# Модуляция. Формирование модулированных сигналов

1 Характеристики модуляторов  
  
Основными характеристиками модуляторов являются модуляционная и частотная.  
Модуляционная характеристика представляет собой зависимость отклонения информационного параметра несущей от воздействующего постоянного модулирующего напряжения Uм. При гармонической несущей это отклонение амплитуды DUm при АМ, отклонение частоты Dw при ЧМ и отклонение фазы Dj при ФМ.  
В идеальном случае модуляционная характеристика должна быть линейной (рисунок) однако реальная характеристика имеет отклонения. Эти отклонения приводят к нелинейным искажениям модулированного сигнала. По данной характеристике определяют качественные показатели модулятора (амплитуду модулирующего сигнала).  
Частотная характеристика представляет собой зависимость основного параметра модулированного сигнала от частоты модулирующего гармонического сигнала uМ(t). Для гармонической несущей такими параметрами являются ( коэффициент mАМ при АМ, девиация частоты Dwm при ЧМ, индексу Djm при ФМ.  
Идеальная частотная характеристика имеет постоянное значение на всех частотах (рисунок). Реальная характеристика имеет отклонения, что приводит к частотным искажениям. По частотной характеристике определяют частотные свойства модулятора (полосу пропускания модулятора).  
  
Модуляционная и частотная характеристики снимаются экспериментально.  
  
2 Формирование амплитудно-модулированных сигналов  
  
Однотактный амплитудный модулятор на диоде  
В состав данного модулятора входит диод (нелинейный элемент) и полосовой фильтр (рисунок). Нелинейный элемент в схеме необходим так как модуляция связана с изменением спектра сигнала.  
На диод VD, вольтамперная характеристика которого аппроксимирована полиномом второй степени, подаются три напряжения: напряжение смещения U0, напряжения модулирующего сигнала (u(t)) и несущего (S(t)) колебания. Спектр отклика диода при таком воздействии будет иметь вид (рисунок). В данном спектре модулированному сигналу соответствуют составляющие на частотах w0, w0±W. Эти составляющие выделяются полосовым фильтром, в качестве которого используется колебательный LC контур, настроенный на частоту w0. Временные диаграммы сигналов представлены на рисунке.  
Недостатком данного модулятора является присутствие в спектре АИ сигнала составляющей несущего сигнала.  
Балансный модулятор  
Данный модулятор представляет собой два однотактных амплитудных модулятора работающих на общую нагрузку (рисунок). Модулятор содержит два диода с одинаковыми ВАХ аппроксимированными полиномами третьей степени. Два резистора с малым, но одинаковым сопротивлением являются нагрузкой диодов. Модулирующий сигнал подается через первичную обмотку трансформатора, а несущее колебание подается через среднюю точку вторичной обмотки трансформатора и точкой соединения двух резисторов.  
Если в некоторый момент времени напряжения u(t) и S(t) будут иметь полярность показанную на рисунке, то, пренебрегая падением напряжения на резисторах, напряжение на диодах будет равно:  
  
uд1(t) = S(t) + uII(t);  
uд2(t) = S(t) - uII(t)  
  
где uII(t) ( напряжение модулирующего сигнала во вторичной обмотке трансформатора.  
  
Напряжение на выходе балансного модулятора будет равно  
  
uвых(t) = 2R(a1 uII(t) + 2 a2 S(t) uII(t) + a3 uII(t)3 + 3 a3 S(t)2 uII(t))  
  
где а1, а2, а3 ( коэффициенты аппроксимирующего полинома.  
  
Спектр сигнала на выходе модулятора показан на рисунке.  
Как следует из спектра выходного сигнала, в нем отсутствуют составляющие несущего сигнала, четные составляющие модулирующего сигнала и их высшие гармоники, которые вносят искажения формы модулированного сигнала. Отсутствие составляющей несущего сигнала и ее гармоник объясняется тем, что падение напряжения, вызванные токами этих колебаний на резисторах, имеют одинаковые значения, но противоположную полярность. К недостаткам модулятора можно отнести наличие составляющих модулирующего сигнала и высших гармоник модулированного сигнала.  
Кольцевой модулятор  
Данный модулятор представляет собой два балансных модулятора работающих на общую нагрузку (рисунок). Четыре диода VD1 ( VD4 имеют одинаковые ВАХ аппроксимированные полиномами третьей степени. Если полярность напряжений u(t) и S(t) в некоторый момент времени соответствует показанной на рисунке, то, пренебрегая падением напряжения на резисторах, напряжение на диодах будет равно  
  
uд1(t) = S(t) + uII(t);  
  
uд2(t) = S(t) - uII(t);  
  
uд3(t) = - S(t) - uII(t);  
  
uд4(t) = - S(t) + uII(t).  
  
Напряжение на выходе модулятора будет равно  
  
uвых(t) = 8R a2 S(t) uII(t).  
  
Спектр сигнала на выходе кольцевого модулятора показан на рисунке.  
Как видно из диаграммы в спектре сигнала отсутствуют составляющие несущего и модулирующего сигналов, а также отсутствуют высшие составляющие модулированного сигнала. Таким образом, кольцевой модулятор является идеальным модулятором, но лишь для сигналов небольшой амплитуды. При больших амплитудах S(t) и u(t) в спектре выходного сигнала появляются различные комбинации нечетных гармоник входных сигналов.  
Амплитудный модулятор на транзисторе  
Данный модулятор используется для формирования больших амплитуд. В нем в качестве нелинейного элемента используется транзистор (VT), включенный по схеме с общим эмиттером (рисунок). Нагрузкой транзистора является колебательный контур С2 L1, который используется в качестве полосового фильтра и настраивается на частоту первой гармоники несущего колебания w0. Также модулятор содержит делитель напряжения R1 R2 подающий напряжение смещения для выбора положения рабочей точки транзистора, резистор R3 обеспечивающий температурную стабилизацию рабочей точки, разделительные конденсаторы С1, С3, С4 разделяющие ток питания от тока сигнала. Модулирующий сигнал подается на эмиттер транзистора. Несущее колебание вместе с напряжением смещения поступают на базу VT. Модулированный сигнал снимается с коллектора.  
Достоинством данного модулятора является высокий КПД, т. к. транзистор работает в режиме отсечки коллекторного тока. Временные диаграммы сигналов схемы показаны на рисунке.  
  
3 Формирование однополосно-модулированных сигналов  
  
Формирование однополосно-модулированных сигналов осуществляется двумя методами: методом фильтрации и методом фазирования.  
  
Метод фильтрации  
Структурная электрическая схема модулятора реализующего данный метод представлена на рисунке. При данном методе модулирующий сигнал u(t) и несущее колебание S(t) подаются на входы балансного или кольцевого модулятора. На выходе модулятора формируется балансно-модулированный сигнал SБМ(t). Затем этот сигнал поступает в полосовые фильтры ПФ1 и ПФ2. ПФ1 выделяет верхнюю боковую полосу SВБП(t), а ПФ2 нижнюю боковую полосу SНБП(t).  
Метод фазирования  
Структурная электрическая схема модулятора реализующего данный метод представлена на рисунке. При данном методе модулирующий сигнал u(t) и несущее колебание S(t) подаются на два модулятора, причем на модулятор М2 данные сигналы поступают со сдвигом фазы на 90°. Это сдвиг осуществляется фазовращателями ФВ1 и ФВ2. На выходе модуляторов формируются модулированные сигналы SАМ(t) и SАМ(t)\*, отличающиеся друг от друга сдвигом фаз 90°. При сложении этих сигналов формируется сигнал верхней боковой полосы, при вычитании ( сигнал нижней боковой полосы.  
  
4 Формирование частотно-модулированных сигналов  
Формирование ЧМ сигналов может производиться с помощью генераторов, в которых частота генерируемых колебаний зависит от модулирующего сигнала. Принципиальная электрическая схема такого модулятора представлена на рисунке. В представленном модуляторе управление частотой генератора осуществляет варикап VD, к которому преложено обратное напряжение. Напряжение модулирующего сигнала подается через первичную обмотку трансформатора Т. Левая часть модулятора представляет LC-генератор с трансформаторной обратной связьью, который генерирует колебания с частотой:  
  
  
где Сэ ( эквивалентная емкость контура.  
  
Эквивалентная емкость контура зависит от емкости С1 и емкости варикапа. В свою очередь емкость варикапа образована емкостью зависящей от напряжения смещения Сv0 и емкостью зависящей от напряжения модулирующего сигнала Cvu. Таким образом эквивалентная емкость равна:  
  
Cэ = С1 + Сv0+ Cvu.  
  
Из всех емкостей переменной является емкость Cvu. Поэтому частота колебаний генератора изменяется в соответствии с модулирующим сигналом. При отсутствии модулирующего сигнала генератор вырабатывает колебания с частотой несущего сигнала w0.  
  
5 Формирование фазо-модулированных сигналов  
  
ФМ сигнал можно получить используя резонансный усилитель. Принципиальная электрическая схема такого модулятора представлена на рисунке. В этом модуляторе резонансный усилитель собран на транзисторе VT. На транзистор подаются напряжение смещения U0 и напряжение несущего колебания S(t). Нагрузкой транзистора является колебательный контур, настроенный в резонанс с частотой несущего колебания, т. е. при отсутствии модулирующего сигнала wрез = w0. Резонансная частота колебательного, как и в частотном модуляторе, зависит от емкостей конденсатора С1 и емкости варикапа VD. Емкость варикапа изменяется в соответствии с напряжением модулирующего сигнала u(t), подаваемого через первичную обмотку трансформатора Т. Таким образом резонансная частота контура изменяется в соответствии с мгновенными значениями сигнала u(t), а соответственно будет изменятся и частота колебаний модулированного сигнала, причем изменение частоты происходит в соответствии с частотой ФМ сигнала.  
  
Также ФМ сигнал можно получить из балансно-модулированного сигнала. Структурная схема такого модулятора представлена на рисунке. Балансно-модулированный сигнал формируется в балансном или кольцевом модуляторе (БМ). Затем сигнал SБМ(t) поступает в сумматор. На второй вход сумматора поступает несущее колебание со сдвигом фазы 90°. Этот сдвиг осуществляет фазовращатель ФВ1. При сложении этих сигналов формируется амплитудно-фазо-модулировнный сигнал Sафм(t). Рассмотрим этот процесс более подробно. Для этого воспользуемся векторными диаграммами сигналов (рисунок ). Вектор S\* соответствует несущему сигналу после фазовращателя. Пусть в некоторый момент времени с БМ поступает сигнал, которому соответствует вектор SБМ’. Этому сигналу соответствует вектор выходного сигнала SАФМ’ угол наклона вектора соответствует фазе полученного сигнала j’. В следующий момент времени амплитуда входного сигнала изменилась до значения вектора SБМ’’. Этому вектору соответствует вектор выходного сигнал SАФМ’’ угол j’’. Как видно из диаграммы вместе с амплитудой балансно-модулированного сигнала изменяется фаза и амплитуда выходного сигнала, что соответствует амплитудно-фазо-модулированному сигналу. Паразитная амплитудная модуляция устраняется ограничителем амплитуды ОА.  
  
6 Формирование манипулированных сигналов  
  
Поскольку манипуляция является частным случаем аналоговой модуляции, то формирование манипулированных сигналов может осуществляться любой из описанных выше схем модуляторов. Однако наиболее удобно формировать данные сигналы ключевыми схемами. В этих схемах используется один или два генератора с различными частотами (при ЧМн) или фазами (при ФМн), которые подключаются к выходу с помощью ключа, которым управляет модулирующий сигнал (рисунок ).  
  
Формирование ОФМн сигналов также может осуществляться ключевыми или приведенными выше схемами, однако предварительно модулирующий сигнал подвергается перекодированию. Это необходимо так как в фазовых модуляторах фаза несущего сигнала изменяется в соответствии с изменением амплитуды модулирующего сигнала, а при ОФМн фаза несущего сигнала изменяется лишь в момент поступления импульса (посылки). Перекодирование сигнала осуществляется относительным декодером, который устанавливается перед модулятором. Относительный декодер состоит из логического элемента сложения по модулю два, на вход которого подается модулирующий сигнал, а на второй вход подается выходной сигнал задержанный на длительность одного дискретного элемента tи (рисунок ). Задержка дискретного элемента осуществляется элементом задержки. Диаграммы, поясняющие процесс работы кодера приведен на рисунке. Суммирование по модулю два осуществляется по правилу: если оба суммируемых элемента одинаковы, то результат равен нулю, если элементы различны, то результат равен единице. Пусть в некоторый момент времени необходимо перекодировать входной сигнал uвх(t). Звездочки указывают момент изменения фазы несущего сигнала при ОФМн. Стрелки указывают задержку выходного сигнала uвых(t). На диаграмме выходного сигнала звездочками указаны моменты изменения фазы несущего сигнала, если подать этот сигнал на фазовый модулятор. Как видно из диаграмм моменты изменения фазы выходного сигнала совпадают с моментами изменения фазы входного сигнала, а следовательно, в результате последующей модуляции будет сформирован ОФМн сигнал.  
  
7 Формирование импульсно-модулированных сигналов  
  
Формирование ИМ сигналов может осуществляться прямым и косвенным методами.  
Прямой метод заключается в непосредственном получении ИМ сигналов с помощью соответствующих схем модуляторов.  
Косвенный метод заключается в получении ИМ сигналов из других модулированных сигналов, в том числе и сигналов аналоговой модуляции.  
А) Формирование АИМ сигналов осуществляется прямым методом. Для этого используется любая схема амплитудного модулятора, в котором диод или транзистор работает в режиме отсечки.  
Б) Формирование ЧИМ сигналов может осуществляться прямым методом, (при этом используется релаксационный генератор, частота колебаний которого может изменяться в соответствии с модулирующим сигналом) или косвенным. Косвенный метод основан на преобразовании ЧМ сигнала в ЧИМ. Для этого, ЧМ сигнал (рисунок а) ограничивают по максимуму и минимуму (рисунок б). Затем из полученных трапециидальных импульсов с помощью дифференцирования и последующего ограничения выделяют передние фронты импульсов. Частота следования импульсов в полученном сигнале будет соответствовать ЧИМ сигналу (рисунок в).  
В) Формирование ШИМ и ФИМ сигналов осуществляется косвенным методом. Для этого, в качестве несущего сигнала, используется периодическая последовательность треугольных импульсов (рисунок б). Сначала формируется АИМ сигнал (рисунок в). Полученный сигнал ограничивают по максимуму, в результате чего получают трапециидальные импульсы, длительность которых будет изменяться в соответствии с ШИМ сигналом (рисунок г). Из трапециидальных импульсов дифференцированием и последующим ограничением выделяют передние фронты импульсов. Полученный в результате сигнал будет соответствовать ФИМ сигналу (рисунок д).