

Лекция 7. Сигналы с угловой модуляцией (УМ)

В несущем колебании $V = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$ можно изменять не только амплитуду, а также либо частоту ω , либо фазу φ , оставляя амплитуду постоянной. Поскольку аргумент $\psi = \omega t + \varphi$ является полной фазой и определяет текущее значение фазового угла, такие сигналы получили название сигналов с угловой модуляцией.

Фазовая модуляция (ФМ)

Если полная фаза процесса $\Psi(t) = \omega_0 t + kX(t)$,

где $X(t)$ – сообщение, k – коэффициент пропорциональности, ω_0 – значение частоты в отсутствии сообщения $X(t)$, то имеем сигнал с фазовой модуляцией:

$$V_{\phi i}(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + kX(t)]. \quad (4.11)$$

Если сообщение $X(t) = \text{const}$, то ФМ сигнал является простым высокочастотным сигналом.

Если $X(t) = A \cos(\Omega t)$, то с увеличением значений сообщения $X(t)$ полная фаза $\psi(t)$ растет во времени быстрее, чем по линейному закону. При уменьшении значений модулирующего сообщения происходит спад скорости роста $\psi(t)$ во времени в соответствии с рис. 4.10.

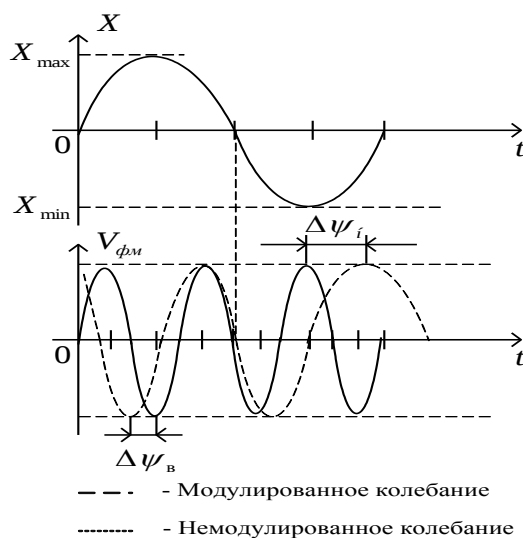


Рис. 4.10. Фазовая модуляция

В моменты времени, когда сигнал $X(t)$ достигает экстремальных значений, абсолютный угол между ФМ сигналом и немодулированным гармоническим

колебанием оказывается наибольшим. Предельное значение этого фазового сдвига называют девиацией фазы $\Delta\psi$. В общем случае, когда сообщение $X(t)$ изменяет знак, принято различать девиацию фазы вверх $\Delta\psi_d = kX_{\max}$ и девиацию фазы вниз $\Delta\psi_i = kX_{\min}$.

Частотная модуляция (ЧМ)

Мгновенная частота $\omega(t)$ сигнала с угловой модуляцией определяется как первая производная от полной фазы по времени, т.е. мгновенная частота – это скорость изменения полной фазы:

$$\omega(t) = \frac{d\psi}{dt} - \text{мгновенная частота.} \quad (4.12)$$

Откуда, полная фаза равна:

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \varphi_0, \quad (4.13)$$

где φ_0 – начальная фаза в момент времени $t=0$.

При ЧМ - сигнале между сообщением $X(t)$ и мгновенной частотой $\omega(t)$ будет связь вида:

$$\omega(t) = \omega_0 + kX(t). \quad (4.14)$$

Поэтому из (4.13) и (4.14)

$$V_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos \psi(t) = U_0 \cos \left[\int_0^t \omega(\tau) d\tau + \varphi_0 \right],$$

$$V_{\text{ЧМ}}(t) = U_0 \cos \left[\omega_0 t + k \int_0^t X(\tau) d\tau + \varphi_0 \right]. \quad (4.15)$$

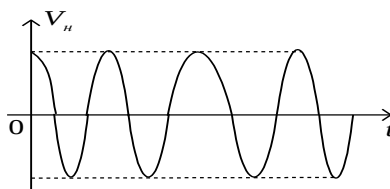


Рис. 4.11. Частотно-модулированный сигнал

График частотно-модулированного сигнала представлен на рис. 4.11.

В соответствии с (4.14) параметрами ЧМ сигнала являются девиация частоты вверх $\Delta\omega_a = kX_{\max}$ и девиация частоты вниз $\Delta\omega_i = kX_{\min}$.

Если $X(t)$ - достаточно гладкая функция, то внешне осциллограммы ФМ и ЧМ - сигналов не отличаются. Однако имеет место принципиальная разница: фазовый сдвиг между ФМ сигналом и немодулированным пропорционален $X(t)$, для ЧМ этот сдвиг пропорционален интегралу от $X(t)$ (сравните (4.11) и (4.15)). Т.е. ЧМ- и ФМ сигналы ведут себя по-разному при изменении частоты модуляции и амплитуды модулирующего колебания.

При ЧМ девиация частоты $\Delta\omega \sim a$ (амплитуде НЧ сигнала), в то же время девиация частоты $\Delta\omega$ не зависит от частоты Ω модулирующего сигнала. Зависимость девиации частоты $\Delta\omega$ для ЧМ- и ФМ сигналов от Ω представлена на рис. 4.11 и 4.12.

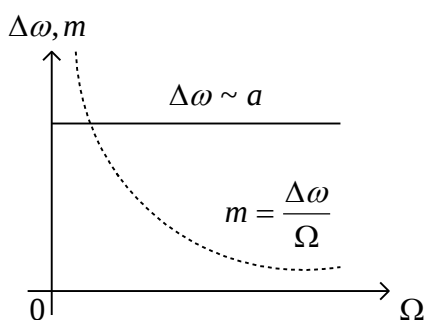


рис. 4.11. Зависимость девиации частоты $\Delta\omega$ от Ω для ЧМ сигналов

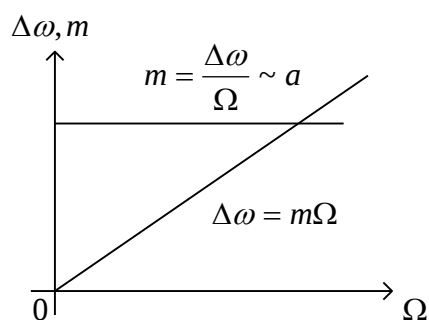


Рис. 4.12. Зависимость девиации частоты $\Delta\omega$ от Ω для ФМ сигналов

При ФМ индекс модуляции $m = \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sim a$ - амплитуде НЧ сигнала независимо от частоты модуляции. Как следствие этого, девиация частоты при фазовой модуляции линейно увеличивается с ростом частоты модулирующего сигнала.

Таким образом, при гармоническом модулирующем сигнале различие между ЧМ и ФМ можно выявить, только изменяя частоту модуляции.

Спектральное разложение ЧМ и ФМ сигналов при малых индексах модуляции

Если колебание $V(t) = U_0 \cos[\omega t + \varphi(t)]$ (4.16)

получено с помощью ФМ, то $\varphi(t)$ и $X(t)$ полностью совпадают по форме и отличаются лишь постоянными коэффициентами. При этом очевидно, с точностью до постоянного коэффициента совпадают спектры функций $\varphi(t)$ и $X(t)$. При ЧМ функция $\varphi(t)$ является интегралом от передаваемого сообщения $X(t)$. Так как интегрирование является линейным преобразованием, то при ЧМ спектр функции $\varphi(t)$ состоит из тех же компонент, что и спектр сообщения $X(t)$, но с измененными амплитудами и фазами.

Отвлекаясь от способа осуществления угловой модуляции и считая заданным спектр функции $\varphi(t)$, находим спектр модулированного колебания $V(t)$. Для этого выражение (4.16) преобразуем к виду:

$$V(t) = U_0 \cos \varphi(t) \cos \omega_0 t - U_0 \sin \varphi(t) \sin \omega_0 t = u_c(t) - u_s(t) \quad (4.17)$$

Из этого выражения следует, что модулированное по углу колебание можно рассматривать как сумму двух квадратурных колебаний: косинусного u_c и синусного u_s , каждое из которых модулировано только по амплитуде. Закон АМ для косинусного колебания определяется медленной функцией $\cos \varphi(t)$, для синусного — функцией $\sin \varphi(t)$. Но для определения спектра АМ колебания достаточно сдвинуть на частоту ω_0 спектр огибающей амплитуд. Следовательно, для нахождения спектра колебания $u(t)$, определяемого выражением (4.17), необходимо найти сначала спектры функций $\cos \varphi(t)$ и $\sin \varphi(t)$, т.е. спектры огибающих квадратурных колебаний.

Из приведенных рассуждений следует, что при одном и том же передаваемом сообщении спектр колебания, модулированного по углу, значительно сложнее, чем спектр модулированного по амплитуде. Действительно, так как $\cos \varphi(t)$ и $\sin \varphi(t)$ являются нелинейными функциями своего аргумента $\varphi(t)$, то спектры этих колебаний могут существенно отличаться от спектра функции $\varphi(t)$.

Это обстоятельство, а также наличие двух квадратурных слагаемых, показывает, что при угловой модуляции спектр модулированного колебания нельзя получить простым сдвигом спектра колебания на величину несущей частоты ω_0 , как это имеет место при АМ.

Задачу о представлении сигналов с угловой модуляцией посредством суммы гармонических колебаний несложно решить в том случае, когда $m \ll 1$. Для тонально-модулированного колебания $V(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$, т.к. $\varphi(t) = m \sin(\Omega t)$, имеем $V(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + m \sin(\Omega t)]$.

Для этого преобразуем эту формулу следующим образом:

$$V(t) = U_0 \cos(m \sin \Omega t) \cos \omega_0 t - U_0 \sin(m \sin \Omega t) \sin \omega_0 t, \text{ т.к. } m \ll 1, \quad \text{то}$$

$$\cos(m \sin \Omega t) \approx 1, \quad \sin(m \sin \Omega t) \approx m \sin \Omega t.$$

Отсюда $V(t) \approx U_0 \cos \omega_0 t - U_0 m \sin \Omega t \cdot \sin \omega_0 t$, т.е.

$$V(t) \approx U_0 \cos \omega_0 t + \frac{m U_0}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t - \frac{m U_0}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \quad (4.18)$$

Спектр ЧМ сигнала представлен на рис. 4.13.

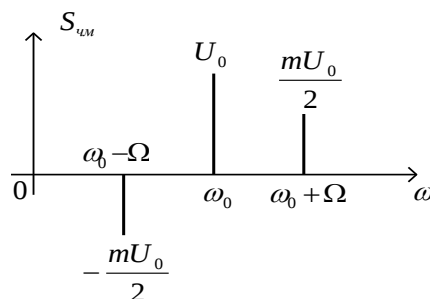


Рис. 4.13. Спектр узкополосного ЧМ сигнала

Таким образом, при $m \ll 1$ в спектре сигнала с угловой модуляцией содержатся несущая и верхняя и нижняя боковые. Индекс m играет здесь такую же роль как и в АМ сигнале. Однако составляющая спектра нижних боковых частот имеет сдвиг по фазе 180° .

При увеличении фазового отклонения, т.е. при возрастании индекса m , уравнение (4.18) и спектр не дают правильного представления о действительной картине явлений при ЧМ и ФМ. Это объясняется тем, что с помощью колебаний несущей частоты и всего лишь одной пары боковых частот невозможно представить

колебание, частота которого или фаза изменяется в широких пределах, а амплитуда остается строго постоянной. Для получения правильной картины необходимо учитывать боковые частоты высших порядков.

Спектр сигнала с угловой модуляцией при произвольном значении индекса модуляции

Итак, при тональной угловой модуляции

$$U(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t) = U_0 \operatorname{Re}(e^{j\omega_0 t} \cdot e^{jm \sin \Omega t}). \quad (4.18)$$

В теории бесселевых функций доказывается, что экспонента $\exp\{+jm \sin Z\}$, периодическая на отрезке $-\pi \leq Z \leq \pi$ разлагается в периодический ряд Фурье

$$e^{jm \sin Z} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) e^{jkZ}, \quad (4.19)$$

где m – любое вещественное число, $J_k(m)$ – функция Бесселя k – порядка от аргумента m (рис. 4.14).

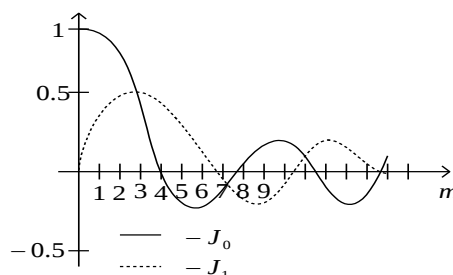


Рис. 4.14. Разложение функции $\exp\{+jm \sin Z\}$ в ряд Фурье при различном порядке k

Мгновенная фаза модулированного колебания $\psi(t) = \omega_0 t + \Delta\omega a \frac{t^2}{2}$ и мгновенная частота $\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \omega_0 + \Delta\omega a t$, т.е. растёт по линейному закону (рисунок. 4.16в).

Сравнивая соотношения (4.18) и (4.19) и подставляя $Z = \Omega t$, перепишем (4.18) так:

$$U(t) = U_0 \operatorname{Re}(e^{j\omega_0 t} e^{jm \sin \Omega t}) = U_0 \operatorname{Re}\left(e^{j\omega_0 t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) e^{jk\Omega t}\right) \quad (4.20)$$

Отсюда получаем следующую модель ЧМ-ФМ сигнала с любым значением индекса модуляции

$$U(t) = U_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(m) \cos(\omega_0 + k\Omega)t \quad (4.21)$$

Напомним, что при $m \ll 1$ ширина спектра ЧМ как и у АМ равна 2Ω . При значении m в пределах от 0,5 до 1 приобретает некоторое значение вторая пара боковых частот, ввиду чего ширина спектра приблизительно равна 4Ω . Далее при $1 < m < 2$ приходится учитывать третью и четвертую пары боковых частот и т.д. На рисунке 4.15 показаны спектры ЧМ сигнала при различных m .

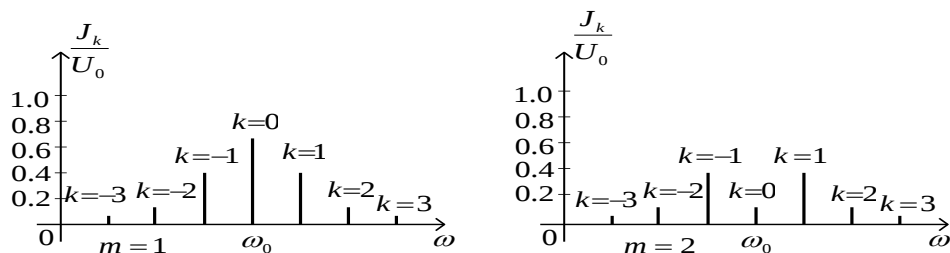


Рис. 4.15. Спектры ЧМ сигнала при различных индексах m

Фазы колебаний на этих рисунках не учитываются, однако следует иметь в виду что, при нечетных k , амплитуды нижних боковых следует брать со знаком минус. Дело в том, что в теории бесселевых функций доказано, что функции с положительными и отрицательными индексами

$J_{-k}(m) = (-1)^k J_k(m)$, поэтому начальные фазы боковых колебаний с частотами $\omega_0 + k\Omega$ и $\omega_0 - k\Omega$ совпадают, если k - четное, и отличаются на 180° , если k - нечетное. Чем больше индекс k функции Бесселя, тем протяженнее область аргументов, при которых эта функция мала. Важно отметить, что с ростом индекса модуляции m расширяется полоса частот, занимаемая сигналом. Обычно полагают, что допустимо пренебречь всеми спектральными составляющими с номером $k > m+1$. Отсюда следует оценка практической ширины спектра с угловой модуляцией $P_{np} = 2k\Omega$ или $P_{np} = 2(m+1)\Omega$.

Как видно, реальные ЧМ и ФМ сигналы характеризуются условием $m \gg 1$, поэтому они называются широкополосными. Итак, $P_{np} \approx 2m\Omega = 2\Delta\omega$.

Таким образом, сигнал с угловой модуляцией занимает полосу, приблизительно равную удвоенной девиации частоты несущей.

Отметим, что для передачи АМ сигнала требуется полоса в m раз меньшая. Большая полоса, занимаемая ЧМ и ФМ, обусловила их большую

помехозащищенность, однако в целях радиосвязи их применение целесообразно в диапазоне УКВ (метровых и более коротких волн).

Вопрос: Возможно ли отсутствие в спектре ЧМ несущего колебания на частоте ω_0 ? Ответ: да, так как при перераспределении мощность V_m по частотным составляющим в соответствии с $J_n(m)$ может быть $J_0(m)=0$.

Практическое занятие

Пример 1. Модулирующий сигнал имеет вид $f(t)=at, a>0, f(t)<1$. Составить выражения для модулированных сигналов при АМ, ЧМ, ФМ и построить их графики, полагая $\varphi_0=0$. В случае АМ $U_{\text{AM}}(t)=U_0[1+m \cdot a \cdot t] \cos \omega_0 t$, где $m=\frac{\Delta U}{U_0}$.

Огибающая (амплитуда) модулированного колебания возрастает также линейно: $U_m(t)=U_0+maU_0t$ (рис. 4.16 б).

$$\text{При ЧМ } V_{\text{ЧМ}}(t)=U_0 \cos \left[\omega_0 t + \Delta \omega \int_0^t a \tau d\tau + \varphi_0 \right] = U_0 \cos \left(\omega_0 t + \Delta \omega a \frac{t^2}{2} \right).$$

Мгновенная фаза модулированного колебания $\psi(t)=\omega_0 t + \Delta \omega a \frac{t^2}{2}$ и мгновенная частота $\omega(t)=\frac{d\psi(t)}{dt}=\omega_0 + \Delta \omega a t$, т.е. растёт по линейному закону (рис. 4.16 в).

Для случая ФМ $V(t)=U_0 \cos[\omega_0 t + \Delta \varphi a t]$,

мгновенная фаза $\psi(t)=\omega_0 t + \Delta \varphi a t$ и мгновенная частота:

$$\omega(t)=\frac{d\psi(t)}{dt}=\omega_0 + \Delta \varphi a = \omega_1 = \text{const},$$

т.е. в момент начала модуляции частота изменилась на величину $\Delta \varphi a$, а далее остаётся постоянной и равной $\omega_1 = \omega_0 + \Delta \varphi a$ (рис. 4.16 г). Однако изменение фазы все равно приводит к изменению периода несущей.

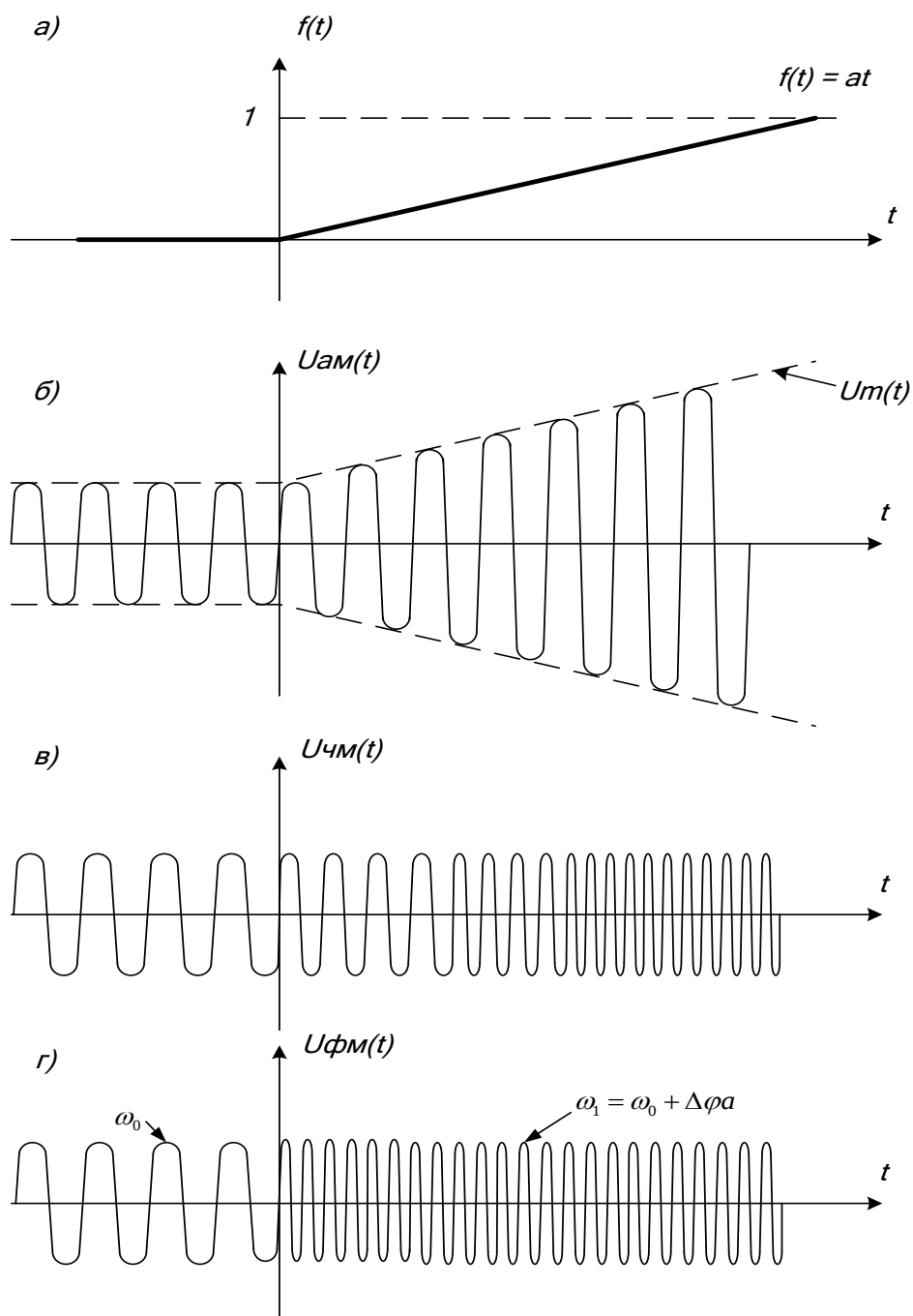


Рис. 4.16. Сигналы АМ (б), ЧМ (в) и ФМ (г) для модулирующего сигнала $f(t) = at$ (а).

Пример 2. Спектр сигнала содержит составляющие с частотами: 50 кГц (амплитуда-1в), 55 кГц (2в), 60 кГц (5в), 65 кГц (2в) и 70 кГц (1в). Определить парциальные коэффициенты модуляции, а также значения модулирующих частот.

Из условия задачи понятно, что спектр содержит центральную (несущую) 60 кГц и две пары боковых частот, отстоящих от несущей на $F_1 = 60 - 55 = 5$ кГц и на $F_2 = 60 -$

50=10 кГц. Эти частоты и являются модулирующими. Соответствующие им парциальные (частичные) коэффициенты модуляции вычисляются так:

$$m_1 = \frac{U_{\delta 1}}{U_0} = \frac{2 \square 2}{5} = 0.8 \quad m_2 = \frac{U_{\delta 2}}{U_0} = \frac{2 \square 1}{5} = 0.4.$$

Пример 3. Сигнал амплитудной модуляции на периоде T_M модулирующего сообщения имеет следующий вид:

$$U_{AM}(t) = \sqrt{6} \left(1 - \left| \frac{2t}{T_M} \right| \right) \cos 2\pi 10^4 t, \quad t \in [-0.5T_M, +0.5T_M].$$

Определить амплитуду и частоту переносчика, а также среднюю мощность АМ сигнала, если $T_M = 10^{-3}$ сек.

Можно заметить, что на периоде T_M закон изменения амплитуды АМ сигнала имеет вид $U_M(t) = \sqrt{6} \left(1 - \left| \frac{2t}{T_M} \right| \right)$. Он симметричен относительно оси ординат: при $t=0$

$U_M(t) = \sqrt{6}$, при $t = \pm \frac{T_M}{2}$ $U_M(t) = 0$. Отсюда $U_M = \frac{\sqrt{6}}{2}$. Частота переносчика 10^4 Гц.

Средняя мощность сигнала

$$P_{AM} = \frac{1}{T_M} \int_{-T_M/2}^{+T_M/2} U_{AM}^2(t) dt = \frac{2}{T_M} \int_0^{+T_M/2} 6 \left(1 - \frac{2t}{T_M}\right)^2 \cos^2 \omega_0 t dt = 1 + \frac{6}{\omega_0^2 T_M^2} \left(1 - \frac{\sin \omega_0 T_M}{\omega_0 T_M}\right).$$

$\omega_0 T_M = 20\pi$, то окончательно получим $P_{AM} = 1 + \frac{3}{200\pi^2} (\epsilon^2)$.

Пример 4. Модулирующее сообщение имеет вид $f(t) = 10 \sin 2\pi 10^4 t$, а переносчик $U_N(t) = 50 \cos 2\pi 10^5 t$. Полагая $m_{\phi M} = 1$ рад, рассчитать амплитудный спектр сигнала ФМ, определить его ширину спектра.

Параметры исходных колебаний соответственно равны $U_M = 10$ В, $\Omega = 2\pi F$, $F = 10$ кГц, $U_N = 50$ В, $f_0 = 100$ кГц, $\phi_0 = 0$. Закон изменения начальной фазы ФМ сигнала $\phi(t) = \sin \Omega t$ с индексом модуляции $m_{\phi M} = 1$ рад. Разлагая тригонометрические функции в степенной ряд, имеем:

$$c_{\phi M}(t) = \cos[m_{\phi M} \sin \Omega t] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} m_{\phi M}^{2n} \sin^{2n} \Omega t,$$

$$s_{\phi M}(t) = \sin[m_{\phi M} \sin \Omega t] = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)!} m_{\phi M}^{2n} \sin^{2n-1} \Omega t.$$

Используем формулы кратного аргумента:

$$\sin^{2n} \Omega t = \frac{1}{2^{2n}} \binom{2n}{n} + \frac{2}{2^{2n}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n-l} \binom{2n}{l} \cos 2(n-l) \Omega t$$

$$\sin^{2n-1} \Omega t = \frac{2}{2^{2n-1}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+l-1} \binom{2n-1}{l} \cos(2n-2l-1) \Omega t.$$

После подстановки $k=n-l$ получаем

$$c_{\phi M}(t) = J_0(m_{\phi M}) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(m_{\phi M}) \cos 2k \Omega t, \quad s_{\phi M}(t) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k-1}(m_{\phi M}) \sin(2k-1) \Omega t,$$

где $J_p(m)$ -функции Бесселя первого рода p -го порядка аргумента m , соответственно равные

$$J_0(m) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} \left(\frac{m}{2}\right)^{2n} \binom{2n}{n}, \quad p=0,$$

$$J_{2k}(m) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{n-k=0}^{n-1} \frac{(-1)^{n+k}}{(2n)!} \left(\frac{m}{2}\right)^{2n} \binom{2n}{n-k}, \quad p=2k \text{ (чет)}, \quad J_{2k-1}(m) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{n-k=0}^{n-1} \frac{(-1)^{3n-k-2}}{(2n-1)!} \left(\frac{m}{2}\right)^{2n-1} \binom{2n-1}{n-k},$$

$p=2k-1$ (нечет).

При $m=1$ имеем: $J_0(0)=0,76$, $J_1(1)=0,44$, $J_2(1)=0,12$, $J_3(1)=0,03\dots$, т. е. функции Бесселя быстро убывают. Подставляя найденные значения в функции $c_{\phi M}(t)$ и $s_{\phi M}(t)$, получаем:

$$c_{\phi M}(t) = 0,76 + 0,24 \cos 2 \Omega t = 0,76 + 0,24 \cos 2 \pi 10^4 t,$$

$$s_{\phi M}(t) = 0,88 \sin \Omega t + 0,06 \sin 3 \Omega t = 0,88 \sin 2 \pi 10^4 t + 0,06 \sin 6 \pi 10^4 t.$$

Спектральные плотности комплексных амплитуд этих сигналов:

$$S_c(j\omega) = J_0(1)\delta(\omega) + J_2(1)[\delta(\omega-2\Omega) + \delta(\omega+2\Omega)],$$

$$S_s(j\omega) = -jJ_1(1)[\delta(\omega-\Omega) - \delta(\omega+\Omega)] - jJ_3(1)[\delta(\omega-3\Omega) - \delta(\omega+3\Omega)].$$

Смещая эти спектры по оси частот на величину ω_0 и подставляя их в выражение для спектра тональной угловой модуляции, окончательно имеем:

$$S_{\phi_M}(j\omega) = \frac{U_m}{2} \left\{ -J_3(1)\delta[\omega - (\omega_0 - 3\Omega)] + J_2(1)[\omega - (\omega_0 - 2\Omega)] - J_1(1)\delta[\omega - (\omega_0 - \Omega)] + \right. \\ \left. J_0(1)\delta(\omega) + J_1(1)\delta[\omega - (\omega_0 + \Omega)] + J_2(1)\delta[\omega - (\omega_0 + 2\Omega)] + J_3(1)\delta[\omega - (\omega_0 + 3\Omega)] \right\}$$

Отсюда получаем искомый спектр амплитуд:

$$f_1 = f_0 - 3F = 70 \text{ кГц}, U_1 = 0,5U_m J_3(1) = 0,75 \text{ В}, f_2 = f_0 - 2F = 80 \text{ кГц}, U_2 = 0,5U_m J_2(1) = 3,0 \text{ В},$$

$$f_3 = f_0 - F = 90 \text{ кГц}, U_3 = 0,5U_m J_1(1) = 11,0 \text{ В},$$

$$f_4 = f_0 = 100 \text{ кГц}, U_4 = 0,5U_m J_0(1) = 19,0 \text{ В},$$

$$f_5 = f + F = 110 \text{ кГц}, U_5 = U_3, f_6 = f + 2F = 120 \text{ кГц}, U_6 = U_2, f_7 = f + 3F = 130 \text{ кГц}, U_7 = U_1.$$

Ширина спектра сигнала ФМ равна $\Delta f_m = f_{\max} - f_{\min} = (130 - 70) \text{ кГц} = 60 \text{ кГц}$.

Пример 5. Определить спектр и амплитуды составляющих ФМ сигнала

$i_{\phi_M}(t) = 20 \cos(2\pi \cdot 10^5 t + 0,3 \sin 2\pi \cdot 10^3 t)$. Сравнить результат со спектром и амплитудами составляющих АМ сигнала с таким же индексом модуляции $m = 0,3$.

По таблицам бесселевых функций находим $J_0(0,3) = 0,978$ и $J_1(0,3) = 0,148$. Так как

$J_{k+1}(m_{\phi_M}) = \frac{2k}{m} J_k(m_{\phi_M}) - J_{k-1}(m_{\phi_M})$, то можно найти величину $J_2(m_{\phi_M})$. Находим

$J_2(0,3) \leq 0,01$. Поэтому $i_{\phi_M}(t) = (19,56 \cos 2\pi \cdot 10^5 t + 2,96 \cos 2\pi \cdot 1,01 \cdot 10^5 t - 2,96 \cos 2\pi \cdot 0,99 \cdot 10^5 t)$, мА.

Ток АМ сигнала с тем же индексом равен:

$i_{AM}(t) = 20(1 + 0,3 \cos 2\pi \cdot 10^3 t) \cos 2\pi \cdot 10^5 t = 20 \cos 2\pi \cdot 10^5 t + 0,3 \cos 2\pi \cdot 1,01 \cdot 10^5 t + 0,3 \cos 2\pi \cdot 0,99 \cdot 10^5 t$, мА.