Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 28.08.2023 18:38:04
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
________________ О.Г. Локтионова
«_8_» 08 ____________ 2023 г.

МОДУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Электромагнитные поля и волны»

Курск 2023

УДК 621.391

Составители: Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи
В. Г. Андронов

Модуляция электромагнитных волн: методические указания по выполнению лабораторной работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Д.С. Коптев. Курск, 2023. – 15 с.

Методические указания по выполнению лабораторной работы содержат краткие теоретические сведения, задания для выполнения работы, примеры их выполнения в математическом приложении MathCAD и перечень вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также рабочей программе дисциплины «Электромагнитные поля и волны».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x841/16.
Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 0,79. Тираж 100 экз. Заказ 750. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1 Цель работы

- изучить основные виды модуляции электромагнитных волн.

2 Краткие теоретические сведения

Модуляция – это процесс изменения одного или нескольких параметров несущего сигнала в соответствии с изменением параметров воздействующего сигнала (модулирующего сигнала).

Параметры несущего сигнала, изменяющиеся во времени под воздействием модулирующего сигнала, называются информационными, так как в их изменениях заложена передаваемая информация. Модулированные сигналы различаются по виду несущего сигнала и по модулируемым параметрам. В качестве несущего сигнала в настоящее время широко используются гармонические колебания, периодическая последовательность импульсов, реже – колебания специальной формы, узкополосный случайный процесс.

Гармоническая несущая $s_n(t) = A_0 \cos(w_0 t + \psi_0)$, например, характеризуется тремя свободными параметрами: амплитудой, частотой и фазой. Все они могут быть информационными. Изменяя один из них при постоянстве других, получаем три основных вида модуляции: амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ).

Модулированный сигнал при гармонической несущей в общем случае можно представить в виде:

$$s_n(u_м, t) = A(t)\cos\Psi(t) \tag{1}$$

где модулированный сигнал на выходе модулятора зависит от времени и от модулирующего сигнала $u_м(t)$, поэтому и обозначается как функция двух аргументов $s_n(u_м, t)$; $A(t)$ – огибающая сигнала; *Ψ(t)* – полная фаза.

За интервал времени, в течение которого полная фаза *Ψ(t)* изменится на 2π, огибающая не успеет сильно измениться и ее можно считать медленно меняющейся.

В модулированном сигнале (1) мгновенная угловая частота есть производная от полной фазы по времени:

$$w(t) = d\Psi(t)/dt \tag{2}$$

При определении параметров модулированных сигналов обычно считают, что модулирующий сигнал $u_м(t)$, нормирован, то есть максимальное абсолютное значение равно единице $\max|u_м(t)|=1$. Главная особенность любой модуляции – преобразование спектра модулирующего сигнала. В общем случае происходит расширение спектра, а при гармоническом несущем сигнале – перенос спектра в область около частоты несущего сигнала [1].

2.1 Амплитудная модуляция

При амплитудной модуляции амплитуда несущего колебания изменяется пропорционально мгновенным значениям модулирующего сигнала $u_м(t)$, то есть становится равной

$$A(t) = A_0 + a u_м(t) \tag{3}$$

где A_0 – амплитуда несущей; a – коэффициент пропорциональности, выбираемый так, чтобы амплитуда A(t) всегда была положительной. Частота и фаза несущего гармонического колебания при АМ остаются неизменными.

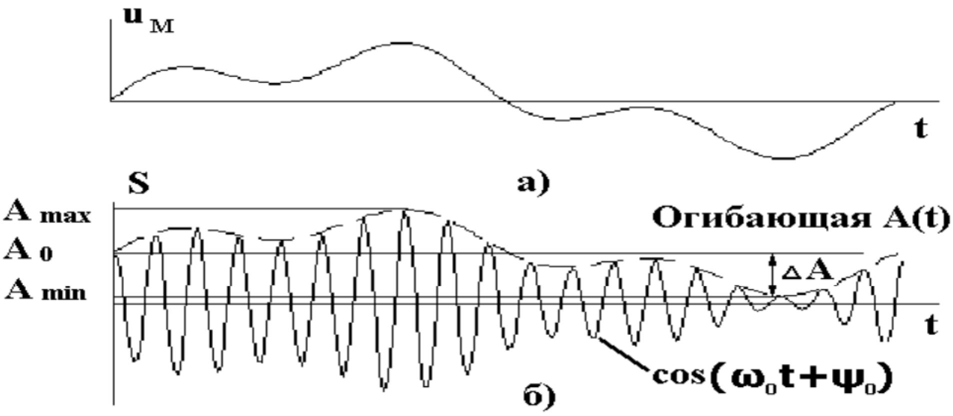


Рисунок 1 – Модулирующий сигнал (а), амплитудно – модулированный сигнал (б)

Временная диаграмма АМ сигнала показана на рисунке 1 (а – модулирующий сигнал, б – амплитудно-модулированный сигнал), из которого видно, что в соответствии с мгновенными значениями $u_м(t)$ амплитуда несущей A_0 увеличивается до значения $A_{мmax}$, получая приращение $\vartriangle A_+ = A_{\max} - A_0 = a u_{м\max}$, или уменьшается, получая $\vartriangle A_- = A_{\max} - A_0 = a u_{м\max}$. Обращает на себя внимание, что амплитуда *A(t)* повторяет форму модулирующего сигнала $u_м(t)$.

В АМ сигнале амплитуда *A(t)* является огибающей высокочастотного заполнения $\cos(w_0 t+\psi_0)$.

Для математического описания АМ сигнала в (3) вместо коэффициента пропорциональности а, зависящего от конкретной схемы модулятора, вводится коэффициент модуляции по формуле:

$$M = \Delta A / A_0 \tag{4}$$

то есть коэффициент модуляции равен отношению максимального приращения амплитуды к амплитуде несущего сигнала. Физически М характеризует собой глубину амплитудной модуляции и может изменяться в пределах $0 \le M \le 1$.

Подставляя (3) в (1) с учетом введенного коэффициента модуляции *M*, получаем аналитическое выражение (математическую модель) любого АМ сигнала:

$$S_{AM}(u_M,t) = A_0\left[1+Mu_м(t)\right]\cos(w_0 t+\psi_0) \tag{5}$$

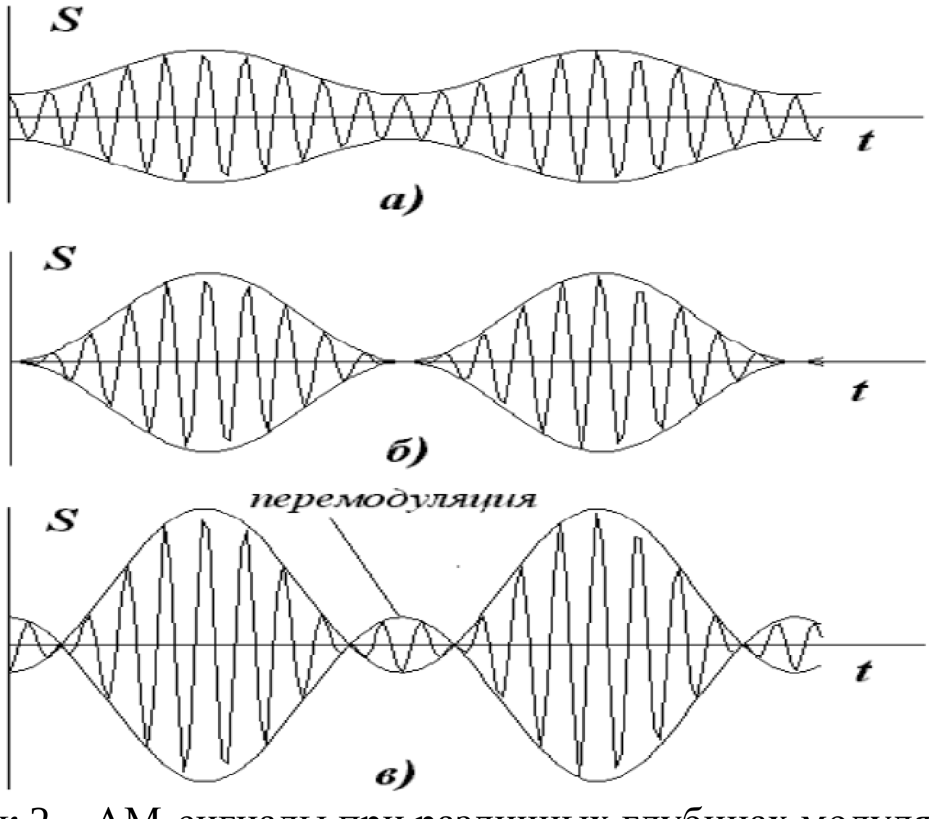


Рисунок 2 – АМ-сигналы при различных глубинах модуляции: а – неглубокая модуляция; б – глубокая модуляция; в – перемодуляция

В простейшем случае модулирующий сигнал $u_м(t)$ является гармоническим колебанием с частотой $\Omega \ll \omega_0$ и начальной фазой Ψ. При этом (6)

$$S_{AM}(u_м, t) = A_0\left[1 + M\cos(\Omega t + \Psi)\right]\cos(w_0 t + \psi_0) \qquad (6)$$

представляет собой аналитическое выражение однотонального АМ сигнала. На рисунке 2 показаны временные диаграммы однотонального АМ сигнала при различных значениях коэффициента модуляции *M*. Легко заметить характерные искажения при перемодуляции (рисунок 2, в), когда форма огибающей перестает повторять форму модулирующего гармонического колебания. Рассмотрим однотональную амплитудную модуляцию в математическом приложении MathCAD – пример № 1.

Пример №1. Рассмотрим амплитудную модуляцию гармоническим сигналом [1].

Дано:

Амплитуда модулируемого сигнала $A_0 := 1$

Различные коэффициенты АМ:

- нормальная АМ $M_1 := 0.5$
- 100% АМ $M_2 := 1$
- перемодуляция $M_3 := 1.5$

Частота и начальная фаза модулирующего сигнала: $\Omega := 1,\ \Psi := \pi$

Частота модулируемого сигнала $w_0 := 15$

Начальная фаза модулируемого сигнала $\psi_0 := \pi$

Рассматриваемый промежуток времени: $t := 0.05..13$

Аналитические выражения однотонального АМ сигнала:

$$S_{1AM}(t) := A_0 \cdot \left(1 + M_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t + \Psi)\right) \cdot \cos(w_0 \cdot t + \psi_0)$$

$$S_{2AM}(t) := A_0 \cdot \left(1 + M_2 \cdot \cos(\Omega \cdot t + \Psi)\right) \cdot \cos(w_0 \cdot t + \psi_0)$$

$$S_{3AM}(t) := A_0 \cdot \left(1 + M_3 \cdot \cos(\Omega \cdot t + \Psi)\right) \cdot \cos(w_0 \cdot t + \psi_0)$$

Решение:

Соответствующие временные диаграммы:

- нормальная амплитудная модуляция;

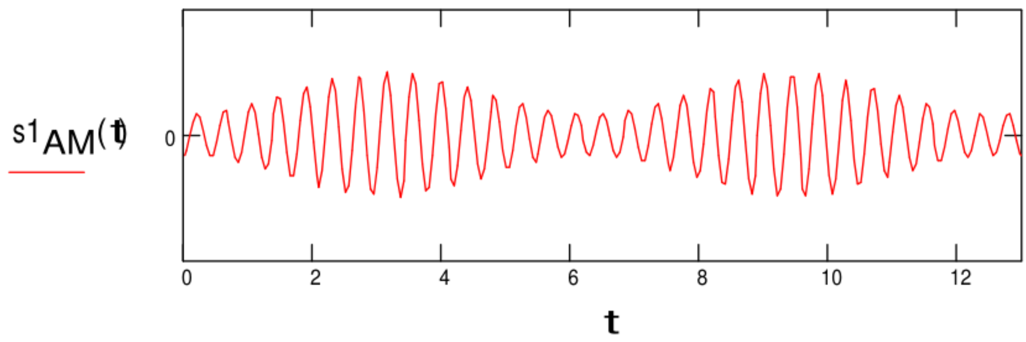


Рисунок 3 – Нормальная амплитудная модуляция

- 100% амплитудная модуляция;

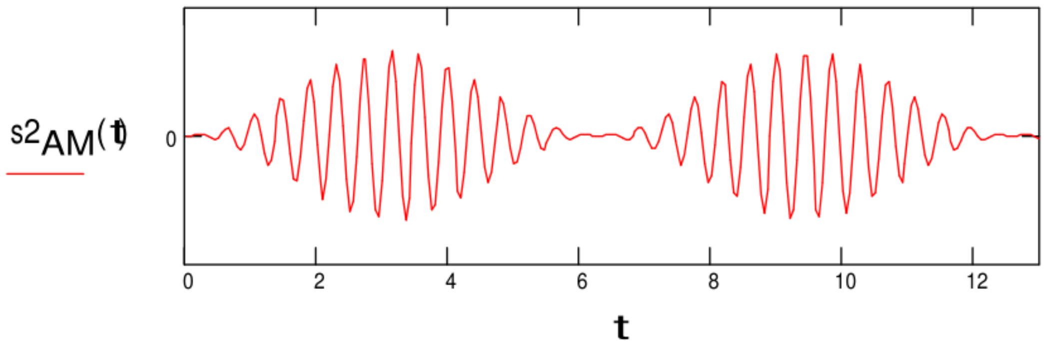


Рисунок 4 – 100% амплитудная модуляция

- перемодуляция сигнала;

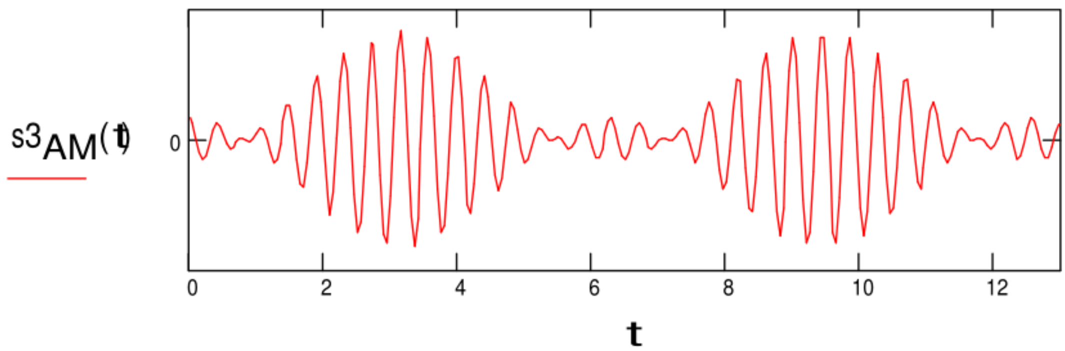


Рисунок 5 – Пемодуляция сигнала

2.2 Фазовая и частотная модуляции гармонического несущего сигнала

$$\Psi(t) = w_0 t + \psi_0 + \Delta\varphi_Д u_м(t) \qquad (7)$$

где $\Delta\varphi_Д$ – коэффициент пропорциональности, называемый (от латинского deviatio – отклонение). Физический смысл этого коэффициента поясняется на рисунке 6, где изображены модулирующий сигнал а) и полная фаза ФМ сигнала б). С увеличением сигнала $u_м(t)$ полная фаза *Ψ(t)* растет во времени быстрее, чем по линейному закону. При значениях сигнала $u_м(t) < 0$ происходит спад скорости роста *Ψ(t)*. Абсолютная величина отклонения фазы от линейной.

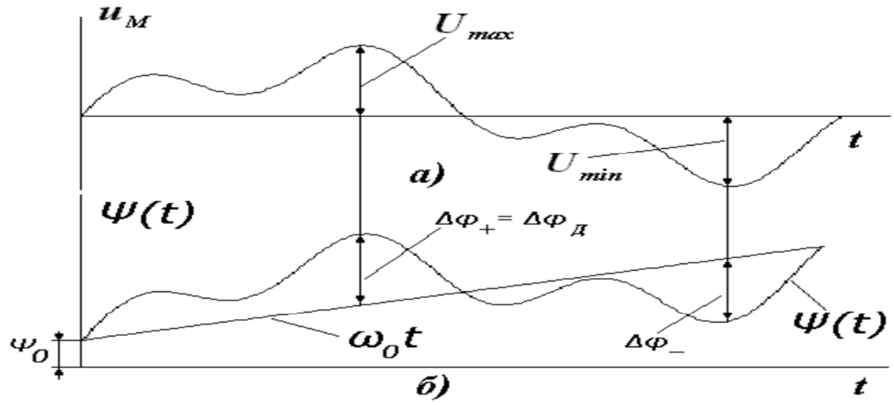


Рисунок 6 – Модулирующий сигнал (а) и полная фаза ФМ сигнала (б)

наибольшая, когда $u_м(t)$ достигает экстремальных значений. На рисунке 6, б отмечено максимальное отклонение фазы вверх $\Delta\varphi +$ и вниз $\Delta\varphi$. Наибольшее отклонение фазы от линейной и является девиацией фазы $\Delta\varphi$ Д при ФМ. В примере на рисунке 6 $\Delta\varphi_Д = \Delta\varphi_+$. Измеряется $\Delta\varphi_Д$ в радианах и может принимать значение от единиц до десятков тысяч радиан.

Подставляя (7) в (1), получаем аналитическое выражение (математическую модель) ФМ сигнала:

$$S_{ФМ}(u_м, t) = A_0 \cos\left[w_0 t + \psi_0 + \Delta\varphi_Д u_м(t)\right] \qquad (8)$$

При частотной модуляции отклонение частоты модулированного сигнала от ω_0 изменяется пропорционально мгновенным значениям модулирующего сигнала $u_м(t)$

$$w(t) = w_0 + \Delta w_Д u_м(t) \qquad (9)$$

где $\Delta\omega_Д$ – коэффициент пропорциональности .

По аналогии с ФМ коэффициент $\Delta w_Д$ называют девиацией частоты и она равна наибольшему отклонению частоты модулированного сигнала от значения частоты несущей ω_0 . Изменение частоты ЧМ сигнала графически показано на рисунке 7 (а – модулирующий сигнал, б – изменение мгновенной частоты), где отмечена девиация частоты $\Delta\omega_Д$, соответствующая наибольшему отклонению частоты вниз $\Delta\omega_Д = \Delta\omega -$ поскольку $\Delta\omega_+ < \Delta\omega_-$. Как и при ФМ, в выражении (9) величина $u_м(t)$ нормирована, то есть $|u_м(t)| \le 1$.

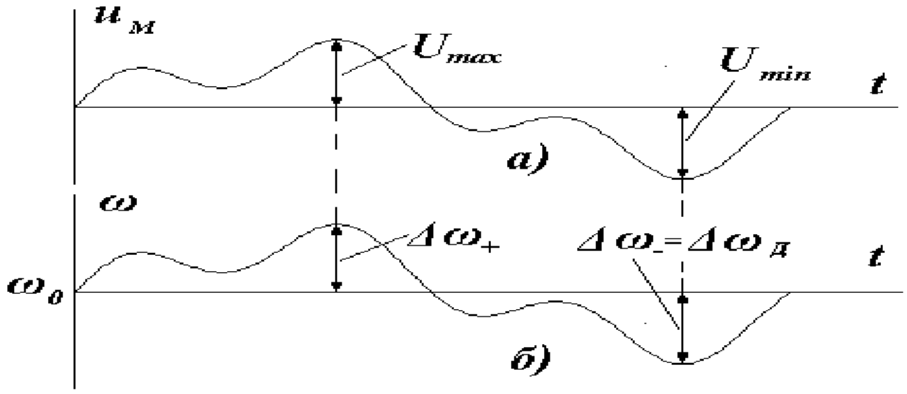


Рисунок 7 – Изменение частоты ЧМ сигнала: а – модулирующий сигнал; б – изменение мгновенной частоты

Девиация частоты является одним из главных параметров частотных модуляторов и может принимать значения от единиц герц до сотен мегагерц в модуляторах различного назначения. Однако всегда необходимо, чтобы выполнялось условие $\Delta\omega_Д \ll \omega_0$.

Полную фазу ЧМ сигнала с частотой (9) согласно (2) находим путем интегрирования, то есть:

$$\Psi_{ЧМ}(t) = \int w(t)dt = \int\left[w_0 + \vartriangle w_Д u_м(t)\right]dt = w_0 t + \vartriangle w_Д \int u_м(t)dt + \psi_0,$$

где ψ 0 можно рассматривать как постоянную интегрирования. Тогда аналитическое выражение (математическая модель) ЧМ сигнала запишется в виде:

$$S_{ЧМ}(t) = A_0 \cos\left[w_0 t + \psi_0 + \vartriangle\varphi_Д \int u_м(t)dt\right] \qquad (10)$$

Поскольку $u_м(t)$ входит в это выражение под знаком интеграла, ЧМ часто называют интегральным видом модуляции.

При модуляции одним тоном $u_м(t) = \cos(\Omega t + \Psi)$ с учетом того, что $\cos ax = (1/a)\sin ax$ из (10) и (8) получаем, что аналитические выражения ФМ и ЧМ сигналов по форме записи имеют совершенно одинаковый вид:

$$S_{ФМ}(u_м, t) = A_0 \cos\left[w_0 t + \psi_0 + m_{ФМ}\cos(\Omega t + \Psi)\right];$$
$$S_{ЧМ}(u_м, t) = A_0 \cos\left[w_0 t + \psi_0 + m_{ЧМ}\sin(\Omega t + \Psi)\right];$$

где m – индекс модуляции . Отличие только в порядке вычисления индекса и фазы модулирующего колебания. При ФМ индекс модуляции m ФМ – величина, равная девиации фазы модулированного сигнала при гармоническом модулирующем сигнале $u_м(t)$, т.е. $m_{ФМ} = \Delta\varphi_Д$. При ЧМ индекс модуляции $m_{ЧМ}$ – отношение девиации частоты модулированного сигнала $\Delta\omega_Д = 2\pi\Delta f_д$ к частоте модулирующего гармонического сигнала $\Omega = 2\pi F$, то есть , $M_{ЧМ} = \Delta\omega_Д / \Omega = \Delta f_д / F$.

Следовательно, индекс частотной модуляции является амплитудой отклонения фазы, измеренной в радианах.

При гармоническом модулирующем сигнале временные диаграммы ФМ и ЧМ имеют совершенно одинаковый вид (рисунок 8). Отличить их можно, только сравнив изменение мгновенной фазы модулированного сигнала с законом изменения модулирующего колебания.

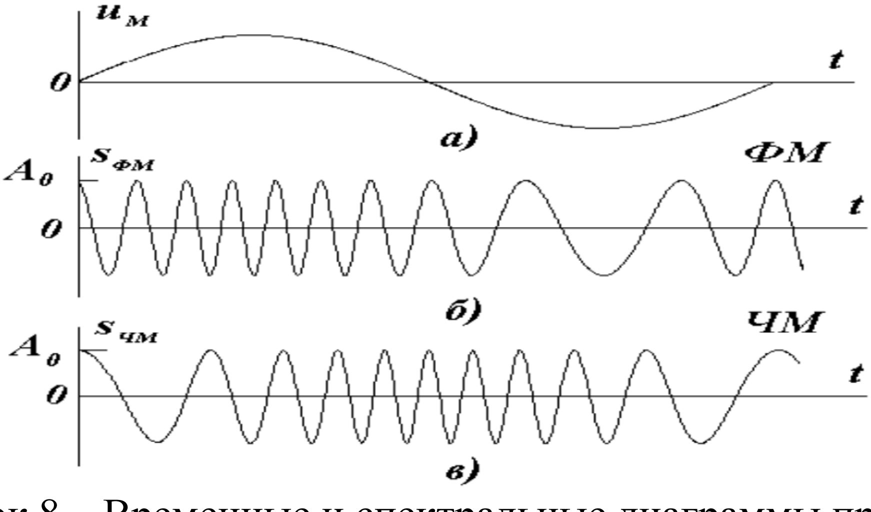


Рисунок 8 – Временные и спектральные диаграммы процесса формирования: ФМ и ЧМ модулирующего сигнала

Рассмотрим фазовую и частотную модуляцию в математическом приложении MathCAD – пример № 2.

Пример № 2. Рассмотрим фазовую и частотную однотональную модуляцию [1].

Дано:

Индекс фазовой модуляции $m_{ФМ} := 10$

Индекс частотной модуляции $m_{ЧМ} := 10$

Аналитическое выражение однотонального ФМ сигнала:

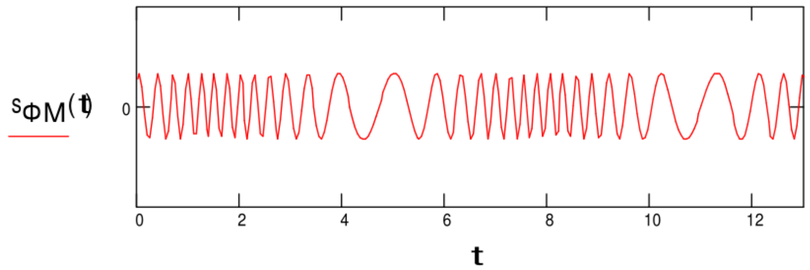
$$S_{ФМ}(t) := A_0 \cdot \cos\left(w_0 \cdot t + \psi_0 + m_{ФМ} \cdot \cos(\Omega \cdot t + \Psi)\right)$$

Аналитическое выражение однотонального ЧМ сигнала:

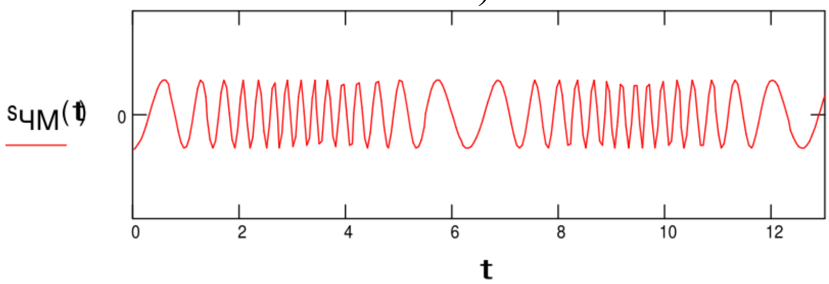
$$S_{ЧМ}(t) := A_0 \cdot \cos\left(w_0 \cdot t + \psi_0 + m_{ЧМ} \cdot \sin(\Omega \cdot t + \Psi)\right)$$

Решение:

Соответствующие временные диаграммы ФМ и ЧМ сигналов:



а)



б)

Рисунок 9 – Временные диаграммы сигналов: а – ЧМ сигнал; б – ФМ сигнал

2.3 Дискретная модуляция гармонического несущего сигнала

Дискретная модуляция является частным случаем модуляции гармонического несущего сигнала, когда модулирующий сигнал $u_м(t)$ дискретный.

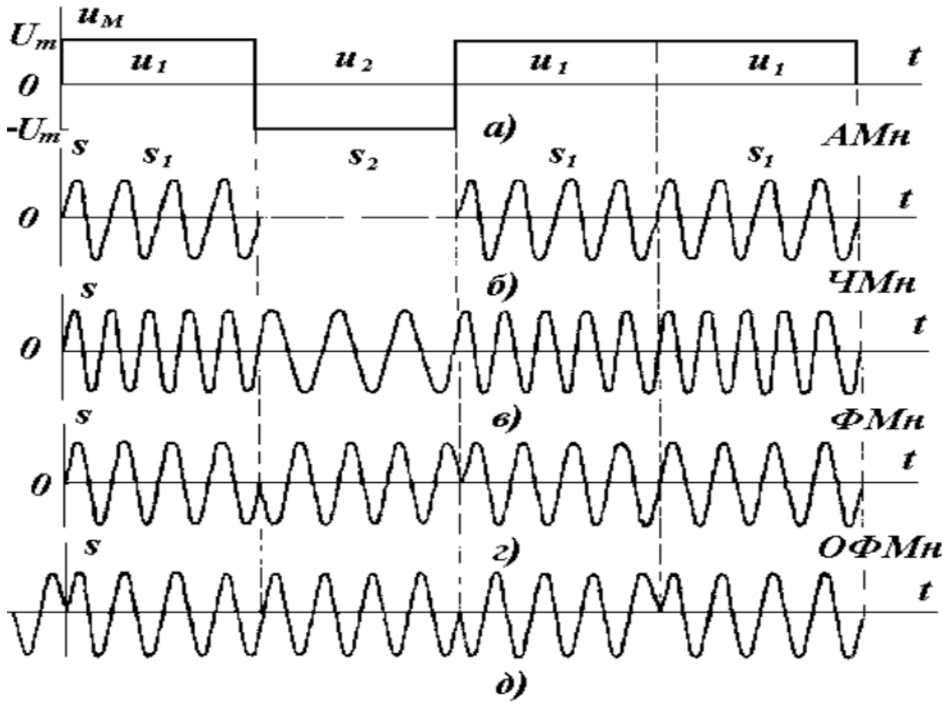


Рисунок 10 – Временные и спектральные диаграммы модулированных сигналов различных видов дискретной двоичной модуляции

Управляя с помощью первичного сигнала параметрами гармонической несущей, можно получить соответственно амплитудную (АМн), частотную (ЧМн) и фазовую (ФМн) манипуляции.

При двоичном коде первичный сигнал принимает два значения – $u_м(t)=U_m$ и $u_2=-U_m$, , которые соответствуют символам вторичного алфавита 1 и 0.

Модулированный сигнал при этом также будет принимать два значения – $s_1(t)$ и $s_2(t)$. На рисунке 10 приведены временные диаграммы различных видов модуляции. При АМн (рисунок 10, б) первичному сигналу $u_1(t)$ соответствует передача несущего колебания в течение t и (посылка), сигналу $u_2(t)$ – отсутствие колебания (пауза), поэтому часто АМн называют манипуляцией с пассивной паузой. При ЧМн (рисунок 10, в) несущее колебание с частотой $w_1 = w_0 + \vartriangle w_Д$ соответствует сигналу $u_1(t)$, а колебание с частотой $w(t) = w_0 + \vartriangle w_Д$ – сигналу $u_2(t)$. Обычно разнос частот $(w_2 - w_1)$ выбирают таким, чтобы спектры сигналов $s_1(t)$ и $s_2(2)$ мало перекрывались. При ФМн (рисунок 10, г) девиация фазы $\Delta\varphi_Д$ выбрана равной $\pi/2$, так как при этом обеспечивается наибольшее различие между сигналами $s_1(t)$ и $s_2(2)$, которые являются противоположными. В связи с этим при ФМн фаза несущей меняется на 180° при каждом переходе от $u_1(t)$ и $u_2(t)$ и наоборот.

В настоящее время наряду с ФМн широко применяется относительная фазовая модуляция (ОФМн, (рисунок 10, д)). Фаза несущего колебания в ОФМн изменяется на 180° при передаче символов 1 (сигнал u_1) и остается неизменной при передаче символов 0 (сигнал u_2) .

Рассмотрим модуляцию дискретным сигналом в математическом приложении MathCAD – пример № 3.

Пример № 3. Рассмотрим амплитудную, фазовую и частотную модуляцию дискретного сигнала [1].

Дано:

Модулирующий сигнал: $u(t) := \left[(t<4)+(t>8)\cdot(t<13)\right]\cdot 2-1$

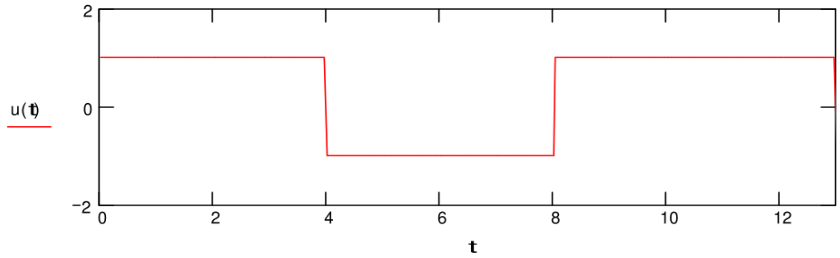


Рисунок 11 – Модулирующий сигнал, описываемый выражением:
$u(t) := \left[(t<4)+(t>8)\cdot(t<13)\right]\cdot 2-1$

Аналитические выражения: $S_{АМн}(t) = A_0\left(1+M_2 u(t)\right)\cos\left(w_0 t+\psi_0\right)$

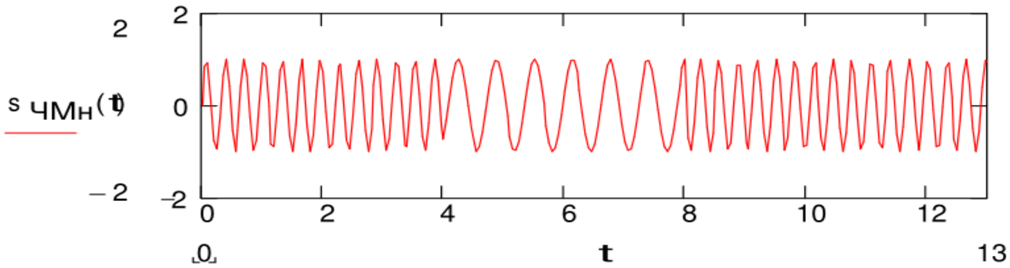
$$S_{ЧМн}(t) = \left[A_0\cos\left(5+u(t)w_0\right)t+3/2\psi_0\right]$$

$$S_{ФМн}(t) = A_0\left[0,315w_0 t+3/2\psi_0 u(t)\right]$$

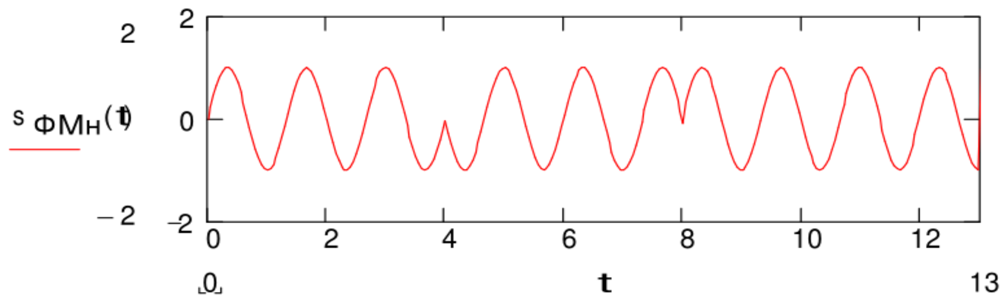
$$S_{ОФМн}(t) = A_0\cos\left[0.315w_0 t-5/2\psi_0 u(t)\right]$$

Решение:

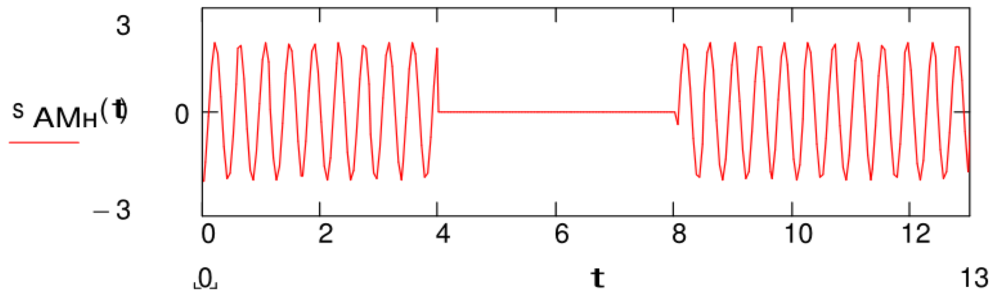
Соответствующие временные диаграммы:



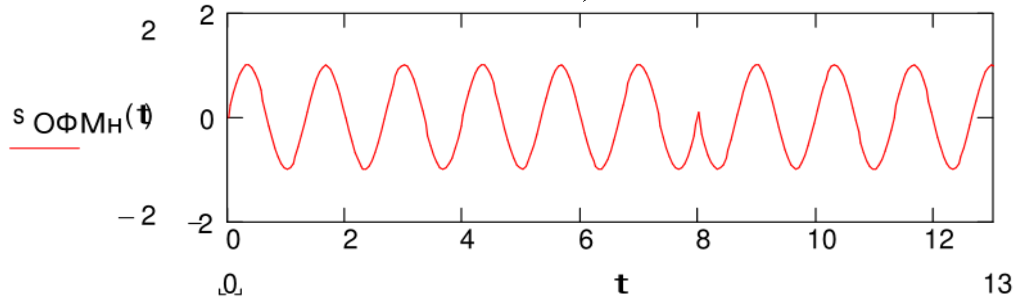
а)



б)



в)



г)

Рисунок 12 – Временные диаграммы сигналов: а – ЧМ сигнал, б – ФМ сигнал, в – АМ сигнал, г – ОФМ сигнал

3 Задание на лабораторную работу

1) Рассмотреть при многотональном модулирующем сигнале, содержащем три или более гармоник разной частоты:

а) амплитудную модуляцию;

б) фазовую модуляцию;

в) частотную модуляцию.

2) Рассмотреть при дискретном модулирующем сигнале, содержащем три импульса различной длины:

а) амплитудную манипуляцию;

б) фазовую манипуляцию;

в) частотную манипуляцию;

г) относительную фазовую манипуляцию.

3) Рассмотреть разложение в ряд Фурье:

а) АМ сигнал при однотональном модулирующем сигнале;
б) АМ сигнал при дискретном модулирующем сигнале;
в) ФМ сигнал при однотональном модулирующем сигнале;
г) ЧМ сигнал при однотональном модулирующем сигнале.

4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение модуляции сигнала.
2. Изобразите модулирующий сигнал при амплитудной модуляции.
3. Что такое фазовая и частотная модуляции гармонического несущего сигнала?
4. Дайте определение перемодуляции сигнала?
5. Запишите аналитические выражения моделирующего сигнала.