

Ctrl ← и Ctrl →. Для перехода от измерений спектра к режиму осциллографа режим сканирования следует отключать.

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации ЦИПа.
2. Включить компьютер, найти директорию **ANAL-SP** и запустить программу **danu133.exe**. Включить функциональный генератор GFG-8219A и соединить его со входом АЦП, входящего в состав ЦИП.
3. Установить на GFG-8219A синусоидальную форму сигналов и, плавно изменяя частоту сигнала от 100 Гц до 10 кГц, наблюдать форму сигнала в режиме "осциллограф" его спектр – в режиме "спектронализатор". Измерить в режиме "спектронализатор" частоту сигнала в трех-четырёх точках диапазона и сопоставить ее с показаниями электронного частотомера генератора. Объяснить источники расхождений в результатах измерений.

**Указание.** Рекомендуется при каждой настройке GFG-8219A поочередно наблюдать осциллограмму и спектр процесса, переключая ЦИП из режима "осциллограф" в режим "спектронализатор" и обратно.

### А. Исследование спектров периодических сигналов

1. Перевести GFG-8219A в режим прямоугольных сигналов. Установить частоту повторения импульсов в 1 кГц и используя ручку генератора "DUTY ADJ" для изменения скважности, наблюдать форму и спектр сигнала при скважности 2, 3, 4 и 5.
2. Измерить спектр (амплитуды и частоты всех отчетливо наблюдаемых гармоник) и для скважности, указанной преподавателем, сопоставить отбоящие измеренного и рассчитанного спектров. Объяснить, какие гармоники в спектре должны иметь нулевую амплитуду и почему?

3. Перевести GFG-8219A в режим треугольных сигналов и произвести аналогичные измерения для частоты повторения в 1 кГц. Используя ручку генератора "DUTY ADJ" превратить треугольный сигнал в пилообразный. Объяснить, как трансформируется спектр треугольного сигнала при превращении его в пилообразный.

### Б. Исследование спектров амплитудно-модулированных сигналов

Функциональный генератор GFG-8219A позволяет создавать однотональные АМ-колебания с помощью внутреннего генератора гармонических колебаний с частотой 400 Гц.

1. Для исследования однотональных АМ-колебаний достаточно установить на GFG-8219A синусоидальную форму сигналов, выбрав частоту несущей порядка 1-2 кГц, с помощью кнопки "MOD ON/OFF" задать режим внутренней амплитудной модуляции с частотой 400 Гц.

Зарисовать картины АМ-колебаний и их спектры для трех-четырёх значений коэффициента модуляции  $m$  (в том числе равного и большего 100%). Произвести измерение коэффициентов модуляции по осциллограмме и спектрограмме для каждого значения  $m$ . Вычислить ширину спектра для различных коэффициентов модуляции. Объяснить, как изменяется форма и спектр колебания при перемодуляции, что происходит с фазой несущего колебания при перемодуляции.

А.В.Хохлов

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РАДИОСИГНАЛОВ СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ (Цифровой измерительный прибор)

*Учебное пособие для спецпрактикума по курсу  
"Радиофизика и электроника"*

Ц е л ь р а б о т ы: исследование периодических и модулированных сигналов спектральным методом.

## Литература

1. Калинин В.И., Гершгейн Г.М. Введение в радиофизику. М.: Гостехиздат, 1957.
2. Хохлов А.В. Теоретические основы радиоэлектроники. Саратов. Изд-во Саратов. ун-та, 2005.
3. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. М.: Вышшшк., 1983.
5. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Гостехиздат, 1957.

## Контрольные вопросы:

1. Что понимают под спектральным представлением сигнала?
2. Как представить в аналитической форме и графически вещественный и комплексный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов? В чем различие вещественного и комплексного спектров? Как изменится спектр при изменении длительности импульсов и частоты повторения?
3. Как можно промодулировать высокочастотное гармоническое колебание по амплитуде?
4. Как представить аналитические выражения и амплитудные спектры для однотонального и многотонального АМ-колебаний?

## Задания для самостоятельной работы

1. Вывести интегральные формулы для коэффициентов  $c_0$  и  $c_k$  в разложении (8).
2. Вывести формулы (13), (14) и (21).

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## Спектры периодических колебаний

Разложение в тригонометрические ряды Фурье. Будем рассматривать периодические колебания

$$x(t+T) = x(t),$$

где  $T$  - период колебания, а в качестве базиса используем следующую систему тригонометрических функций с кратными частотами:

$$\begin{aligned} \Phi_0(t) &= \sqrt{\frac{1}{T}}, \\ \Phi_{1C}(t) &= \sqrt{\frac{2}{T}} \cos \frac{2\pi}{T} t, & \Phi_{1S}(t) &= \sqrt{\frac{2}{T}} \sin \frac{2\pi}{T} t, \\ \Phi_{2C}(t) &= \sqrt{\frac{2}{T}} \cos 2 \frac{2\pi}{T} t, & \Phi_{2S}(t) &= \sqrt{\frac{2}{T}} \sin 2 \frac{2\pi}{T} t, \\ & \dots & & \dots \end{aligned}$$

Представленная совокупность функций является ортонормальной на отрезке  $[0, T]$ , т.е.

$$\int_{t_1}^{t_2} \Phi_k(t) \Phi_m^*(t) dt = \delta_{km} = \begin{cases} 1, & k = m, \\ 0, & k \neq m, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\delta_{km}$  - символ Кронекера. Тогда колебание  $x(t)$  можно представить соотношением

$$x(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i \Phi_i(t). \quad (2)$$

Множитель  $\sqrt{2/T}$  принято включать в коэффициенты  $\alpha_i$ , а ряд (2) записывать в виде

$$x(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (c_{kC} \cos k \frac{2\pi}{T} t + c_{kS} \sin k \frac{2\pi}{T} t), \quad (3)$$

где

$$c_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt, \quad (4)$$

$$c_{kC} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos k \omega_1 t dt, \quad (5)$$

$$c_{kS} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin k \omega_1 t dt. \quad (6)$$

Здесь и в дальнейшем  $\omega_1 = 2\pi/T$  - угловая частота основной гармоника периодической функции  $x(t)$ .

Ряд (3) называется *рядом Фурье в тригонометрической форме*. Для целей спектрального анализа такое разложение не удобно, так как каждой частоте  $k\omega_1$  отвечают

сигнал первой спектральной составляющей усиливается резонансным усилителем и создает вертикальное отклонение луча ЭЛТ  $y_1 \sim U_1$ . Чтобы отклонение луча происходило только вверх используется подпрондуктовый диод.

Уже в следующий момент времени выходное напряжение резонансного усилителя снова обращается в ноль, и луч ЭЛТ не отклоняется в вертикальном направлении, присовывая горизонтальную прямую.

Таким же образом в моменты времени  $t_2, t_3$  и  $t_4$  возникают вертикальные отклонения в точках с координатами  $x_2, x_3$  и  $x_4$  длиной  $y_2 \sim U_2, y_3 \sim U_3$  и  $y_4 \sim U_4$ . При  $t = T$  ГПН возвращается в нулевое состояние, а гетеродин к частоте  $f_0$  и сканирование спектра повторяется.

С развитием компьютеров появился новый тип анализаторов спектра, основанных на дискретном преобразовании Фурье, - *цифровые анализаторы спектра*.

Цифровые анализаторы спектра отличаются высоким быстродействием, так как одновременно вычисляют значения для всех частот на основе единой последовательности входных данных.

## Экспериментальная часть

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из цифрового измерительного прибора (ЦИП) и двух функционального генератора GFG-8219A. ЦИП построен на базе ПЧМ РС с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и имеет несколько режимов, из которых в лабораторной работе используются режим осциллографа (клавиша F2) и режим цифрового анализатора спектра (клавиша F4). Наибольшая частота дискретизации ЦАП составляет 70 кГц. Выборка может быть установлена длиной 2048, 4096 или 8192 байта (клавиша В). Амплитуда входного сигнала устанавливается в пределах  $\pm 2.56, \pm 5.12$  или  $\pm 10.24$  В (клавиша R). Клавиша Z увеличивает масштаб изображения, а Shift-Z - уменьшает его в любом из режимов ЦИПа. Клавиша F1 содержит Help, а клавиша Esc обеспечивает выход из программы.

**ЦИП в режиме осциллографа.** Чтобы достаточно полно отобразить на экране дисплея структуру исследуемого сигнала необходимо иметь  $10 \div 12$  отсчетов на период колебания. Поэтому максимальная частота сигнала прямоугольной формы должна быть не выше 5 кГц, а для треугольного и синусоидального сигналов не выше  $20 \div 30$  кГц. Амплитуда сигналов не должна превышать 10 В. Число периодов сигнала, наблюдаемых в пределах экрана дисплея (что эквивалентно изменению частоты развертки в обычных осциллографах) можно регулировать, используя клавиши Home - End (группа настроек) или PageUp - PageDown (плавающая настройка). Амплитуда исследуемого сигнала высвечивается в нижнем левом углу экрана.

**ЦИП в режиме анализатора спектра.** Наибольшая частота спектральных гармоник равна половине частоты дискретизации и составляет 35 кГц. По умолчанию прибор устанавливает наиболее удобный для исследований в лабораторной работе диапазон частот: от 43.596 до 8937 Гц. Клавиши Home - End позволяют сжимать или растягивать изображение спектра, а клавиши  $\leftarrow$  и  $\rightarrow$  сменяют спектр. Клавиши  $\uparrow$  и  $\downarrow$  позволяют варьировать амплитуды спектральных составляющих. Программное обеспечение анализатора спектра предусматривает точное измерение амплитуд и частот спектральных составляющих. Для этого используется режим сканирования спектра (клавиша S). При нажатии клавиши на экране появляется вертикальная линия, которая переключается плавно с помощью клавиш  $\leftarrow$  и  $\rightarrow$  и скачкообразно при использовании клавиш

узкополосный резонансный усилитель, настроенный на частоту  $f_{пр} \ll f_{01}$ , и индикатор спектра в виде ЭЛТ.

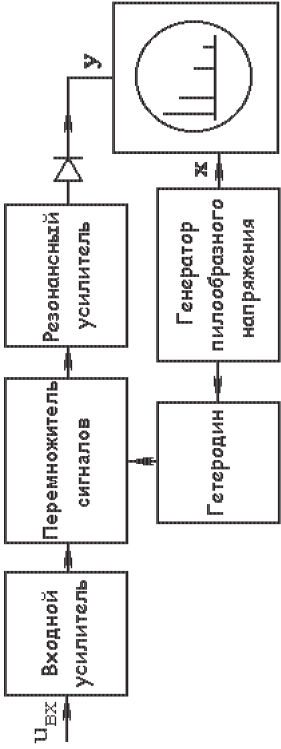


Рис. 11

Пусть на вход анализатора спектра поступает сигнал, содержащий  $N$  гармонических составляющих:

$$u_{вх}(t) = \sum_{k=1}^N U_k \cos 2\pi f_k t,$$

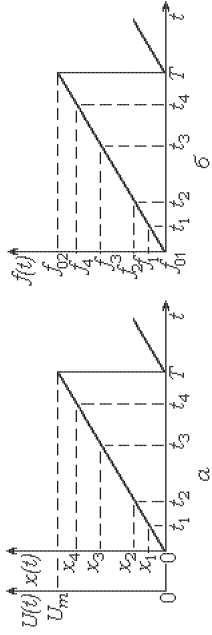


Рис. 12

из которых первые четыре с частотами  $f_{01} \leq f_1 < f_2 < f_3 < f_4 \leq f_{02}$  попадают в полосу пропускания входного усилителя и в качестве  $u_{вх1}$  поступают на первый вход перемножителя сигналов. На второй вход перемножителя поступает сигнал от гетеродина. ( $u_{вх2} = U_{пр} \cos 2\pi f_r(t)$ ). Тогда

$$u_{вых} = K[U_1 \cos 2\pi f_1 t + U_2 \cos 2\pi f_2 t + U_3 \cos 2\pi f_3 t + U_4 \cos 2\pi f_4 t] U_{пр} \cos 2\pi f_r(t).$$

Каждое произведение можно представить полусуммой косинусов суммы и разности аргументов, т.е. на вход резонансного усилителя поступают восемь гармонических сигналов, из которых четыре содержат разностные частоты (подчеркнуты):

$$u_{вых} = \frac{KU_{пр}}{2} [U_1 \cos 2\pi(f_1 + f_r(t))t + \underline{U_1 \cos 2\pi(f_1 - f_r(t))t} + U_2 \cos 2\pi(f_2 + f_r(t))t + \underline{U_2 \cos 2\pi(f_2 - f_r(t))t} + U_3 \cos 2\pi(f_3 + f_r(t))t + U_4 \cos 2\pi(f_4 + f_r(t))t + \underline{U_4 \cos 2\pi(f_4 - f_r(t))t}].$$

Выходной сигнал ГПН медленно изменяется (период сканирования  $T$  в тысячи раз превышает периоды измеряемых сигналов), а луч медленно смещается вдоль оси  $x$ . Пока  $t < t_1$  ни одна из разностных частот не попадает в полосу пропускания резонансного усилителя, и напряжение на  $y$ -входе ЭЛТ равно нулю. Когда  $t \rightarrow t_1$ , а  $f_1 - f_r(t_1) < f_{пр}$ ,

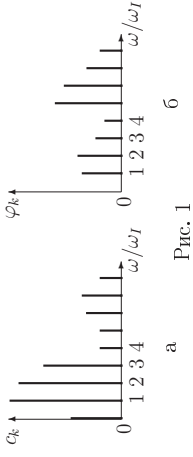


Рис. 1

одновременно две составляющие ряда, и необходимо устройство, способное их разделить.

Более рациональной является так называемая *амплитудно-фазовая формулировка* рядов Фурье.

**Амплитудно-фазовая формулировка ряда Фурье.** Каковы бы не были коэффициенты Фурье  $c_{kC}$  и  $c_{kS}$ , можно найти такое  $c_k > c_{kC}$ ,  $c_{kS}$  и такой угол  $\varphi_k$ , чтобы выполнялись соотношения

$$c_{kC} = c_k \cos \varphi_k, \quad c_{kS} = c_k \sin \varphi_k. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (3), получим:

$$x(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(k\omega_1 t - \varphi_k). \quad (8)$$

Это тоже тригонометрический ряд Фурье, но его каждая гармоническая составляющая представлена *амплитудой*  $c_k = \sqrt{c_{kC}^2 + c_{kS}^2}$  и *начальной фазой*  $\varphi_k$ .

Совокупность гармоник, на которые разлагается функция  $x(t)$  называется *спектром периодического колебания*  $x(t)$ . Совокупности амплитуд  $c_k$  и начальных фаз  $\varphi_k$  составляют *амплитудный и фазовый спектры*  $x(t)$ . Они изображаются в виде *спектральных диаграмм* (рис. 1). При этом каждой гармонике сигнала соответствует вертикальный отрезок, длина которого пропорциональна амплитуде или начальной фазе, а местоположение на горизонтальной оси соответствует частоте.

- *Интегрируемые периодические сигналы* [2, с.30] можно представить математической моделью в виде суммы постоянной составляющей и гармонических колебаний кратных частот.
- Спектральные линии периодического сигнала образуют *эвидентный дискретный* или *эвидентный линейчатый* спектр с частотами  $k\omega_1$ .
- Тригонометрический ряд (8) представляет *вещественные модели* реальных периодических сигналов.
- Структура спектров зависит от симметрии функций [2, с.29].

**Представление ряда Фурье в комплексной форме.** Представляя каждую гармоническую функцию в (8) суммой комплексно-сопряженных слагаемых, получим:

$$x(t) = \frac{1}{2} \left( c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k e^{j(k\omega_1 t - \varphi_k)} + c_k e^{-j(k\omega_1 t - \varphi_k)} \right). \quad (9)$$

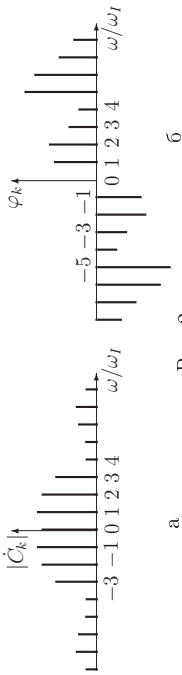


Рис. 2

Если ввести комплексные амплитуды гармоник  $\dot{C}_k = c_k e^{-j\varphi_k}/2$  и  $\dot{C}_k^* = c_k e^{j\varphi_k}/2$ , то уравнение (9) можно представить в виде:

$$x(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \dot{C}_k e^{jk\omega t} + \sum_{k=-\infty}^{-1} \dot{C}_k^* e^{-jk\omega t} \quad (10)$$

где  $\dot{C}_0 = c_0/2$ ,  $\dot{C}_{-k} = \dot{C}_k^*$

$$\dot{C}_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) (\cos k\omega t - j \sin k\omega t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jk\omega t} dt \quad (11)$$

Комплексный ряд (10) содержит гармоники с отрицательными частотами. Они не имеют физического смысла и порождены комплексным представлением гармонических колебаний [2, с.31].

Формулы (11) и (10) часто называют *парой преобразований Фурье*, так как первая из них позволяет определить совокупность комплексных амплитуд по заданной функции  $x(t)$  (прямое преобразование Фурье  $\mathbf{F}$ ), а вторая – найти  $x(t)$  по заданному множеству комплексных амплитуд гармоник (обратное преобразование Фурье  $\mathbf{F}^{-1}$ ). Чтобы подчеркнуть дuality преобразований Фурье, в литературе (особенно зарубежной) вместо  $\dot{C}_k$  вводят дискретно-определенные функции  $\dot{X}(k)$  или просто  $X(k)$ . Тогда

$$\dot{X}(k) = \mathbf{F}[x(t)] \quad x(t) = \mathbf{F}^{-1}[\dot{X}(k)]$$

Совокупность комплексных амплитуд гармоник  $\dot{C}_k$  называется *комплексным спектром периодического сигнала*  $x(t)$ .

Комплексный спектр можно изобразить в виде единой спектральной диаграммы, если над вертикальными отрезками амплитудного спектра указать численные значения начальных фаз гармоник.

**Пример. Спектр последовательности прямоугольных видеоимпульсов.** Пусть периодическая (с периодом  $T$ ) последовательность импульсов (рис. 3) задана аналитическим выражением:

$$x(t) = \begin{cases} E, & nT - \tau/2 < t < nT + \tau/2 \\ 0, & nT + \tau/2 < t < (n+1)T - \tau/2, \end{cases} \quad (12)$$

где  $E$  – амплитуда, а  $\tau$  – длительность импульсов.

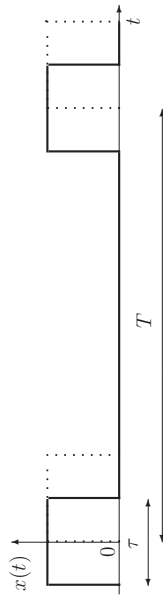


Рис. 3

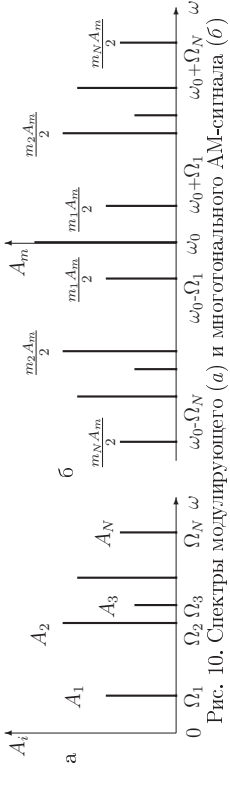


Рис. 10. Спектры модулирующего (а) и многотонального АМ-сигнала (б)

Спектр многотонального АМ-сигнала содержит две группы колебаний с верхними от  $(\omega_0 + \Omega_1)$  и нижними от  $(\omega_0 - \Omega_N)$  до  $(\omega_0 - \Omega_1)$  боковыми частотами. При этом структуры спектров верхней боковой полосы частот и модулирующего сигнала идентичны, а спектральные компоненты нижней боковой полосы частот получаются при зеркальном отражении верхней боковой полосы относительно несущей. Таким образом, колебания боковых частот располагаются попарно-симметрично относительно частоты несущего колебания. Полный спектр содержит  $2N + 1$  составляющих, а его ширина определяется величиной максимальной частоты в спектре модулирующего сигнала и равна  $2\Omega_N$ .

Частным случаем многотонального АМ-сигнала является высокочастотное колебание, промодулированное по амплитуде последовательностью прямоугольных импульсов [2, с. 80-81].

## Методика экспериментального исследования спектров радиосигналов (анализаторы спектра)

Исследования частотных спектров сигналов выполняются с помощью электронных приборов, называемых *анализаторами спектра*.

В простейшем случае амплитуды различных частотных составляющих сигнала можно измерить резонансным селективным вольтметром, перестраивая его частоту. Если его перестройку автоматизировать, используя электронное сканирование частоты, то получим наиболее распространенный *сканирующий анализатор спектра* или *анализатор спектра с последовательным сканированием*. Вместо одного перестраиваемого фильтра можно использовать набор фильтров с фиксированной полосой пропускания, настроенных на разные частоты и плотно (без зазоров) заполняющих частотный диапазон. Тогда получим *анализатор спектра с одновременным или параллельным анализом*, работающий в реальном времени [5].

Анализатор спектра напоминает работу обычного радиоприемника с электронной перестройкой, но только очень узкополосного. Анализатор спектра (рис. 11) содержит: входной усилитель с полосой пропускания от  $f_{01}$  до  $f_{02}$ , определяющий полосу пропускания анализатора спектра, гетеродин – генератор с периодически изменяющейся частотой  $f_r(t)$ , генератор пилообразного напряжения (ГПН)  $U(t) = \frac{f_r}{T}t$  (рис. 12, а), задающий горизонтальное отклонение луча электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) и управляющий сканированием частоты гетеродина (рис. 12, б):

$$f_r(t) = f_{01} + \frac{f_{02} - f_{01}}{T}t, \quad (0 \leq t \leq T, \quad f_{01} \leq f_r(t) \leq f_{02}),$$

перемножитель сигналов ( $u_{\text{вых}} = K u_{\text{вх}1} \cdot u_{\text{вх}2}$ ), где  $K$  – характеристический параметр перемножителя,



В частности, при  $q = 2$  амплитуды всех четных гармоник обращаются в нуль, а амплитуды нечетных уменьшаются обратно пропорционально номерам гармоник (рис. 5, б). Последовательность прямоугольных импульсов, длительность  $\tau$  которых равна половине периода (рис. 5, а), называется *меандр*.

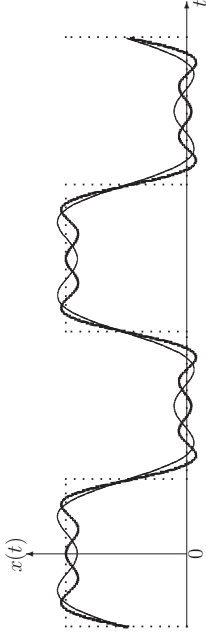


Рис. 6. Аппроксимация  $x(t)$  укороченным рядом Фурье:  $k = 3$  (тонкая линия),  $k = 5$  (п/ж линия) и  $k = 31$  (пунктирная линия)

Вклад различных составляющих в сигнал, аппроксимируемый рядом Фурье с конечным числом слагаемых, иллюстрирует рис. 6. При  $k = 3$  суммируются всего 5 гармоник и  $\hat{x}(t)$  сильно отличается от  $x(t)$ , но уже при  $k = 31$  функции  $\hat{x}(t)$  и  $x(t)$  практически не различимы.

2. Уменьшение длительности импульсов  $\tau$  сопровождается перемещением нулей отгибающей в область все более высоких частот, т.е. *спектр расширяется*, а скорость убывания его амплитуд и сами амплитуды уменьшаются.

3. Увеличение  $T$  при неизменном значении  $\tau$  вызывает рост числа спектральных линий в каждом лепестке диаграммы и уменьшение расстояний между ними. При  $T \rightarrow \infty$ , т.е. при переходе от последовательности к одиночному импульсу, спектр *из дискретного превращается в непрерывный, состоящий из бесконечно большого числа спектральных линий малой амплитуды* ( $|C_k| \rightarrow 0$ ), *расположенных сколь угодно близко друг к другу*.

## Модулированные радиосигналы и их спектры

Сигналы, поступающие от источников сообщений, чаще всего являются низкочастотными и при передаче с помощью радиоволн их спектры переносятся в область высоких частот. Для этого достаточно изменить пропорционально передаваемому сообщению параметры высокочастотного колебания, называемого *несущим*. В качестве несущих применяются непрерывные (аналоговые), импульсные или даже хаотические колебания. Чаще других используются однотоновые непрерывные сигналы, математической моделью которых является гармоническое колебание.

- Физический процесс изменения во времени одного или нескольких параметров несущего колебания в соответствии с передаваемым сообщением называется *модуляцией*.

Гармоническое несущее колебание

$$x_{\text{нес}}(t) = A_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (16)$$

имеет три параметра: *амплитуду*  $A_m$ , *круговую частоту*  $\omega_0$  и *начальную фазу*  $\varphi_0$ . Управляя одним из них можно получить три вида модуляции: *амплитудную, частотную или фазовую* (сокращенные обозначения АМ, ЧМ и ФМ).

Если при неизменных  $\omega_0$  и  $\varphi_0$  амплитуда колебания (16) изменяется по закону

$$A(t) = A_m + \Delta A s(t), \quad (17)$$

где  $s(t)$  — передаваемое сообщение, то колебание называется *амплитудно-модулированным*:

$$x_{\text{АМ}}(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = [A_m + \Delta A s(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (18)$$

Математической моделью АМ-сигнала служит выражение

$$x_{\text{АМ}}(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (19)$$

где  $A(t) = A_m(1 + ms(t))$  — отгибающая АМ-сигнала;  $\omega_0$  и  $\varphi_0$  — круговая частота и начальная фаза высокочастотного заполнения;  $A_m$  — амплитуда несущего колебания в отсутствие модуляции;  $m = \Delta A / A_m$  — коэффициент модуляции.

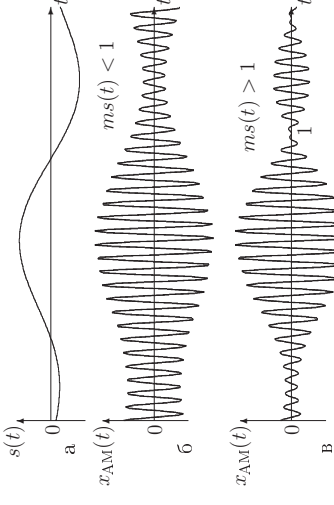


Рис. 7. Передаваемое сообщение (а) и АМ-колебание при  $|ms(t)| < 1$  (б) и  $|ms(t)| > 1$  (в), 1 — точка разрыва фазы несущего колебания

Пока  $|ms(t)| < 1$  (рис. 7, б), передаваемое сообщение внесется в  $x_{\text{АМ}}(t)$  без искажений. Пусть модулирующий сигнал  $s(t)$  является гармоническим:

$$s(t) = A_s \cos(\Omega t + \Phi_0),$$

Такое АМ-колебание называется *однотоновым*, а его мгновенное значение описывается соотношением

$$x_{\text{АМ}}(t) = A_m (1 + m \cos(\Omega t + \Phi_0)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (20)$$

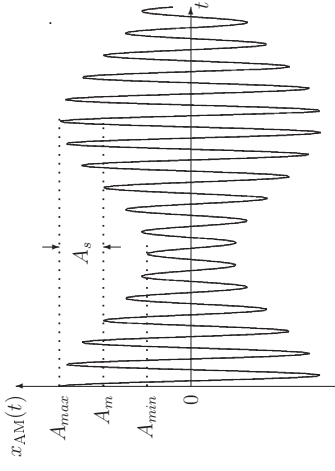


Рис. 8. Однотоновое АМ-колебание