

Глава 12. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Генератором электрических колебаний называется электронное устройство, с помощью которого осуществляется преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока различной формы. В зависимости от формы выходных колебаний различают генераторы гармонических колебаний и релаксационные. Первые широко используются в радиотехнических и измерительных устройствах, вторые — главным образом в импульсной и цифровой технике.

Электронные генераторы бывают с внешним и внутренним возбуждением. Генераторы с внешним возбуждением управляются от постороннего источника сигналов, а генераторы с внутренним возбуждением — автогенераторы — возбуждаются самостоятельно. Для объяснения работы любого электронного генератора его структурную схему представляют в виде усилителя и цепи положительной обратной связи (см. гл. 10). В гл. 10 было показано, что коэффициент усиления такого усилителя, охваченного положительной обратной связью, $K_{oc} = K/(1 - K\beta)$. При $K\beta < 1$ введение положительной обратной связи увеличивает коэффициент усиления усилителя. Однако если произведение $K\beta$ приближается к единице, положение меняется — на выходе усилителя наблюдаются колебания даже при отсутствии сигнала на входе. Происходит самовозбуждение усилителя — превращение усилителя в генератор. Электронный автогенератор работает следующим образом. Сразу же после включения источника питания появляется некоторое напряжение на выходе усилителя (оно возникает либо из-за бросков тока, появляющегося при включении, либо из-за флуктуаций токов и напряжений шума во всех элементах реальных электронных цепей). Это начальное напряжение усиливается усилителем и через цепь обратной связи в фазе подается на вход усилителя. Происходит самовозбуждение генератора, и напряжение на выходе усилителя растет до тех пор, пока транзисторы (или лампы) усилителя не установятся в режим отсечки (транзистор закрыт) или насыщения (транзистор полностью открыт). При этом рост напряжения прекращается и генератор переходит в стационарный режим. Работа усилителя в нелинейном режиме приводит к тому, что выходные колебания генератора резко отличаются по форме от гармонических. Для получения гармонических колебаний в нагрузку усилителя или в цепь обратной связи вводят частотно-избирательную систему, подавляющую все гармонические составляющие кроме одной. Для этой цели чаще всего используют одиночный колебательный контур достаточно высокой добротности Q , который отфильтровывает практически все гармонические составляющие кроме колебаний с частотой, равной его резонансной частоте F_p . Добротность реальных контуров колеблется от 50 до 300. Значение добротности определяет форму частотной характеристики контура, которая называется резонансной. Чем выше значение добротности, тем острее резонанс, т. е. больше амплитуда выходного сигнала и меньше полоса пропускания $2\Delta F$ (см. рис. 5.26). Добротность контура на резонансной частоте

$$Q = F_p/2\Delta F \text{ или } Q = \omega_p L/R = 1/(R\omega_p C) \text{ при } F_p = \omega_p/2\pi,$$

где L , C и R — соответственно индуктивность, емкость и активное сопротивление контура на резонансной частоте.

Другой способ получения гармонических колебаний в автогенераторе состоит в том, что в усилителе принимают специальные ме-

ры, чтобы не допустить работу его транзисторов в режиме отсечки или в режиме насыщения. Первый способ (использование одиночного колебательного контура) применяется в генераторах гармонических колебаний высокой частоты, второй — низкой частоты.

Используя структурные схемы рис. 10.2 и 10.3 при анализе генераторов, ясно, что в усилительной части могут использоваться самые различные активные элементы (лампы, транзисторы, туннельные диоды). Различными могут быть и схемы обратной связи. Но для того чтобы анализируемая схема стала генератором, необходимо обязательное выполнение двух условий: *баланс амплитуд* и *баланс фаз*.

Первое условие соответствует тому, что потери энергии в автогенераторе восполняются от источника питания с помощью цепи положительной обратной связи. Появившиеся по какой-либо причине на входе усилителя слабые колебания усиливаются усилителем в K раз и ослабляются в β раз цепью обратной связи, попадая вновь на вход усилителя в той же фазе, но с большей амплитудой. Далее они опять усиливаются, и процесс повторяется. В этом режиме амплитуда колебаний возрастает, что соответствует условию $K\beta > 1$. С наступлением стационарных колебаний произведение $K\beta = 1$. Последнее равенство и представляет собой математическую запись баланса амплитуд.

Математическая запись условия баланса фаз имеет вид $\varphi + \psi = 0$, где φ — сдвиг фазы выходного напряжения усилителя относительно входного, ψ — сдвиг фазы выходного напряжения цепи обратной связи относительно ее входа. Оба условия записываются в виде комплексного уравнения:

$$K\beta = 1, \quad (12.1)$$

где левая часть представляет собой петлевое усиление (см. гл. 10). Углы сдвига фаз φ и ψ войдут в уравнение (12.1) в явном виде, если его представить в показательной форме (см. § 5.3):

$$Ke^{j\varphi}\beta e^{j\psi} = 1, \quad (12.2)$$

где K и β — модули коэффициентов усиления и обратной связи; φ и ψ — аргументы комплексных чисел K и β .

12.2. ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

LC — автогенераторы. Существует много схем LC-генераторов, одна из самых распространенных приведена на рис. 12.1, а. Автогенератор представляет собой однокаскадный усилитель, в котором в качестве цепи положительной обратной связи применяют контур, настроенный с помощью подбора параметров L_0 и C_0 на резонансную частоту $\omega_p = 1/\sqrt{L_0C_0}$, или $F_p = 1/2\pi\sqrt{L_0C_0}$, где ω_p — кру-

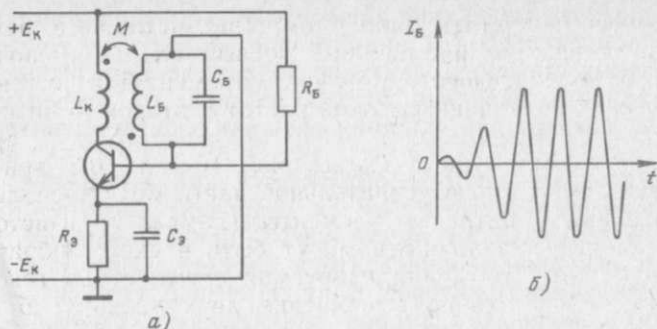


Рис. 12.1. Схема LC -автогенератора (а) и возникновение в нем незатухающих колебаний (б)

говая частота; F_p — частота, количество периодов в секунду. После включения источника питания E_k в контуре возникает переменный ток I_b , который усиливается транзистором. Эти колебания через катушку L_k , индуктивно связанную с катушкой L_b , вновь возвращаются в колебательный контур. Размах колебаний постепенно нарастает до определенной величины, пока транзистор работает в линейной части входной вольт-амперной характеристики. По достижении режимов отсечки и насыщения наступают стационарные колебания, т. е. колебания определенной амплитуды (рис. 12.1, б). Условие баланса амплитуд в данной схеме сводится к тому, что на резонансной частоте потери энергии в контуре компенсируются энергией, вносимой в колебательный контур источником питания через катушку L_k .

Условие баланса фаз в рассматриваемом автогенераторе осуществляется при сдвиге фаз выходного (коллекторного) напряжения U_k на 180° относительно напряжения U_b . Практически это условие выполняется соответствующей намоткой индуктивных катушек (направление, указанное точкой на рис. 12.1, а, намотки витков катушек резонансного контура и коллекторной цепи должно быть противоположным).

Существенным недостатком LC -автогенераторов является зависимость частоты генерируемых колебаний от изменения температуры и режима работы, механических воздействий на автогенератор, колебаний напряжений питания и других дестабилизирующих факторов. Отклонение частоты колебаний от допустимого значения может привести к тому, что некоторые электронные устройства, работающие на фиксированной частоте (избирательный усилитель, фазоинвертор и др.), перестанут работать или будут работать с большими погрешностями.

Воздействие дестабилизирующих факторов на нестабильность частоты проявляется в изменении емкостей конденсаторов и индуктивностей катушек колебательных контуров. Это объясняется

тем, что частоту колебаний определяют не абсолютные значения емкостей конденсаторов и индуктивностей катушек контура, а их эквивалентные значения, включая различные паразитные емкости и индуктивности, значения которых зависят от температуры, механических воздействий, влияния внешних электромагнитных полей и т. д.

Нестабильность частоты выражается как отношение абсолютного изменения частоты ΔF к рабочей частоте F_p $\Delta F/F_p = -0,5(\Delta L/L_0 + \Delta C/C_0)$, где ΔL и ΔC — приращения индуктивности и емкости катушки и конденсатора соответственно под влиянием дестабилизирующих факторов. Влияние температуры сказывается на изменениях линейных размеров индуктивных катушек и конденсаторов. Так, с повышением температуры линейные размеры указанных элементов увеличиваются, что влечет за собой рост емкости и индуктивности колебательного контура соответственно на ΔC и ΔL . Следует также отметить, что на нестабильность генерируемой частоты, вызванную изменением температуры, сильно влияют изменения параметров транзисторов. Для уменьшения нестабильности частоты используют различные способы ее стабилизации. Различают параметрическую и кварцевую стабилизацию частоты.

Параметрическая стабилизация частоты заключается в ослаблении влияния внешних факторов на частоту генерируемых колебаний, а также в подборе элементов генератора, обеспечивающих минимальные изменения частоты. Первое состоит в том, что контур экранируют для устранения воздействия внешних электромагнитных полей или применяют массивные корпуса (шасси) для снижения влияния механических ударов и вибрации. Второе заключается в одновременном включении в генератор конденсаторов с отрицательным и положительным температурными коэффициентами емкости, что уменьшает влияние изменений температуры. Параметрическая стабилизация частоты позволяет снизить нестабильность частоты до 10^{-5} .

Кварцевая стабилизация частоты заключается в применении кварцевых резонаторов, что дает очень низкую нестабильность частоты, обычно порядка 10^{-7} . Кварцевый резонатор представляет собой тонкую пластину минерала (кварца или турмалина) прямоугольной или круглой формы, установленную в кварцедержателе. Кварц, как известно, обладает пьезоэффектом. При сжатии кварцевой пластинки на противоположных ее гранях появляются разноименные электрические заряды, при растяжении пластинки на тех же гранях знаки зарядов изменяются на обратные. При воздействии на кварцевую пластинку переменного электрического поля в ней возникают механические упругие колебания, приводящие, в свою очередь, к появлению электрических зарядов на ее гранях. Таким образом, кристалл кварца (пластинка) представляет собой электро-механическую систему, обладающую резонансными свойствами. В зависимости от геометрических размеров и ориентации среза ре-

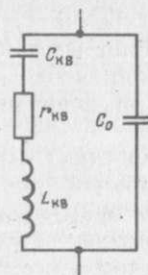


Рис. 12.2. Эквивалентная схема кварцевого резонатора

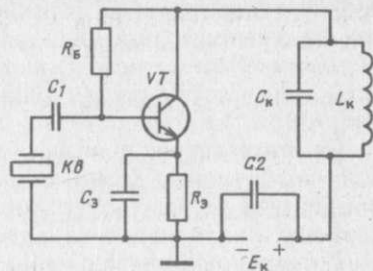


Рис. 12.3. Схема автогенератора с кварцевой стабилизацией частоты

зонансные свойства каждой пластинки строго индивидуальны и лежат в пределах от нескольких десятков килоггерц до нескольких десятков мегагерц.

Кварцевый резонатор эквивалентен электрическому колебательному контуру. Эквивалентная схема кварцевого резонатора изображена на рис. 12.2. Как видно из схемы, кварц эквивалентен $L_{кв}$, $r_{кв}$ и $C_{кв}$, шунтированным емкостным элементом, характеризующим емкость кварцедержателя C_0 (несколько десятков пикофарад). Индуктивность кварца $L_{кв}$ равна от десятков микрогенри до нескольких миллигенри. Емкость кварца $C_{кв}$ мала (сотые доли пикофарады). Кварцевый резонатор обладает острым резонансом, что свидетельствует о небольшом сопротивлении $r_{кв}$, составляющем обычно единицы-десятки ом. Поэтому добротность кварца достигает 10^5 — 10^6 , т.е. на 2—3 порядка больше добротности контуров, выполненных на дискретных элементах — индуктивной катушке и конденсаторе. Кварцевый резонатор, как видно из его эквивалентной схемы, может иметь два резонанса: резонанс напряжений (резонансная частота $\omega_n = 1/\sqrt{L_{кв}C_{кв}}$) и резонанс токов (резонансная частота $\omega_t = 1/\sqrt{C_{экв}L_{кв}}$, где $C_{экв} = C_0C_{кв}/(C_0 + C_{кв})$). Частоты ω_n и ω_t мало отличаются друг от друга, так как $C_0 \gg C_{кв}$. На частотах ниже и выше ω_t эквивалентное сопротивление кварцевого резонатора носит емкостный характер, а на частотах выше ω_n и ниже ω_t — индуктивный. Частотные свойства кварцевого резонатора обуславливают его различное включение в автогенератор. Чаще всего кварцевый резонатор включают в цепь обратной связи как колебательный контур (рис. 12.3).

Кварцевую стабилизацию частоты обычно применяют в автогенераторах, работающих на фиксированных частотах, что является ее недостатком. Кроме кварца для стабилизации частоты служат пластинки турмалина, однако этот минерал дороже кварца и поэтому применяется редко.

В интегральных микросхемах размеры кварцевой пластины не должны превышать размеров, соответствующих частотам порядка 20 МГц, поэтому на более высоких частотах используют

работу генератора на гармониках по частоте выше основной. Такие генераторы получили название делителей частоты. Так как геометрические размеры кварца увеличиваются с уменьшением частоты, для стабилизации низкой частоты используют камертонные вибраторы, выполненные из специальных сплавов.

RC-автогенератор. Для получения гармонических колебаний низкой частоты (от долей герца до нескольких десятков килогерц) применение LC-автогенераторов и кварцевых нецелесообразно из-за больших индуктивностей катушек, емкостей конденсаторов и больших размеров пластин кварцевых резонаторов. В этом случае используют RC-автогенераторы, так как получается высокая стабильность частоты за счет применения резисторов и конденсаторов с хорошей стабильностью параметров. Кроме того, RC-автогенераторы при одной и той же потребляемой мощности с LC-автогенераторами имеют меньшие габаритные размеры, массу и стоимость, а потому могут изготавливаться в интегральном исполнении.

Одна из схем RC-автогенераторов приведена на рис. 12.4. Этот автогенератор также содержит усилитель на транзисторе и цепь положительной обратной связи, являющейся частотно-зависимой RC-цепью. Входное и выходное напряжение сдвинуты по фазе 180° . Если выходное напряжение, снимаемое с коллектора, непосредственно подать на вход усилителя, то получится отрицательная обратная связь. Следовательно, для соблюдения условия баланса фаз, прежде чем подать напряжение с выхода на вход, необходимо сдвинуть его по фазе еще раз на 180° . Эту задачу выполняет RC-цепь, состоящая из трех одинаковых RC-звеньев, причем каждое RC-звено сдвигает напряжение по фазе на 60° . Сопrotивление последнего звена является суммой сопrotивлений резистора R_3 и входного сопrotивления каскада

$$R_{вх} = h_{11э} R_6 / (h_{11э} + R_6),$$

$$\text{где } R_6 = R_{61} \parallel R_{62} = R_{61} R_{62} / (R_{61} + R_{62}).$$

Если рассчитать коэффициент обратной связи трехзвенной RC-цепи, предусмотрев фазовый сдвиг ее входного и выходного напряжений на 180° , то при выполнении условий $R_1 = R_2 = R_3 = R$ и $C_1 = C_2 = C_3 = C$ самовозбуждение станет возможным на частоте

$$F_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{6R^2 C^2}}. \quad (12.3)$$

Частоту F_p , при которой угол $\psi = 180^\circ$, называют квазирезонансной частотой. Это название связано с тем, что генерируемые колебания имеют значительные искажения формы, из-за того, что условия самовозбуждения выполняются и для других частот (гармоник), близких по частоте к F_p . Это объясняется отсутствием строгой избирательности к основной частоте RC-цепи. Для снижения искажений в усилитель вводится отрицательная обратная связь по току. В автогенераторе рис. 12.4, а это можно осуществить включением резистора R_3 при отключении конденсатора C_3 . На частоте F_p коэффициент передачи $\beta = 1/29$. Следовательно, самовоз-

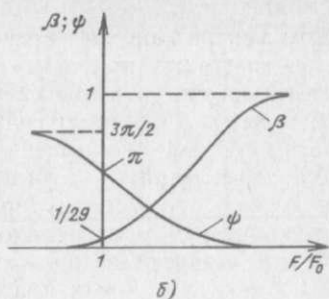
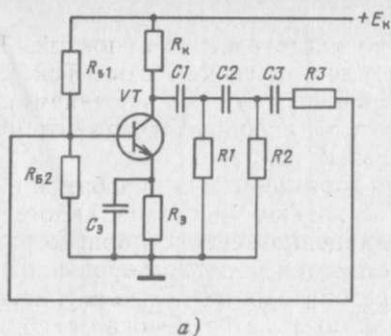
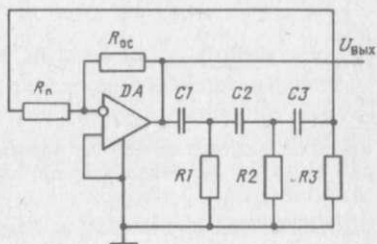


Рис. 12.4. Схема автогенератора с фазосдвигающей RC-цепочкой (а) и зависимость коэффициента передачи β и угла фазового сдвига ψ от частоты (б)

Рис. 12.5. Схема RC-автогенератора на операционном усилителе



буждение генератора возможно, если коэффициент усиления усилителя $K \geq 29$, а если введена отрицательная обратная связь, то $K > 29$ (см. рис. 12.4, б).

В качестве усилительного звена обычно используют усилители постоянного тока в интегральном исполнении, в частности операционные усилители (см. § 11.4 и 13.16). Схема RC-автогенератора на операционном усилителе приведена на рис. 12.5. Цепь частотно-зависимой обратной связи включена между выходом и инвертирующим (перевернутым относительно выходного сигнала на 180°) входом усилителя. Требуемый коэффициент усиления усилительного звена ($K \geq 29$) достигается выбором отношения $R_{ок}/R_о \geq 29$. Входное усиление инвертирующего усилителя, равное $R_о$, совместно с сопротивлением R_3 определяет активную составляющую сопротивления оконечного звена частотно-зависимой цепи обратной связи. В связи с этим для расчета частоты F_p по (12.3) нужно, чтобы $R_1 = R_2 = R_3 \parallel R_о = R$. Необходимая амплитуда колебаний достигается некоторой подстройкой сопротивления $R_{ок}$.