Практическое занятие № 4

# Модуляция и демодуляция сигналов

*Продолжительность практического занятия* – 2 часа.

*Цель практического занятия* – изучение принципов переноса спектра сигналов из низкочастотной области в выделенную для их передачи область высоких частот и обратного восстановления исходной информации из модулированного сигнала.

**1. Общие сведения**

***Модуляция колебаний* –** медленное по сравнению с периодом колебаний изменение амплитуды, частоты или фазы колебаний по определённому закону. Соответственно различаются амплитудная модуляция, частотная модуляция и модуляция по фазе. При любом способе модуляции колебанийскорость изменения амплитуды, частоты или фазы должна быть достаточно малой, чтобы за период колебания модулируемый параметр почти не изменился.

Модуляция колебаний применяется для передачи информации с помощью электромагнитных волн радиодиапазона или оптического диапазона.

Переносчиком сигнала в этом случае являются синусоидальные электрические колебания высокой частоты ω (несущая частота). Амплитуда, частота, или фаза этих колебаний, а в случае света и поляризация, модулируются передаваемым сигналом.

Основным видом несущих сигналов являются гармонические колебания:

, (1)

которые имеют три свободных параметра: *U* – амплитуду; ω – частоту; ϕ – фазу. Вот почему в зависимости от того, на какой из данных параметров переносится информация, различают *амплитудную* (АМ)*, частотную* (ЧМ) *или фазовую* (ФМ) модуляцию несущего сигнала.

**2. Амплитудная модуляция**

***Амплитудная модуляция*** – изменение амплитуды колебаний, происходящее с частотой, намного меньшей, чем частота самих колебаний (рис.1).



Рис.1. Амплитудная модуляция

При амплитудной модуляции колебания низкой частоты Ω (модулирующий сигнал) периодически изменяют (модулируют) амплитуду колебаний высокой частоты ω (несущей частоты)*,* генерируемых радиопередатчиком (рис.2).



Рис.2. Амплитудная модуляция синусоидальным сигналом (гармоническое колебание высокой частоты ω модулировано по амплитуде гармоническим колебанием низкой частоты Ω, где τ = 1/Ω – его период)

Параметрами модулированных колебаний являются:

Ω – частота модулирующих колебаний, *t* – время, ω – несущая частота,

*A* – амплитуда высокочастотного колебания (*Амакс* и *Амин* – максимальное и минимальное значения амплитуды),

*T* – период высокочастотного колебания.

В простейшем случае модуляции амплитуды *А* синусоидальным сигналом модулированное колебание, изображённое на рис.2, может быть записано в виде:

, (2)

где *А*0 – амплитуда исходного колебания;

ω – частота исходного колебания;

Ω – частота модуляции;

*m* – глубина модуляции.

Глубина модуляции *m* характеризует степень изменения амплитуды:

. (3)

Частота модуляции Ω характеризует скорость изменения амплитуды колебаний. Эта частота должна быть во много раз меньше, чем несущая частота ω. Модулированное колебание уже не является синусоидальным. Амплитудно-модулированное колебание представляет собой сумму трёх синусоидальных колебаний с частотами ω, ω+ Ω и ω– Ω.

Колебание частоты ω называется *несущим*. Его амплитуда равна амплитуде исходного колебания *А*0. Две остальные частоты называются боковыми частотами, или спутниками. Амплитуда каждого спутника равна *mА*0/2.

Таким образом, любая передающая часть телеметрической системы, работающая в режиме амплитудной модуляции, излучает не одну частоту, а целый набор (спектр) частот. В простейшем случае модуляции колебаний синусоидальным сигналом этот спектр содержит лишь три составляющие – несущую и две боковые.

Если же модулирующий сигнал не синусоидальный, а более сложный, то вместо двух боковых частот в модулированном колебании будут две боковые полосы, частотный состав которых определяется частотным составом модулирующего сигнала. Поэтому каждая передающая станция занимает в эфире определённый частотный интервал. Во избежание помех несущие частоты различных станций должны отстоять друг от друга на расстоянии, большем, чем сумма боковых полос. Ширина боковой полосы зависит от характера передаваемого сигнала: для радиовещания – 10 кГц, для телевидения – 6 МГц. Исходя из этих величин, выбирают интервал между несущими частотами различных станций.

Для получения амплитудно-модулированного колебания колебание несущей частоты ω и модулирующий сигнал частоты Ω подают на специальное устройство – модулятор.

**3. Частотная модуляция**

***Частотная модуляция*** – вид модуляции колебаний, при котором передаваемый сигнал управляет частотой несущего высокочастотного колебания.

Особенность частотной модуляции – высокая помехозащищенность. Частотная модуляция применяется для высококачественной передачи информации: в радиовещании (в диапазоне УКВ), для звукового сопровождения телевизионных программ, при тональном телеграфировании, в радиотелефонии и др.

В случае частотной модуляции синусоидальным сигналом частота колебаний меняется по закону:

, (4)

где  – модулирующий сигнал;

Δω – девиация частоты.

## При частотной модуляции полоса частот модулированного колебания зависит от величины β = Δω/Ω, называемой индексом частотной модуляции. При β << 1 справедливо приближенное соотношение:

 . (5)

В этом случае частотно-модулированное колебание, так же как и амплитудно-модулированное, состоит из несущей частоты ω и двух спутников с частотами ω + Ω и ω – Ω. Поэтому при малых β
полосы частот, занимаемые амплитудно-модулированным и частотно-модулированным сигналами, одинаковы.

При больших индексах β спектр боковых частот значительно увеличивается. Кроме колебаний с частотами ω ± Ω, появляются колебания, частоты которых равны ω ± 2Ω, ω ± 3Ω и т. д. Полная ширина полосы частот, занимаемая частотно-модулированным колебанием с девиацией Δω и частотой модуляции Ω (с точностью, достаточной для практических целей), может считаться равной 2Δω + 2Ω. Эта полоса всегда шире, чем при амплитудной модуляции.

Преимуществом частотной модуляции перед амплитудной в технике связи является большая помехоустойчивость. Это качество частотной модуляции проявляется при β >> 1, то есть когда полоса частот, занимаемая частотно-модулированным сигналом, во много раз больше 2Ω. Поэтому частотно-модулированные колебания применяются для высококачественной передачи сигналов в диапазоне ультракоротких волн (УКВ), где на каждую радиостанцию выделена полоса частот, в 15-20 раз большая, чем в диапазоне длинных, средних и коротких волн, на которых работают радиостанции с амплитудной модуляцией.

Частотно-модулированные колебания могут быть получены изменением частоты задающего генератора радиопередатчика.

**4.  Фазовая модуляция**

***Фазовая модуляция (модуляция по фазе)*** – вид модуляции колебаний, при котором передаваемый сигнал управляет фазой несущего высокочастотного колебания. По характеристикам фазовая модуляция близка к частотной модуляции.

В случае фазовой модуляции модулированное колебание имеет вид:

. (6)

Если модулирующий сигнал синусоидальный, то форма модулированных колебаний и их спектральный состав для частотной и фазовой модуляции одинаковы. В случае несинусоидального модулирующего сигнала это различие чётко выражено.

В многоканальных системах связи в качестве переносчика информации используется не гармоническое колебание, а периодическая последовательность радиоимпульсов, каждый из которых представляет собой цуг колебаний высокой частоты. Периодическая последовательность таких импульсов определяется четырьмя основными параметрами: амплитудой, частотой следования, длительностью (шириной) и фазой. В соответствии с этим, возможны четыре типа импульсной модуляции: амплитудно-импульсная, частотно-импульсная, широтно-импульсная, фазово-импульсная. Импульсная модуляция обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с модуляцией непрерывной синусоидальной несущей, зато полоса частот, занимаемая передающей радиостанцией с импульсной модуляцией, во много раз шире, чем при амплитудной модуляции.

***Задание* 1**. Приведите графическое изображение частотной модуляции синусоидальным сигналом по примеру рис.1.

***Задача* 1**. Рассчитать глубину модуляции при соотношении максимального и минимального значения амплитуды 3:1.

***Задача* 2**. Определить боковые частоты при амплитудной модуляции несущих колебаний 100 МГц звуковыми частотами 1000 Гц. Результат выразить в МГц.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое «модуляция колебаний»?

2. Какие колебания формируют несущую частоту?

3. Чем характеризуется амплитудная модуляция?

4. Что такое глубина модуляции и как она определяется?

5. Какие частоты называются боковыми?

6. Чем характеризуется частотная модуляция?

7. Что называется индексом частотной модуляции?

8. Чем характерна модуляция по фазе?

9. Чем характеризуется импульсная модуляция?

Практическое занятие № 5

Анализ принципов построения входных цепей в радиоприемных устройствах телеметрических систем

*Продолжительность практического занятия* – 2 часа.

*Цель практического занятия* – изучение принципов построения входных цепей в радиоприемных устройствах, получение практических навыков по анализу электрических цепей и решению задач.

## 1. Общие сведения

Типовая блок-схема приемной части телеметрической системы (ТС) включает в себя антенну *А*, входную цепь *ВЦ*, усилитель высокой частоты *УВЧ*, усилитель промежуточной частоты *УПЧ*, гетеродин *Г*, усилитель низкой частоты *УНЧ*, после которой сигналы могут выводиться на регистратор *Р*, монитор *Мон* или на устройство компьютерной обработки информации *КОИ* (рис.1).



# Рис.1. Типовая блок-схема приемной части телеметрической системы

Принятый антенной сигнал поступает в радиотракт, выполняющий две задачи:

1.Селекцию сигнала нужной радиостанции от всех остальных (мешающих).

2.Усиление.

Качество выполнения первой задачи характеризует селективность (избирательность) приемника, а второй – его чувствительность.

Селективность обеспечивают колебательные контуры, настроенные на частоту сигнала. Лучшие результаты можно получить при объединении нескольких контуров в фильтр.

Отфильтрованный и усиленный радиочастотный сигнал подается на детектирование, что позволяет выделить напряжение звуковой частоты. Напряжение звуковой частоты поступает на усилитель низкой частоты, к выходу которого подключен регистратор.

**2. Простейший радиоприемник**

Все упомянутые элементы (кроме усилителей и регистратора) показаны на принципиальной схеме простейшего детекторного приемника (рис.2).



Рис.2. Схема простейшего радиоприемника

Радиоволны, идущие от различных передающих станций, возбуждают в антенне *А* быстропеременные токи различных частот. С катушкой *La* индуктивно связана катушка *L* колебательного контура. Емкость *С* конденсатора контура можно изменять, настраивая контур в резонанс по отношению к частоте одной из передающих радиостанций. При хорошей настройке колебания, вызванные волной от этой станции, будут в колебательном контуре приемника преобладать над всеми другими.

Таким образом, селективность обеспечивает колебательный контур *LC*, связанный с антенной A и детектором, причем для настройки контура на частоту определенной радиостанции применен конденсатор переменной емкости *С* (в старинных детекторных приемниках применялись и катушки переменной индуктивности – вариометры).

К колебательному контуру присоединена цепь диодного детектора. Детектором служит диод, пропускающий ток только в одном направлении и, следовательно, выделяющий только положительные полупериоды модулированного напряжения радиочастот.

Блокировочный конденсатор *С1* сглаживает радиочастотные пульсации, и совместно с сопротивлением нагрузки *R1* образует фильтр.

Работа фильтра происходит так. В те моменты времени, когда диод пропускает ток, часть его проходит через нагрузку, а другая часть ответвляется в конденсатор, заряжая его. Разветвление тока уменьшает величину импульсов, проходящих через нагрузку. Зато в промежутке между импульсами, когда диод заперт, конденсатор частично разряжается через нагрузку. Поэтому в интервале между импульсами ток через нагрузку течет в ту же сторону и напряжение на нагрузке не исчезает. Каждый новый импульс подзаряжает конденсатор.

Благодаря этому через нагрузку течет ток звуковой частоты. Напряжение на фильтре будет пульсировать в такт с проходящим по нагрузке током. Его можно считать состоящим из постоянного напряжения сигнала низкой частоты. Далее ток звуковой частоты может подаваться на усилители.

Частота колебаний в контуре определяется индуктивностью и емкостью согласно формуле Томсона

.

При малых *L* и *C* частота колебаний получается высокой.

**3. Приемники прямого усиления и супергетеродин**

Более совершенны приемники прямого усиления. Название это появилось потому, что усиление принятого сигнала идет прямо на его частоте. Простейший одноконтурный приемник прямого усиления получится, если между контуром и детектором установить усилитель, выполненный на одном или нескольких транзисторах. Чувствительность его заметно выше, однако селективность невысокая.

Поэтому используют фильтры в виде систем из нескольких колебательных контуров. Способность выделять полезный сигнал из массы мешающих у них намного выше. Расчеты показывают, что для выделения полезного сигнала из посторонних сигналов и помех нужно как минимум 5…10 контуров. Сделать их все перестраиваемыми по частоте в приемнике прямого усиления очень сложно, поскольку настройки контуров в любой точке диапазона должны точно совпадать. Есть и другие трудности, связанные с неравномерностью усиления усилителя радиочастоты по диапазону, с изменением его полосы пропускания и т.д.

По этим причинам в приемниках используют супергетеродинную схему радиотракта. Главной ее особенностью является преобразователь частоты, установленный на входе. Элементы настройки приемника (обычно двухсекционный конденсатор переменной емкости) есть только в преобразователе, задача которого привести все частоты принимаемых радиостанций к единой, стандартизованной промежуточной частоте.

Для преобразования частоты нужен гетеродин – встроенный в приемник маломощный генератор, частота которого отличается от принимаемой на значение промежуточной частоты, обычно в большую сторону.

Другой элемент преобразователя – смеситель, на который поступают принимаемый сигнал и сигнал местного гетеродина. Преобразование частоты происходит по закону:

*f пч* = *f гет* – *f сигн* ,

где *f пч* – значение промежуточной частоты; *f гет* – частота гетеродина;

 *f сигн* – частота сигнала.

В простых приемниках функции смесителя и гетеродина объединяют и преобразователь зачастую выполняют на одном транзисторе. В приемниках же с высокими параметрами обязательно используют отдельный гетеродин.

Приведя сигналы любой станции к единой промежуточной частоте (ПЧ), мы можем хорошо отфильтровать сигнал многоконтурным фильтром, поскольку все его контуры будут иметь фиксированную настройку. Более того, промышленность освоила выпуск пьезокерамических фильтров, в которых контуры заменены резонаторами из пьезокерамики. Например, фильтр типа ФП1П имеет семь резонаторов и занимает объем менее кубического сантиметра. Высокая селективность супергетеродина сохраняется на любой частоте независимо от диапазона.

Отфильтрованный сигнал ПЧ поступает далее на усилитель промежуточной частоты, а затем детектируется.

На фиксированной ПЧ легче получить стабильное и высокое усиление, поэтому чувствительность супергетеродина, как правило, выше, чем у приемников прямого усиления.

Наряду с достоинствами, у супергетеродина есть и недостатки. Главный из них – наличие побочного канала приема на частоте *fгет* + *fпч*. Этот канал приема называют *зеркальным*, поскольку он расположен симметрично с основным относительно частоты гетеродина.

Ослабить прием по зеркальному каналу может только входной контур или фильтр, поэтому в супергетеродине перестраивать по частоте приходится как минимум два контура – входной и гетеродинный. Особенно трудно подавить зеркальный канал на коротких волнах, где селективности одиночного входного контура обычно недостаточно.

**4. Требования к входным цепям радиоприемных устройств телеметрических систем**

В отличие от радиовещательных радиоприемников при проектировании приемника радиотелеметрической системы наибольшего внимания заслуживают две основные задачи:

–достижение возможно большой чувствительности, так как от нее зависит дальность передачи информации;

–восстановление принятых сигналов до их первоначальной формы с минимальными искажениями (особенно в многоканальных телеметрических системах, так как необходимо учитывать помехи из-за воздействия канала на канал в приемнике).

Перечислим минимально необходимое для однозначного определения приемника число его общих внешних параметров:

1. Несущая частота *fн* сигналов на входе приемника и ее стабильность *fн*± δ*fн* , где δ – ошибка передачи сигнала.

2. Полоса пропускаемых частот 2Δ*fн*.

3. Чувствительность приемника по напряжению сигнала *Uco* и соответствующее ей отношение сигнала к шуму на входе приемника *Uco*/*Uш*.

4. Динамический диапазон сигналов на входе приемника телеметрической системы *Кд* = *Uc макс*/*Uco* и соответствующие ему величина сигнала *Ucв* и допустимое ее изменение на выходе приемника δ*Ucв*/*Ucв*.

5. Избирательность по соседнему зеркальному каналу и промежуточной частоте.

6. Число каналов и способ их разделения.

7. Параметры каналов на входе приемника (частоты и полосы сигналов при частотном разделении или последовательность и длительность сигналов при временном разделении).

8. Амплитудные, частотные и фазовые характеристики сигналов на выходах всех каналов приемника.

9. Допустимые взаимные помехи между каналами.

10.Величина ошибки передачи сигнала, обусловленная приемником.

11.Уровень шумов в каналах.

12.Способы контроля работоспособности и основных параметров приемного устройства.

**5. Разделительные фильтры**

Для разделения на приемной стороне модулированных поднесущих по отдельным цепям применяют *разделительные фильтры*. Каждый из разделительных фильтров должен быть настроен на частоту соответствующего сигнала и иметь определенную полосу пропускания.

Чтобы избежать взаимного влияния каналов, разделительные фильтры должны обладать достаточной крутизной скатов амплитудно-частотной характеристики, а для получения неискаженной графической регистрации должны иметь линейную фазовую характеристику.

В верхней части звукового диапазона частот наиболее часто применяются полосовые фильтры в виде одиночных и связанных колебательных контуров из индуктивностей и емкостей. В нижней части звукового диапазона величины индуктивностей и емкостей становятся нереально большими, и в этой области применяют RC-фильтры.

Однако необходимо иметь в виду, что выполнение RC-фильтра с широкой полосой пропускания и крутыми скатами является сложной задачей.

**6. RC-фильтры**

Для формирования частот полосы пропускания применяются следующие типы RC-фильтров:

1.RC-фильтр нижних частот (рис.3).



Рис.3. Фильтр нижних частот: *а* – схема; *б* – частотная характеристика

2.RC-фильтр верхних частот (рис.4).



Рис.4. Фильтр верхних частот: *а* – схема; *б* – частотная характеристика

3.Полосовой RC-фильтр (рис.5).



Рис.5. Полосовой RC-фильтр: *а* – схема; *б* – частотная характеристика

Основной характеристикой RC-фильтров является частота среза *fcp*. Под частотой среза понимается такое значение частоты, при котором коэффициент передачи фильтра *kп* меньше входного напряжения *Uвх* в 1,41 раза или

*Uвых* = 0,71⋅*Uвх*,

где *Uвых* – выходное напряжение, *Uвх* – входное напряжение.

Частота среза пассивного RC-фильтра определяется исходя из формулы

.

Поскольку частота равна, то .

Отсюда .

***Задача***: Определить для фильтра нижних частот сопротивление фильтра *Rф*, если *Сф* = 0,1 мкФ и *fcp* = 300 Гц (рис.6).



Рис.6. Схема к задаче

## Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит типовая блок-схема приемной части телеметрической системы?

2. Какие задачи выполняет радиотракт?

3. Какую роль выполняет колебательный контур *LC* в простейшем приемнике?

4. Как определяется частота колебаний в колебательном контуре?

5. В чем заключаются особенности конструкции приемников прямого усиления?

6. Какие требования предъявляются к входным цепям радиоприемных устройств телеметрических систем?

7. Какие основные типы RC-фильтров применяются во входных цепях радиоприемных устройств телеметрических систем?

8. Как определяется коэффициент передачи фильтра?