**Генераторы электромагнитных колебаний. Современное состояние и практическое использование**.

Харченко Юрий Юриевич

1. Основные виды генераторов, их достоинства и недостатки.

2.1. Генератор на мосте Вина.

 Генератор на мосте Вина представляет собой неперестраиваемый генератор с фазовращателем, в котором используется как положительная, так и отри­цательная обратная связь. Это относительно устойчивая низкочастотная схема, которая легко настраивается и обычно используется в генераторах синусоидаль­ных колебаний в диапазоне частот от 5 Гц и до 1 МГц. Схема моста Вина была использована Хьюлетом и Паккардом при разработке их первого генератора. На рис. 2.1., а показана простая стабилизирующая фазосдвигающая схема. Для частот ниже частоты генерации сдвиг фазы в цепи нарастает, а для частот выше частоты генерации — убывает. На очень низких частотах С1 ведет себя почти как разомкнутая цепь и выходной сигнал отсутствует. На высоких часто­тах, благодаря С2, выход практически короткозамкнут и сигнала также нет. Фазосдвигающая цепочка представляет собой реактивный делитель напря­жения. Поэтому фазо­сдвигающая (стабилизирующая) цепь имеет частотно-избирательные свойства, а выходное напряжение имеет максимум на центральной частоте [4].

Рис. 2.1. Фазосдвигающая цепь:

а) —конфигурация схемы;

б) передаточная характеристика

 На рис. 2.2. изображена схема генератора на мосте Вина. Фазосдвигающая цепь и резистивный делитель напряжения образуют мост Вина. Когда мост сбалансирован, разница напряжений в диагоналях равна нулю. Делитель на­пряжения обеспечивает отрицательную обратную связь, которая компенсирует положительную связь от фазосдвигающей цепи. Отношение резисторов в делите­ле напряжения составляет 2:1, поэтому коэффициент усиления по напряжению неинвертирующего усилителя Ах равен 3.

 

Рис.2.2. Схема генератора на мосте Вина.

Для компенсации разбалансировки моста и изменения параметров элемен­тов под воздействием температуры в схему добавляется схема автоматическая регулировка усиления АРУ. Простой способ обеспечить автоматическую ре­гулировку усиления состоит в том, чтобы заменить делитель устройством с пере­менным сопротивлением типа полевого транзистора. Схему нужно построить так, чтобы при увеличении амплитуды на выходе сопротивле­ние канала полевого транзистора тоже увеличивалось, а при уменьшении должно уменьшаться и сопротивление канала. Таким образом, осуществляет­ся автоматическая компенсация усиления при изменении амплитуды выходного сигнала.

 Схема, показанная на рис. 2.2., действует следующим образом. При включении питания на выходе появляется широкополосный шум и через фазосдвигающую цепь поступает на вход. Через фазосдвигающую цепь без сдвига фазы и с коэф­фициентом передачи, равным 1/3, проходит только напряжение с частотой Следовательно, автоколебания происходят только на одной частоте в фазе с единичным усилением по петле обратной связи.

 2.2. LС-генераторы.

LС-генераторы — это схемы, где в качестве частотно-зависимых элементов используются LС колебательные контуры. Работа колебательного контура осно­вана на взаимном превращении кинетической и потенциальной энергии. Рис. 2.3. иллюстрирует принцип действия колебательного контура. При появлении в схеме тока (момент времени Ч) начинается обмен энергией между катушкой индук­тивности и конденсатором, что приводит к появлению выходного переменного напряжения (моменты 2 и 1) (рис. 2.3, а). Напряжение выходного сигнала пока­зано на рис. 2.3., б. Частота колебаний f контура — это частота параллельного резонансного LС-контура, а ширина полосы зависит от добротности схемы. Примерами схем, построенных на основе LС-контура, служат генераторы Кол­пица и Хартли [3].



Рис. 2.3. Колебательный LС-контур; а) — работа колебательного контура; б) — выходной сигнал.

2.3. Генератор Хартли.

На рис. 2.4., а показана принципиальная схема генератора Хартли. Транзисторный усилитель обеспечивает на резонансной частоте необходимое единичное усиление в цепи обратной связи. Разделитель­ный конденсатор Сс создает цепь обратной связи. Элементы Lха, Lц, и С — определяют частоту колебаний, а напряжение питания обозначено Vс

На рис. 2.4, б показана эквивалентная схема генератора Хартли по постоян­ному току. Разделительный конденсатор Сс обеспечивает развязку цепей по­стоянного тока (напряжения смещения на базе) и препятствует их замыканию на землю через катушку индуктивности Lц,- Конденсатор С2 — также раздели­тельный и предотвращает замыкание тока коллектора на землю через катушку индуктивности Lха- Высокочастотный дроссель — ВЧ-дроссель по постоянному току короткозамкнут.

На рис. 2.4, в показана эквивалентная схема генератора Хартли для пере­менного тока. Разделительный конденсатор Сс создает цепь положительной обратной связи от резонансного контура на базу. Разделительный конден­сатор С2 снимает сигнал переменного тока с коллектора и передает его в резонансный контур. ВЧ-дроссель служит для развязки цепей питания по по­стоянному току. Генератор Хартли работает следующим образом. При включении питания на коллекторе появляется переходной многочастотный сигнал, который че­рез конденсатор С2 подается на резонансный контур. Этот сигнал обеспечивает энергию, необходимую для зарядки конденсатора Сг, и как только Сг зарядит­ся, генератор начинает работать. Резонансный контур будет выделять частоты только на частоте резонанса. Часть напряжения с резонансного контура через катушку Lц, отводится назад к базе , где оно усиливается. Усиленный сигнал на коллекторе находится в противофазе с сигналом базы. Дополнительные 180° сдвига фазы образуются на индуктивности L1 и, следовательно, сигнал, пода­ваемый обратно на базу транзистора, усиливается и изменяет фазу на 360°. Таким образом, схема обладает способностью самовосстановления — регенера­тивна и будет поддерживать колебания без внешнего источника сигнала.

Количество энергии, которая отводится назад на базу транзистора опре­деляется отношением величины индуктивности Lц, к полной индуктивности {L1а + Lц,). Если назад отводится недостаточно энергии, то колебания затуха­ют. Если отводится чрезмерная энергия, транзистор входит в режим насыщения.

 Поэтому положение отвода на катушке Lх регулируется до тех пор, пока коли­чество энергии обратной связи не станет точно таким, какое необходимо для единичного усиления в цепи обратной связи и поддержания колебаний.



Рис. 2.4. Генератор Хартли: а) — принципиальная схема; б) — эквивалентная схема для постоянного тока; в) — эквивалентная схема для переменного тока

 2.4. Генератор Колпица.

 На рис. 2.5, а показана принципиальная схе­ма генератора Колпица. По принципу действия генератор Колпица очень похож на генератор Хартли, за исключением того, что вместо катушки с отводами используется емкостный делитель напряжения. Транзистор Ql обеспечивает уси­ление, емкость Сс создает цепь положительной обратной связи, катушка Lц и конденсаторы Са и Си — частотно-задающие элементы; Vсс — обозначение напряжение питания [3].

На рис. 2.5, б показана эквивалентная схема генератора Колпица по посто­янному току. Разделительный конденсатор С2 предотвращает появление посто­янной составляющей коллекторного напряжения на выходе. ВЧ-дроссель по по­стоянному току короткозамкнут.



Рис. 2.5. Генератор Колпица; а) — принципиальная схема; б) — эквивалентная схема для постоянного тока; в) — эквивалентная схема для переменного тока

 На рис. 2.5, в показана эквивалентная схема генератора Колпица по пере­менному току. Разделительный конденсатор Сс создает цепь положительной обратной связи от колебательного контура к базе транзистора Ql, ВЧ-дроссель обеспечивает развязку цепи сигнала переменного тока от источника питания.

 Принцип действия генератора Колпица во многом идентичен работе генера­тору Хартли. При включении питания на коллекторе транзистора Ql появляется шум, служащий источником возбуждения колебаний в контуре. Конденсаторы Са и Cc образуют делитель напряжения сигнала переменного тока. Через ем­кость Сс часть напряжения сигнала отводится назад к базе Q. Транзистор Ql сдвигает фазу сигнала на 180° . Следовательно, полный сдвиг фазы составляет 360°, и сигнал обратной связи регенеративен. Отношение Са к Са + Си определяет амплитуду сигнала обратной связи.

 2.5.Генератор Клаппа.

 Схема генератора Клаппа почти идентич­на схеме Колпица, показанной на рис. 2.6, а, за исключением конденсатора Сд, включенного последовательно с Lх. Емкость Сд выбирается меньше, чем Си или Си. Таким образом, имея большее реактивное сопротивление, Сд сильнее влияет на частоту резонансного контура. Преимуществом генератора Клаппа является то, что емкости Са и Си подбираются для оптимизации коэффици­ента передачи цепи ОС, в то время как Cs может иметь переменную емкость и использоваться для установки частоты колебаний. Для улучшения стабильно­сти генератора применяется конденсатор Сд с отрицательным температурным коэффициентом. Стабильность частоты определяет способность генератора оставаться на фик­сированной частоте и имеет важное значение в системах связи. Стабильность частоты обычно разделяют на кратковременную и долговременную. Кратко­временная стабильность преимущественно определяется колебаниями рабочих напряжений и шумами, тогда как долговременная стабильность — это функция старения компонентов, изменения окружающей температуры и влажности. Ста­бильность частоты рассмотренных ранее генераторов с резонансным LС-контуром и с LC-цепями недостаточна для большинства приложений радиосвязи, так как эти генераторы подвержены обоим видам нестабильности. Кроме то­го, добротность резонансных контуров относительно низкая, что ухудшает стабильность частоты генераторов.

Нестабильность частоты определяется как процент допустимого отклонения частоты от требуемого значения. Например, генератор, работающий с ±5%-й стабильностью на частоте 100 кГц, будет работать в диапазоне 100 ± 5 кГц, то есть на частотах от 95 до 105 кГц. Коммерческие ЧМ-радиостанции долж­ны поддерживать частоту несущей в пределах ±2 кГц от рабочей частоты, что составляет приблизительно 0,002 %. В коммерческом АМ-радиовещании мак­симально допустимое отклонение несущей частоты должно составлять только ±20 Гц.

1. На стабильность частоты генератора влияют несколько факторов. Наиболее очевидны те из них, которые влияют непосредственно на параметры компо­нентов, определяющих частоту генератора. Это изменение значений индуктив­ностей, емкостей и сопротивлений при изменении температуры и влажности окружающей среды, а также изменение параметров транзисторов. На стабиль­ность влияют также пульсации напряжения в источниках питания постоянного тока. Стабильность частоты RC- или LC-генераторов можно значительно улуч­шить, стабилизируя напряжение питания и минимизируя изменения параметров окружающей среды. Также могут использоваться специальные термостабильные компоненты. Кварцевые генераторы

 Кварцевые генераторы — это генераторы с обратной связью, где в качестве определяющего частоту компонента вместо LC-контура используется кварцевый резонатор. Кварцевый резонатор ведет себя подобно LС-контуру, но обладает некоторыми преимуществами. Кварцевые резонаторы способны с высокой точ­ностью и стабильностью поддерживать частоту генераторов в частотомерах, электронных системах навигации, радиопередатчиках и приемниках, телевизо­рах, видеомагнитофонах, компьютерах и других приложениях, количество кото­рых слишком велико для перечисления [4].

Изучением формы, структуры, свойств кристаллов и их классификацией за­нимается кристаллография. Кристаллография имеет дело с кристаллическими решетками, межатомными связями и характеристиками различных срезов кри­сталлических материалов. Кристаллическая решетка кварца обладает так назы­ваемым пьезоэлектрическим эффектом. Пластины кварца, вырезанные из кри­сталла и отполированные, начинают колебаться, если к их граням приложе­но переменное напряжение. Электрические и механические свойства кристалла определяются его физическими размерами, особенно толщиной и видом среза. Пьезоэлектрический эффект в кварце проявляется в том, что механические воздействия на кристаллическую структуру решетки приводят к появлению электрических потенциалов на его гранях, и наоборот. Деформация может быть в форме сжа­тия, натяжения, скручивания или сдвига. Если деформация воздействует перио­дически, то и выходное напряжение изменяется периодически. И наоборот, если к кварцу приложить переменное напряжение с частотой в области его меха­нического резонанса, то в кристалле возникнут механические колебания. Этот процесс называют возбуждением механических колебаний в кристалле. Такие механические колебания называются объемными акустическими волнами, а их амплитуда пропорциональна амплитуде приложенного напряжения.

3.1. Материалы для кварцевых генераторов.

 Пьезоэлектрическими свойствами обладает множество природных кристал­лических материалов: кварц, сегнетова соль, турмалин, а также искусственно полученные материалы — различные виды пьезокерамики. Пьезоэлектрический эффект наиболее явно проявляется в сегнетовой соли, поэтому ее обычно ис­пользуют в пьезоэлектрических микрофонах. Но для стабилизации частоты ге­нераторов наиболее часто используется кварц из-за его стабильности, низкого температурного коэффициента и высокой механической добротности [4].

Срезы кристалла. В природе кварцевые кристаллы имеют форму шестигранной призмы, ограни­ченной сверху и снизу шестигранными пирамидами, как показано на рис. 3.1, а. В кристалле выделяют оси трех типов: оптические, электрические и механи­ческие. Продольную ось, соединяющую точки в вершинах пирамид, называют оптической осью или осью Е. Электрическое напряжение, приложенное вдоль оптической оси, не приводит к пьезоэлектрическому эффекту. Электрическая ось X проходит по диагонали через противоположные углы шестиугольника — в плоскости, перпендикулярной оси Z. Ось, перпендикулярная граням кристал­ла — это ось У, или механическая ось. На рис. 3.1, б показаны оси кристалла и реакция кристалла на механическое воздействие.

Если срез кристалла ориентирован так, что его плоскости перпендикулярны электрической оси, то деформация вдоль оси Y приведет к появлению на его плоскостях электрических зарядов. Если направление деформации изменится, заряды на плоскостях поменяют знак. И наоборот, под действием переменного напряжения, приложенного к плоскостям кварцевой пластины, возникают меха­нические колебания. Это и есть пьезоэлектрический эффект, проявляющийся, когда механические силы приложены к граням кристаллического среза, перпен­дикулярного оси Y. Если пластина вырезана перпендикулярно оси X, то такой срез называют прямым Х-срезом кристалла. Если грани перпендикулярны оси Y, то это прямой Y-срез кристалла. Вращая плоскость среза вокруг одной или бо­лее осей, можно получить множество разнообразных косых срезов. Если Y-срез сделан под углом 35 к вертикальной оси (рис. 3.1, в), то получается срез АТ. Другие типы косых срезов обозначаются ВТ, СТ, ВТ, ЕТ, АС, СТ, МТ, МТ. Для кварцевых резонаторов, работающих в диапазонах ВЧ и ОВЧ, наибо­лее популярным является срез АТ. Резонансная частота кварца определяется геометрическими размерами пластины, видом среза, а также режимом коле­баний. Резонансные частоты кристаллов с ЧТ-срезом находятся в диапазоне приблизительно от 800 кГц до 30 МГц. Срезы СТ и ВТ свойственны низким частотам и чаще всего используются в диапазоне от 100 до 500 кКц. Срез МТ с продольными колебаниями используется в диапазоне от 50 до 100 кГц, а ХТ-срез применяется на частотах ниже 50 кГц [4].

Кварцевая пластина обычно закрепляется в держателе, который помещается в герметичный корпус. Термином «кварцевый резонатор» обозначают держатель с кварцем. На рис. 3.1, г показано, как выглядит смонтированный в корпус кри­сталл кварца. Поскольку стабильность частоты кварца зависит от температуры, кварцевый резонатор может быть помещен в термостат для поддержания неиз­менной рабочей температуры.



Рис. 3.1. Кристалл кварца; а)структура кристалла; б)оси кристалла; в)срез кристалла; г)внешний вид стандартного кварцевого резонатора.

 Рабочая частота кварца обратно пропорциональна его толщине. Это показывает, что для получения высокой резонансной частоты пластина кварца должна быть очень тонкой. Это препятствует производству кварцевых резонаторов с частотой более 30 МГц, так как подложка становится настолько тонкой, что становится исключительно хрупкой, и обычные методы резки и полировки приводят к очень большому количеству бракованных пла­стин. Данная проблема решается путем использования химического травления для получения более тонких срезов.

 3.2. Обертоновые кварцевые генераторы.

 Как уже отмечалось ранее, для увеличения частоты колебаний кварцевого резо­натора пластина кварца должна быть максимально тонкой. Это налагает очевид­ное физическое ограничение: чем более тонкой делается пластина, тем сильнее увеличивается риск ее повреждения, и тем сложнее становится ее использовать. Хотя практический предел основной частоты колебаний составляет приблизи­тельно 30 МГц, существует возможность использовать механические гармоники кварцевого резонатора. В режиме обертонов используются гармонически свя­занные колебания, происходящие одновременно с основной частотой. В этом режиме генератор настроен так, чтобы работать на 3-й, 5-й, 7-й или даже 9-й гармонике основной частоты кварца. Гармоники называют обертонами, потому что они в целое число раз превышают основную гармонику. Изготовители могут так обрабатывать кристаллы, что один из обертонов будет выражен больше, чем другие. Использование режима обертонов позволяет увеличить практический предел частоты кварцевых генераторов приблизительно до 200 МГц [4].

На рис. 3.2, а показана электрическая эквивалентная схема кварцевого резона­тора. Каждый электрический элемент эквивалентен механическому параметру кристалла кварца. Емкость С2 — это фактическая емкость между электродами резонатора с кварцем в роли диэлектрика. Емкость Сг характеризует механи­ческую гибкость кварца (также называемую эластичностью). Индуктивность L эквивалентна эффективной массе кварца в процессе колебаний, а сопротивле­ние Я характеризует механические потери трения. Механическая добротность кварца (Q) весьма высока. Типичные значения Q находятся в диапазоне от 0,1 Ен до более 100 Ен, поэтому добротность кварцевых резонаторов получа­ется очень большой. Добротность в диапазоне от 10000 до 100 000 и выше не редкость (по сравнению с добротностью 100-1000 для катушек индуктивности, используемых в LC-контурах). Это обеспечивает высокую стабильность квар­цевых генераторов по сравнению с генераторами с LС-контурами на навесных элементах. Типичные значения емкости С меньше 1 пФ, а значения С2 находятся в диапазоне от 4 до 40 пФ.

Из эквивалентной схемы кварца видно, что в нем имеются два резонансных контура: последовательный и параллельный. Им соответствуют две резонансные частоты.

Кварцевый резонатор может работать как на последовательной, так и на параллельной резонансной частоте, в зависимости от конфигурации схемы, в которой он используется. Относительно высокая крутизна графика полного сопротивления, показанного на рис. 3.2, б, также характеризует стабильность и точность частоты кварцевого резонатора.

“



Рис. 3.2. Эквивалентная схема кварцевого резонатора: а) — эквивалентная схема;

б) — график полного сопротивления; в) — график реактивного сопротивления.

 3.3. Схемы кварцевых генераторов.

Хотя существует множество различных конфигураций схем кварцевых генера­торов, наиболее часто применяются генератор Пирса, выпол­ненные на схемах с дискретными, навесными элементами или на интегральных схемах. Если вам нужна хорошая стабильность частоты и в достаточно про­стой схеме, то генератор Пирса на дискретных компонентах — хорошее решение. Если большое значение имеют низкая цена и простой цифровой стык, то подой­дет генератор Пирса на интегральных схемах. Генератор Пирса на дискретных элементах имеет относительно простую электрическую схему, требующую немного компонентов (для большинства версий в диапазо­не средних частот нужен только один транзистор). Генератор Пирса позволяет получить высокую мощность выходного сигнала при рассеивании очень неболь­шой энергии непосредственно на кварце. Наконец, кварцевый генератор Пирса обладает превосходной кратковременной стабильностью частоты (потому что в этой схеме добротность кварца под нагрузкой почти столь же высока, как и добротность без нагрузки). Единственный недостаток генератора Пирса состо­ит в том, что ему требуется усилитель с большим коэффициентом усиления — около 70. Поэтому приходится использовать транзистор с большим усилением или даже многокаскадный усилитель. На рис. 3.3 показана схема генератора Пирса, работающего на частоте 1 МГц. Транзистор Ql обеспечивает необходимое для генерации усиление. Цепь LСг вносит в сигнал обратной связи сдвиг по фазе на 65°. Полное сопротивление кварца имеет в основном активный характер, с небольшой индуктивной соста­вляющей. Полное сопротивление кварца, складываясь с реактивным сопротивле­нием обеспечивает дополнительные 115° отставания по фазе. Транзистор ин­вертирует сигнал (сдвиг фазы на необходимые 360° сдвига фазы. Поскольку нагрузка кварца емкостная (в основном это импеданс после­довательно соединенных конденсаторов Сг и С2), то данный тип генератора обладает очень хорошей краткосрочной стабильностью частоты. К сожалению, так как Сг и С2 вносят большие потери, и транзистор должен иметь относи­тельно высокое усиление.

 Генератор Пирса на интегральных схемах широко используется в современной радиоэлектронике.



Рис. 3.3. Генератор Пирса.

 На рис. 3.4. показан кварцевый генератор Пирса на интегральных схемах ИС. Хотя эта схема имеет меньшую стабильность частоты, но в ней можно приме­нять простые цифровые ИС, что существенно снижает затраты по сравнению со схемами на дискретных компонентах.

 

 Рис. 3.4. Кварцевый генератор Пирса на ИМС.

 Для гарантированного пуска колебаний через резистор обрат­ной связи выхода инвер­тора Ах подается напряжение по­стоянного смещения на его вход, переводя его в линейный режим работы. Буферный инвертор А2 преобра­зует сигналы с выхода усилите­ля Ах в стандартные логические уровни (отсечка и насыщение) и увеличивает крутизну фронтов. Выходное сопротивление Ах вме­сте с С2 образует цепь, обес­печивающую необходимое отста­вание по фазе. Микросхемы, из­готовленные по КМОП-технологии, используются на частотах приблизительно до 2 МГц, а ЭСЛ-микросхемы работают на частотах свыше 20 МГц [4].

 Кварцевый генератор с RLC-полумостом. На рис. 3.5. показана схема квар­цевого генератора Мичэма с RLС- полумостом. Первый генератор Ми­чэма был разработан в 1940-х го­дах. В нем использовались полный мост с четырьмя плечами и лампа с вольфрамовой нитью накала, име­ющая отрицательный температур­ный коэффициент. В схеме, пока­занной на рис. 3.5, используются полумост с двумя плечами и тер­морезистор с отрицательным тем­пературным коэффициентом. Фа­зорасщепитель на транзисторе Qx обеспечивает два выхода сигналов в противофазе. Кварцевый резона­тор должен работать на частоте последовательного резонанса, поэтому его полное внутреннее сопротивление активно и довольно мало. При возникновении колебаний, амплитуда сигнала постепенно увеличивается, при этом сопротивление терморезистора из-за нагре­ва уменьшается до тех пор, пока мост не будет полностью сбалансирован. При этом амплитуда колебаний стабилизируется и будет определяться конечным со­противлением терморезистора. Резонансный RLC-контур на выходе настроен на частоту последовательного резонанса кварца [4].

 

Рис. 3.5. Кварцевый генератор с RLC-полумостом.

Модульный кварцевый генератор. Модульный кварцевый генератор состоит из кварцевого генератора и управля­емого напряжением элемента — варикапа. Вся схема генератора помещается в одном металлическом корпусе. Упрощенная принципиальная схема модульного кварцевого генератора Колпица показана на рис. 3.6, а. Хх — это собственно кварцевый резонатор, Ql — активный элемент усилителя, Сх — конденсатор, по­зволяющий подстраивать частоту кварцевого генератора в пределах небольшого диапазона частот, УС1 — управляемый напряжением конденсатор (варикап или варакторный диод). Варикап — это специально разработанный диод, емкость которого зависит от приложенного к нему обратного напряжения. При увели­чении напряжения обратного смещения емкость диода уменьшается. Варикап имеет специальный запирающий слой между слоями р- и п-типа, созданный с применением различных видов и концентраций легирующих материалов (при описании процесса изготовления варикапа часто используется термин «плавный переход»). На рис. 3.6, б показан график зависимости емкости от напряжения обратного смещения для типичного варикапа.



Рис. 3.6. Модульный кварцевый генератор; а) принципиальная схема; б) характе­ристика варикапа

 Резонансная частота кварца, может подстраиваться с помощью варикапа (т. е. путем изменения значения напряжения обратного смещения диода). Вместе с узлом термокомпенсации варикап обеспечивает мгновенную подстройку ухода частоты, вызванного изменением температуры. Схема термокомпен­сирующего модуля показана на рис. 3.7. Модуль компенсации включает в себя буферный усилитель и термокомпенсационную цепь, представляющую со­бой терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом. Когда температура начинает падать, сопротивление терморезистора увеличивается и, соответственно, компенсирующее напряжение тоже начинает увеличиваться. По­сле этого напряжение компенсации поступает на модуль генератора, где упра­вляет емкостью варикапа. В настоящее время существуют компенсационные модули, способные поддерживать стабильность частоты 0,0005 % [4].



Рис. 3.7. Схема термокомпен­сирующего модуля

1. Генераторы на больших интегральных схемах.

 В последнее время применение интегральных микросхем для генерации сиг­налов стремительно возрастает, так как генераторы на интегральных схемах имеют превосходную стабильность частоты, широкий диапазон настройки и удобны в использовании. Генераторы сигналов и функций широко используются в устройствах связи и телеметрии, а также в калибровочных и испытатель­ных лабораториях. Для многих из этих приложений подходят недорогие серийно выпускаемые генераторы на интегральных микросхемах, которые дают разра­ботчику недорогие решения по сравнению со схемами на дискретных, навесных элементах. Методы, лежащие в основе генерации и формирования сигналов, хорошо под­ходят для использования однокристальных интегральных технологий. В настоящее время существует возможность изготовления интегральных схем генераторов сигна­лов, функционально полностью сопоставимые со сложными генераторами на дискретных компонентах.

Генераторы на больших интегральных схемах подразделяются на функцио­нальные генераторы, таймеры, программируемые таймеры, генераторы, упра­вляемые напряжением, прецизионные генераторы и генераторы сигналов. В простейшем случае генератор сигналов представляет собой устройство, фор­мирующее четко определенные, высокостабильные сигналы, которые можно мо­дулировать внешним сигналом, а также перестраивать в заданном диапазоне. Типичный генератор сигналов состоит из четырех основных узлов (рис.4.1): 1) задаю­щего генератора, вырабатывающего периодический сигнал основной частоты; 2) формирователя сигнала; 3) АМ-модулятора (необязательно); 4) выходного буферного усилителя, изолирующего генератор от нагрузки и способного обес­печить необходимый ток в нагрузке [3].



 Рис. 4.1. Генератор на ИС.

 Типичный генератор на ИС использует в своей работе процесс зарядки и раз­рядки внешних времязадающих конденсаторов постоянным током.

 На рис. 4.2. показана упрощенная принципиальная схема такого генератора сигналов, пред­ставляющая собой мультивибратор с эмиттерными связями, который может ге­нерировать прямоугольные, треугольные и пилообразные сигналы. Схема рабо­тает следующим образом. Когда транзистор Ql и диод открыты, то транзи­стор Q2 и диод £>2 закрыты, и наоборот. Таким образом, конденсатор Со пооче­редно заряжается и разряжается от источника постоянного тока С. Напряжение на V1 и V2 представляет собой симметричный прямоугольный сигнал. Напряжение Vл остается неизменным, пока транзистор Ql открыт, а когда Ql закрывается, оно линейно нарастает с наклоном, равным С/Со. На­пряжение на выходе Vв(t) идентично напряжению Vд, но отстает от него на полпериода. Таким образом, на дифференциальном выходе Vд —Vв образу­ется треугольный сигнал. На рис. 3.15, б показаны типичные графики выходных напряжений [3].



Рис. 4.2. Упрощенная схема генератора сигналов на ИС: а) — принципиальная схема; б) — формы сигналов

* 1. Интегральный функциональный генератор.

 ХК-2206 — интеграль­ная микросхема функционального генератора, изготовленная корпорацией ЕХАК. Эта микросхема позволяет вырабатывать высококачественные сигналы синусои­дальной, прямоугольной, треугольной и пилообразной формы, а также импульс­ные сигналы с высокой степенью стабильности и точности. Выходные сигналы ХК-2206 могут быть промодулированы внешним модулирующим сигналом как по амплитуде, так и по частоте, а рабочая частота может быть задана в диапа­зоне от 0,01 Гц до 1 МГц. ХК-2206 идеально подходит для применения в области связи, в измерительной аппаратуре и в других приложениях, требующих сину­соидального сигнала, амплитудной или частотной модуляции.

ХК-2206 имеет типичную стабильность частоты 20 ррт/°С и может линейно перестраиваться внешним управляющим напряжением в частотном диапазоне 2000 : 1.

Структурная схема генератора функций ХК-2206 показана на рис. 4.3. Гене­ратор функций состоит из четырех функциональных блоков: генератора, управляемого напряжением ГУН; аналогового умножителя и формирователя сину­соидального сигнала, буферного усилителя с единичным усилением и набора токовых ключей. Генератор, управляемый напряжением, — это автогенератор со стабильной частотой колебаний, зависящей от внешних времязадающих конден­саторов и сопротивлений и управляющего напряжения. На вход ГУН подается управляющее напряжение — постоянное или переменное напряжение, а на его выходе генерируется переменное напряжение. Частота переменного напряжения на выходе ГУН пропорциональна его входному напряжению, зависящему, в свою очередь, от номиналов внешних резисторов, подключенных между контактами 7, 8 и землей. Выбор одного из этих выводов определяется уровнем напряжения на входе ЧМ (вывод 9). Поэтому схема может генерировать две различные часто­ты. Если вывод 9 отключен или на него подано напряжение смещения V= 2 В, то в качестве частотозадающего элемента выбирается резистор, соединенный с выводом 7. Если же уровень напряжения на выводе V= 1 В, то выбирается резистор, соединенный с выводом 8. Таким образом, можно переключать выход­ную частоту между частотами Д и Д, просто изменяя напряжение на выводе 9.

 

Рис. 4.3. Структурная схема генератора функций ХК-2206

 Частота колебаний пропорциональна величине тока на выводе 7 или 8. Ча­стота изменяется пропорционально току, величина которого может находиться в диапазоне между 1 мкА и 3 мкА.

 Прецизионные интегральные генераторы. ХК-2209 — это инте­гральная схема генератора переменной частоты, имеющая превосходную тем­пературную стабильность и широкий диапазон линейной перестройки часто­ты. Схема обеспечивает одновременно треугольный и прямоугольный выходные сигналы, а частота устанавливается внешними резистором и конденсатором. ХК-2209 идеально подходит для частотной модуляции, преобразования напря­жения в частоту, генерации тонального сигнала или качающейся частоты [3].



Рис.4.4. Прецизионный интегральный генератор ХК-2209.

Частота выходного сигнала генератора ХК-2209 пропорциональна току, под­водимому через вывод установки времени. Этот ток можно модулировать, при­кладывая к выводу установки времени управляющее напряжение через до­бавочный резистор R. Если напряжение меньше напряжения на выводе 4, то от входа установки времени отводится дополнитель­ный ток, в результате полный ток на входе увеличивается, вызывая увеличе­ние частоты колебаний. Наоборот, если напряжение выше, чем напряжение на выводе 4, то частота колебаний уменьшается.

* 1. Схемы фазовой автоподстройки частоты

 Петля фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ — это необычайно универсаль­ная схема, широко используемая в современных системах электросвязи для реа­лизации разнообразных функций, включая модуляцию, демодуляцию, обработку сигнала, восстановление несущей и тактовой частоты, генерацию частоты, син­тез частот и множество других приложений в области электросвязи. Схемы ФАПЧ используется в передатчиках и приемниках, при аналоговой и цифровой модуляции, а также при передаче цифровых сигналов.

Системы ФАПЧ начали использоваться в 1932 г. для синхронного детектиро­вания и демодуляции радиосигналов в составе контрольно-измерительных схем и систем дистанционной телеметрии. Однако много лет разработчики избегали использовать устройства на основе ФАПЧ из-за их большого размера, сложности и высокой стоимости. Теперь, с появлением интегральных микросхем, системы ФАПЧ могут обеспечить надежную высококачественную работу и в то же вре­мя быть исключительно малогабаритными, удобными и потреблять небольшую мощность. В результате произошел переход от специализированного проектиро­вания систем ФАПЧ к простому использованию универсальных, функционально законченных микросхем с широчайшей областью применения. Сегодня доступен широкий ассортимент таких интегральных схем ФАПЧ различных производи­телей. Некоторые из этих изделий представляют собой универсальные схемы, которые подходят для самых разных применений, другие оптимизированы и предназначены для использования в специализированных приложениях детек­тирования ЧМ-сигналов, демодуляции стереофонических сигналов или синтеза частот. Схема ФАПЧ позволяет обеспечить точную настройку, частотную се­лекцию и фильтрацию без использования громоздких катушек индуктивности и дросселей [5].

В сущности, ФАПЧ — это система управления с петлей обратной связи, в которой параметрами регулирования являются частота или фаза сигнала, а не величина его напряжения или тока. Структурная схема петли ФАПЧ показана на рис. 4.5. Как видно из рисунка, система ФАПЧ содержит четыре основных блока: 1) фазовый компаратор или фазовый детектор, 2) фильтр низких частот ФНЧ, 3) усилитель, 4) ГУН. Эти четыре блока скомпонованы в интегральную схему, где для каждого из них предусмотрены внешние вход и выход, позволяю­щие связать блоки так, как это необходимо пользователю, установить частоту среза фильтра низких частот, коэффициент усиления усилителя и частоту ГУН.



 Рис. 4.5. Структурная схема петли ФАПЧ

 В основе работы системы ФАПЧ лежит фазовая синхронизация сигналов под­страиваемого и опорного генераторов. Однако, прежде чем возникнет фазовая синхронизация, цепь ФАПЧ должна быть синхронизирована по частоте. После того как произойдет захват частоты, на выходе фазового компаратора появится напряжение, пропорциональное разности фаз между сигналом на выходе ГУН и внешним эталонным сигналом. Чтобы система ФАПЧ работала должным образом, необходимо обеспечить полный замкнутый тракт петли обратной связи, как показано на рис. 4.5. При отсутствии внешнего опорного сигнала или когда петля обратной связи разо­мкнута, ГУН работает на частоте предварительной настройки которую на­зывают собственной частотой или частотой собственных колебаний. Собствен­ная частота — это выходная частота ГУН в системе ФАПЧ с разомкнутой петлей обратной связи. Собственная частота ГУН определяется внешними ком­понентами. Как уже говорилось, прежде чем система ФАПЧ войдет в режим слежения, должен произойти захват частоты. Когда на вход системы ФАПЧ поступает внешний входной сигнал с частотой , компаратор сравнивает час­тоту внешнего сигнала с частотой выходного сигнала ГУН. На выходе фазового компаратора формируется напряжение ошибки, рассогласования пропорци­ональное разности фаз двух сигналов на входе. Напряжение сигнала ошибки через фильтр нижних частот и усилитель воздействует на управляющий элемент ГУН. Если собственная частота ГУН„ достаточно близка к частоте внешнего опорного сигнала то под действием обратной связи в схеме ФАПЧ ГУН син­хронизируется, то есть захватывает внешний входной сигнал. В сущности, система ФАПЧ имеет три рабочих состояния: автономное со­стояние собственных, свободных колебаний, режимы захвата и слежения. В ав­тономном состоянии внешний сигнал опорной частоты отсутствует или петля обратной связи разомкнута. При этом ГУН генерирует сигнал на своей соб­ственной частоте, определяемой внешними компонентами. В состоянии захвата, система ФАПЧ должна иметь внешний опорный сигнал и замкнутую петлю обратной связи. Из состояния захвата система ФАПЧ со временем переходит в режим слежения частоты. В режиме слежения частота ГУН отслеживает частоту внешнего входного сигнала (т. е. равняется ей). Когда система ФАПЧ находится в состоянии удержания, частота ГУН следует за изменениями частоты внешнего опорного сигнала.

 Полоса захвата и удержания петли ФАПЧ. Полоса захвата и полоса удержания, отслеживания — это два ключевых параме­тра системы ФАПЧ, которые характеризуют ее рабочий диапазон частот. Область захвата. Область захвата определяется как диапазон частот, сосредоточенный вокруг собственной частоты ГУН в котором система ФАПЧ в состоянии произвести захват частоты и войти в синхронизм с внешним входным сигналом. В зависи­мости от конструкции системы ФАПЧ, ширины полосы пропускания фильтра нижних частот и усиления петли обратной связи, область захвата находится, как правило, в диапазоне между 0,5 и 1,7 собственной частоты ГУН. Иногда область захвата называют областью вхождения в синхронизм. Полоса захвата частоты — полосы частот захвата слева или справа от опорной частоты, ко­торые, как правило, симметричны (т. е. область захвата в 2 раза шире полосы захвата частоты). Область захвата и полосы захвата показаны в форме частот­ной диаграммы на рис. 4.6. Самая низкая частота, на которой система ФАПЧ может произвести захват, называется нижним пределом захвата fd, а самая вы­сокая частота — верхним пределом захвата fe.

Р

 Рис. 4.6. Область захвата час­тоты системы ФАП

Полоса удержания. Область удержания определяется как диапазон частот, сосредоточенный во­круг собственной частоты ГУН, в котором система ФАПЧ может поддерживать режим синхронизма с внешним опорным сигналом. При этом предполагается, что система ФАПЧ первоначально захватила и

 Рис. 4.7. Область удержания час­тоты системы ФАП.

удерживает частоту входного сигнала. Область удержания также известна как область слежения. Область удержания — это диапазон частот, в котором после того, как произошел захват частоты, система ФАПЧ будет точно отслеживать частоту внешнего опорного сигнала. Полоса удержания (синхронизации) — диапазон частот в области удер­жания слева или справа от опорной частоты (т. е. область удержания в 2 раза шире полосы удержания). Связь между областью удержания и полосой удержа­ния показана в виде частотной диаграммы на рис. 4.7. Самая низкая частота, которую система ФАПЧ может отслеживать, называется нижним пределом удер­жания fi, а самая высокая частота — верхним пределом удержания fj.