

## 11. НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ

### Нелинейный элемент и воздействие на него одного сигнала

*Нелинейным элементом* называют элемент, параметры которого зависят от протекающего через него тока или от приложенного к нему напряжения. Типичными нелинейными элементами являются диод и транзистор. Их параметры существенно изменяются при воздействии рабочих токов и напряжений.

На рисунке 1 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейного (1) и линейного (2) резисторов. Только при воздействии малых напряжений нелинейные элементы можно приближенно заменять линейными элементами. Например, характеристики диодов и транзисторов линеаризуются, если воздействует напряжение  $\Delta U < 0,1 \text{ В}$ .

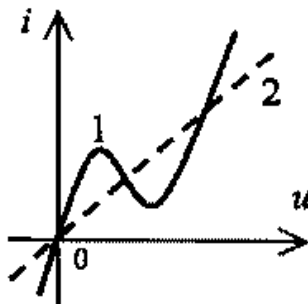


Рис.1

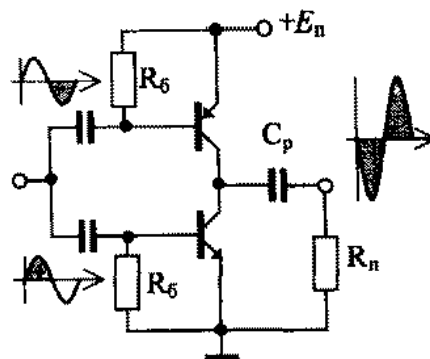
В соответствии с методом тригонометрических формул вольт-амперную характеристику нелинейного резистора аппроксимируем полиномом:

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + \dots + a_n u^n, \quad (1)$$

где коэффициенты  $a_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  зависят от вида ВАХ и находятся, как правило, приравниванием значений полинома (1) в выбранных  $(n + 1)$  точках к значениям в этих же точках реальной ВАХ.

**Нелинейный усилитель** — это усилитель на работающем в нелинейном режиме транзисторе, имеющий увеличенный коэффициент полезного действия. Простейшая схема нелинейного усилителя приведена на рис. 3. Отличительная особенность схемы — отсутствие постоянного напряжения смещения на базе транзистора. Поэтому транзистор при отсутствии входного сигнала будет закрыт и его постоянные токи базы, коллектора и эмиттера будут практически равны нулю. Транзистор будет открываться только при подаче положительной полуволны большого по амплитуде входного напряжения (амплитуда должна быть много больше 0,1 В). Отметим, что в некоторых нелинейных усилителях может использоваться источник напряжения смещения. В этом случае напряжение выбирается или запирающим, или небольшим открывающим.

Нелинейные усилители используются в автогенераторах (например, в импульсных источниках питания ЭВМ), в усилителях мощности (например, в мощных усилителях звуковой частоты), в качестве усилителей-ограничителей [10], в передатчиках и т. д.



**Умножитель частоты** — это нелинейное устройство, частота сигнала на выходе которого в несколько раз больше частоты входного сигнала. В умножителе частоты используется свойство нелинейных элементов — порождать гармоники с частотами, кратными частоте входного сигнала.

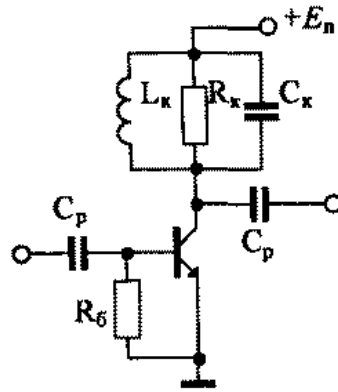


Рис. 6

### Воздействие на нелинейный элемент двух сигналов

Рассмотрим более сложный случай, когда на нелинейный элемент воздействуют два сигнала (рис. 1). Для простоты в качестве входных сигналов будем использовать гармонические сигналы с нулевыми начальными фазами:  $s_1(t) = S_1 \cos(\omega_1 t)$ ;  $s_2(t) = S_2 \cos(\omega_2 t)$ . Частоты этих двух сигналов в общем случае различны:  $\omega_1 \neq \omega_2$ .

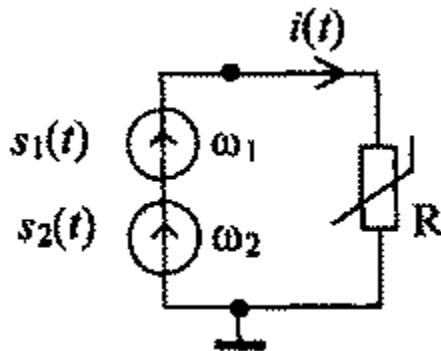


Рис. 1

Нелинейную зависимость тока  $i$  от напряжения  $u$  на нелинейном элементе аппроксимируем полиномом третьей степени:

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3. \quad (1)$$

Комбинационные гармоники используются в преобразователях частоты, модуляторах и детекторах (демодуляторах).

**Преобразователь частоты** — это устройство, в котором осуществляется сдвиг спектра входного сигнала по частотной оси с сохранением информации, содержащейся во входном сигнале. Принцип работы преобразователя частоты поясняется спектральными диаграммами на рис. 2. Для простоты в качестве входного сигнала выбран амплитудно-модулированный сигнал. Центральная частота (несущая) входного АМ-сигнала  $\omega_c$  и частота  $\omega_r$  вспомогательного генератора, называемого *гетеродином*, показаны на рис. 2, а.

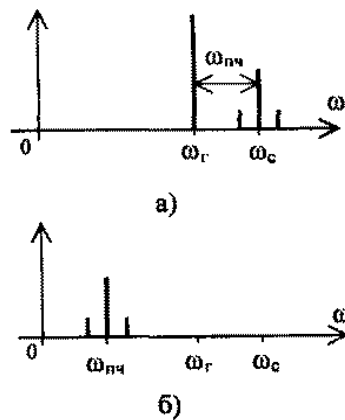


Рис.2.

Схема преобразователя частоты на диоде приведена на рис.3

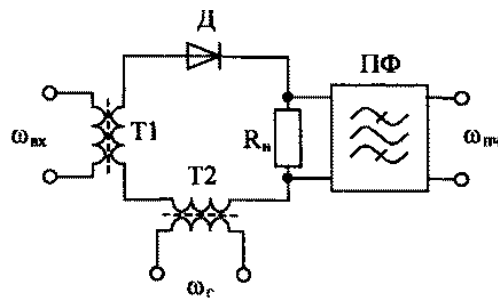


Рис.3

В зависимости от вида модуляции различают амплитудный, частотный и фазовый модуляторы. Для простоты ниже рассмотрим только амплитудный модулятор.

Спектральная диаграмма, поясняющая работу амплитудного модулятора, приведена на рисунке 4.

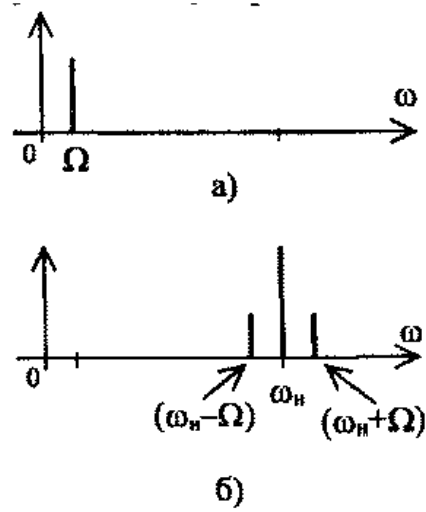


Рис.4

Схема простого АМ-модулятора приведена на рис.5, схема детектора – на рис.6.

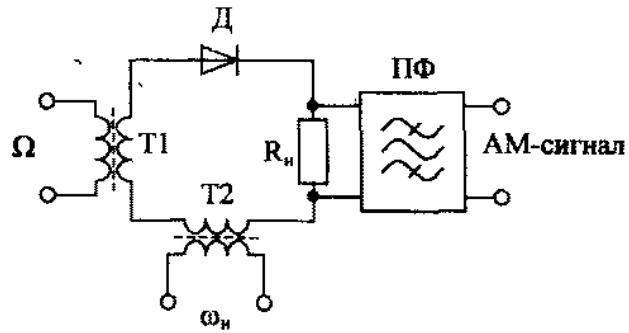


Рис. 5

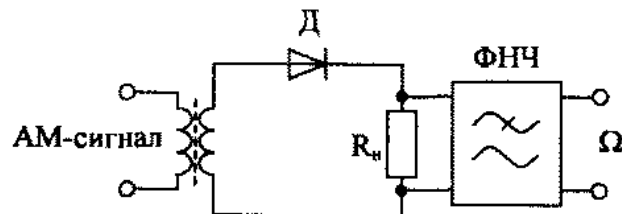


Рис.6

## Автогенераторы гармонических колебаний

*Автогенератор* — это устройство, в котором самопроизвольно (но не беспричинно) возникают, растут и устанавливаются колебания. Первопричинами, обуславливающими возникновение автоколебаний, являются внутренние шумы в автогенераторе, импульсы, возникающие в схеме при включении питания, а также помехи, наводки и т. п. В автогенераторе осуществляется преобразование энергии источника питания в энергию колебаний. Автогенератор — одно из основных устройств в радиоэлектронике. Он — источник всех сигналов в радиоэлектронных устройствах: радиопередатчиках, модемах, компьютерах, электронных часах и т. п.

Для построения автогенераторов используются *неустойчивые* электрические цепи, в которых после окончания малого по величине возмущения амплитуда оставшихся колебаний возрастает с течением времени. В предыдущих параграфах рассматривались *устойчивые* электрические цепи, в которых после окончания воздействия колебания затухают.

*Автогенератор на туннельном диоде* (рис. 2) — пример простого генератора гармонических колебаний. Постоянное напряжение  $E_0$  через дроссель  $Dp$  подается на анод туннельного диода  $D$ . Величина этого напряжения такова, что рабочая точка помещается на падающем участке ВАХ диода.

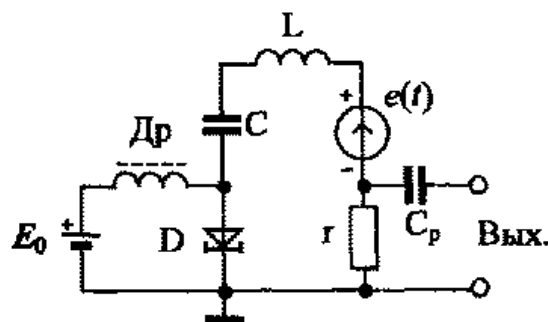


Рис. 2

Для автогенераторов с внешней обратной связью для анализа самовозбуждения удобно использовать формулу, описывающую коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$\dot{K}_{oc} = \frac{\dot{K}}{1 - \beta \dot{K}}, \quad (5)$$

где  $\dot{K}$  — коэффициент усиления исходного усилителя,  $\beta$  — коэффициент передачи четырехполюсника ОС. В нашем случае формула (5) описывает передачу малых и кратковременных возмущений с входа на выход автогенератора.

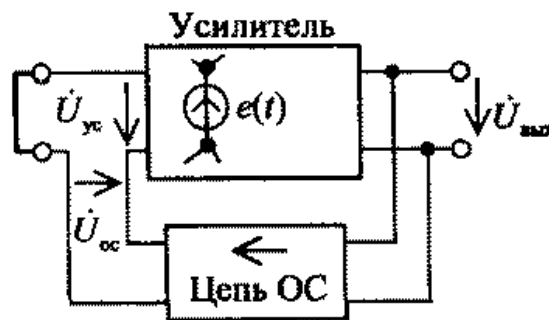


Рис. 3

### Стационарный режим автогенератора

После самовозбуждения автогенератора колебания на его выходе с течением времени быстро возрастают. Как только амплитуда этих колебаний превысит 0,1 В из-за нелинейности ВАХ диодов или транзисторов, рост амплитуды колебаний в автогенераторе вначале замедляется, а затем, как показывает практика, прекращается. Наступает *стационарный (установившийся) режим* работы автогенератора. В этом случае автогенератор будет преобразовывать в энергию колебаний максимально возможную часть энергии источника питания. Установившийся режим — основной режим работы автогенератора. В стационарном режиме автогенератор характеризуется двумя основными параметрами — частотой и амплитудой колебаний.

При возрастании амплитуды колебаний транзисторы усилителя входят в нелинейный режим работы. В течение некоторой части периода в этом режиме транзистор практически закрыт и не усиливает сигнал. Поэтому с ростом амплитуды колебаний в автогенераторе коэффициент усиления усилителя  $K$  при  $U_{yc} > 0,1$  В уменьшается (рис. 1).

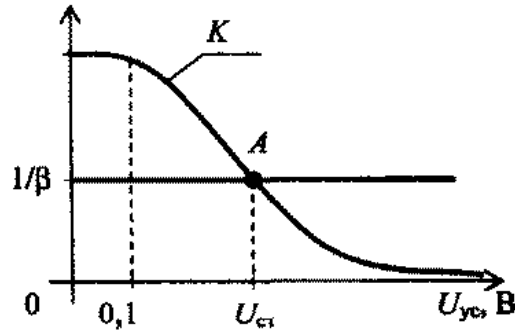


Рис. 1

Баланс фаз иллюстрируется на рис. 2. Из анализа графиков следует, что колебания возникают на единственной частоте  $\omega_r$ , на которой фазовый сдвиг в усилителе, равный  $+180^\circ$ , компенсируется фазовым сдвигом в цепи ОС, равным  $-180^\circ$ . Отметим, что если баланс фаз выполняется на нескольких частотах, то генерируется сумма гармоник с этими частотами, соответствующая сложному импульсному сигналу.

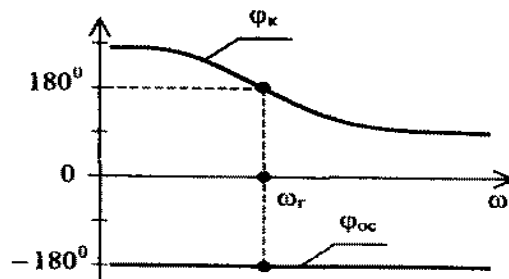


Рис. 2

RC – автогенератор на операционном усилителе (рис.3).



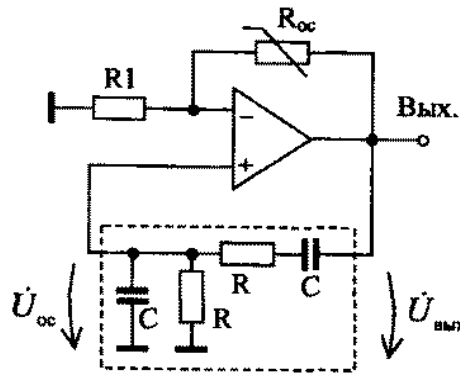


Рис.3

Для генерации последовательности прямоугольных импульсов используется автоколебательный *мультивибратор*, схема которого показана на рис. 5. Мультивибратор состоит из двух одинаковых каскадов — усилителей с общим эмиттером. Сигналы с коллекторов этих каскадов через разделительные конденсаторы C1 и C2 поступают на базы транзисторов.

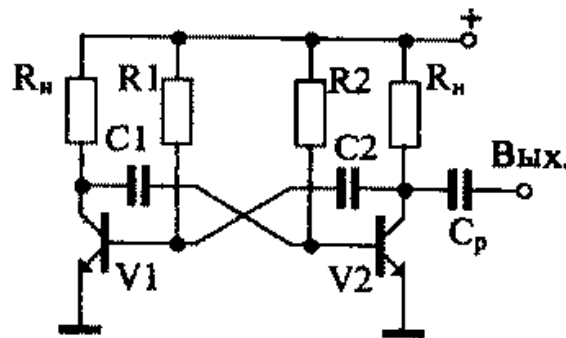


Рис.5

Мультивибраторы широко используются в качестве генераторов импульсов в компьютерах. Для повышения стабильности их работы в схемы дополнительно включают катушки индуктивности (резонансные контуры) и кварцевые резонаторы, а вместо инвертирующих усилителей ОЭ используют логические элементы.