**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ. БАЗОВЫЕ СХЕМЫ**

**Содержание**

Введение

Сравнительный анализ режимов самовозбуждения генератора

Автогенератор с трансформаторной обратной связью

Автогенератор на туннельном диоде

Обобщенная схема трехточечного генератора

Заключение

Литература

**Введение**

Проведя сравнительный анализ режимов самовозбуждения автогенератора, отметив достоинства и недостатки этих режимов, необходимо акцентировать внимание на совмещении их достоинств в автоматическом смещении путем анализа конкретных схем его обеспечения.

Рассматривая базовые схемы автогенераторов с применением трансформаторов и туннельных диодов, особое внимание следует уделить на понимание курсантами физических процессов, происходящих при самовозбуждении и работе генераторов, а также сделать опору на изученные теоретические основы автоколебаний.

Первый патент на трехточечную схему выдан инженеру американской фирмы "Вестерн электрик" Р. Хартлею (1975 г.), имя которого она носит в радиотехнической литературе. Это индуктивная трехточка. В схеме Хартлея обратная связь изменяется путем перемещения точки присоединения катода по виткам катушки индуктивности контура. В 1918 году инженер той же фирмы Э. Колпитц запатентовал схему лампового генератора с емкостной обратной связью. Схемы Хартлея и Колпитца являются основными схемами автогенераторов и прототипами всех исторически более поздних автогенераторов.

В конце первой мировой войны в ламповой технике генерирования незатухающих колебаний были сделаны попытки использовать внутриламповые емкости. Положительная обратная связь через емкость сетка-анод триода, с которой боролись в радиоприемниках, здесь оказалась полезной. Одна из ранних схем такого типа имела два контура – один в анодной цепи, другой – в сеточной цепи и была эквивалентна индуктивной трехточке. Колебания возникали, когда контуры были несколько расстроены относительно частоты генерации и имели индуктивное сопротивление. Эта схема нашла применение на коротких волнах в радиолюбительской практике 20-х годов. Позднее появились другие варианты двухконтурных генераторов. Важно подчеркнуть, что все они сводились либо к индуктивной, либо к емкостной трехточкам. Принципы построения ламповых генераторов сохранились до наших дней, несмотря на то, что элементная база шагнула далеко вперед (от лампового триода до интегральных микросхем).

**Сравнительный анализ режимов самовозбуждения генератора**

Проведем сравнительный анализ режимов самовозбуждения, используя при этом различные характеристики автогенератора.

Мягкий режим.

Если рабочая точка находится на участке характеристики *i*K(*u*БЭ) с наибольшей крутизной, то режим самовозбуждения называется мягким.

Проследим за изменениями амплитуды тока первой гармоники в зависимости от величины коэффициента обратной связи *К*ОС. Изменение *К*ОС приводит к изменению угла наклона прямой обратной связи (рис.1)



а) б)

Рис. 1 Мягкий режим самовозбуждения

При *К*ОС = *К*ОС1 состояние покоя устойчиво и генератор не возбуждается, амплитуда колебаний равна нулю (рис. 1 б). Величина *К*ОС = *К*ОС2 = *К*КР является граничной (критической) между устойчивостью и неустойчивостью состояния покоя. При *К*ОС = *К*ОС3 > *К*КР состояние покоя неустойчиво, генератор возбудится, и величина *Im*1 установится соответствующей точке А. При увеличении *К*ОС величина первой гармоники выходного тока будет плавно расти и при *К*ОС = *К*ОС4 установится в точке Б. При уменьшении *К*ОС амплитуда колебаний будет уменьшаться по той же кривой и колебания сорвутся при коэффициенте обратной связи *К*ОС = *К*ОС2 < *К*КР.

В качестве выводов можно отметить следующие особенности мягкого режима самовозбуждения:

* для возбуждения не требуется большой величины коэффициента обратной связи *К*ОС;
* возбуждение и срыв колебаний происходят при одном и том же значении коэффициента обратной связи *К*КР;
* возможна плавная регулировка амплитуды стационарных колебаний путем изменения величины коэффициента обратной связи *К*ОС;
* как недостаток следует отметить большое значение постоянной составляющей коллекторного тока, что приводит к малому значению КПД.

Жесткий режим.

Если рабочая точка находится на участке характеристики *i*K = *f* (*u*БЭ) с малой крутизной *S* < *SMAX*, то режим самовозбуждения называется жестким.

Проведем анализ режима (аналогично мягкому режиму самовозбуждения) по колебательной характеристике автогенератора *Im*1 = *f* (*Um*БЭ) и характеристике *Im*1 = *f* (*К*ОС), представленных на рисунках 2 а) и б) соответственно.



а) б)

Рис. 2 Жесткий режим самовозбуждения

Анализируя точки пересечения прямых обратной связи с колебательной характеристикой, приходим к выводу, что возбуждение автогенератора произойдет, когда коэффициент обратной связи превысит величину *К*ОС3 = *К*ОСКР. Дальнейшее увеличение *К*ОС приводит к небольшому увеличению амплитуды первой гармоники выходного (коллекторного) тока *Im*1 по пути В-Г-Д. Уменьшение *К*ОС до *К*ОС1 не приводит к срыву колебаний, так как точки В и Б устойчивы, а точка А устойчива справа. Колебания срываются в точке А, т. е. при *К*ОС < *К*ОС1, так как точка А неустойчива слева.

Таким образом, можно отметить следующие особенности работы генератора при жестком режиме самовозбуждения:

* для самовозбуждения требуется большая величина коэффициента обратной связи *К*ОС;
* возбуждение и срыв колебаний происходят ступенчато при разных значениях коэффициента обратной связи *К*ОС;
* амплитуда стационарных колебаний в больших пределах изменяться не может;
* постоянная составляющая коллекторного тока меньше, чем в мягком режиме, следовательно, значительно выше КПД.

Сравнивая положительные и отрицательные стороны рассмотренных режимов самовозбуждения, приходим к общему выводу: надежное самовозбуждение генератора обеспечивает мягкий режим, а экономичную работу, высокий КПД и более стабильную амплитуду колебаний – жесткий режим.

Стремление объединить эти преимущества привело к идее использования автоматического смещения, когда генератор возбуждается при мягком режиме самовозбуждения, а его работа происходит в жестком режиме. Сущность автоматического смещения рассмотрена ниже.

### Автоматическое смещение.

Сущность режима заключается в том, что для обеспечения возбуждения автогенератора в мягком режиме исходное положение рабочей точки выбирается на линейном участке проходной характеристики с максимальной крутизной. Эквивалентное сопротивление контура выбирается таким, чтобы выполнялись условия самовозбуждения. В процессе нарастания амплитуды колебаний режим по постоянному току автоматически изменяется и в стационарном состоянии устанавливается режим работы с отсечкой выходного тока (тока коллектора), т. е. автогенератор работает в жестком режиме самовозбуждения на участке проходной характеристики с малой крутизной (рис. 3).



Рис. 3 Принцип автоматического смещения автогенератора

Напряжение автоматического смещения получают обычно за счет тока базы путем включения в цепь базы цепочки *R*Б*C*Б (рис. 4).



Рис. 4. Схема автоматического смещения за счет тока базы

Начальное напряжение смещения обеспечивается источником напряжения *Е*Б. При возрастании амплитуды колебаний увеличивается напряжение на резисторе *R*Б, создаваемое постоянной составляющей базового тока *I*Б0. Результирующее напряжение смещения (*Е*Б - *I*Б0*R*Б) при этом уменьшается, стремясь к *Е*БСТ.

В практических схемах начальное напряжение смещения обеспечивается с помощью базового делителя *R*Б1, *R*Б2 (рис. 5).



Рис. 5. Автоматическое смещение с помощью базового делителя

В этой схеме начальное напряжение смещения



где – ток делителя.



При возрастании амплитуды колебаний постоянная составляющая тока базы *I*Б 0 увеличивается и смещение *Е*Б уменьшается по величине, достигая значения *Е*БСТ в установившемся режиме. Конденсатор *С*Б предотвращает короткое замыкание резистора *R*Б1 по постоянному току.

Следует отметить, что введение в схему генератора цепи автоматического смещения может привести к явлению прерывистой генерации. Причиной ее возникновения является запаздывание напряжения автоматического смещения относительно нарастания амплитуды колебаний. При большой постоянной времени = *R*Б*С*Б (рис. 8.41) колебания быстро нарастают, а смещение остается практически неизменным – *Е*Б.НАЧ. Далее смещение начинает изменяться и может оказаться меньше той критической величины, при которой еще выполняются условия стационарности, и колебания сорвутся. После срыва колебаний емкость *С*Б будет медленно разряжаться через *R*Б и смещение вновь будет стремиться к *Е*Б.НАЧ. Как только крутизна станет достаточно большой, генератор снова возбудится. Далее процессы будут повторяться. Таким образом, колебания периодически будут возникать и снова срываться.

Прерывистые колебания, как правило, относятся к нежелательным явлениям. Поэтому очень важно расчет элементов цепи автоматического смещения проводить так, чтобы исключить возможность возникновения прерывистой генерации.

Для исключения прерывистой генерации в схеме (рис. 3) величину *C*Б выбирают из равенства



**Автогенератор с трансформаторной обратной связью**

Рассмотрим упрощенную схему транзисторного автогенератора гармонических колебаний с трансформаторной обратной связью (рис. 6).



Рис. 6. Автогенератор с трансформаторной обратной связью

Назначение элементов схемы:

1. транзистор *VT p-n-p* типа, выполняет роль усилительного нелинейного элемента;
2. колебательный контур *L*K*C*K*G*Э задает частоту колебаний генератора и обеспечивает их гармоническую форму, вещественная проводимость *G*Э характеризует потери энергии в самом контуре и во внешней нагрузке, связанной с контуром;
3. катушка *L*Б обеспечивает положительную обратную связь между коллекторной (выходной) и базовой (входной) цепями, она индуктивно связана с катушкой контура *L*К (коэффициент взаимоиндукции М);
4. источники питания *Е*Б и *Е*К обеспечивают необходимые постоянные напряжения на переходах транзистора для обеспечения активного режима его работы;
5. конденсатор *С*Р разделяет генератор и его нагрузку по постоянному току;
6. блокировочные конденсаторы *С*Б1 и *С*Б2 шунтируют источники питания по переменному току, исключая бесполезные потери энергии на их внутренних сопротивлениях.

Физические процессы в генераторе.

При подключении источников питания *Е*Б и *Е*К эмиттерный переход смещается в прямом направлении и возникает коллекторный ток *i*К(t), который в начале замыкается от + *Е*К через эмиттер – базу – коллектор транзистора и емкость *С*К на - *Е*К, поскольку емкость для перепада тока представляет собой короткое замыкание. Конденсатор *С*К заряжается, а затем начинает разряжаться через элементы контура *L*K*G*Э и в контуре возникают свободные колебания. Колебательный ток, проходя через *L*К, создает ЭДС взаимоиндукции в катушке *L*Б. Эта ЭДС прикладывается к эмиттерному переходу транзистора через емкость *С*Б1 и управляет токами базы и коллектора. Переменная составляющая коллекторного тока, протекающая по цепи: коллектор, контур *L*K*C*K*G*Э, эмиттер, база, коллектор, восполняет потери энергии в контуре и, если выполнены условия самовозбуждения, то колебания в нем будут нарастать по амплитуде. Первое условие самовозбуждения называется фазовым и оно достигается тем, что катушка *L*Б включается встречно катушке *L*К. В этом случае напряжение на базе *U*БЭ будет изменяться в противофазе с напряжением на коллекторе (соответственно, и с напряжением на контуре *U*К) и выходная проводимость транзистора окажется отрицательной. Это означает, что транзистор является источником энергии по переменному току. Но одного фазового условия недостаточно, необходимо еще выполнение амплитудного условия самовозбуждения, т. е. чтобы энергия *W*(+), поступающая в контур от транзистора, превышала потери энергии *W*(-) на проводимости *G*Э. Практически это достигается выбором М > МКР, где МКР – величина М, при которой выполняется равенство *W*(+) = *W*(-). Частота генерируемых колебаний примерно равна резонансной частоте контура



поскольку при *Q* >> 1, величина коэффициента затухания



Достоинства схемы: возможность плавной, независимой регулировки частоты (путем изменения *С*К) и амплитуды (путем изменения М) колебаний.

Недостаток схемы заключается в том, что на высоких частотах затруднена регулировка амплитуды колебаний из-за влияния паразитной емкости между катушками *L*K и *L*Б, поэтому генераторы с трансформаторной обратной связью применяются в диапазонах длинных и средних волн (ДВ и СВ).

При расчете параметров генератора необходимо определить частоту генерируемых колебаний, резонансную частоту контура, добротность контура, а также выполнение амплитудного и фазового условия самовозбуждения.

Пример

Автогенератор с трансформаторной обратной связью (рис. 6) имеет параметры контура *L*K = 3 мкГн, *С*К = 90 пФ, *G*Э = 25 Ом.

Определить частоту собственных затухающих колебаний колебательного контура 1, резонансную частоту 0 и добротность *Q* колебательного контура.

Решение задачи.

Поскольку включение катушек *L*Б и *L*K произведено встречно, что обеспечивает противофазное изменение напряжений на базе и коллекторе транзистора, то фазовое условие самовозбуждения выполнено. Амплитудное условие самовозбуждения будет достигнуто выбором М > МКР.

Для определения режима свободных колебаний в контуре рассчитаем его параметры.

Частота собственных колебаний контура определяется выражением



Для ее определения вычислим резонансную частоту контура и коэффициент затухания контура:



Отсюда



Добротность контура вычислим по формуле



Как видно из приведенных расчетов, частота собственных колебаний и резонансная частота контура, при добротности Q >> 1, практически совпадает (квазиколебательный режим), что подтверждает теоретические положения.

**Автогенератор на туннельном диоде**

Исторически туннельные диоды появились значительно позже, чем транзисторы и лампы. Малые габариты и вес, высокая надежность и экономичность обусловили быстрое расширение области их применения. Вольт-амперная характеристика у туннельного диода – типа *N* (рис. 7). Поэтому схема автогенератора получается просто: к диоду подключают параллельный контур по переменному току (рис. 8.44 б), а режим по постоянному току выбирают так, чтобы рабочая точка О оказалась на падающем участке характеристики (рис. 7).



а) б)

Рис.7. Вольт-амперная характеристика и схема генератора на туннельном диоде

Режим по постоянному току должен обеспечиваться с учетом внутреннего сопротивления источника *R i*. Для этого необходимо решить систему двух уравнений:



Графическое решение системы показано на рисунке 8.44 а.

Рассмотрим два случая.

В первом случае, при крутизне наклона характеристики |*S*(*U*0)| > 1/*R i*, существует три возможных состояния, удовлетворяющих уравнениям системы – точки А, О, Б. Анализ, с учетом емкости самого диода, показывает, что только точки А и Б, расположенные на нарастающих участках характеристики, являются устойчивыми. Если точка покоя (точка О) находится на участке характеристики с отрицательным наклоном, то состояние схемы будет неустойчивым и рабочая точка самопроизвольно смещается в одно из крайних положений (в точку А или точку Б).

Во втором случае, при крутизне наклона характеристики |*S*(*U*0)| < 1/*R i*, существует лишь одно состояние, удовлетворяющее уравнениям – точка О. Оно оказывается устойчивым и поэтому рабочая точка может быть установлена на любом участке вольт-амперной характеристики с отрицательной крутизной, следовательно, фазовое условие самовозбуждения выполняется. Амплитудное условие самовозбуждения будет выполнено, если |*S*(*U*0)| > *G*Э, где *G*Э – проводимость контура в точках подключения диода.

Частота колебаний равна



и может изменяться с помощью *С*К. Амплитуда колебаний изменяется путем изменения точки подключения диода к колебательному контуру. Если катушки *L*1 и *L*2 не связаны единым магнитным полем, то коэффициент включения контура равен



Если же катушки *L*1 и *L*2 образуют единую катушку с общим магнитным полем, то диод подключается к индуктивной ветви с коэффициентом включения, равным



где *n*1 и *n*2 – число витков в частях катушки, обозначенных на схеме *L*1 и *L*2.

Блокировочная емкость *С*Б выбирается из условия



Достоинства схемы:

1. способность работать в очень широком диапазоне частот (от единиц килогерц до десятков гигагерц);
2. высокая стабильность параметров при изменении температуры в широких пределах;
3. низкий уровень собственных шумов;
4. малое потребление энергии от источников питания;
5. длительный срок службы;
6. малая чувствительность к воздействию радиации.

Недостаток схемы – малая выходная мощность, что обусловлено малыми интервалами токов и напряжений в пределах падающего участка характеристики (с отрицательной крутизной). Например, генератор на одном туннельном диоде с пиковым током до 10 мА обеспечивает мощность, не превышающую единиц милливатт. Для получения большей мощности необходимо применять диоды с большими пиковыми токами.

**Обобщенная схема трехточечного автогенератора**

Кроме схемы автогенератора с трансформаторной обратной связью существуют так называемые трехточечные схемы автогенераторов синусоидальных колебаний. В них нет катушек связи и положительная обратная связь достигается автотрансформаторным (потенциометрическим) подключением цепи обратной связи к контуру, т. е. обратная связь реализована с помощью реактивных делителей напряжения емкостного или индуктивного типа.

В трехточечном автогенераторе активный прибор (лампа или транзистор) подключается к колебательному контуру в трех точках. Изобразим обобщенную схему замещения трехточечного генератора по переменному току, которая будет справедлива для любого генератора такого типа (рис. 8).



Рис. 8. Обобщенная схема замещения трехточечного автогенератора

Контур состоит из двухполюсников , , , которые обычно имеют столь малые потери, что можно считать их чисто реактивными:



Обобщенная схема содержит усилитель с коэффициентом усиления



и нагрузкой в виде контура *Х*1*Х*2*Х*3, а также цепь обратной связи, передающую часть выходного напряжения усилителя обратно на его вход с коэффициентом передачи



Поскольку

,



То



Фаза коэффициента усиления К в схеме с общим эмиттером (катодом) на резонансной частоте контура равна 180, так как сопротивление контура на этой частоте чисто активно, а усилитель с общим эмиттером инвертирует сигнал. Следовательно, для выполнения фазового условия самовозбуждения генератора К + = 360 необходимо, чтобы = 180. Это будет выполняться, если будет действительной и отрицательной величиной. В соответствии с (8.40) можно утверждать, что это будет выполняться при двух условиях:

1. *Х*1 и *Х*3 должны быть разного знака (разного характера реактивности);
2. |*Х*3| > |*X*1|.Частота генерируемых колебаний равна резонансной частоте контура, так как фазовое условие будет выполняться только на этой частоте. Из условия резонанса в контуре *Х*1 + *Х*2 + *Х*3 = 0 следует, что *Х*2 должен иметь знак, одинаковый с *Х*1 и тогда



Таким образом, можно сформулировать правило построения трехточечного генератора: между общим и управляющим, общим и выходным электродами усилительного элемента должны быть включены реактивные элементы одинакового характера реактивности, а между управляющим и выходным электродами – элемент противоположного характера реактивности.

Соблюдение данного правила гарантирует выполнение фазового условия самовозбуждения генератора.

Если реактивные двухполюсники являются одноэлементными, то возможны всего два варианта трехточечных генераторов (рис. 9).



а) б)

Рис. 9. Схемы трехточечных генераторов

Схему, представленную на рисунке 9, а называют индуктивной трехточкой, а на рисунке 8.46, б – емкостной трехточкой.

Все вышеприведенные рассуждения и выводы справедливы и для трехточечных автогенераторов, собранных на лампе. Нетрудно изобразить и аналогичные схемы индуктивной и емкостной трехточки.

Следует подчеркнуть, что двухполюсники , , , входящие в контур, могут быть получены как полные сопротивления сколь угодно сложных схем (например, колебательных контуров), важно лишь, чтобы на частоте генерируемых колебаний они создавали нужную реактивность. В схемах автогенераторов могут отсутствовать конденсаторы колебательных контуров, так как вместо них используются междуэлектродные емкости.



**Заключение**

Каждая схема имеет свои достоинства и недостатки. Появление новых схем обусловлено желанием улучшить те или иные свойства имеющихся схем. Например, желание получить возможность независимой регулировки частоты и амплитуды колебаний на всех более высоких частотах вместе с определенными конструктивными удобствами, получить более высокую стабильность частоты и т. д. Однако одновременного улучшения всех свойств, как правило, достичь не удается в силу их противоречивости, поэтому приходится отдавать предпочтение той или иной схеме в зависимости от условий применения.

**Литература:**

1. Богданов Н. Г., Лисичкин В. Г. Основы радиотехники и электроники. Часть 8, 2000г..

2. Никольский И. Н., Хопов В. Б., Варокосин Н. П., Григорьев В. А., Колесников А. А. Нелинейные радиотехнические устройства связи. 1972.