераторов с кварцевым резонатором.

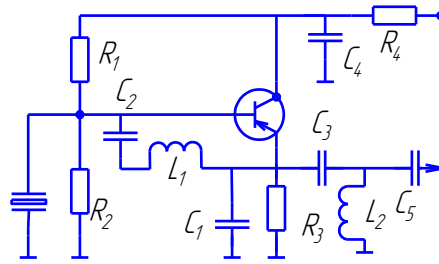


Рис.11 Схема автогенератора с кварцем, работающим на высшей гармонике.

### 5. Автогенераторы на элементах с отрицательным сопротивлением

В диапазоне СВЧ широкое применение находят автогенераторы на элементах с отрицательным сопротивлением. Электронные приборы, как и пассивные элементы, при включении их в электрическую цепь оказывают току некоторое сопротивление. На преодоление этого сопротивления источник затрачивает определенную энергию. Направление тока совпадает с направлением ЭДС, т.е. сопротивление цепи положительное. Вольтамперная характеристика такого элемента изображается восходящей линией. Но есть электронные приборы, у которых на вольтамперной характеристике есть падающий участок (рис. 12.а). Например, такой участок есть у тиристоров и туннельных диодов. На падающем участке характеристики с увеличением приложенного напряжения ток начинает уменьшаться, т.е. появляется отрицательное сопротивление ( $-R$ ). Уменьшение тока в цепи происходит в результате компенсации прямого тока источника питания  $E$  встречным током  $i_k$ , источником которого является отрицательное сопротивление. Поэтому отрицательное сопротивление можно рассматривать как генератор тока (рис.12.б).

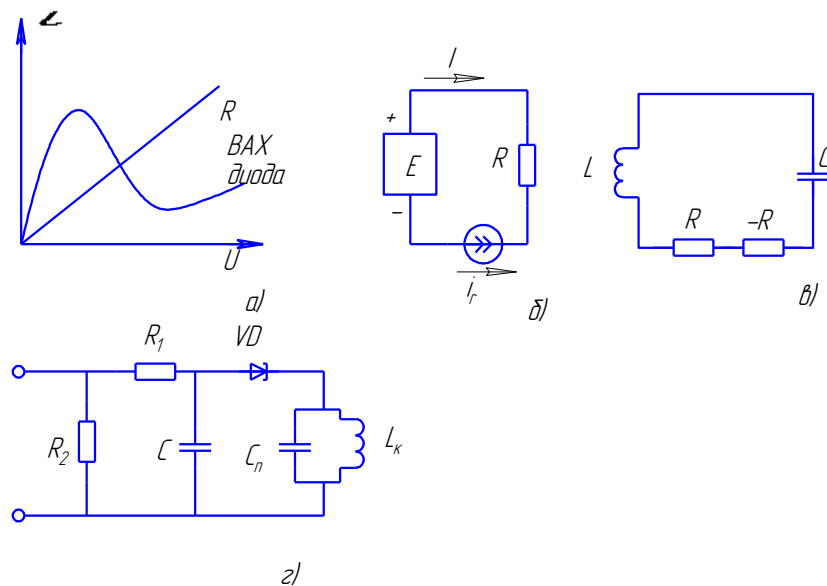


Рис.12 Принцип работы автогенератора на элементах с отрицательным сопротивлением.

Отрицательное сопротивление используется для получения незатухающих автоколебаний в контуре автогенератора. Если в колебательный LCR контур включить отрицательное сопротивление ( $-R$ ) равное положительному ( $R$ ), то потери в контуре будут скомпенсированы и в контуре могут существовать свободные незатухающие колебания. Упрощенная схема автогенератора на туннельном диоде приведена на рис. 12.г. На таких приборах можно строить автогенераторы на частоты до десятков ГГц. Но их мощность не превышает нескольких десятков мВт.



### Контрольные вопросы

1. Что такое «мягкий» и «жесткий» режим самовозбуждения и чем они определяются?
2. Объясните, какая емкость на схеме рис. 5.в должна быть больше.
3. Проследите аналогию между схемами рис. 6.а, 6.б и 5.в, 5.г.
4. Собраны две одинаковые схемы автогенераторов. Контурная катушка одного автогенератора выполнена из медного провода, другая – из посеребренного. Индуктивности катушек одинаковы. Объясните, в каком генераторе и почему будет выше стабильность частоты.
5. Какими схемотехническими и конструктивными способами можно уменьшить нестабильность частоты автогенераторов?
6. Сколько и каких резонансов может быть у кварцевого резонатора? Объясните их причины.
7. На каком резонансе (параллельном или последовательном) кварца основана схема автогенератора, приведенная на рис.10.б?
8. Объясните принцип работы автогенератора на приборе с отрицательным сопротивлением.

**Литература.**

1. Устройства генерирования и формирования радиосигналов. Учебник для вузов /Л.А. Белов, В.М. Богачев, М.В. Благовещенский и др; под ред. Г.М. Уткина и др. М. Радио и связь, 1994, 416с
2. Радиопередающие устройства. Учебник для вузов / В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др; под ред. В.В. Шахгильдяна М. Радио и связь, 1996, 560с.
3. Б.Е. Петров, В.А. Романюк, Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. М. Радио и связь, 1989, 232с.

**Содержание**

## Введение

1. Общие принципы работы автогенераторов.	4
2. Схемы автогенераторов.	8
3. Нестабильность частоты автогенераторов.	10
4. Автогенераторы с кварцевым резонатором.	12
5. Автогенераторы на элементах с отрицательным сопротивлением.	15
Литература.	18