

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### ГЕНЕРАТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Генератором электрических колебаний называется устройство, позволяющее преобразовать энергию постоянного тока в энергию электрических колебаний, возникающих в его схеме самопроизвольно, без периодического воздействия внешнего возбуждающего напряжения.

#### ОБЩИЕ УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрим автогенератор как структуру, содержащую два основных звена: усилительное (К) и звено обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta$  (рис. 1).

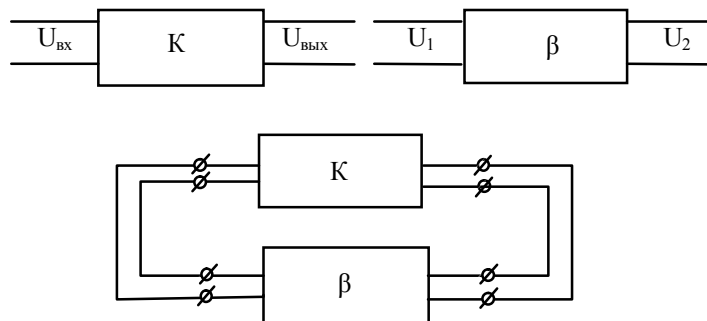


Рис. 1. Структурная схема автогенератора.

Обозначим

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = ke^{i\varphi_K} \quad (1)$$

(К - комплексный коэффициент усиления усилительного звена) и

$$\beta = \frac{U_1}{U_2} = \beta e^{i\varphi_\beta} \quad (2)$$

( $\beta$ - комплексный коэффициент передачи напряжения цепи обратной связи), где U- напряжение на входе, а U- напряжение на выходе цепи обратной связи. Комплексная форма выражений вызвана необходимостью учета сдвигов фаз, создаваемых усилительным звеном и цепью обратной связи.

При наличии в схеме автогенератора колебаний должно выполняться условие:

$$K\beta = K\beta e^{i(\varphi_K + \varphi_\beta)} = 1 \quad (3)$$

Из этого равенства вытекает:

1)  $k\beta = 1$  - условие баланса амплитуд (4)

2)  $\varphi_K + \varphi_\beta = 2\pi n$  - условие баланса фаз, где (5)

Здесь  $k$  - модуль коэффициента усиления усилительного каскада,  $\beta$  - модуль коэффициента передачи цепи обратной связи,  $\varphi_k$  - фазовый сдвиг, создаваемый усилительным каскадом,  $\varphi_\beta$  - фазовый сдвиг, создаваемый цепью обратной связи,  $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

Эти условия являются очень важными в теории автогенераторов.

Основной предпосылкой к самовозбуждению автогенератора и переходу его в режим установившихся колебаний является положительная обратная связь, характеризуемая совпадением фазы напряжения на выходе цепи обратной связи и входе усилителя.

Под действием положительной обратной связи малые флуктуационные колебания, возникающие в схеме генератора после включения напряжения питания, усиливаются усилительным каскадом  $K$  и передаются цепью обратной связи  $\beta$  на выход усилителя. При каждом обходе по замкнутому контуру, содержащему усилитель и цепь обратной связи, сигнал на входе и выходе усилительного звена прогрессивно возрастает. Такой рост продолжается до тех пор, пока процесс самовозбуждения не завершается установившимся режимом, для которого и выполняются условия баланса амплитуд (4). Для самовозбуждения автогенератора в начальный момент времени необходимо выполнение условия:

$$k\beta > 1 \quad (6)$$

Если бы характеристика усилительного звена была линейной, это привело бы к бесконечному росту амплитуды автоколебаний. Поэтому усилительное звено должно обладать нелинейной характеристикой. Переход к установившемуся режиму обусловлен постепенным уменьшением коэффициента усиления усилительного звена в связи с уменьшением наклона усилительной характеристики при росте сигнала, что характерно для всех видов усилителей (рис. 2).

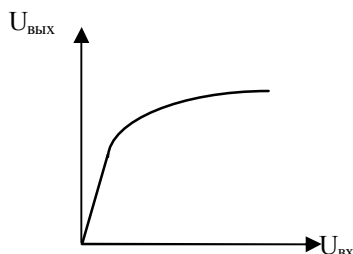


Рис. 2. Характеристика усилителя.

В принципе генератор с самовозбуждением мало отличается от усилительной ступени с цепью обратной связи. Одно из отличий заключается в том, что часто усилитель должен усиливать полосу частот и поэтому в качестве нагрузки используется апериодическая нагрузка (резистор, дроссель, трансформатор). Генератор генерирует чаще всего одну частоту, поэтому в качестве нагрузки используется параллельный колебательный контур, сопротивление которого на резонансной частоте максимально и имеет активный характер

$$R = \rho Q, \text{ где } \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ волновое сопротивление, } Q - \text{ добротность.}$$

Примером генератора является транзисторный генератор с индуктивной связью (рис. 3). В этой схеме цепь обратной связи образована катушкой контура  $L$  и катушкой обратной связи в цепи базы  $L_{св}$ . Возникающие в контуре электрические колебания (в момент включения) наводят в катушке связи переменную ЭДС, которая создает переменное возбуждающее напряжение в

цепи базы. Для этого вторичная обмотка цепи обратной связи должна быть так присоединена к выводам базы и коллектору транзистора, чтобы входное напряжение у нее имело фазу, сдвинутую на  $180^\circ$  по отношению к фазе выходного напряжения усилительного звена. Этим обеспечивается нулевой сдвиг (следовательно, положительная обратная связь) между входным и выходным напряжениями в петле обратной связи, так как усилительное звено также создает фазовый сдвиг, равный  $180^\circ$ .

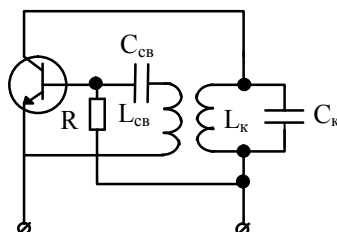


Рис. 3. Генератор на транзисторе.

### КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ

Процесс возникновения колебаний в автогенераторе зависит от условий, в которые поставлен усилительный элемент, то есть от выбранного рабочего режима, определяемого постоянными питающими напряжениями и величиной коэффициента обратной связи. Особую роль при выборе режима играет напряжение смещения  $E$ , так как оно определяет положение рабочей точки на характеристике усилительного элемента. Если рабочая точка лежит в области большой крутизны, то самовозбуждение возникает легко, так как незначительные изменения напряжения во входной цепи вызывают значительные изменения выходного тока. Возможен также и другой случай, когда рабочая точка лежит в области минимальной крутизны, что приводит к затруднению самовозбуждения генератора. Следовательно, возможны два режима самовозбуждения:

#### Мягкий режим самовозбуждения

Мягкий режим (рис. 4) наблюдается при положении рабочей точки на прямолинейном участке характеристики усилительного элемента и характерен для схемы генератора на рис. 3. Появление сеточного тока препятствует повышению средней крутизны и ограничивает дальнейший рост импульсов анодного тока.

#### Жесткий режим самовозбуждения.

Для получения этого режима рабочая точка смещается влево, для чего на сетку подается отрицательное напряжение (рис. 5), более отрицательное, чем напряжение запирающего (режим С с углом осечки  $q < 90^\circ$ ). При больших напряжениях смещения незначительные колебания, возникающие в контуре и передающиеся цепью обратной связи в сеточную цепь, не могут вызвать самовозбуждение генератора, так как лампа закрыта. Колебания могут возникнуть при очень большой начальной амплитуде, что иногда трудно обеспечить. Колебания возникают скачком и быстро нарастают до установившегося режима. С точки зрения эксплуатации удобен мягкий режим, так как колебания возбуждаются самопроизвольно и плавно (мягко). Однако наличие тока покоя (постоянной составляющей) приводит к низкому КПД и большим потерям, возникающим на электродах усилительного элемента. Поэтому в момент включения

целесообразно иметь мягкий режим (напряжение смещения мало), а в установившемся режиме целесообразно перейти в жесткий режим (напряжение смещения большое). Эти противоречивые требования успешно удовлетворяются с помощью включения в сеточную цепь цепочки RC.

По существу, в цепи сетки возникает выпрямительная схема, в которой роль диода выполняет промежутки катод - сетка, а нагрузочным сопротивлением этой схемы является R. В процессе самовозбуждения в цепи сетки на R возникает постоянное напряжение с отрицательной полярностью на сетке, которое является напряжением смещения. Конденсатор C снижает пульсации и повышает постоянное напряжение на сетке. Для этого постоянная времени RC-цепи определяется соотношением  $\tau = RC \cdot T$ , где T – период колебаний.

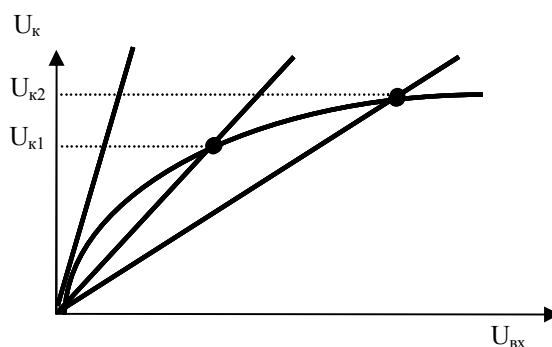


Диаграмма работы подобного генератора приведена на рис. 6.

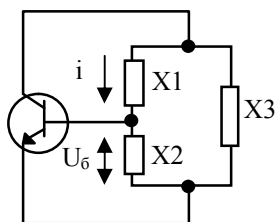
Когда автоколебания в генераторе отсутствуют, нет и дополнительного отрицательного смещения. После возникновения колебаний появляются импульсы сеточного тока, которые создают отрицательное напряжение смещения, сдвигающее рабочую точку влево и переводящее схему из мягкого в жесткий режим.

### ОБОБЩЕННАЯ ТРЕХТОЧЕЧНАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА

Рассмотренные выше схемы с индуктивной связью и большинство других существующих схем генераторов могут быть приведены к так называемой обобщенной трехточечной схеме.

Для выполнения условий самовозбуждения в этой схеме должны выполняться 3 требования:

1. Сопротивления X1 и X2 должны иметь разные знаки.
2. Сопротивление X1 должно быть по абсолютной величине больше X2.



3. Сопротивления  $X_1$  и  $X_2$  должны иметь разные знаки.

При выполнении первых двух требований обеспечивается баланс фаз, т.к. напряжение на базе транзистора, равное  $iX_1$  оказывается сдвинутым на  $180^\circ$  относительно напряжения на коллекторе, равного  $i(X_1+X_2)$ .

При выполнении третьего требования сопротивление третьей ветви, равное  $X_1+X_2$  и сопротивление правой ветви  $X_3$  приобретают разные знаки и образуют колебательный контур LC, резонансная частота которого и определяет частоту генерируемых колебаний.

### КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Колебательной характеристикой называется зависимость тока первой гармоники  $I$  от напряжения возбуждения  $U$  или  $I = f(U)$ . В силу наличия нелинейного элемента (лампа или транзистор) напряжение, значение тока анода или коллектора определяется суммой постоянной составляющей и высших гармоник:

$$i = I_0 + I_{K1} \cos 2\omega t + I_{K2} \cos 2\omega t + I_{K3} \cos 3\omega t + \dots \quad (7)$$

Напряжение на нагрузке (контуре)  $U$  будет определяться резонансным сопротивлением контура для тока 1-ой гармоники:

$$U_K = I_{K1} R_P \quad (8)$$

Колебательная характеристика нелинейна, т.к. она характеризует свойства усилительного звена, содержащего нелинейный элемент, и аналогична амплитудной характеристике усилителя.

Колебательная характеристика совместно с характеристикой обратной связи позволяет определить амплитуду установившихся колебаний.

Для определения амплитуды установившихся колебаний на одном графике строится зависимость  $U_K$  от напряжения на входе усилительного звена  $U_{ВХ}$  и линейная характеристика обратной связи. В установившемся режиме автогенератора амплитуда напряжения возбуждения  $U_{ВХ}$  и амплитуда переменного напряжения на резонансной частоте  $U_K$  должны одновременно удовлетворять этим зависимостям. Это возможно только в точках пересечения 1 и 2. При увеличении коэффициента связи (прямая  $1/\beta$  проходит ниже) точка пересечения смещается вправо, что приводит к некоторому увеличению амплитуды колебаний на нагрузке. Подобный процесс характерен для мягкого режима.

Как можно видеть из графика (рис. 7.), при уменьшении величины обратной связи амплитуда колебаний плавно уменьшается. При небольших, близких к критическим, значениях коэффициента связи лампа работает на линейном участке ее колебательной характеристики, что позволяет получить неискаженную, синусоидальную форму выходного напряжения.

У генератора, имеющего жесткий характер самовозбуждения, колебательная характеристика имеет иной вид (рис. 8.). Если в таком генераторе уменьшать величину обратной связи, то при амплитуде колебаний, соответствующей точке 3, в которой характеристика обратной связи касается колебательной характеристики, колебания сорвутся. Следовательно, в жестком режиме невозможно, уменьшая величину обратной связи, плавно уменьшать амплитуду колебаний. Кроме того, из-за нелинейности характеристики форма колебаний оказывается сильно искаженной.

Точка О характеризует устойчивое состояние покоя, т. е. отсутствие самовозбуждения при малых начальных амплитудах, т. к. транзистор закрыт запирающим напряжением смещения. Возбуждение может наступить при амплитудах, превышающих (точка 1), после чего амплитуда

нарастает и достигается устойчивый режим (точка 3). Точка 2 характеризует неустойчивое состояние генератора. Так как случайное изменение в сторону уменьшения вызывает соответствующее уменьшение, что в свою очередь уменьшает амплитуду, в результате колебания в схеме затухают. Небольшое увеличение амплитуды входного сигнала вызывает увеличение, что приводит к нарастанию до устойчивого колебательного состояния, характеризуемого точкой 3. Если в таком генераторе уменьшать величину обратной связи, то при амплитуде колебаний, соответствующих точке 3, в которой характеристики обратной связи касается колебательной характеристики, то колебания сорвутся. Следовательно, в жестком режиме невозможно, уменьшая величину обратной связи, плавно уменьшать амплитуду колебаний. Кроме того, из-за нелинейности характеристики форма коллекторного тока оказывается сильно искаженной. Однако использование в схеме генератора колебательного контура позволяет выделить первую гармонику коллекторного тока и получить входное синусоидальное напряжение.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРА

Стабильность частоты является одним из важнейших параметров автогенератора. Для количественной оценки стабильности частоты автогенераторов наиболее часто используется обратная величина - относительная нестабильность частоты, представляющая собой отношение максимально допустимого отклонения частоты автогенератора от установленного значения (абсолютная нестабильность частоты) к установленной частоте.

Причины, которые вызывают отклонение частоты, и методы стабилизации частоты могут быть выявлены при анализе уравнения баланса фаз. Фазовые углы и являются функциями частоты и параметров схемы автогенератора и режима его работы (величин индуктивностей, емкостей, параметров активного элемента). Под влиянием различных факторов, называемых дестабилизирующими, параметры автогенератора будут изменяться, что приведет к изменению фазовых углов в уравнении (3). Однако после изменения углов установится новый стационарный колебательный режим на новой частоте и сумма измененных фазовых углов будет снова удовлетворять соотношению (5). Следовательно, для повышения стабильности частоты автогенератора существуют следующие возможные пути:

1. Поддержание постоянства параметров режима генератора и колебательной системы. Этот путь носит название параметрической стабилизации. Параметрическая стабилизация требует поддержания постоянства питающих напряжений. Для осуществления параметрической стабилизации также необходимо, чтобы колебательная система слабо изменяла свои параметры под влиянием внешних воздействий (изменение температуры влажности, давления и т.п.)
2. Выбор схемы и режима работы генератора при котором фазовые углы изменялись бы в минимальной степени при изменении параметров отдельных элементов и режима работы генератора. В связи с тем, что цепь обратной связи содержит колебательную систему (колебательный контур), фазовый сдвиг которой зависит от частоты, необходимо использовать контур с большой крутизной фазово-частотной характеристики, так как при одинаковом изменении фазового угла, вызываемом изменением, например, параметров режима работы, возникает изменение частоты автогенерации, большее для контура с меньшей крутизной. Так как крутизна фазочастотной характеристики зависит от добротности, необходимо использовать колебательные контуры с максимальным значением  $Q$ .
3. Компенсация температурных изменений параметров элементов автогенератора (в основном, емкости колебательного контура, увеличивающейся с возрастанием температуры), противоположными по характеру изменениям других. Наиболее часто для компенсации используют конденсаторы с отрицательным температурным коэффициентом, емкость которых уменьшается при увеличении температуры.
4. Использование в качестве колебательных систем кварцевых резонаторов, обладающих высокой стабильностью собственной колебательной частоты и высокой добротностью. Кварцевые

резонаторы позволяют получать относительную нестабильность частоты автогенераторов, что недостижимо при других путях стабилизации частоты.

Кварцевые резонаторы представляют собой пластины, определенным образом вырезанные из кристаллов кварца и обладающие прямым и обратным пьезоэффектом. На боковые поверхности пластин наносятся проводящие металлические слои, являющиеся обкладками конденсатора. При подведении к обкладкам переменной э.д.с. кварцевая пластина будет совершать стабильные механические колебания, амплитуда которых достигает максимума при совпадении частоты внешней э.д.с. с собственной частотой механических колебаний кварцевой пластины. Механические колебания вызывают, в свою очередь, появление электрических зарядов на обкладках.

Резонансные свойства кварцевых резонаторов очень стабильны, а добротность их достигает величин  $\sim 10^7$ , что во много раз превышает добротность обычных колебательных контуров. Эквивалентная схема кварцевого резонатора приведена на рис. . Она состоит из большой индуктивности  $L_1$ , малой емкости  $C_1$ , образующих последовательный колебательный контур с сопротивлением потерь  $R_1$ . В схему также входит емкость кварцедержателя  $C_0$ . Такая эквивалентная схема имеет две точки резонанса:

1. точку резонанса последовательного контура,
2. точку резонанса параллельного контура.

Эти резонансные частоты связаны соотношением:

При резонансе параллельного контура полное сопротивление  $Z$  резонатора максимально, а при резонансе последовательного - минимально (рис. ). Обе резонаторные точки используются для стабилизации частоты в схемах автогенераторов.

Существует большое разнообразие схем кварцевых автогенераторов. В таких схемах кварцевые резонаторы, возбуждаемые на нечетных механических гармониках, в большинстве случаев работают на последовательном резонансе. Схемы такого типа мало зависят от внешних влияний и обеспечивают высокую стабильность частоты. Контур, имеющий в схеме кварцевый генератор, обеспечивает надежное подавление побочных частот и устойчивость колебаний. На рис. приведена схема кварцевого генератора на полевом транзисторе.

В схеме с кварцем в цепи обратной связи (рис. ) кварцевый резонатор обычно возбуждается на основной частоте или на частотах механических гармоник - третьей или пятой. Автогенератор возбуждается на частоте, близкой к частоте последовательного резонанса (или кратной ей) кварца, так как его сопротивление при этом мало и цепь обратной связи оказывается замкнутой. На всех других частотах, отличных от резонансной, сопротивление цепи обратной связи невелико и самовозбуждения не происходит. Основное преимущество этой схемы заключается в высокой стабильности частоты автоколебаний возможности получения частот до 150 МГц при работе кварцевого резонатора на гармонике, а внешней части схемы - в режиме удвоения или утроения частоты.

## АВТОГЕНЕРАТОРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Установление в автогенераторе незатухающих колебаний свидетельствует компенсации потерь в колебательной системе, что формально можно трактовать, как внесение в колебательную систему "отрицательного сопротивления", равного по величине сопротивлению потерь. "Отрицательное сопротивление" в генераторах с обратной связью имеет транзистор, регулирующий поступление энергии в колебательный контур от источника постоянного напряжения под действием напряжения на базе. Об этом свидетельствует отрицательная крутизна ее динамической характеристики (рис. ).

Однако это достигается только при подаче на базу напряжения по цепи обратной связи. Имеется ряд устройств, которые по своей природе обладают "отрицательным сопротивлением".

Присоединение их к колебательному контуру может привести к генерации незатухающих колебаний без применения внешней обратной связи. Примером такого устройства является электрическая дуга.

В начальный период передатчики строились с использованием электрической дуги (дуговые передатчики), где контур включался последовательно с электрической дугой. В последнее время были разработаны полупроводниковые приборы, также обладающие "отрицательным сопротивлением" (например, туннельные диоды).

Все реальные устройства могут обладать свойствами "отрицательного" сопротивления в некоторой области режимов, за пределами которой они являются устройствами с обычным, "положительным" сопротивлением. В противном случае колебания в такой системе возрастали бы бесконечно. Если включить элемент с "отрицательным" сопротивлением в контур так, что он будет работать на падающем участке характеристики при выполнении условия, что произойдет самовозбуждение системы.

На рис. приведена схема автогенератора на туннельном диоде. Кроме туннельных диодов в схемах генераторов с "отрицательным сопротивлением", возможно использование тетродов и пентодов в схемах динаatronного и транзисторного генераторов.

## ГЕНЕРАТОРЫ, НЕ СОДЕРЖАЩИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ (RC-ГЕНЕРАТОРЫ)

При снижении частоты генерируемых колебаний (при  $f < 50$  кГц) значительно возрастает индуктивность  $L$  и емкость  $C$  контура. Это приводит к увеличению размеров, снижению стабильности. Поэтому колебательные контуры LC-типа не используются на низких частотах ( $f < 50$  кГц), а применяются RC - звенья, обеспечивающие условия самовозбуждения.

Если собственный сдвиг фазы равен  $180^\circ$  (лампа с общим катодом или транзистор с общим эмиттером), то звено обратной связи должно создавать такой фазовый сдвиг, чтобы результирующий фазовый сдвиг был равен  $360^\circ$ . Для этого могут применяться RC-звенья. В связи с тем, что одно такое звено обеспечивает на определенной частоте фазовый сдвиг, равный  $60^\circ$ , для получения требуемого фазового сдвига  $180^\circ$  используют RC-цепь, состоящую из трех звеньев.

Частота, на которой фазовый сдвиг подобной цепи равен  $180^\circ$ , называется квазирезонансной.

В силу того, что коэффициент такой цепи равен , необходимо, чтобы коэффициент усиления  $K$  усилительного звена был более 29 ( $K > 29$ ). Однако значительное увеличение  $K$  нежелательно, так как возрастает количество гармоник из-за отсутствия избирательности у цепи обратной связи В отличие от LC-генераторов, где избирательность обеспечивается резонансными свойствами колебательного контура).

На рис. приведена схема RC-генератора с трехзвенной цепью.

Перестройка подобного генератора может осуществляться путем скачкообразного изменения емкостей  $C$  и плавного изменения величины  $R$ .

## ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ LC-АВТОГЕНЕРАТОРОВ

В настоящее время существует большое разнообразие различных схем автогенераторов на лампах и транзисторах.

Схема генератора на рис. является разновидностью индуктивной трехточечной схемы, успешно работающей как на низких ( $f \sim 50$  кГц), так и на высоких частотах ( $f \sim 200$  МГц) при



использовании высокочастотных транзисторов (КТ 315, КТ 606). Резистор R2 позволяет ограничить постоянную составляющую тока коллектора и мощность, рассеиваемую на коллекторе. При необходимости получения синусоидальной формы выходного напряжения выходной сигнал снимается не с коллектора, а с помощью катушки L1, содержащей числа катушки L2. На высоких частотах не требуется включение конденсатора C3, так как емкость коллектора транзистора оказывается включенной в контур L3C3.

Генераторы, выполненные на полевых транзисторах, позволяют получать более высокую стабильность частоты. На рис приведена схема автогенератора на полевом транзисторе.

Благодаря высокому входному сопротивлению, цепь затвора полевого транзистора почти не шунтирует контур, сохраняя его высокую добротность, что повышает и стабильность частоты.

Колебания более высоких частот ( $f \sim 300$  МГц) можно получить с помощью автогенератора, в котором транзистор включен по схеме с общей базой (рис. ).

Обратная связь в данной схеме осуществляется с помощью конденсатора C3. При настройке подобного генератора величину C3 устанавливают минимальной, что улучшает форму выходного напряжения.

## ГЕНЕРАТОРЫ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В релаксационных генераторах возбуждаются колебания, по форме резко отличные от синусоидальных. Простейший тип релаксационного генератора может быть осуществлен по схеме, показанной на рис. .

Схема действует следующим образом: после включения источника E начинает заряжаться источник C. Этот заряд прекращается, как только напряжение на конденсаторе достигнет величины зажигания лампы U2 (рис. ). Вспыхнувшая лампа имеет малое сопротивление, и конденсатор довольно быстро разряжается через нее до напряжения U1, при котором лампа гаснет, и процесс повторяется.

Амплитуда колебаний зависит от разности потенциалов зажигания и погашения лампы (U2-U1).

Частота автоколебаний зависит от постоянных времени цепей заряда и разряда, а также от напряжения источника. Период колебаний T складывается из двух промежутков.

для процесса заряда имеем

где  $\tau$  - постоянная времени зарядной цепи.

Нетрудно показать, что время заряда конденсатора от напряжения U2 до напряжения ее погашения U1 продолжается в течение промежутка. Этот промежуток равен  $\tau \ln \frac{U2}{U1}$ , где R1 - сопротивление лампы при ее горении.

Таким образом, период релаксационного колебания равен  $T = \tau \ln \frac{U2}{U1} + \tau \ln \frac{U2}{U1}$ .

Из этого выражения видно, что период колебаний тем больше, чем больше постоянные времени заряда и разряда. Период же тем меньше, чем больше напряжение питающей батареи.

При использовании в качестве разрядной лампы тиратрона появляется возможность регулирования периода колебаний путем изменения порога зажигания (U2) подачей дополнительного напряжения на его сетку. Значительно большие возможности регулирования периода колебаний и формы кривой имеют схемы, в которых роль разрядного элемента ("клапана") выполняется электронными лампами или полупроводниковыми приборами (например, туннельными диодами). Подобные релаксационные генераторы могут применяться в качестве генератора развертки осциллографов.

К релаксационным генераторам относятся и мультивибраторы. Мультивибратор обычно содержит два взаимно связанных транзисторных усилителя, у которых для возбуждения и

поддержания колебаний выход второго усилителя подключен к выходу первого, а выход первого - к входу

## ОСОБЕННОСТИ ТРАНЗИСТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Транзисторные генераторы имеют ряд особенностей по сравнению с ламповыми схемами, обусловленных физической природой процессов в транзисторе. Главная из них - инерционные процессы, причиной которых является конечное время пролета неосновных носителей через базу транзистора. Если для большинства случаев процессы в ламповых генераторах можно анализировать с помощью статических характеристик, то для транзисторных автогенераторов подобный анализ будет справедлив только на низких частотах диапазона рабочих частот транзистора.

Напряжения на всех электродах транзистора типа р-п-р в схемах автогенераторов должны иметь полярность, обратную полярности напряжений на соответствующих электродах лампы направления тока базы и коллектора имеют также обратный характер. Направления тока базы и коллектора в транзисторе п-р-п совпадает с направлением тока в электронной лампе.

Следующей особенностью транзисторных схем являются их малые (по сравнению с электронными лампами) сопротивления. Во многих схемах автогенераторов лампа работает без сеточных токов, то есть в области отрицательных напряжений на сетке. По этой причине при анализе ламповых схем можно считать, что сопротивление участка сетка-катод равно бесконечности. В транзисторах коллекторный ток всегда сопровождается током базы. Сопротивление участка база-эмитер относительно мало ( $\sim 10$  Ом) и его всегда необходимо учитывать.

Внутреннее сопротивление лампы  $R$ , нагруженной на колебательный контур обычно соизмеримо с сопротивлением контура при резонансе, что позволяет обеспечить согласование контура с лампой при полном включении контура. Внутреннее сопротивление транзистора обычно значительно меньше сопротивления контура, поэтому для его согласования с транзистором эквивалентное сопротивление контура снижают либо путем увеличения его емкости (так как  $R = \frac{1}{\omega C}$ ), либо путем его частичного включения (см. рис. 9)

Схемы транзисторных автогенераторов классифицируются по признаку общего электрода (общий эмитер, общая база, общий коллектор). Из этих трех схем наиболее часто применяется схема с общим эмитером, так как в ней коэффициент усиления по мощности значительно выше, чем в других. В то же время частотные свойства лучше при использовании схемы с общей базой.

В транзисторном автогенераторе, как и в ламповом, существуют мягкий и жесткий режимы возбуждения. Причем, как известно, в ламповом генераторе при наличии только автоматического смещения (резистор в цепи катода) возникает режим мягкого возбуждения с переходом генератора по мере роста амплитуды колебаний в жесткий режим. В транзисторном генераторе, работающем по схеме с общим эмитером (см. рис. 11) при наличии только автоматического смещения в цепи база-эмитер, возникает жесткий режим (рабочая точка в положении 1, рис. 10). Это объясняется особенностями характеристик транзистора расположенных в правом квадранте.

Жесткий режим самовозбуждения в схеме генератора на транзисторе можно получить и при отсутствии напряжения смещения (точка 2, рис. 10). Для того, чтобы создать мягкий режим самовозбуждения, то есть для установки рабочей точки в середине линейного участка (рис. 10, точка 3), необходимо подать смещение  $E$  на базу (рис. 12) отрицательное в случае транзистора р-п-р типа и положительное в случае транзистора п-р-п типа.

Таким образом, для обеспечения мягкого режима самовозбуждения и перехода затем системы в жесткий режим, необходима комбинированная схема смещения (рис. 13).

Первоначальное смещение создается резистором  $R$  (точка 3, рис. 10). При появлении пульсирующего тока эмитера на резисторе  $R$  возникает падение напряжения, являющееся запирающим для транзистора, и рабочая точка смещается в положение 1, что приводит к переходу схемы в жесткий режим.

Цель работы: Исследовать характеристики и свойства транзисторного автогенератора.

### ХОД РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством осциллографа и цифрового частотомера и с органами его управления (по инструкциям к приборам).
2. Собрать схему генератора, подключив на его выход вертикальный вход осциллографа и добиться устойчивой картины на его экране. Зарисовать полученные кривые. Напряжение питания генератора 9:12 В.
3. Измерить частоту генерируемых колебаний для всех емкостей колебательного контура генератора с помощью фигур Лиссажу. (для этого на горизонтальный вход осциллографа подать сигнал от генератора сигналов, а на вертикальный вход осциллографа от исследуемого генератора.)
4. Подключить на выход генератора цифровой частотомер и определить частоту генерируемых колебаний также для всех емкостей колебательного контура генератора.
5. Снять зависимость частоты и амплитуды генерируемых колебаний от величины постоянного напряжения питания. Объяснить полученные результаты.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как меняется амплитуда выходного напряжения генератора при изменении коэффициента передачи цепи обратной связи
  - а) в мягком режиме
  - б) в жестком режиме?
2. Каков спектр выходного сигнала при работе генератора
  - а) в мягком режиме
  - б) в жестком режиме?
3. Каков режим работы генератора в данной работе?
4. Как его изменить?