

Лекция № 8. Манипуляция сигналов

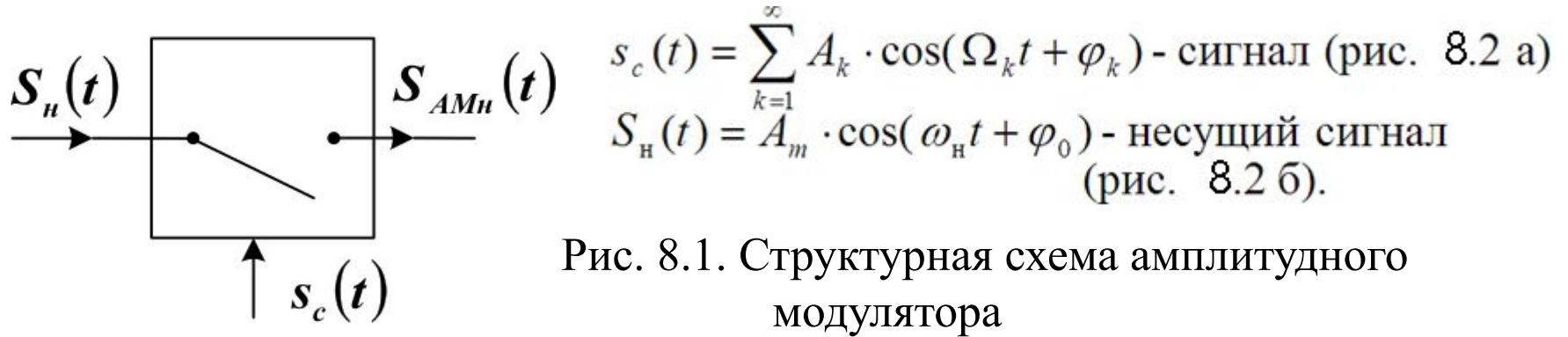
При дискретном изменении управляющего колебания модулируемые параметры несущей будут изменяться скачком. В этом случае вместо термина «модуляция» применяется термин «манипуляция», а само колебание называется манипулированным. В частности манипуляция – это модуляция несущего колебания посылками постоянного тока прямоугольной формы.

Дискретное манипулирующее колебание может иметь вид униполярных или биполярных прямоугольных импульсов. Для описания двух возможных состояний широко используются термины «посылка» и «пауза». Эти состояния обозначают обычно символами +1 и -1 или 1 и 0.

8.1. Временные и спектральные характеристики амплитудно-манипулированных сигналов

Амплитудной манипуляцией (АМн) называется процесс изменения амплитуды несущего (высокочастотного, манипулируемого) колебания в соответствии с законом изменения амплитуды дискретного информационного (первичного электрического, манипулирующего) сигнала.

Структурную схему получения АМн сигнала можно представить как ключ, управляемый первичным сигналом $s_c(t)$, на вход которого поступает несущий сигнал $S_H(t)$ (рис. 8.1). При этом первичный сигнал можно представить в виде отрезка ряда Фурье:



Амплитудно-манипулированный сигнал имеет вид последовательности радиоимпульсов с прямоугольной огибающей (рис. 8.2 в). Единичные элементы с длительностью интервалов $\tau_{И}$, соответствующих символам кодовой комбинации (1 и 0 или +1 и -1), преобразуются к виду:

$$S_{АМн}(t) = \frac{1}{2} A_m \cdot [1 + x_c(t)] \cdot \cos(\omega_H t + \varphi_0), \quad (8.1)$$

где $x_c(t)$ – нормированная функция, повторяющая закон изменения $s_c(t)$ (рис. 8.2 а) и принимающая значения ± 1 .

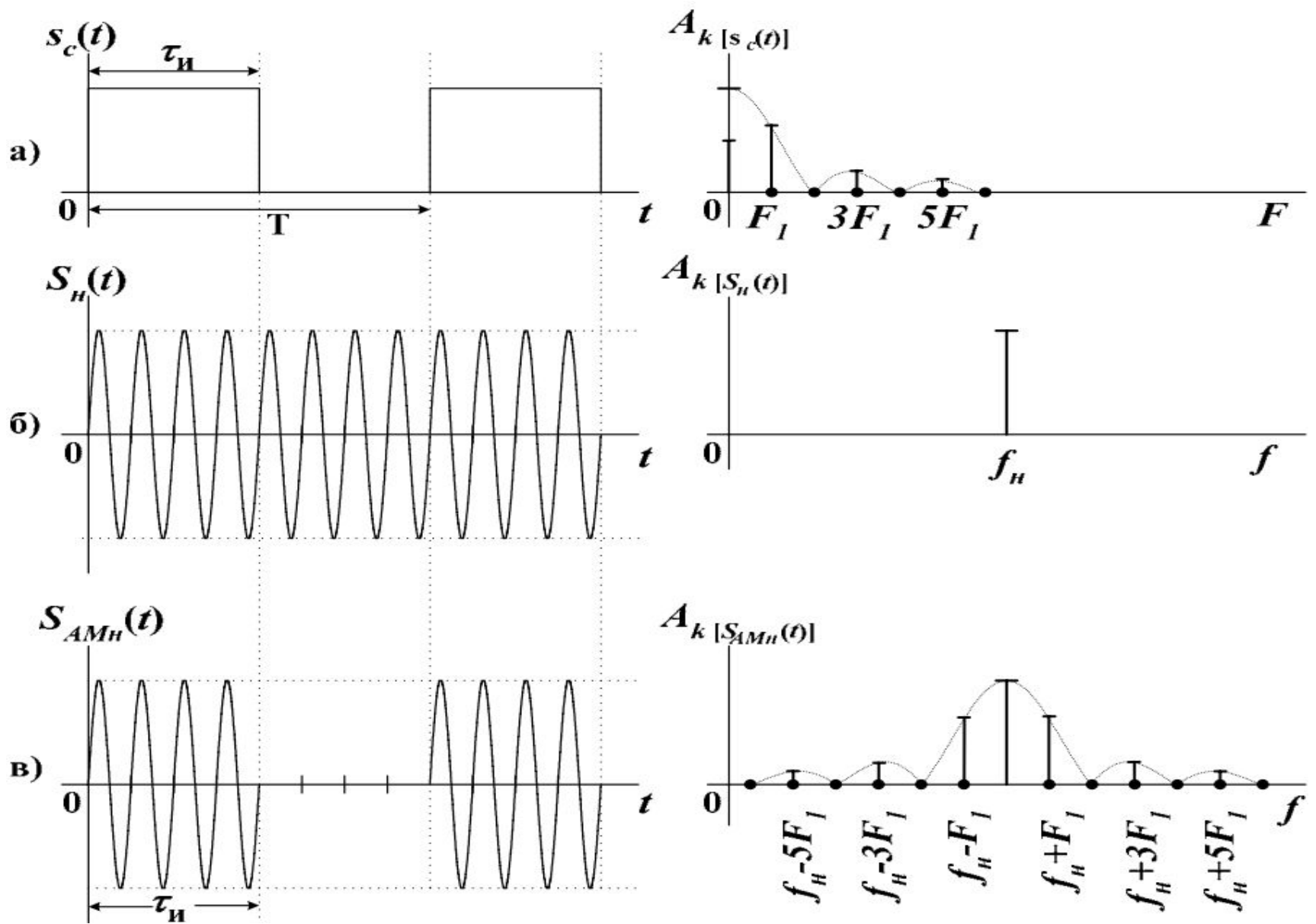


Рис. 8.2. Временные и спектральные характеристики формирования АМн сигнала

Спектральный состав периодической последовательности АМн сигналов определяется следующим выражением:

$$S_{\text{АМн}}(t) = \frac{A_m \cdot \tau_{\text{и}}}{T} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(k2\pi F_1 t) \right] \cdot \cos(2\pi f_{\text{н}} t) = \frac{A_m \cdot \tau_{\text{и}}}{T} \cdot \cos(2\pi f_{\text{н}} t) + \quad (8.2)$$

$$+ \frac{A_m \cdot \tau}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_{\text{и}})}{k\pi F_1 \tau_{\text{и}}} \right| \times [\cos(f_{\text{н}} + kF_1)2\pi t + \cos(f_{\text{н}} - kF_1)2\pi t].$$

Спектр модулированного сигнала содержит в своем составе: составляющую с амплитудой $A_m \cdot \tau_{\text{и}}/T$ на несущей частоте $f_{\text{н}}$ и две симметричные боковые полосы с частотами составляющих $(f_{\text{н}} + kF_1)$, $(f_{\text{н}} - kF_1)$ и амплитудами $\frac{A_m \cdot \tau}{T} \cdot \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_{\text{и}})}{k\pi F_1 \tau_{\text{и}}}$.

Для периодических сигналов – спектр дискретный, а при случайном следовании кодовых символов (непериодических сигналов) – спектр становится сплошным.

Ширина спектра АМн колебания: $\Delta F_{\text{АМн}} = 2kF_1$,
 где k – номер учитываемой гармоники;
 $F_1 = 1/T$ – частота первой гармоники информационного сигнала.

В реальных каналах ширину спектра берут с учетом третьей или пятой гармоники, например при необходимости передать цифровой сигнал со скоростью $V = 50$ Бод, ширина спектра $\Delta F_{\text{АМн}} = 2 \cdot 5 \cdot F_1 = 5 \cdot V = 250$ Гц.

В настоящее время двоичная амплитудная манипуляция используется в низкоскоростных системах передачи информации, в многоканальных системах связи с временным разделением, в радиолокационных системах, а также в ряде оптических систем.

8.2. Временные и спектральные характеристики частотно-манипулированных сигналов

При частотной манипуляции (ЧМн) частота высокочастотного колебания изменяется скачком на величину $\pm \Delta f_m$ относительно несущей f_n (рис. 8.3). Таким образом, на выходе ЧМн вырабатываются колебания на частотах f_1 и f_2 .

Разность частот $f_1 - f_2 = \Delta f_{\text{сдв}}$ называют частотным сдвигом. Максимальное отклонение частоты Δf_m от несущей называют девиацией.

Отношение девиации частоты Δf_m к частоте манипулирующего колебания F называется индексом частотной манипуляции. Индекс ЧМн прямо пропорционален девиации и обратно пропорционален частоте информационного сигнала: $m_{\text{ЧМн}} = \Delta f_m / F$

Различают частотную манипуляцию: с разрывом фазы и без разрыва фазы. Общий вид ЧМн сигнала с разрывом фазы можно представить в виде суммы двух АМн сигналов с разными несущими частотами f_1 и f_2 .

Технически такой вид манипуляции реализуется с помощью двух генераторов (рис. 8.4), которые управляются ключом под воздействием информационного сигнала: $S_{\text{ЧМн}}(t) = S_{1\text{АМн}}(t) + S_{2\text{АМн}}(t)$.

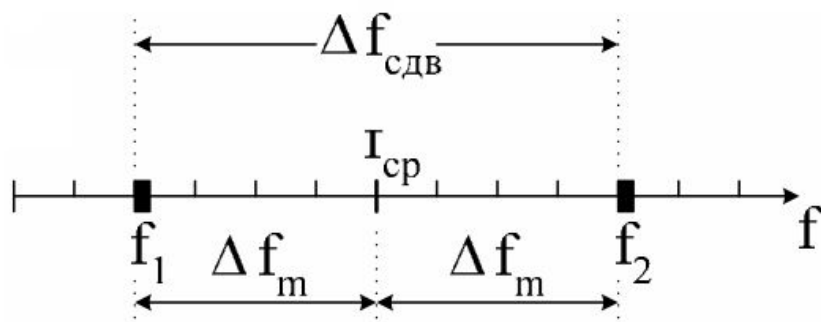


Рис. 8.3. Параметры сигналов ЧМн

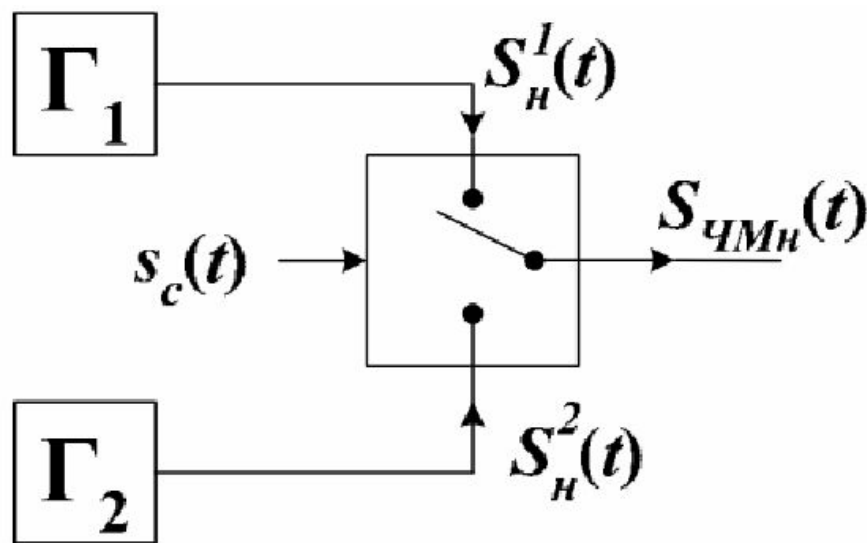


Рис. 8.4. Структурная схема формирования ЧМн колебаний с разрывом фазы

Это представление позволяет спектр колебания $S_{\text{ЧМн}}(t)$ найти как результат наложения двух спектров колебаний АМн, который будет иметь вид:

$$S_{\text{ЧМн}}(t) = \frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \cdot \cos(2\pi f_1 t) + A_m \cdot \left(1 - \frac{\tau_u}{T}\right) \cdot \cos(2\pi f_2 t) + \frac{A_m \cdot \tau_u}{T} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_u)}{k\pi F_1 \tau_u} \times \quad (8.3)$$

$$\times [\cos(f_1 + kF_1)2\pi t + \cos(f_1 - kF_1)2\pi t - \cos(f_2 + kF_1)2\pi t - \cos(f_2 - kF_1)2\pi t].$$

Первое слагаемое определяет составляющую на частоте f_1 , второе - на частоте f_2 . Формирование ЧМн сигнала с разрывом фазы показано на рис. 8.5.

Из рис. 8.5 видно, что ширина спектра ЧМн сигнала отличается от спектра сигнала АМн на величину $2\Delta f_m$:

$$\Delta F_{\text{ЧМн}} = 2kF_1 + 2\Delta f_m,$$

где k – номер учитываемой гармоники.

Например при необходимости передать цифровой сигнал со скоростью $V = 75$ бит/с, $\Delta f_m = 250$ Гц, $k = 3$, ширина спектра $\Delta F_{\text{ЧМн}} = 2 \cdot 3 \cdot (75/2) + 2 \cdot 250 = 725$ Гц.

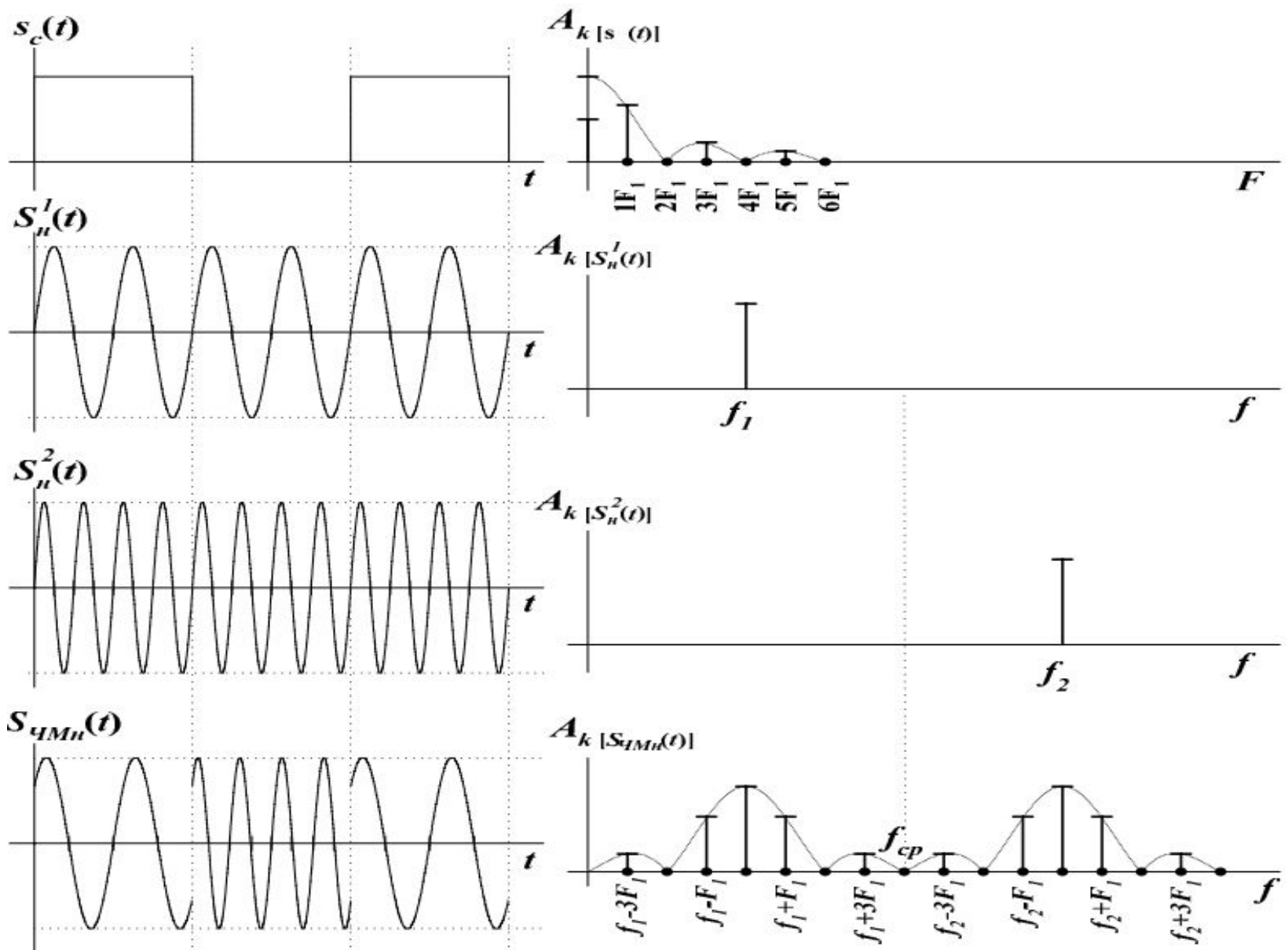


Рис. 8.5. Временные и спектральные характеристики формирования ЧМн сигнала с разрывом фазы

Общий вид ЧМн сигнала без разрыва фазы (рис. 8.6) можно записать в виде: $S_{\text{ЧМн}}(t) = A_m \cos[\omega_n t + \Delta\varphi(t)]$, где $\Delta\varphi(t)$ – приращение фазы, обусловленное приращением частоты $\Delta\omega(t)$.

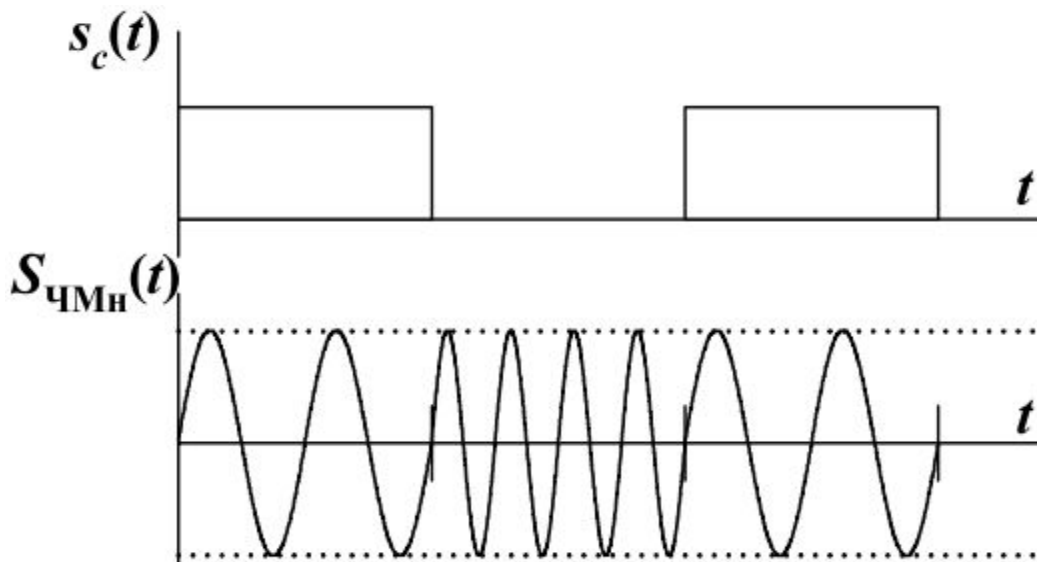


Рис. 8.6. Временные характеристики формирования ЧМн колебаний без разрыва фазы

Этот вид манипуляции предполагает использовать один источник колебаний (рис. 8.7), частота которого изменяется посредством управляемой реактивности (в этом случае фаза изменяется непрерывно – без разрыва).

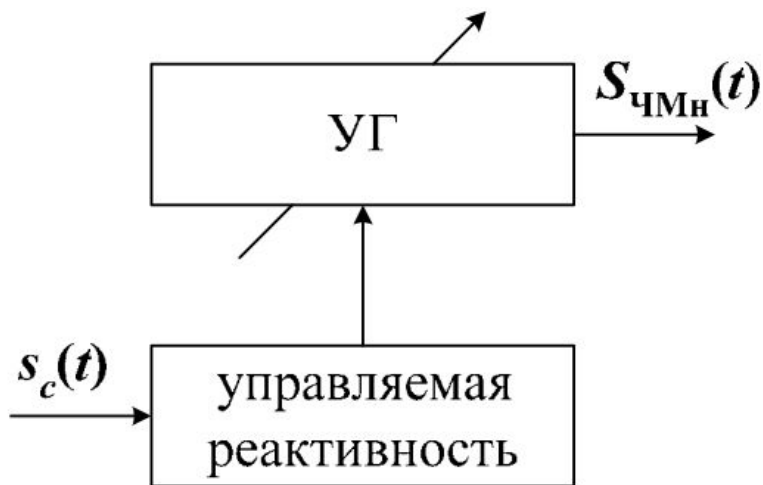


Рис. 8.7. Структурная схема формирования ЧМн колебаний без разрыва фазы

Спектральный состав ЧМн сигнала без разрыва фазы можно получить, раскрывая выражение для $S_{\text{ЧМн}}(t)$:

$$S_{\text{ЧМн}}(t) = A_m [\cos \omega_H t \cdot \cos \Delta\varphi(t) - \sin \omega_H t \cdot \sin \Delta\varphi(t)].$$

Из этой формулы следует, что для нахождения спектра ЧМн сигнала необходимо определить спектр функций $\cos \Delta\varphi(t)$ и $\sin \Delta\varphi(t)$ разложив их в ряд Фурье:

$$S_{\text{ЧМн}}(t) = \frac{2A_m \cdot m}{\pi} \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\sin[0,5\pi(m+k)]}{m^2 - k^2} \cdot \cos(f_H + kF_1)2\pi t. \quad (8.4)$$

Из спектральной характеристики (8.4) видно, что для спектра при $m_{\text{ЧМн}} \ll 1$ энергия колебания находится вблизи f_H .

Спектр ограничен несущей и двумя боковыми частотами:

$$\begin{aligned}
 S_{\text{ЧМН}}(t) = & A_m \cdot \frac{\sin(0,5\pi m)}{0,5\pi m} \cdot \cos \omega_{\text{H}} t + \\
 & + \frac{2A_m \cdot m}{\pi} \cdot \sum_{k=2,4,\dots}^{\infty} \frac{\sin(0,5\pi m)}{m^2 - k^2} \cdot [\cos(\omega_{\text{H}} + k\Omega)t + \cos(\omega_{\text{H}} - k\Omega)t] - \\
 & - \frac{2A_m \cdot m}{\pi} \cdot \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin(0,5\pi m)}{m^2 - k^2} \cdot [\sin(\omega_{\text{H}} + k\Omega)t + \sin(\omega_{\text{H}} - k\Omega)t].
 \end{aligned} \tag{8.5}$$

По мере увеличения индекса частотной модуляции энергия концентрируется вблизи частот f_1 и f_2 . На рис. 8.8 приведены спектры колебаний при различных $m_{\text{ЧМН}}$.

Ширина спектра определяется по общей формуле:

$$\Delta F_{\text{ЧМН}} = 2(\Delta f_m + \Delta F) = 2F(m - 2) = 2\Delta f_m (1 + 2/m), \tag{8.6}$$

либо по формулам для различных $m_{\text{ЧМН}}$:

$$\Delta F_{\text{ЧМН}} = \begin{cases} (1,3 \cdot m_{\text{ЧМН}} + 1,4) \cdot V; & 2 \leq m_{\text{ЧМН}} \leq 8 \\ (1,1 \cdot m_{\text{ЧМН}} + 1,6) \cdot V; & 8 \leq m_{\text{ЧМН}} \leq 20 \end{cases} \tag{8.7}$$

где V – скорость телеграфирования в бодах.

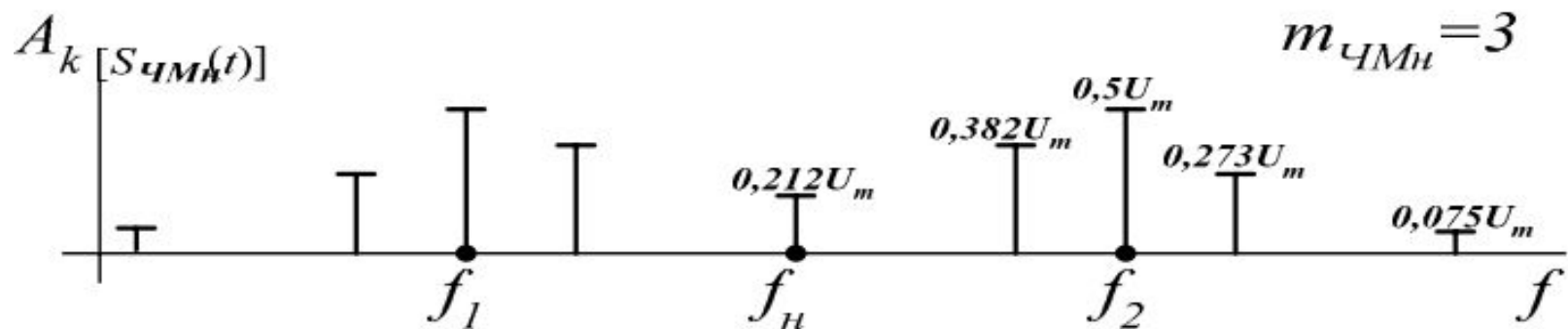
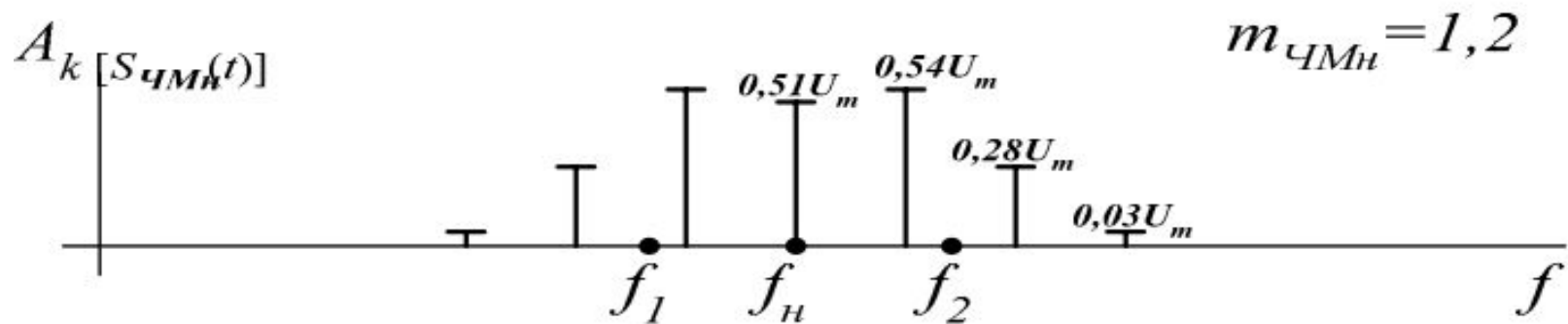
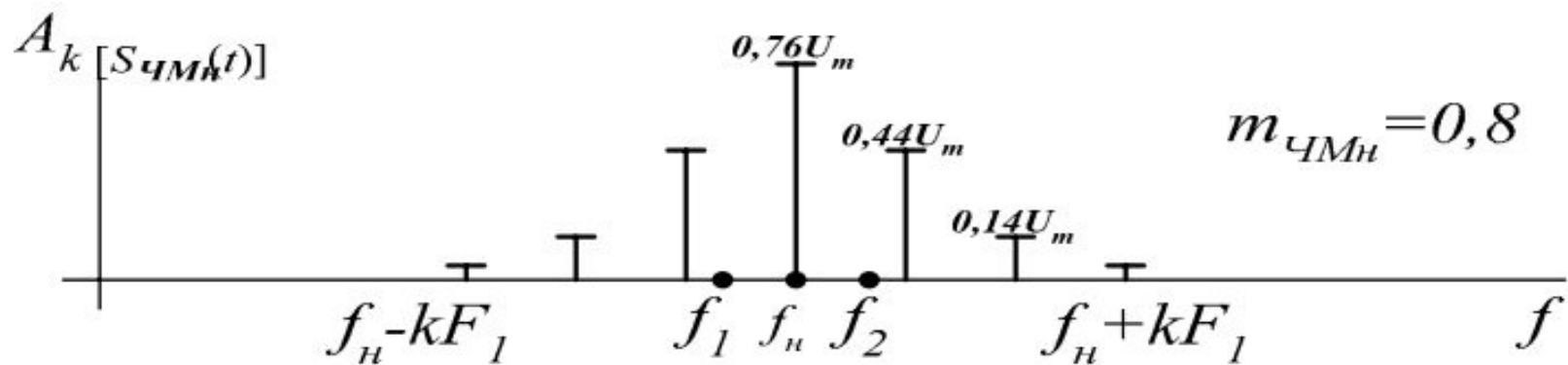


Рис. 8.8. Спектральные характеристики ЧМн сигнала без разрыва фазы для различных индексов модуляции

8.3. Фазовая (относительно-фазовая) манипуляция сигналов

В настоящее время разработано несколько вариантов двухпозиционной (бинарной) и многопозиционной фазовой манипуляции. В радиосистемах передачи информации наиболее часто применяются двоичная, четырехпозиционная и восьми позиционная фазовая манипуляция (ФМн). Данные сигналы обеспечивают высокую скорость передачи, применяются в радиосвязи, в системах фазовой телеграфии, при формировании сложных сигналов.

Временные и спектральные характеристики ФМн сигналов

Наиболее простой является бинарная ФМн, при которой изменение фазы несущего колебания происходит скачком в определенные моменты первичного сигнала (рис. 8.9, а) на 0 или 180°; при этом его амплитуда и частота несущей остаются неизменными.

ФМн сигнал имеет вид последовательности радиоимпульсов (отрезков гармонических колебаний) с прямоугольной огибающей (рис. 8.9, в):

$$S_{\text{ФМн}}(t) = A_m \cos[\omega_n t + (1 + x_c(t)) \cdot \Delta\varphi_m], \quad (8.8)$$

где $x_c(t)$ – нормированная функция, принимающая значения -1 и 1, и повторяющая изменения информационного сигнала (рис. 8.9, а); $\Delta\varphi_m$ – девиация фазы (максимальное отклонение фазы от начальной).

Величина $\Delta\varphi_m$ может быть любой, однако, для лучшего различения двух сигналов на приеме целесообразно, чтобы они максимально отличались друг от друга по фазе, т.е. на 180° ($\Delta\varphi_m = \pi$).

Таким образом, одни из ФМн колебаний будут синфазны с колебаниями несущей, а другие противоположны по фазе на 180° .

Такой сигнал можно представить в виде суммы двух АМн сигналов, с противофазными несущими 0° и 180° : $S_{\text{ФМн}}(t) = S_{1\text{АМн}}(t) + S_{2\text{АМн}}(t)$.

Структурная схема модулятора в этом случае реализуется с помощью двух самостоятельных источников колебаний (генераторов) с разными начальными фазами, выходы которых управляются информационным сигналом с помощью ключа (рис. 8.10).

Спектр ФМн колебания находится суммированием спектров колебаний $S_{1\text{АМн}}(t)$ и $S_{2\text{АМн}}(t)$:

$$S_{\text{ФМн}}(t) = A_m \left(\frac{2\tau_{\text{н}}}{T} - 1 \right) \cdot \cos(2\pi f_{\text{н}} t) + 2A_m \frac{\tau_{\text{н}}}{T} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left| \frac{\sin(k\pi F_1 \tau_{\text{н}})}{k\pi F_1 \tau_{\text{н}}} \right| \times \quad (8.9)$$

$$\times [\cos(f_{\text{н}} + kF_1)2\pi t + \cos(f_{\text{н}} - kF_1)2\pi t].$$

Из формулы следует, что спектр колебаний ФМн в общем случае содержит несущее колебание, верхнюю и нижнюю боковые полосы, состоящие из оставляющих частот $(k2\pi f_{\text{н}} \pm k2\pi F_1)t$.

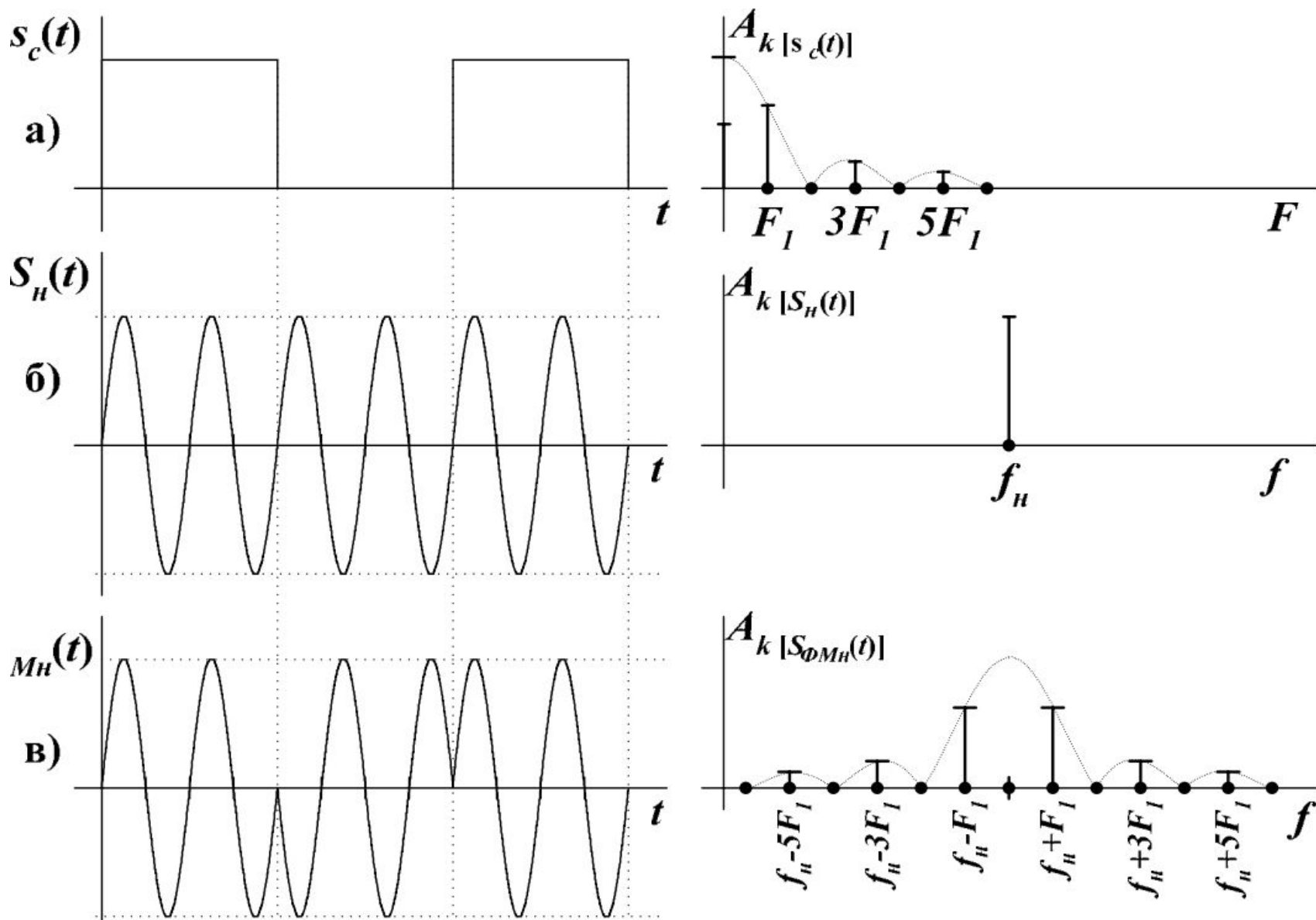


Рис. 8.9. Временные и спектральные характеристики формирования ФМн сигнала

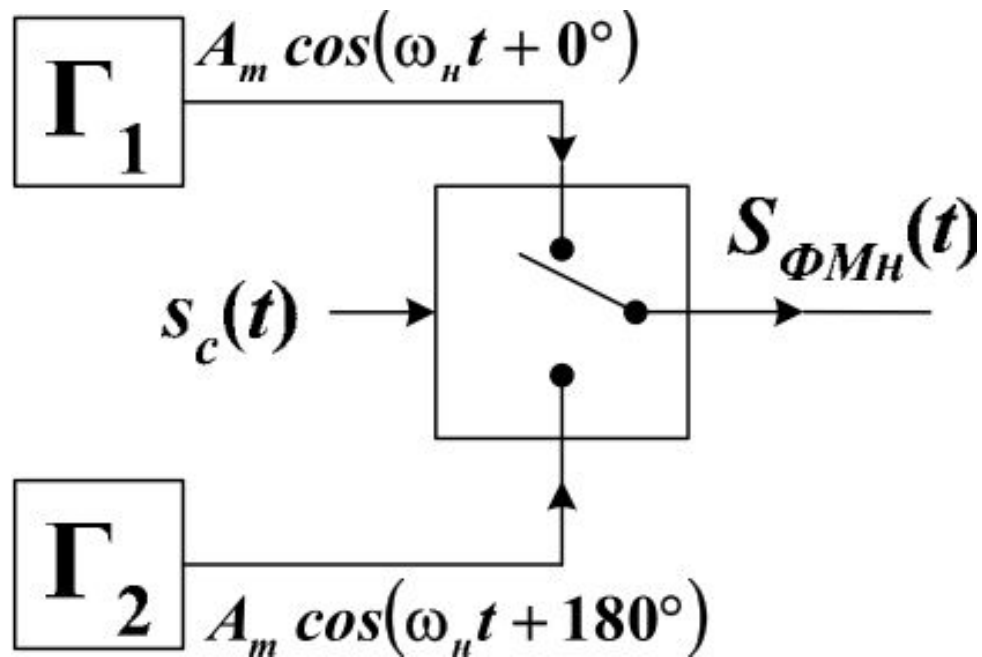


Рис. 8.10. Структурная схема формирования ФМн колебаний

Анализ спектров ФМн сигналов (рис. 8.9) при различных значениях $\Delta\varphi_m$ показывает, что при изменении $\Delta\varphi_m$ от 0 до π происходит перераспределение энергии сигнала между несущим колебанием и боковыми составляющими, а при $\Delta\varphi_m = \pi$ вся энергия сигнала содержится только в боковых полосах.

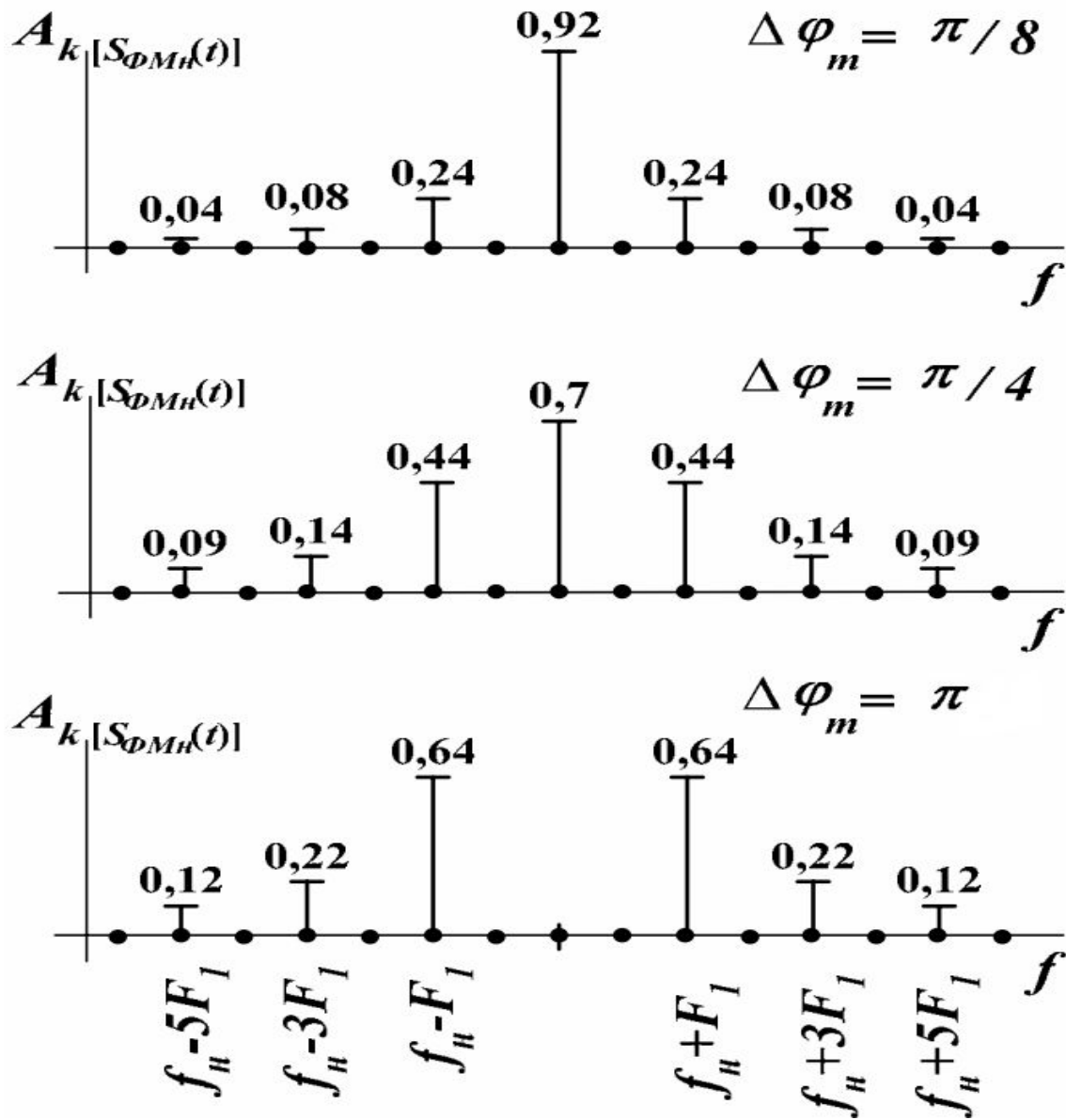


Рис. 8.11. Спектры сигналов фазовой манипуляции при различных значениях девиации фазы

Из рис. 8.11 следует, что спектр амплитуд ФМн сигнала содержит те же составляющие, что и спектр АМн сигнала, а для скважности $T/\tau_{и} = 2$ составляющая на несущей частоте отсутствует. Амплитуды боковых составляющих ФМн сигнала в 2 раза больше, чем АМн сигнала.

Это объясняется наложением 2-х спектров – спектра ФМн сигнала и несущей. На интервале, где колебания синфазны, суммарная амплитуда удваивается, а где фазы противоположны, компенсируется.

Равенство полос частот АМн и ФМн сигнала предполагает также и равенство максимально возможных скоростей модуляции. Большая амплитуда спектральных составляющих ФМн сигнала по сравнению с АМн обуславливает большую помехоустойчивость.

При ФМн начальная фаза является информационным параметром, и в алгоритмах работы фазового демодулятора с целью получения сведений о начальной фазе должны формироваться и храниться образцы вариантов передаваемого сигнала, достаточно точно совпадающие с ним по частоте и начальной фазе.

Так как на приеме нет признаков по которым можно точно установить однозначное соответствие между переданными двоичными символами и образцами сигнала на входе демодулятора, в результате возможно явление так называемой «обратной работы».

Неопределенность начальной фазы объясняется с одной стороны тем, что в канале связи к переданной фазе добавляется произвольный и неизвестный фазовый сдвиг. С другой стороны, фаза сигнала всегда приводится к интервалу 2π и сигналы, различающиеся по фазе на 2π , для приемника одинаковы. Данное свойство неоднозначности решения характерно именно для ФМн.

Для реализации системы с ФМн необходима передача специального синхросигнала (маркерного сигнала), соответствующему одному из символов, например 0.

Другой путь реализации ФМн – применение специальных кодов с избыточностью, позволяющих обнаруживать ошибки типа инвертирования всех символов.

При АМн сигнал, прошедший канал связи, также отличается от переданного, однако если на выходе модулятора сигналу с большей амплитудой соответствовал некоторый двоичный символ, то и на входе демодулятора варианту сигнала с большей амплитудой будет соответствовать тот же самый символ – неоднозначность отсутствует.

При ЧМн ситуация аналогична. Если одна из двух частот больше другой на выходе модулятора, то после всех преобразований в канале она останется больше и на входе демодулятора.

Временные характеристики сигналов с относительной фазовой манипуляцией

Неоднозначность характерная для ФМн сигналов, устранена в системах относительно-фазовой манипуляции (ОФМн). У такого метода манипуляции информация заложена не в абсолютном значении начальной фазы, а в разности начальных фаз соседних посылок, которая остается неизменной и на приемной стороне. Для передачи первого двоичного символа в системах с ОФМн необходима одна дополнительная посылка сигнала, передаваемая перед началом передачи информации и играющая роль отсчетной.

В системе с ФМн, после изменения полярности опорного колебания, все последующие символы ошибочные (обратная работа), причем ошибка будет оставаться до следующего скачка фазы опорного колебания.

В системе с ОФМн скачкообразное изменение полярности опорного колебания приводит к одиночной ошибке, что и определяет преимущества сигналов с ОФМн.

При выборе метода модуляции ФМн или ОФМн необходимо учитывать их достоинства и недостатки.