<u>Лекция № 8.</u>

Модуляция сигналов в измерительных системах

Информационные преобразования в аналоговых блоках измерительных систем осуществляются над сигналами, имеющими различные информативные параметры, или, другими словами, над сигналами с различными видами модуляции. Под *модуляцией* понимается *процесс изменения во времени одного или нескольких параметров сигнала-носителя* в соответствии с алгоритмами передачи информации от одних преобразователей к другим.

В качестве сигналов-носителей используют постоянное напряжение, гармонический сигнал, периодическую последовательность прямоугольных импульсов. Наиболее широко на практике применяют сигналы, формируемые путем модуляции гармонических колебаний в виде тока или напряжения. Поскольку у гармонического сигнала три параметра: амплитуда, круговая частота и начальная фаза, то модуляции может подвергаться любой из трех. Поэтому различают амплитудную модуляцию (АМ), частотную модуляцию (ЧМ) и фазовую (ФМ). Последние два вида имеют общее название – угловая модуляция, поскольку у них имеется общее свойство: при изменении частоты всегда меняется фаза колебаний, а при изменении фазы – частота.

Амплитудная модуляция. Амплитудная модуляция заключается в изменении амплитуды несущего гармонического колебания по закону модулирующего воздействия (модулирующей функции). Пусть немодулированное несущее напряжение имеет вид:

$$u_н(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)\,, \tag{8.1}$$

где A_0, ω_0, φ_0 – соответственно амплитуда, круговая частота и начальная фаза носителя. При амплитудной модуляции амплитуда носителя изменится по закону:

$$A_m = A_0 + \Delta A_m x(t) = A_0\left[1 + m x(t)\right], \tag{8.2}$$

где $m = \Delta A_m / A_0$ – коэффициент амплитудной модуляции (глубина модуляции), под которым понимают отношение наибольшего приращения ΔA_m амплитуды несущего колебания к амплитуде A_0 немодулированной несущей. Функция $x(t)$, называемая *модулирующей функцией,* характеризует воздействие на амплитуду носителя и должна быть задана в относительных единицах $|x(t)| \le 1$. Очевидно также, чтобы при АМ огибающая амплитуда носителя повторяла форму модулирующей функции $x(t)$ без искажений, необходимо выполнение условия: $m \le 1$.

Величина m характеризует глубину амплитудной модуляции (часто она задается в процентах). При малой глубине модуляции ($|mx(t)| \ll 1$) относительное изменение огибающей невелико, поэтому такой режим нецелесообразен ввиду неэффективного использования параметров носителя. В то же время нельзя допускать режима перемодуляции ($m > 1$), при котором форма огибающей перестает повторять форму модулирующего сигнала, и неизбежно искажение передаваемой информации.

Подставляя (8.2) в (8.1) получим выражение для мгновенных значений АМ-сигнала:

$$u(t) = A_0\left[1 + mx(t)\right]\cos(\omega_0 t + \varphi_0)\ . \tag{8.3}$$

Анализ этого выражения позволит ответить на вопрос: в чем преимущества амплитудной модуляции гармонического сигнала по сравнению с модуляцией постоянного напряжения.

Тональная амплитудная модуляция. Тональной называется модуляция, при которой модулирующая функция имеет вид гармонического сигнала с частотой $\Omega \ll \omega_0$: $x(t) = \cos\Omega t$.

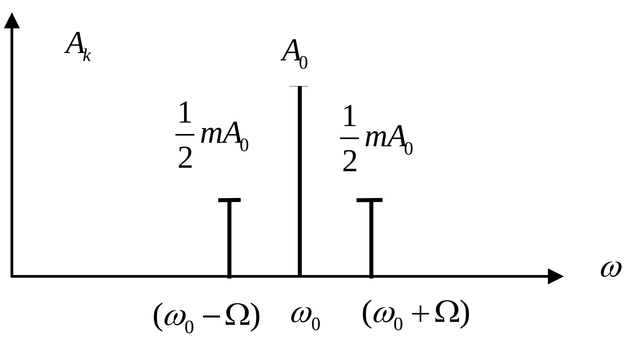
При рассмотрении тональной амплитудной модуляции для упрощения записи будем считать начальные фазы сигналов равными нулю. Тогда мгновенное значение АМ сигнала запишется в виде:

$$u(t) = A_0\left[1 + m\cos\Omega t\right]\cos(\omega_0 t)\ . \tag{8.4}$$

Используя известную тригонометрическую формулу произведения косинусов, из выражения (8.4) получим:

$$u(t) = A_0\cos(\omega_0 t) + \frac{1}{2}mA_0\cos(\omega_0 - \Omega)t + \frac{1}{2}mA_0\cos(\omega_0 + \Omega)t \tag{8.5}$$

Формула (8.5) устанавливает спектральный состав тонального АМ сигнала. Видно, что спектр АМ сигнала содержит частотные компоненты несущего сигнала ω_0 и двух боковых частот: $(\omega_0 - \Omega)$ и $(\omega_0 + \Omega)$.



При построении спектральной диаграммы тонального АМ сигнала (см. рисунок) следует обратить внимание на равенство амплитуд верхнего и нижнего боковых колебаний (при этом их значения не могут превышать половины амплитуды немодулированного сигнала) и на симметрию расположения этих спектральных составляющих относительно несущего сигнала. Важно, что спектр АМ сигнала не содержит спектральной составляющей с частотой модулирующей функции $x(t)$. Очевидно, что ширина спектра АМ сигнала равна 2Ω, то есть вдвое превышает ширину спектра модулирующей функции.

Свойство симметрии спектра АМ сигнала позволяет использовать при необходимости разновидность АМ – однополосную амплитудную модуляцию, при которой передается только одна боковая полоса (вторая боковая подавляется). В этом случае вдвое сокращается ширина спектра АМ сигнала.

Аналогичные результаты можно получить при модуляции носителя любым сложным сигналом. Если модулирующая низкочастотная функция имеет сложный спектральный состав, например:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cos(\Omega_i t + \varphi_i), \tag{8.6}$$

где частоты Ω_i образуют упорядоченную возрастающую последовательность $\Omega_1 < \Omega_2 < \ldots < \Omega_n$, а амплитуды α_i и начальные фазы φ_i произвольны, то подставляя (8.6) в (8.3) получим:

$$u_{AM}(t) = A_0 \left[1 + \sum_{i=1}^{n} m\alpha_i \cos(\Omega_i t + \varphi_i) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{8.7}$$

Введем совокупность парциальных (частичных) коэффициентов модуляции $M_i = m\alpha_i$ и запишем аналитическое выражение сложномодулированного (многотонального) АМ сигнала в форме:

$$u_{AM}(t) = A_0 \left[1 + \sum_{i=1}^{n} M_i \cos(\Omega_i t + \varphi_i) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \ . \tag{8.8}$$

Спектральное разложение такого сигнала имеет вид:

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{A_0}{2} \sum_{i=1}^{n} M_i \cos\left[(\omega_0 - \Omega_i)t + \varphi_0 - \varphi_i \right] + \\ + \frac{A_0}{2} \sum_{i=1}^{n} M_i \cos\left[(\omega_0 + \Omega_i)t + \varphi_0 + \varphi_i \right] \end{aligned} \tag{8.9}$$

Очевидно, что в спектре сложномодулированного АМ сигнала, помимо несущего сигнала, содержатся две группы верхних и нижних боковых частот, являющиеся масштабной копией спектра модулирующей функции, сдвинутой в область высоких частот на величину ω_0, и располагающиеся зеркально относительно несущей частоты ω_0.

Если спектр модулирующей функции не линейчатый, а сплошной и сосредоточен в низкочастотной области, то общие закономерности амплитудной модуляции сохраняются:

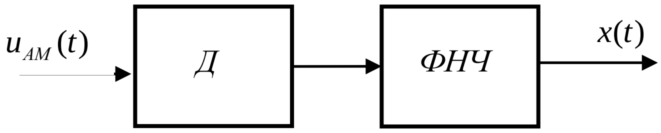
- огибающая АМ сигнала связана с мгновенными значениями низкочастотной модулирующей функции;
- спектр АМ сигнала образуется несущей частотой и двумя всплесками, зеркально отражаемыми относительно частоты ω_0;
- полоса частот, необходимая для передачи АМ сигнала, равна удвоенному значению наивысшей частоты (граничной частоты $\omega_{гр}$) спектра модулирующей функции; при этом необходимо выполнение условия $\omega_{гр} \ll \omega_0$.

Таким образом, процесс амплитудной модуляции связан с *переносом спектра исходного сигнала из области низких частот в область высоких частот*. В измерительной технике это необходимо в следующих случаях:

- если среда, используемая для передачи сообщений, физически не может переносить сигналы низких частот, соответствующих спектру функции $x(t)$, а может переносить сигналы более высоких частот (например, радиоканалы);
- при наличии в диапазоне частот, соответствующих спектру $x(t)$, сильных помех или шумов (перенос сообщений в область более высоких частот устраняет или уменьшает влияние этих помех или шумов);
- при использовании кабельной линии для одновременной передачи нескольких сообщений вида $x(t)$ от различных источников, если эти сигналы имеют перекрывающиеся частотные спектры, (модуляция носителей с различными частотами ω_0 позволяет разнести спектры сигналов).

На практике амплитудная модуляция реализуется либо в линейной цепи с переменными параметрами, либо в нелинейной цепи. Из выражения (8.3) следует, что амплитудный модулятор должен выполнять операцию перемножения двух функций: $\left[1+mx(t)\right]$ и $A_0\cos(\omega_0 t+\varphi_0)$. Следовательно, амплитудный модулятор должен представлять собой аналоговое перемножающее устройство. Наиболее просто АМ в линейной цепи с переменными параметрами реализуется на транзисторах или операционных усилителях с управляемым коэффициентом усиления.

После регистрации или передачи АМ сигнала по каналу связи необходимо осуществить его демодуляцию (детектирование), т.е. выделить модулирующую функцию, которая в неявном виде содержится в модулированном высокочастотном сигнале. По своему назначению детектирование является процессом, обратным процессу модуляции, т.е. детектирование тоже сопровождается трансформацией частотного спектра и не может быть осуществлено без применения нелинейных цепей или же линейных цепей с переменными параметрами. Амплитудный демодулятор можно представит в виде сочетания детектора (диода) с фильтром нижних частот ФНЧ:



В детекторе происходит выделение среднего значения выходного напряжения, а ФНЧ подавляет высокочастотные составляющие ω_0.

Угловая модуляция. Как отмечалось, угловая модуляция включает в себя две разновидности: фазовую модуляцию (ФМ) и частотную (ЧМ). При фазовой модуляции модулирующая функция $x(t)$ воздействует непосредственно на фазу гармонического сигнала, а при частотной модуляции функция $x(t)$ воздействует непосредственно на частоту, а изменение фазы является следствием изменения частоты. Так как $\omega(t) = {d\varphi(t)}/{dt}$, т.е. угловая частота есть скорость изменения фазы колебаний, то $\varphi(t) = \int_0^t \omega(t)dt + \varphi_0$ – полная фаза есть интегральное значение круговой частоты.

При ЧМ мгновенная частота равна: $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega x(t)$, (8.10)

где $\Delta\omega$ –девиация частоты, равная максимальному изменению частоты в результате ЧМ, и ЧМ сигнал запишется в виде: $u_{чм}(t) = A_0 \cos\left[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t x(t)dt\right]$. (8.11)

Отсюда модуляция частоты по закону $x(t)$ приводит к модуляции фазы по закону $\int_0^t x(t)dt$.

При ФМ модуляции: $u_{фм}(t) = A_0 \cos\left[\omega_0 t + \Delta\varphi x(t)\right]$. (8.12)

При этом мгновенная частота сигнала $\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \omega_0 + \Delta\varphi \frac{dx(t)}{dt}$, (8.13)

где $\Delta\varphi$ – девиация фазы, т.е. максимальное изменение начальной фазы при ФМ.

Таким образом, модуляция фазы по закону $x(t)$ приводит к модуляции частоты по закону $dx(t)/dt$, и по внешнему виду невозможно отличить ФМ сигналы от ЧМ сигналов.