

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

С.В. Хазанова, А.В. Нежданов, Д.Е. Николичев

**Исследование процесса амплитудной, частотной
и фазовой модуляции**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета для
студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
11.03.04 – Электроника и наноэлектроника
28.03.01 – Нанотехнологии и микросистемная техника

Нижегород
2021

УДК 621.37/39 (077)

ББК 32.84 р

М25

М25 Хазанова С.В., Нежданов А.В., Николичев Д.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АМПЛИТУДНОЙ, ЧАСТОТНОЙ И ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2021. – 24с.

Рецензент:

зав. лабораторией. НИФТИ ННГУ

доктор физ.-мат. наук, **В.Г. Шенгуров**

Данная работа является частью лабораторного практикума по курсу “СВЧ - электроника”. В ней детально рассмотрены процессы амплитудной, фазовой и частотной модуляции. Проанализированы спектральные характеристики модулированных сигналов как для случая однотоновой модуляции, так и более сложных модулирующих воздействий.

Практикум предназначен для студентов бакалавриата физического факультета ННГУ, обучающихся по направлениям 11.03.04 – Электроника и наноэлектроника и 28.03.01 – Нанотехнологии и микросистемная техника.

Ответственный за выпуск:

председатель методической комиссии ФзФ ННГУ,

к.ф.-м.н., доцент Перов А.А.

УДК 621.37/39 (077)

ББК 32.84 р

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Амплитудная модуляция.....	6
1.1. Однотональная амплитудная модуляция	7
1.2. Амплитудная модуляция последовательностью прямоугольных импульсов	9
1.3. Мощность амплитудно-модулированных колебаний.....	11
2. Частотная и фазовая модуляция (угловая модуляция)	13
2.1. Спектральные характеристики частотной и фазовой модуляции	15
3. Амплитудно-, фазо- и частотно-манипулированные сигналы.....	19
Описание установки.....	20
Задания	21
Вопросы.....	22
Литература	23

ВВЕДЕНИЕ

Модуляция – это процесс изменения высокочастотного несущего сигнала с целью передачи информации, такой как речь, музыка или любые другие звуковые сигналы. Орган слуха – высокочувствительный приемник и анализатор сложных звуковых сигналов. При этом, границы слышимых звуков это 16-20 Гц – нижняя и 18 – 20 кГц – верхняя. Именно в данном диапазоне (от 20 Гц до 20 кГц) происходит передача основного потока аудиосигналов. Однако, если бы пришлось передавать аудиосигналы напрямую, нам понадобилась бы антенна протяженностью более 10000 км! Следовательно, одна из причин необходимости модуляции связана с тем, что для передачи высокочастотных сигналов требуются антенны меньших размеров. К примеру, несущие сигналы с частотой от 500 кГц до 1,7 ГГц могут транслироваться с помощью антенн размером, начиная от сотен метров до сантиметров соответственно. Одновременно с этим повышается пропускная способность канала связи, и возможна передача различных видов данных.

В качестве примера (Рис.1) изобразим частотные области работы сетей 3G: **UMTS-900** и **UMTS-2100**. Как видно из названия, первая работает вблизи **900 МГц**, а вторая – вблизи **2100 МГц**. На практике более распространен второй вариант.

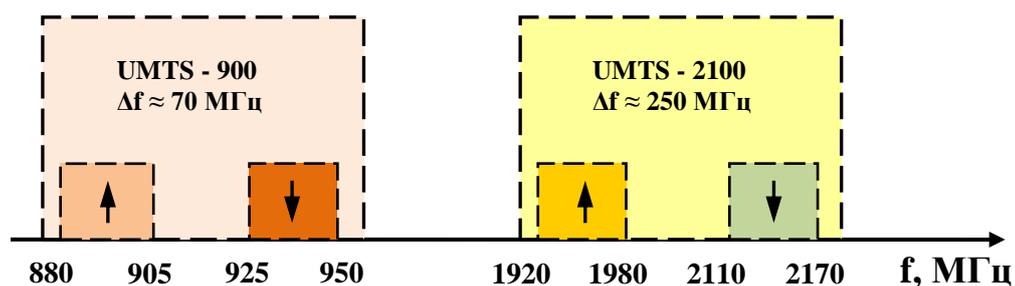


Рис. 1. Частоты 3G.

В сетях 3G каналы передачи и приема *разнесены по частоте*. Каналы передачи от пользователя к базовой станции отмечены на рисунке стрелочкой вверх, а каналы приема пользователем данных отмечены стрелочкой вниз. Далее полосы частот в 60 МГц (**1920...1980**) МГц и (**2110...2170**),

предназначенные для передачи и приема данных, распределяются *между операторами сотовой связи* (например, Мегафону, Билайну, МТС и Теле-2 отведено по 15 МГц в каждом из этих диапазонов).

Итак, **модуляция** сигнала – процесс переноса информации, содержащейся в некотором диапазоне частот в другой частотный диапазон с сохранением полезной информации. Другими словами, процесс **модуляции** заключается в том, что высокочастотное колебание, способное распространяться на большие расстояния, модулируется низкочастотным, содержащим полезную информацию. Колебание, с помощью которого передается сигнал, носит название **несущего колебания** или **несущей частоты**. Для этого один (или несколько) параметров высокочастотного колебания изменяют по закону передаваемого сообщения. В зависимости от типа изменяемого параметра различают три основных вида модуляции: **амплитудную, частотную, фазовую**. При этом любой из этих параметров может быть модулирован или изменён для передачи информации. В общем случае исходный (информационный) сигнал может иметь вид любой произвольной функции $e(t)$. В целом модуляцию можно разделить на **аналоговую и цифровую**.

1. Амплитудная модуляция

Обычная амплитудная модуляция (АМ) является одной из форм аналоговой модуляции.

При амплитудной модуляции амплитуда несущего колебания A_m изменяется пропорционально модулирующему сигналу, причем остальные два параметра частота ω и фаза φ остаются неизменными.

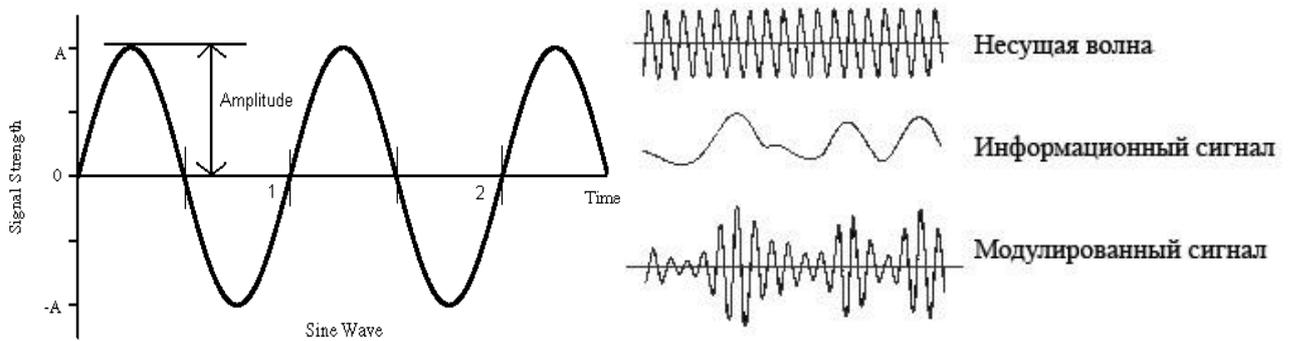


Рис. 2. Осциллограмма несущей волны, информационного и амплитудно-модулированного сигнала.

Для временной зависимости это изображается таким образом, что огибающая модулированного сигнала повторяет форму информационного сигнала (Рис.2).

Несущий сигнал – это, как правило, волна высокой частоты, которая может быть математически описана функцией синуса или косинуса с амплитудой, частотой, и начальной фазой: $s(t) = A_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, где A_m – амплитуда немодулированного несущего колебания.

Получим зависимость от времени амплитудно-модулированного сигнала. При амплитудной модуляции по закону исходного сигнала меняется амплитуда несущего сигнала. Для упрощения выкладок будем считать, что между несущим и исходным сигналом нет фазовых различий, поэтому $\varphi_0=0$ и

$$U_{AM}(t) = S(t) \cos \omega_0 t. \quad (1)$$

Амплитуда модулированного сигнала теперь является функцией $S(t)$, зависящей от времени. Представим ее как наложение исходного сигнала $Ae(t)$ на амплитуду несущего сигнала A_m :

$$S(t) = A_m + Ae(t) = A_m \left[1 + \frac{A}{A_m} e(t) \right] = A_m [(1 + m * e(t))]. \quad (2)$$

В радиотехнике часто пользуются терминами видео- и радиосигнала (видео- и радиоимпульса). Так, **видеосигналом** называют огибающую, по форме совпадающую с полезным сигналом, **радиосигналом** называют видеосигнал с высокочастотным заполнением. Запишем аналитическое выражение АМ радиосигнала как произведение низкочастотной огибающей $S(t)$ и высокочастотного гармонического колебания, тогда результирующий модулированный сигнал можно представить в виде:

$$U_{AM}(t) = A_m [1 + m * e(t)] \cos(\omega_0 t), \quad (3)$$

где $m = A/A_m$ - Коэффициент глубины модуляции или просто **глубина модуляции**, и при крайних значениях исходного сигнала $e(t) = 1; -1$ получаем:

$$U_{AM}^{max} = A_m(1 + m); U_{AM}^{min} = A_m(1 - m).$$

Тогда, в общем случае глубину модуляции можно определить, как:

$$m = \frac{U_{AM}^{max} - U_{AM}^{min}}{U_{AM}^{max} + U_{AM}^{min}} 100\%. \quad (4)$$

Таким образом, глубина модуляции может изменяться от 0 до 100%. Если m больше 100%, то модулированное колебание будет сильно искажено, форма огибающей перестает повторять форму модулирующего сигнала. Данный эффект называется **перемодуляцией**.

1.1. Однотональная амплитудная модуляция

Пусть исходный сигнал имеет гармонический вид или колебание на одной частоте: $e(t) = A \cos \Omega t$. В данном случае модуляцию называют **однотональной** ($\Omega = 2\pi F$ – угловая частота исходного сигнала). Таким образом, модулированный сигнал можно представить как радиосигнал с высокочастотным заполнением и огибающей, соответствующей исходному сигналу, при этом форма записи амплитудно-модулированного (АМ) сигнала:

$$U_{AM}(t) = A_m [1 + m \cos \Omega t] \cos(\omega_0 t), \quad (5)$$

где Ω – частота модулирующего сигнала; ω_0 – частота несущего колебания.

Амплитудная модуляция обычно применяется к процессам с амплитудой, медленно меняющейся по сравнению с несущим сигналом ($\Omega \ll \omega_0$). Воспользовавшись тригонометрическими соотношениями, представим модулированный сигнал как сумму простых гармонических колебаний с различными частотами, получаем:

$$U_{AM}(t) = A_m * \cos \omega_0 t + \frac{mA_m}{2} * \cos(\omega_0 + \Omega) t + \frac{mA_m}{2} * \cos(\omega_0 - \Omega) t \quad (6)$$

Следовательно, в случае однотоновой модуляции амплитудный спектр модулированного сигнала состоит из трёх линий (Рис. 3). Первое слагаемое соответствует несущему колебанию с частотой ω_0 , второе и третье – с частотами $(\omega_0 + \Omega)$ и $(\omega_0 - \Omega)$ – называют верхними и нижними боковыми колебаниями.

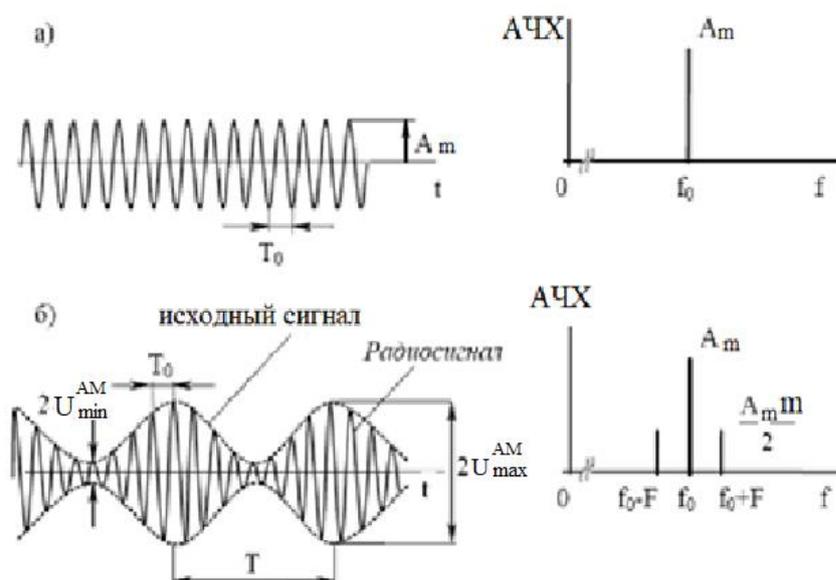


Рис. 3 а) осциллограмма несущего гармонического колебания, спектр несущего колебания; б) осциллограмма модулированного сигнала, спектр амплитудно-модулированного сигнала при однотоновой модуляции.

Таким образом, радиосигналы содержат в своём спектре гармоники, частоты которых группируются около частоты несущего колебания $\omega_0 = 2\pi f_0$, где $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{T_0}$, а $F = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$. При амплитудной модуляции амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) модулированного сигнала получается путём переноса спектра огибающей по оси частот на величину, при

которой колебание на несущей частоте имеет амплитуду A_m , а амплитуды боковых составляющих определяются выражением $\frac{mA_m}{2}$.

1.2. Амплитудная модуляция последовательностью прямоугольных импульсов

Теперь в качестве полезного сигнала возьмем последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой $A_{И}$ (Рис. 4), а в качестве несущего – высокочастотное колебание на частоте ω_0 : $s(t) = A_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, T – период следования импульсов, $t_{И}$ – длительность импульса, $q = \frac{T}{t_{И}}$ – скважность следования импульсов. Используя разложение в ряд Фурье, представим последовательность прямоугольных импульсов как:

$$e(t) = \frac{A_{И}t_{И}}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{q}\right)}{n\pi/q} \cos n\omega_1 t \right], \quad \text{где } \omega_1 = \frac{2\pi}{T}. \quad (7)$$

Так, постоянная составляющая и амплитуды гармоник определяются формулами:

$$\frac{S_0}{2} = \frac{A_{И}t_{И}}{T}; \quad S_n = \frac{2A_{И}t_{И}}{T} \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{q}\right)}{n\pi/q}, \quad (8)$$

а гармоники расположены с одинаковым интервалом, кратным $\omega_1 = 2\pi F$ по оси частот.

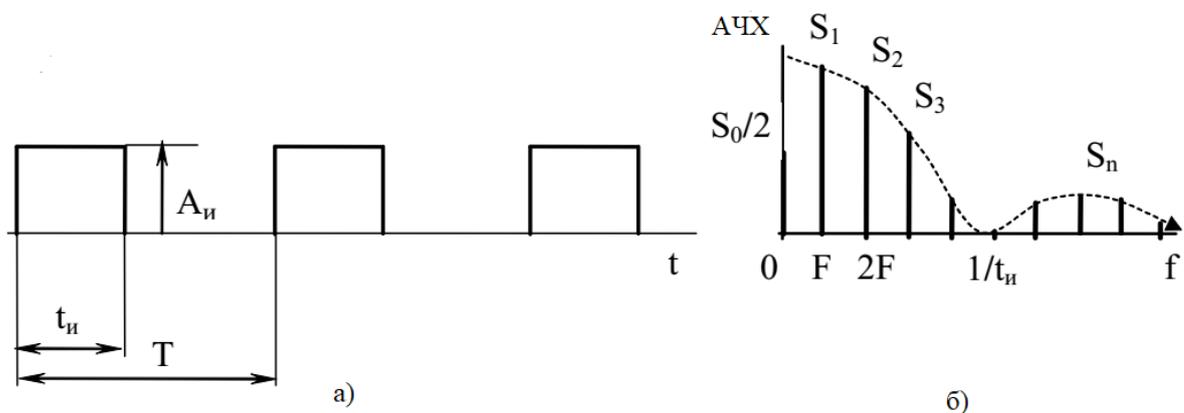


Рис. 4 а) осциллограмма последовательности прямоугольных импульсов и б) соответствующий спектр (АЧХ) последовательности прямоугольных импульсов;

Последовательность прямоугольных радиоимпульсов (рис.5) также может быть сформирована путём умножения гармонического сигнала с несущей частотой $f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{\omega_0}{2\pi}$ на исходный сигнал (7) (в данном случае на периодическую последовательность прямоугольных импульсов) (рис. 4 а), которая является огибающей радиоимпульсов.

$U_{AM}(t) = A_m e(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$, тогда при $A_m=1$, запишем:

$$U_{AM}(t) = \left[\frac{S_0}{2} + S_1 \cos(2\pi Ft) + S_1 \cos(4\pi Ft) + \dots \right] \cos(2\pi f_0 t). \quad (9)$$

Используя тригонометрические тождества получим окончательно:

$$U_{AM}(t) = A_0 \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_0 + n\omega_1)t + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_0 - n\omega_1)t \quad (10)$$

АЧХ радиосигнала получается путём переноса спектра огибающей вправо по оси частот на величину f_0 , при этом колебание на несущей частоте имеет амплитуду $A_0=S_0/2$, а амплитуды боковых составляющих определяются выражением:

$$A_n = \frac{A_H}{q} \frac{\sin \frac{n\pi}{q}}{\frac{n\pi}{q}}. \quad (11)$$

При этом АЧХ амплитудно-модулированного радиосигнала имеет вид, симметричный относительно частоты несущего колебания $\omega_0 = 2\pi f_0$, таким образом, ширина полосы частотного спектра АМ-колебания равна удвоенной полосе частот модулирующего сигнала $\Delta\omega \cong 2\Delta\Omega$ (рис.6).

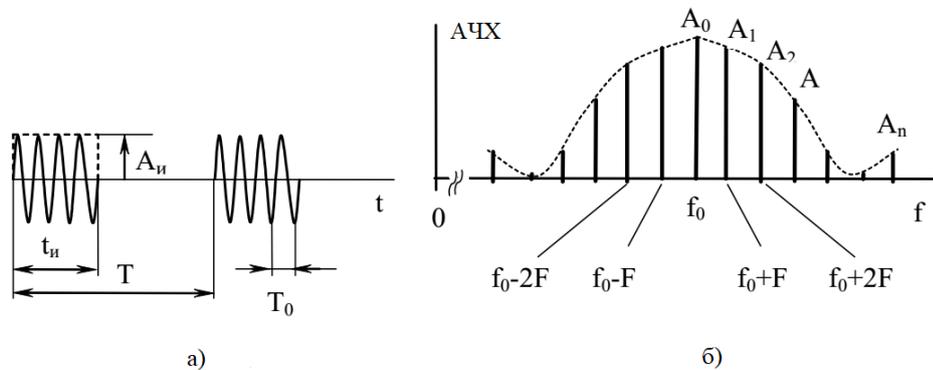


Рис. 5 а) Осциллограмма последовательности прямоугольных радиоимпульсов; б) спектр сигнала, модулированного последовательностью прямоугольных импульсов.

В случае произвольного вида исходного сигнала, АЧХ радиосигнала также получается переносом спектра видеоимпульса по оси частот на величину f_0 и симметричного отображения относительно частоты несущего колебания.

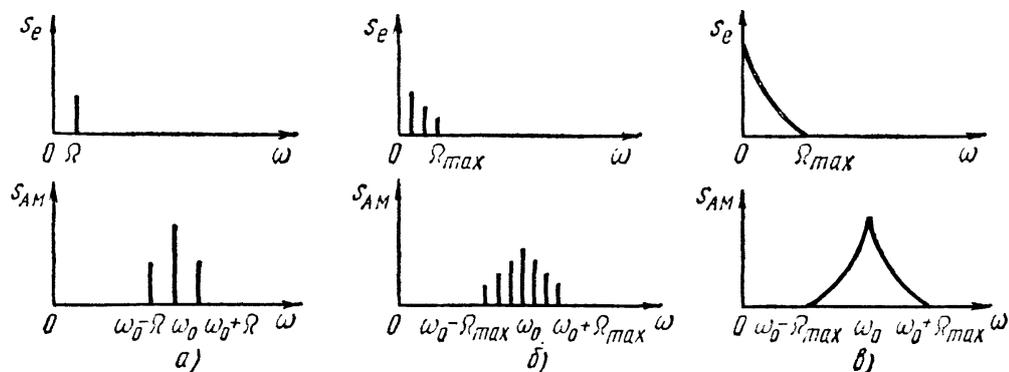


Рис. 6. Примеры спектров произвольных исходных сигналов (верхние) и спектров амплитудно-модулированных сигналов (нижние).

1.3. Мощность амплитудно-модулированных колебаний

Средняя мощность АМ-колебания (см. рис. 3 б)

$$P_{cp.} = \frac{1}{2} A_m^2 + \frac{1}{8} m^2 A_m^2 + \frac{1}{8} m^2 A_m^2, \quad (12)$$

где A_m – амплитуда несущего колебания, m - глубина модуляции.

Видно, что мощность боковых колебаний, переносящих информационный сигнал

$$P_{б.к.} = 2 \frac{1}{8} m^2 A_m^2 = \frac{1}{2} m^2 P_{нес}, \quad (13)$$

не превышает половины мощности несущего колебания. При уменьшении глубины модуляции, мощность становится еще меньше. Таким образом, основная часть мощности расходуется на передачу не содержащего информацию несущего колебания. В системах радиосвязи существуют схемы, где перед передачей сигнала несущее колебание удаляется, остаются только боковые. Такая модуляция называется *одно/двуполосной* модуляцией с подавлением несущей (Single Sideband/Double Sideband – *Suppressed Carrier Modulation*. (SSB-SC, DSB-SC)).

Однако, несущая частота необходима для последующей демодуляции (детектировании) сигнала. Поэтому существуют специальные схемы, которые

могут извлекать информацию о несущей с помощью одной из боковых полос. Чаще всего они и используются при демодуляции.

Несмотря на то, что АМ модуляция полезна для изучения предмета, это не самый эффективный и удобный способ модуляции сигнала, обычная АМ – это медленный процесс, требующий для передачи сигнала большой мощности.

В то же время амплитудная модуляция может быть полезна для передачи цифровых данных. Амплитуды этих простых сигналов меняются дискретно, что, в конечном счете, образует сигнал с дискретным изменением и амплитуды, и фазы одновременно. Множество коммуникационных протоколов применяют квадратурную амплитудную модуляцию или QAM. Существующие протоколы такие, как, например, 802.11b беспроводной Ethernet (Wi-Fi) и цифровое видеовещание (Digital Video Broadcast (DVB)), оба используют модуляцию 64-QAM. Кроме того, возникающие беспроводные технологии, такие как WiMAX, 802.11n и HSDPA/HSUPA (новый сотовый стандарт передачи данных) применяют QAM.

2. Частотная и фазовая модуляция (угловая модуляция)

При частотной модуляции по закону модулирующего колебания меняется частота. Частотная модуляция обычно используется для радио- или телевизионной трансляции. FM (FM – Frequency Modulation) радиостанции, вещают в диапазоне от 88 МГц до 108 МГц, причем каждая радиостанция использует полосу частот в 38 кГц. Аналоговое телевидение также применяет FM модуляцию, и телевизионные каналы (от 0 до 72) передают сигналы в диапазоне от 54 МГц до 825 МГц. Таким образом, частотная модуляция применяется для высококачественной передачи звукового (низкочастотного) сигнала в радиовещании (в диапазоне УКВ), для звукового сопровождения телевизионных программ, передачи сигналов цветности в телевизионном стандарте SECAM, музыкальных синтезаторах.

Если исходный сигнал является типичным аналоговым сигналом без дискретных цифровых значений, модуляция считается аналоговой. Частотная модуляция – это такой тип модуляции, при котором изменения в информационном сигнале соответствуют изменениям частоты несущего колебания, при фазовой модуляции изменения по закону исходного сигнала претерпевает фаза.

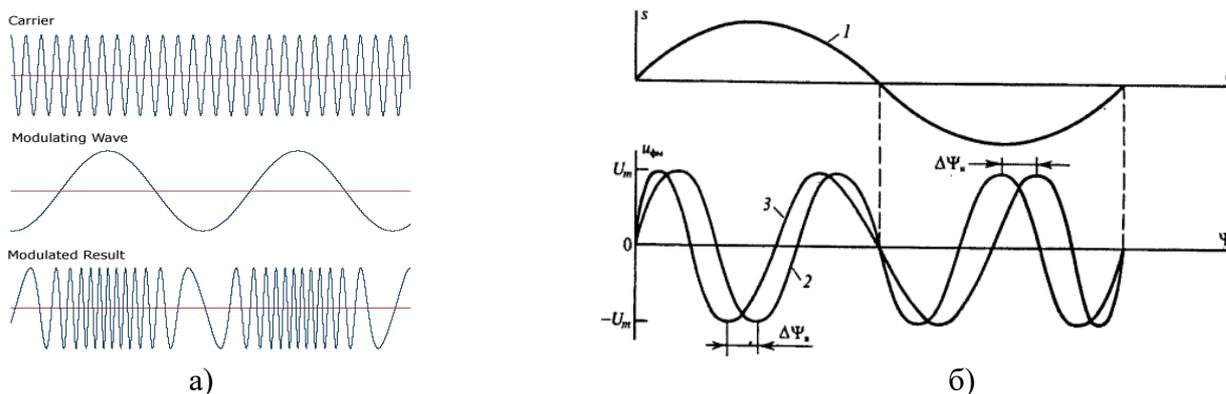


Рис. 7. Осциллограммы а) частотно-модулированного сигнала; б) фазомодулированного сигнала при однотоновой модуляции.

Из рис. 7 видно, что максимальное изменение частоты или фазы сигнала происходит в моменты максимального изменения полезного сигнала.

Пусть исходный передаваемый сигнал имеет гармонический вид $e(t) = A \cos \Omega t$. Аргументом несущего колебания $s(t) = A_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ является полная фаза, определяющая текущее значение фазового угла:

$$\Psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0 . \quad (14)$$

Рассмотрим, как полная фаза изменится при введении частотной или фазовой модуляции. При частотной модуляции мгновенное значение частоты должно зависеть от времени по закону модулирующего колебания:

$$\omega^{ЧМ}(t) = \omega_0 + \Delta \omega e(t) = \omega_0 + \Delta \omega \cos \Omega t , \quad (15)$$

где $\Delta \omega \sim A$ – девиация (отклонение) частоты, пропорциональное амплитуде исходного модулирующего сигнала.

При фазовой модуляции по закону модулирующего сигнала меняется фаза:

$$\Psi^{ФМ}(t) = \omega_0 t + \Delta \psi e(t) + \varphi_0 . \quad (16)$$

Необходимо отметить, что частота и фаза связаны между собой соотношениями: частота меняется по закону первой производной по времени от фазы $\omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt}$, в то время как фаза является интегралом от частоты:

$$\Psi(t) = \int_{-\infty}^t \omega(t) dt . \quad (17)$$

Другими словами, частота является скоростью изменения фазы во времени. Поскольку при изменении частоты меняется и фаза модулированного колебания, а при изменении фазы меняется частота, частотный и фазовый виды модуляции часто объединяют под общим названием **угловая модуляция (УМ)**.

Будем считать для простоты, что начальную фазу, равной нулю $\varphi_0 = 0$. Мгновенная полная фаза частотно-модулированного сигнала определяется путем интегрирования мгновенной частоты по времени:

$$\Psi^{ЧМ}(t) = \int_{-\infty}^t \omega^{ЧМ}(t) dt = \omega_0 t + \frac{\Delta \omega}{\Omega} \sin \Omega t , \quad (18)$$

где $M = \frac{\Delta \omega}{\Omega}$ - индекс частотной модуляции.

Тогда аналитическое выражение для частотно-модулированного сигнала при однотоновой модуляции запишем как:

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = A_m \cos(\omega_0 t + M \sin \Omega t) . \quad (19)$$

Мгновенная частота ФМ сигнала:

$$\omega_{\text{ФМ}}(t) = \omega_0 + \Delta\psi \frac{de(t)}{dt} , \quad (20)$$

где $\Delta\psi = M$ девиация фазы.

Зависимость от времени фазомодулированного сигнала имеет вид, аналогичный выражению, полученному для частотно-модулированного сигнала:

$$U_{\text{ФМ}}(t) = A_m \cos(\omega_0 t + \Delta\psi \sin \Omega t) . \quad (21)$$

Таким образом, **частотная модуляция сопровождается фазовой модуляцией**, закон изменения которой пропорционален интегралу от низкочастотной функции. Поскольку частота и фаза связаны между собой, с помощью частотного модулятора можно получить ФМ-сигнал и, наоборот, с помощью фазового – ЧМ-сигнал. Для этого в первом случае на частотный модулятор модулирующий сигнал подается через дифференциатор, а для получения частотно-модулированного колебания на фазовый модулятор подается сигнал через интегратор (рис. 8).

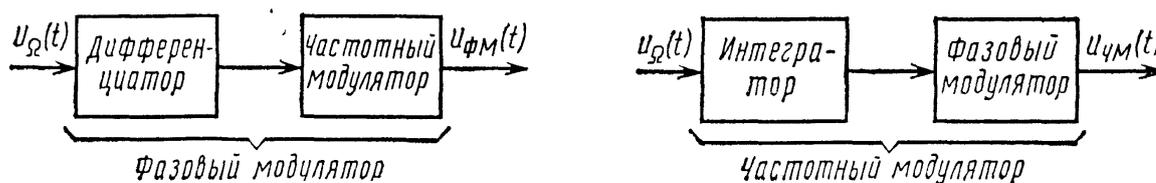


Рис. 8. Блок схемы фазового и частотного модуляторов.

2.1. Спектральные характеристики частотной и фазовой модуляции

Перепишем выражение для частотно-модулированного сигнала как:

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = A_m \cos(\omega_0 t + M \sin \Omega t) = A_m \cos \omega_0 t \cos(M \sin \Omega t) - A_m \sin \omega_0 t \sin(M \sin \Omega t) . \quad (22)$$

Вначале рассмотрим ситуацию, когда индекс модуляции очень мал $M \ll 1$. Тогда можно принять: $\cos(M\sin\Omega t) \sim 1$, а $\sin(M\sin\Omega t) \sim M\sin\Omega t$. По формуле произведения синусов двух углов, получим:

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = A_m \cos\omega_0 t - A_m M \sin\omega_0 t \sin\Omega t = A_m \cos\omega_0 t - \frac{M}{2} A_m [\cos(\omega t - \Omega) t] + \frac{M}{2} A_m [\cos(\omega t + \Omega) t]. \quad (23)$$

Из выражения видно, спектр частотно-модулированного сигнала при малом индексе модуляции похож на спектр АМ сигнала. Также имеет три составляющие на основной и боковых частотах, однако, в отличие от спектра амплитудно-модулированного сигнала, одно из боковых колебаний сдвинуто по фазе на 180° (рис. 9). При этом ширина спектров АМ-сигналов и ЧМ-сигналов с малым индексом модуляции одинаковы.

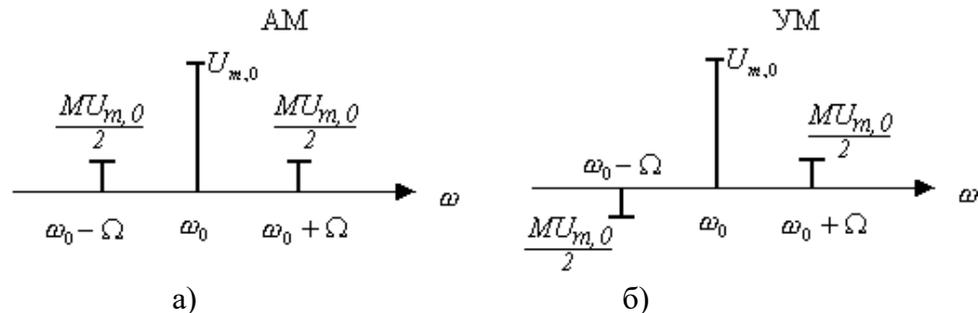


Рис .9. а) Спектр амплитудно-модулированного сигнала при однотоновой модуляции. б) Спектр частотно-модулированного сигнала при однотоновой модуляции с малым индексом модуляции M .

Теперь определим спектр (УМ) колебания при произвольном индексе модуляции M . Выражение для ЧМ-сигнала:

$$U_{\text{УМ}}(t) = A_m \cos(\omega_0 t + M \sin\Omega t) = A_m \operatorname{Re}\{e^{j\omega_0 t} e^{jM \sin\Omega t}\}. \quad (24)$$

Если индекс модуляции не является малым ($M \geq 1$), то, в отличие от амплитудной модуляции, спектр будет выглядеть сложнее. Так как сигнал является периодическим, воспользуемся разложением ряда Фурье. Учитывая, что $e^{jM \sin x} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(M) e^{jkx}$, запишем:

$$U_{\text{ЧМ}}(t) = A_m \operatorname{Re}\{e^{j\omega_0 t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(M) e^{jk\Omega t}\} = A_m \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(M) \cos(\omega_0 + k\Omega)t.$$

Таким образом, даже при тональной модуляции, спектр УМ-колебания имеет бесконечно много составляющих на частотах $\omega_0 \pm k\Omega$ ($k=1,2,3 \dots$), амплитуды которых определяются значениями функции Бесселя первого рода $J_k(M)$, рассматриваемой как функция номера гармоники k при заданном значении индекса M . Спектральные линии боковых гармоник расположены симметрично относительно основной (несущей частоты).

Спектр частотно-модулированного сигнала получается сложным и содержит большое количество боковых частот $\omega_0 \pm k\Omega$, причем с увеличением индекса модуляции растет и количество боковых частот (рис. 10). При больших индексах модуляции ширина спектра примерно равна удвоенной девиации частоты $\Delta\omega = 2\Omega M$. Увеличение амплитуды модулирующего сигнала увеличивает параметры сигнала угловой модуляции $\Delta\omega$ и M , а также расширяет спектр сигнала.

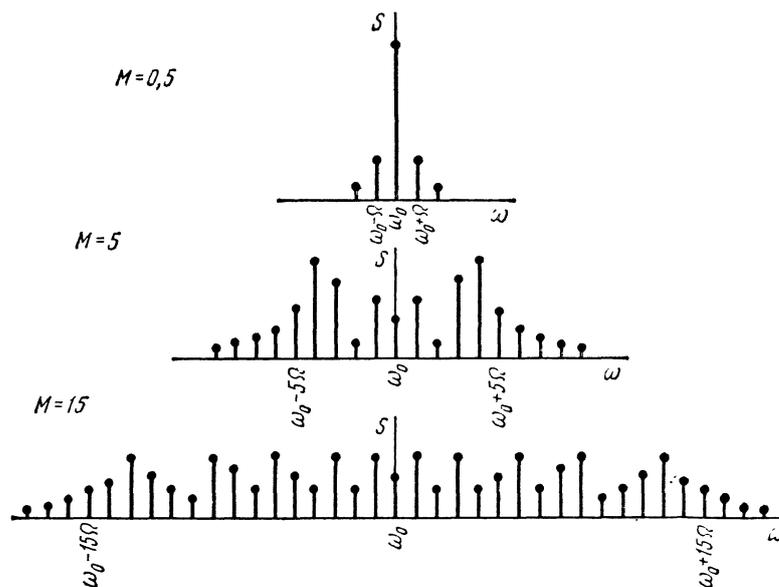


Рис. 10. Спектр частотно-модулированного сигнала с различным значением индекса угловой модуляции.

При однотоновой модуляции фазовая и частотная модуляция неразличимы. Различие между частотно- и фазомодулированными сигналами может наблюдаться при модуляции сигналами разной частоты. Фазовый модулятор обеспечивает отклонение фазы несущей частоты, пропорциональное напряжению модулирующего сигнала. При ФМ модуляции

индекс M не зависит от частоты модулирующего сигнала, имеет постоянное значение, поэтому и амплитуды составляющих с частотами $\omega_0 \pm k\Omega$ не зависят от частоты модулирующего сигнала Ω . При ЧМ девиация частоты задающего генератора передатчика пропорциональна напряжению модулирующего сигнала. Таким образом, при частотной модуляции индекс M обратно пропорционален частоте Ω , следовательно, с ростом частоты Ω амплитуды боковых колебаний резко уменьшаются. Полоса спектра ЧМ сигнала в реальности получается более узкой, чем полоса ФМ сигнала.

3. Амплитудно-, фазо- и частотно-манипулированные сигналы

Поскольку сегодня большинство коммуникаций носят цифровой характер, на практике применяются более сложные методы модуляции. Цифровые схемы модуляции немного отличаются от аналоговых, рассмотренных выше. Важным классом сигналов являются т.н. манипулированные сигналы.

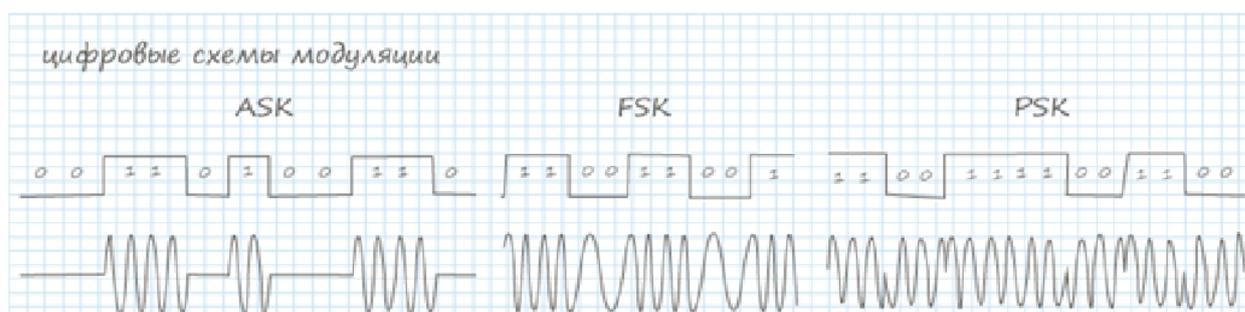


Рис. 11. Схемы амплитудной (ASK), частотной (FSK) и фазовой (PSK) манипуляций.

На рисунке 11 представлены схемы амплитудной (ASK), частотной (FSK) и фазовой (PSK) манипуляций.

В простейшем случае – это последовательности радиоимпульсов, отделенные временными промежутками (рис.11). Функция $e(t)$ при этом принимает значение либо 0 либо 1. Такого рода модуляцию называют «манипуляцией» (от английского «Shift Key»). Однако, как и в аналоговых схемах, всё сводится к изменению в основном трёх параметров: **частоты, фазы и амплитуды**, за исключением того, что параметры меняются скачками в соответствии с резким изменением самого сигнала.

Описание установки

Аппаратная часть:

- PXI-шасси с управляющим контролером или компьютером;
- модульный мультиметр;
- модульный генератор сигналов;
- модульный осциллограф;
- модульное устройство цифрового ввода-вывода;
- модульный программируемый источник питания.

Программная часть:

- программная среда LabVIEW;
- драйвера мультиметров NI-DMM;
- драйвера генераторов сигналов NI-FGEN;
- драйвера осциллографов NI-SCOPE;
- драйвера устройств цифрового ввода-вывода NI-HSDIO;
- драйвера программируемых источника питания NI-DCPower.

Дополнительно:

- набор деталей для измерения электрических характеристик (резисторы, емкости, батарейка).
- набор соединительных кабелей

LabVIEW симуляторы созданы специально, чтобы эффективно проиллюстрировать основные понятия модуляции. Используя графический дисплей LabVIEW, интерактивные демонстрации позволяют пользователю изменять входные данные на лицевой панели и наблюдать получаемые результаты.

Задания

1. Ознакомиться с работой установки.
2. Выбрать в качестве исходного сигнала АМ-модуляции гармонический сигнал. Получить спектр амплитудно-модулированного сигнала для различных частот исходного сигнала ($\Omega=5, 10, 15$ кГц).
3. Получить спектр амплитудно-модулированного сигнала для одной частоты исходного сигнала $\Omega=10$ кГц при различной глубине модуляции ($m=0,25; 0,5; 0,75$).
4. Получить спектр частотно-модулированного сигнала для различных частот исходного сигнала ($\Omega =5, 10, 15$ кГц).
5. Получить спектр частотно-модулированного сигнала для одной частоты исходного сигнала $\Omega=10$ кГц при различной девиации частоты ($\Delta\omega=50$ кГц; 750 Гц).
6. Выбрать в качестве исходного сигнала АМ-модуляции последовательность прямоугольных импульсов. Получить спектр амплитудно-модулированного сигнала для различной частоты следования импульсов.
7. Получить спектр частотно-модулированного сигнала для различной частоты следования импульсов.

Вопросы

1. В чем состоит физическая необходимость процессов модуляции?
2. Какие параметры изменяются в процессах амплитудной, фазовой и частотной модуляции?
3. Что такое глубина модуляции?
4. От чего зависит распределение мощности в спектре однотонового АМ-сигнала?
5. В чем заключаются различия между сигналами с частотной и фазовой модуляцией?
6. Как выглядит спектральный состав частотно- и фазомодулированных сигналов при малом индексе модуляции ($M \ll 1$)?
7. Сравните между собой частоты несущего и модулирующего колебаний.
8. Как изменяется спектр АМ, ЧМ и ФМ модулированного сигнала при изменении частоты однотонового модулирующего сигнала?
9. Чем определяется ширина спектра ЧМ модулированного сигнала?
10. Чем определяется ширина спектра АМ модулированного сигнала?

Литература

1. Каяцкас, А. А. Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие для студентов вузов по спец. «Констр. и производство радиоаппаратуры» / А. А. Каяцкас. - Москва: Высш. школа, 1988. - 464 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. - Москва: Высш. школа, 2003. - 462 с.

Софья Владиславовна **Хазанова**, Алексей Владимирович **Нежданов**,
Дмитрий Евгеньевич **Николичев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АМПЛИТУДНОЙ,
ЧАСТОТНОЙ И ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ**

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина 23.