

# СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

---

## ВВЕДЕНИЕ

Электроника - наука о теории и практике работы электровакуумных, ионных и полупроводниковых приборов и устройств

Схемотехника - раздел электроники, охватывающий исследования и разработку схемотехнических решений (электрических и структурных схем), используемых в электронной аппаратуре.

Аналоговая электроника охватывает электронные средства, которые предназначены для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону непрерывной функции.

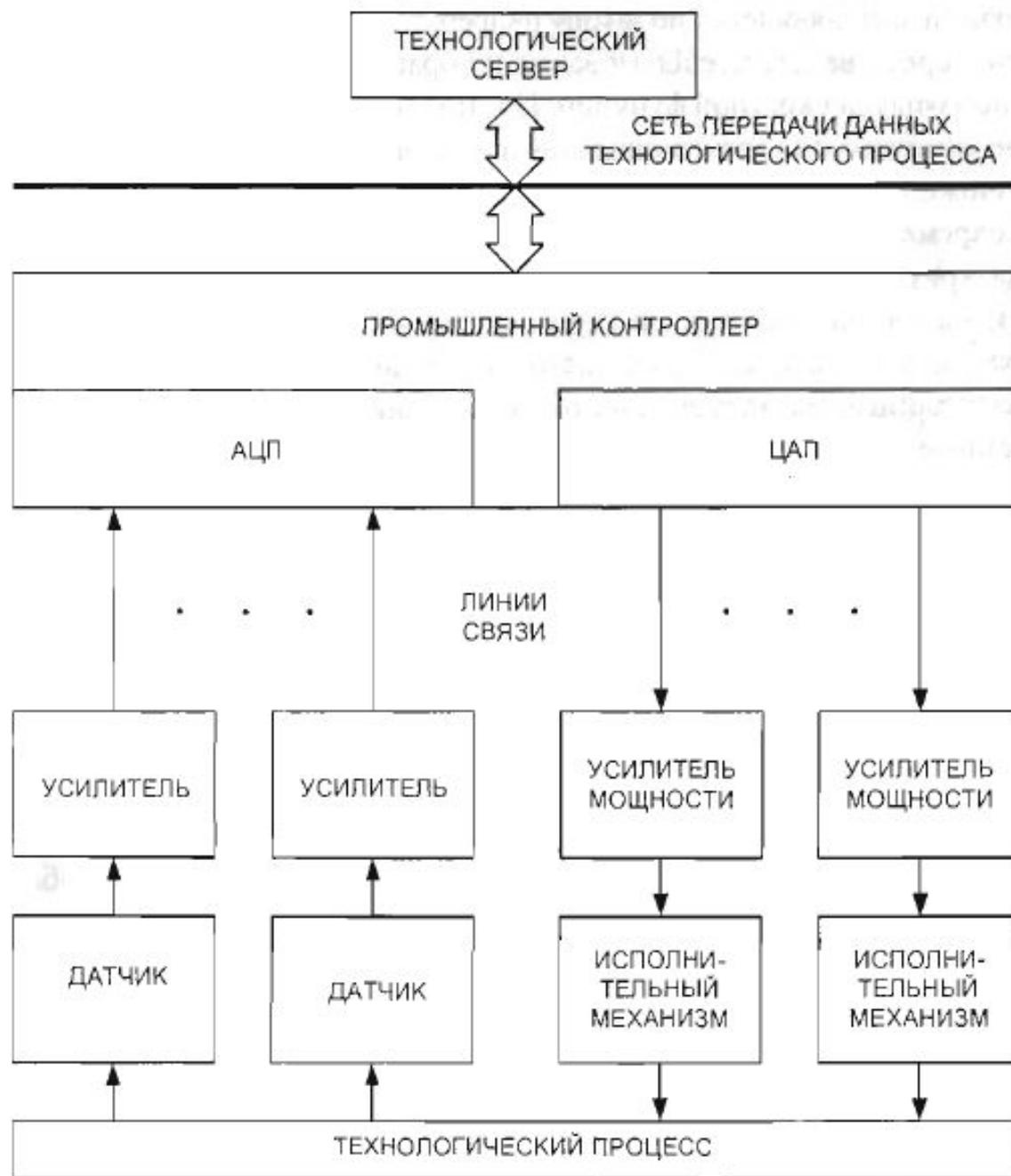
Цифровая электроника охватывает электронные средства для преобразования и обработки информации, изменяющейся по закону дискретной функции.

Современную электронику можно разделить на три области:

**радиоэлектроника** - раздел электроники, связанный с передачей, приемом и обработкой радиосигналов;

**энергетическая** (промышленная или силовая), связанная с преобразованием переменного и постоянного токов для нужд электроэнергетики, электротяги, металлургии и пр.;

**информационная**, к которой относятся электронные средства, обеспечивающие измерения, контроль и управление различными процессами, включая производство и научные исследования.



Для создания электронных устройств используют электронные элементы. Электронные элементы современных электронных устройств выпускаются промышленностью в двух видах:

- в виде отдельных дискретных компонентов (диодов, транзисторов, тиристоров и др.);

- в виде микросхем (интегральных схем), в которых в одном корпусе в один функциональный узел объединен ряд отдельных элементов, выполненных, как правило, на одном кристалле полупроводника.

Дискретные элементы применяются преимущественно в силовых цепях автоматики, которые менее сложны по схемотехнике, рассеивают большее количество теплоты, имеют большие габаритные размеры. Используются они также в слаботочных цепях для согласования отдельных микросхем, корректировки характеристик некоторых устройств и в случаях, когда применение микросхем по тем или иным причинам нецелесообразно.

Область использования интегральных схем непрерывно расширяется. Они выполняют все более сложные функции, включают в себя все большее число отдельных электронных элементов. Вершиной современного развития электроники является создание в одном корпусе (на одном кристалле) программируемых электронных элементов - микропроцессорных наборов и микроЭВМ.

## СИГНАЛЫ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрические сигналы можно разделить на **аналоговые** и **дискретные**.

Аналоговые сигналы представляют собой непрерывные во времени функции напряжения или тока и делятся на **постоянные** и **переменные**.

**Постоянные аналоговые сигналы** представляют собой однополярные медленно изменяющиеся во времени напряжения или токи.

**Переменными аналоговыми сигналами** называются функции напряжения или тока, изменяющиеся во времени как по амплитуде, так и по знаку. Частным случаем переменного сигнала является гармонический или синусоидальный.

**Дискретными** называются такие электрические сигналы, которые представляют собой разрывные во времени функции напряжения или тока и могут принимать ограниченное число уровней. Наиболее часто используются дискретные сигналы, которые имеют только два уровня - высокого напряжения (тока) и низкого напряжения (тока). Такие сигналы называют импульсными или двоичными. Два дискретных значения, которые принимают двоичные сигналы, обычно обозначают двумя **цифровыми** символами - «1» и «0». Поэтому двоичные дискретные сигналы также называют цифровыми, а раздел электроники, изучающий формирование, преобразование и передачу двоичных сигналов - цифровой техникой.

## Синусоидальные сигналы

$$U = U_m \sin 2\pi ft$$

$$U = U_m \sin(2\pi ft + \phi)$$

$$U = U_m \sin \omega t$$

$$U_{\text{эфф}} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m = 0,707 U_m$$

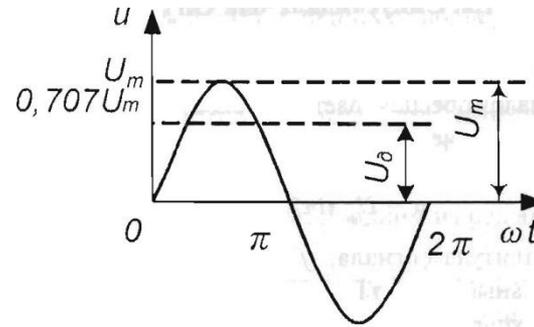


Рис.1.1. Синусоидальный сигнал

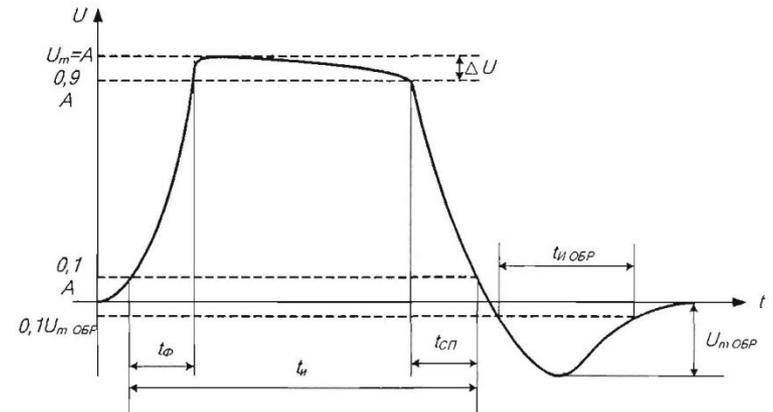
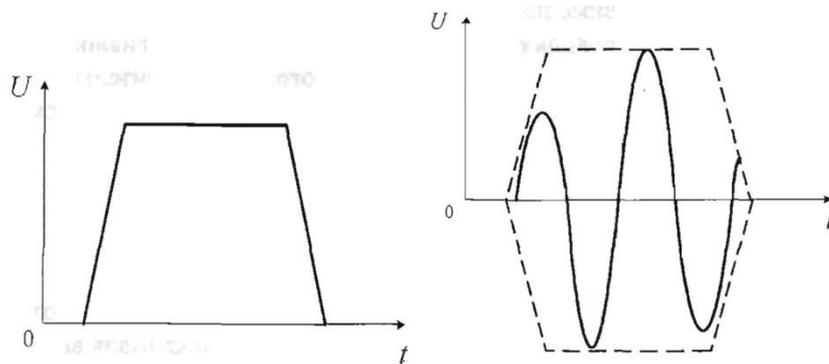
$$\text{дБ} = 20 \lg (A_2/A_1)$$

дБВ - эффективное значение 1В;

дБВт - напряжение, соответствующее мощности 1 мВт на некоторой предполагаемой нагрузке, для радиочастот это обычно 50 Ом, для звуковых частот - 600 Ом (напряжение 0 дБВт на этих нагрузках имеет эффективное значение 0,22 В и 0,78 В);

дБп - небольшой шумовой сигнал, генерируемый резистором при комнатной температуре. Нужно обратить внимание на эталонную амплитуду 0 дБ: при использовании этого значения нужно не забывать его оговаривать, например «амплитуда 27 дБ относительно эффективного значения 1 В», или в сокращенной форме «27 дБ относительно 1 В<sub>эфф</sub>» или пользоваться условным обозначением дБВ

# Импульсные сигналы



Основными характеристиками и параметрами импульсов являются:

Амплитуда импульса  $U_m = A$ ;

Активная длительность импульса (измеряется на уровне  $0,1 A$ )  $t_{И}$

Крутизна фронта  $S_{\Phi} = dU/dt \approx U_m/t_{\Phi}$ ;

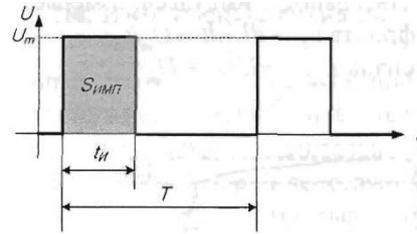
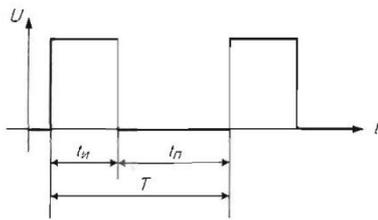
Крутизна спада  $S_{СП} = dU/dt \approx U_m/t_{СП}$ ;

Искажение вершины импульса  $\Delta U$ , которое оценивается отношением  $\frac{\Delta U}{U_m} \cdot 100\%$ .

Амплитуда обратного выброса  $U_{mОБР}$ ;

Длительность обратного выброса  $t_{ИОБР}$ ;

Мощность импульса  $P = W/t_{И}$  где  $W$ - энергия импульса.

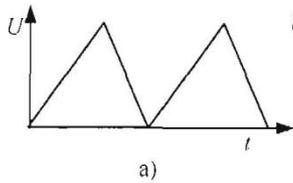


Частота импульсной последовательности  $f = 1/T$ , где  $T = t_{И} + t_{П}$ ;

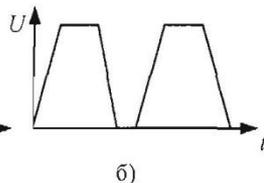
Коэффициент заполнения  $\gamma = t_{И} / T$  (диапазон изменения  $0 \dots 1$ );

скважность  $Q = T / t_{И}$  (диапазон изменения от  $\infty$  до  $1$ );

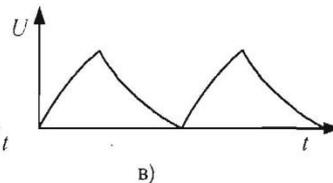
Среднее значение импульса  $U_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{И}} U(t) dt = \frac{S_{ИМП}}{T} = \frac{U_m \cdot t_{И}}{T} = U_m \cdot \gamma = \frac{U_m}{Q}$



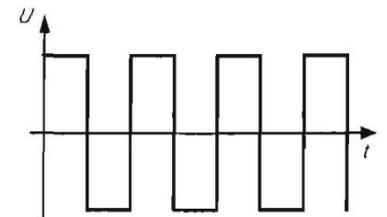
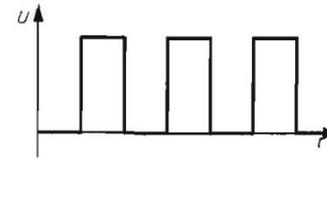
а)



б)

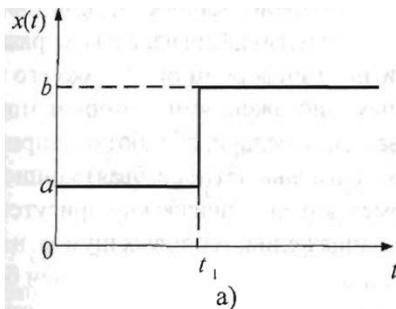


в)

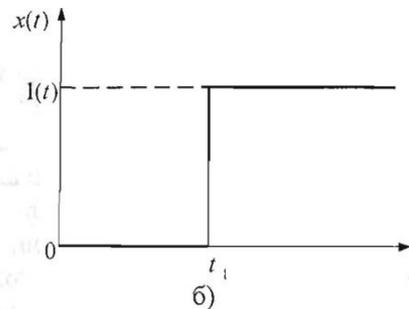


Для анализа схем используют

1. *Ступенчатое возмущение* - мгновенное изменение воздействия на постоянную величину, чаще всего равную единице измерения



а)



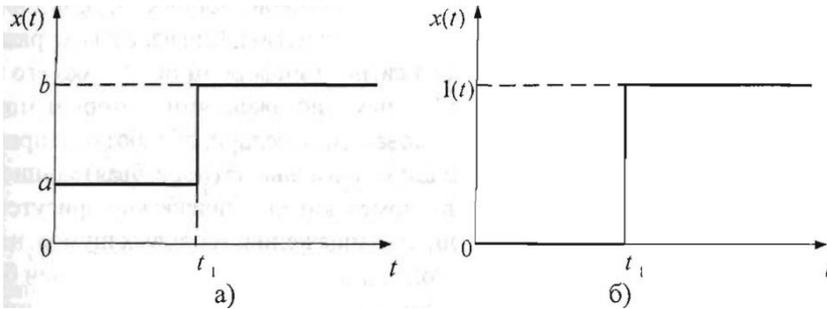
б)

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t_1 < 0; \\ 1(t), & t_1 \geq 0; \end{cases}$$

Единичный скачок в момент  $t_1$  по отношению к моменту  $t_0$  аналитически записывается в виде  $l(t_1 - t_0)$ .

При анализе работы систем автоматического управления и их отдельных элементов в качестве типовых возмущений используют:

**1. Ступенчатое возмущение** - мгновенное изменение воздействия на постоянную величину, чаще всего равную единице измерения



$$x(t) = \begin{cases} 0, & t_1 < 0; \\ 1(t), & t_1 \geq 0; \end{cases}$$

Единичный скачок в момент  $t_1$  по отношению к моменту  $t_0$  аналитически записывается в виде  $I(t_1 - t_0)$

**2. Импульсное возмущение** - это возмущение, полученное как последовательность двух одинаковых по величине, но противоположных по знаку ступенчатых возмущений, сдвинутых во времени. Особое значение имеет единичная импульсная или дельта-функция. Она обозначается  $\delta(t_1 - t_0)$ .

Дельта-функция обладает следующими свойствами:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t_1 - t_0) dt = 1;$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) \delta(t_1 - t_0) dt = \varphi(t_1);$$

**3. Периодическое возмущение.** В ряде случаев периодическое возмущение является наиболее удобным для исследования. Так, для автоматических систем, работающих в режиме незатухающих колебаний, целесообразно проводить проверку их свойств под действием периодических возмущений.

Стандартным считается периодическое возмущение единичной амплитуды  $x(t) = \sin \omega t$ .

Аналоговые и дискретные сигналы имеют общие характеристики, с помощью которых они описываются. К ним относятся: **динамический диапазон, время установления и ширина спектра сигнала.**

**Динамический диапазон** - отношение наибольшей мгновенной (пиковой) мощности к наименьшей (пороговой) мощности. Динамический диапазон - чисто физическая характеристика сигнала и не отражает смысла передаваемой с помощью этого сигнала информации. Однако его выбор определяется максимально допустимыми искажениями, которым может подвергаться сигнал в процессе формирования, передачи, обработки и приема без потери заключенной в нем информации. Наименьшая (пороговая) мощность сигнала определяется уровнем шумов и помех, Увеличение сигнала приводит к росту отношения сигнал-помеха, однако максимальное (пиковое) значение сигнала ограничивается как ростом затрачиваемой мощности, так и предельными характеристиками элементов и устройств, через которые происходит передача сигналов. Насыщение этих элементов приводит к искажению передаваемых сигналов, а значит и заключенной в них информации.

**Время установления** является динамической характеристикой сигнала и определяется временем, за которое сигнал достигнет своего установившегося значения. Этот параметр непосредственно связан с временными характеристиками устройств, формирующих сигнал, и определяется их инерционностью. Время установления можно характеризовать либо функцией времени (временной характеристикой), описывающей реальный процесс, либо функцией частоты (спектром, или рядом гармонических колебаний). При этом оба представления равносильны и взаимно дополняют друг друга, а переход от одного к другому осуществляется с помощью прямого и обратного преобразования Фурье или Лапласа.

Выбор того или иного способа описания (временного или частотного) определяется исключительно назначением устройства.

Кроме рассмотренных общих характеристик, различные виды сигналов характеризуются рядом дополнительных, параметров. У постоянного напряжения - это амплитуда, у переменного напряжения - амплитуда, частота, фаза, среднее и действующее значения.

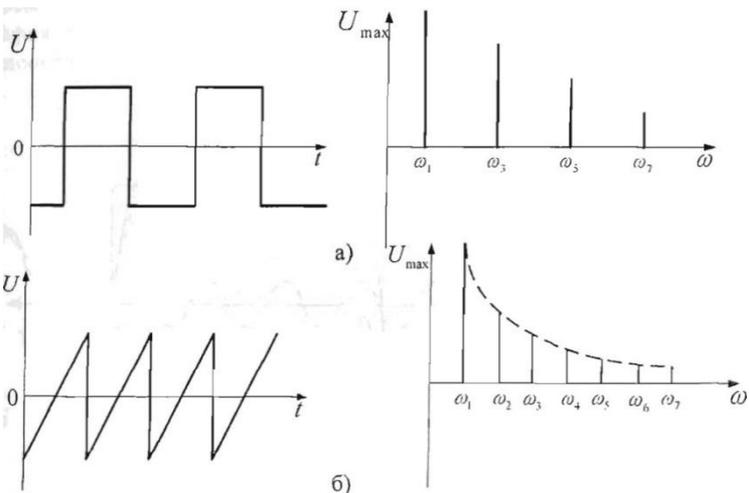
Переменный электрический сигнал в большинстве случаев представляет собой функцию времени  $u(t)$  с периодом  $T = 1/f$ , которую можно записать в виде ряда Фурье:

$$u(t) = U_0 + U_{1\max} \cos(\omega_0 t - \phi_1) + U_{2\max} \cos(2\omega_0 t - \phi_2) + U_{3\max} \cos(3\omega_0 t - \phi_3) + \dots;$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;

$\phi_1, \phi_2, \phi_3$  - начальные фазы отдельных гармоник;

$U_{1\max}, U_{2\max}, U_{3\max}, \dots$  - их амплитуды.



Совокупность величин  $U_{Kmax}$  называют спектром амплитуд, совокупность величин  $\phi_K$  - спектром фаз.

Чаще всего интересуются только спектром амплитуд и называют его для краткости просто спектром.

Длины вертикальных отрезков представляют собой амплитуды соответствующих гармоник. Эти отрезки называют спектральными линиями, а сам спектр - линейчатый.

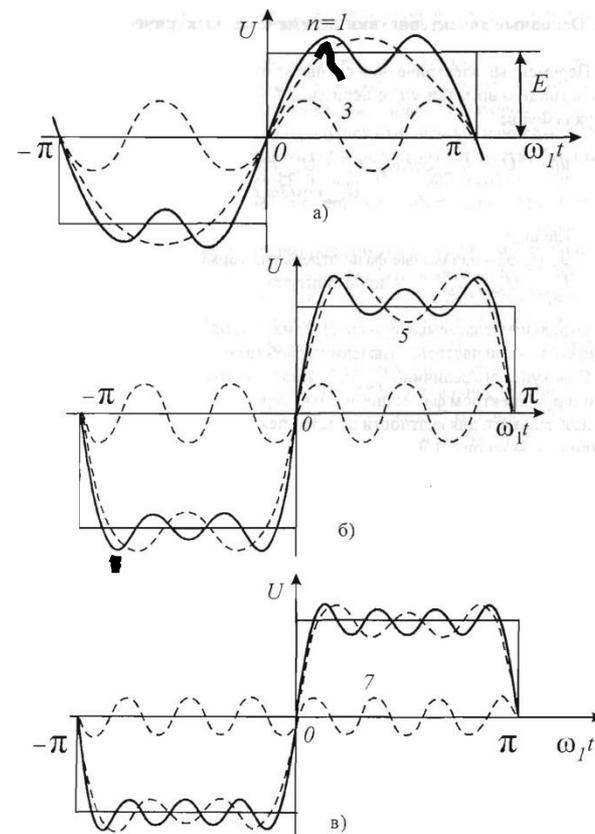
Форма сигналов и графическое изображение спектра:

а) - прямоугольных импульсов, б) - пилообразных импульсов

В общем случае сумма является бесконечным рядом, т. е. спектр сигнала бесконечен. Так как амплитуды гармоник по мере увеличения их номера (угловой частоты  $\omega$ ) убывают, начиная с некоторой гармоники, высокочастотными колебаниями пренебрегают, тем самым, ограничивая спектр сигнала.

Интервал частот, в котором размещается ограниченный спектр, называется **шириной спектра**. Ограничение спектра производят исходя из допустимого искажения сигнала так, чтобы не потерять содержащуюся в нем информацию.

На рис. показано, как формируются прямоугольные импульсы из гармоник.



Методы исследования прохождения сигналов через электронные цепи основываются на основных законах электрических и электромагнитных цепей. Для применения этих законов характеристики электронных устройств линеаризуются, а электронные элементы заменяются эквивалентными схемами по постоянному и переменному току для переменных сигналов и для установившегося или переходного режимов для импульсных сигналов. Эти эквивалентные схемы представляют собой совокупность источников токов, напряжений и пассивных элементов - емкостей, индуктивностей, активных сопротивлений.

Любую электронную схему можно представить в виде электрической схемы и уже к ней применять известные методы, позволяющие оценить процессы в этих эквивалентных схемах, а значит, и в базовых электронных схемах, при воздействии типовых возмущений - гармонического воздействия или скачка напряжения.

**Переходной функцией  $h(t)$**  называется изменение выходной величины во времени при поданном на вход звена единичном возмущении типа ступенчатой функции (скачка) при нулевых начальных условиях.

Переходная функция используется для анализа импульсных сигналов и цепей.

Для оценки характеристик и динамических свойств аналоговых сигналов и формирующих и преобразующих их устройств чаще используют типовое возмущение в виде *единичного гармонического колебания*.

В режиме вынужденных колебаний выходная величина исследуемого при таком возмущении устройства (звена) будет иметь вид

$$x_{\text{ВЫХ}}(\omega t) = K(\omega)e^{j(\omega t - \varphi(\omega))},$$

где  $K(\omega)$  - амплитуда и  $\varphi(\omega)$  - фаза колебаний на выходе устройства.

Таким образом, характеристики электронного устройства могут быть определены по его воздействию на амплитуду и фазу проходящего через него гармонического сигнала. А так как характеристики устройств, преобразующих аналоговые сигналы, линейны или близки к ним, то полученные таким образом характеристики описывают свойства исследуемых цепей и устройств и для многочастотных сигналов.

Для того чтобы определить, насколько изменятся амплитуда и фаза, необходимо выходную величину  $x_{\text{ВЫХ}}(\omega t)$  разделить на  $x_{\text{ВХ}}(\omega t)$ .

Отношение  $W(j\omega) = x_{\text{ВЫХ}}(\omega t)/x_{\text{ВХ}}(\omega t) = K(\omega)e^{-j\varphi(\omega)}$ , представляет собой комплексное число, которое на комплексной плоскости изображается как вектор. Комплексное число  $W(j\omega)$  называют также комплексным коэффициентом усиления. Если воспользоваться геометрической интерпретацией  $W(j\omega)$ , то при изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$  конец вектора опишет кривую. Эту кривую называют **амплитудно-фазовой частотной характеристикой**.

Зависимость модуля  $K(\omega)$  от частоты называют *амплитудной частотной характеристикой* (АЧХ), а зависимость фазы  $\varphi(\omega)$  от частоты - *фазовой частотной характеристикой* (ФЧХ).

Обозначим вещественную часть комплексного числа  $W(j\omega)$  через  $U(j\omega)$  и мнимую часть - через  $V(j\omega)$ :  $W(j\omega) = U(j\omega) + jV(j\omega)$ . Вещественную часть комплексного числа называют вещественной частотной характеристикой, мнимую часть - мнимой частотной характеристикой.

Динамические характеристики электронных устройств как звеньев автоматических систем можно характеризовать также передаточной функцией.

**3. Передаточной функцией** звена называется отношение изображения выходной величины звена к изображению входной величины при нулевых начальных условиях

$$W(s) = x_{\text{ВЫХ}}(s)/x_{\text{ВХ}}(s)$$

Передаточная функция устройства может быть получена из описывающего его эквивалентную схему уравнения, записанного в операционной форме. Например, если уравнение, описывающее эквивалентную схему устройства, имеет вид  $(Ts + 1) U(s) = KV(s)$ , то его передаточная функция  $W(s) = U(s)/V(s) = K/(Ts + 1)$ .

Между передаточной функцией, амплитудно-фазовой частотной характеристикой (комплексным коэффициентом усиления), переходной функцией и дифференциальным уравнением, описывающим работу устройства, существует однозначная зависимость, поскольку они являются различными формами отражения одного и того же физического факта - преобразования воздействий, поступающих на вход устройства. Например, если дифференциальное уравнение звена имеет вид:

$$T \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = Kx_{\text{ВХ}}$$

то операционная форма записи этого уравнения при нулевых начальных условиях получается путем замены оператора дифференцирования  $d/dt$  через комплексную переменную  $s$ :

$$(Ts + 1)x_{\text{ВЫХ}}(s) = Kx_{\text{ВХ}}(s)$$

Если входная величина представляет собой единичный скачок, то ее изображение по Карсону-Лапласу равно единице  $x_{\text{ВХ}}(s) = 1$ , следовательно, изображение переходной функции будет равно передаточной функции  $h(s) = W(s)$ . Для рассматриваемого устройства изображение переходной функции равно  $h(s) = K/(Ts + 1)$ .

Сама переходная функция, как функция времени, будет равна

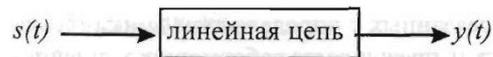
$$h(t) = K(1 - e^{-t/T}).$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика получается из передаточной функции при замене в ней  $s$  на  $j\omega$ :  $W(j\omega) = K/(Tj\omega + 1)$ .

Дифференциальное уравнение и переходная функция в качестве независимой переменной имеют время, передаточная функция - комплексную переменную  $s$ , а амплитудно-фазовая частотная характеристика - угловую частоту  $\omega$ .

*Прохождение сигналов через линейную цепь.* Рассмотрим линейную цепь, на которую воздействует сигнал  $s(t)$ . На выходе возникает реакция - выходной сигнал  $y(t)$  (рис.).

Известно, что при воздействии на линейную цепь гармонического сигнала  $s(t) = S_m \cos(\omega t + \phi_s)$ , на выходе цепи устанавливается сигнал, форма которого тоже гармоническая:  $y(t) = Y_m \cos(\omega t + \phi_y)$ . Гармонический сигнал - единственный сигнал, не изменяющий свою форму при прохождении через линейную электрическую цепь.



Пусть на линейную цепь воздействует сложный негармонический сигнал  $s(t)$ . Форма сложного сигнала при прохождении через цепь будет искажаться. Для расчетов искажений выходного сигнала  $y(t)$  наиболее часто используются спектральные методы и их обобщения. Суть спектрального метода проста. Сложный сигнал с помощью рассмотренных выше спектральных разложений представляется в виде суммы гармонических колебаний. Затем находятся частичные реакции линейной цепи на каждый их гармонических входных сигналов. После этого, в соответствии с принципом суперпозиции результирующий выходной сигнал находится как сумма частичных реакций линейной цепи.

Спектральный метод анализа линейных цепей определяет два простых правила, которыми следует пользоваться при определении характера прохождения сигнала через эти цепи.

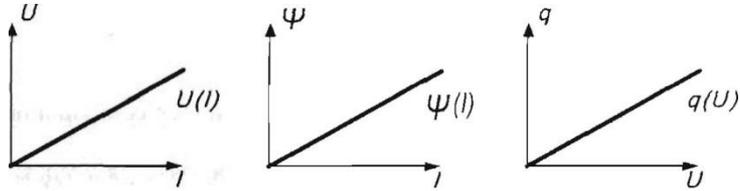
Во-первых, в зависимости от требований к форме выходного сигнала следует сравнить спектр входного сигнала и амплитудно-частотную характеристику цепи. Допустим, что требования к форме выходного сигнала достаточно высоки, тогда форма АЧХ должна быть такой, чтобы без затухания передавать все значимые гармоники входного сигнала.

Во-вторых, в результате сравнения спектра сигнала и АЧХ линейной цепи можно оценить форму выходного сигнала. В качестве примера рассмотрим прохождение прямоугольных импульсов через фильтр нижних частот.

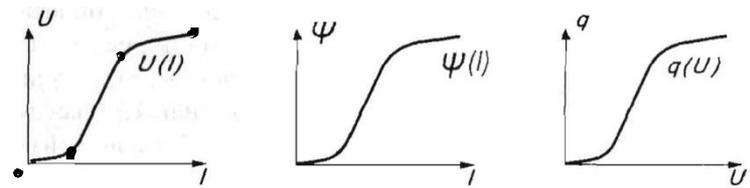
Прямоугольный импульс формируется набором нечетных гармоник, однако за формирование фронта и среза отвечают высокие гармоники, а за формирование вершины импульса - нижние гармоники. При прохождении сигнала через фильтр высокие гармоники подавляются, следовательно, в выходном сигнале уменьшится их амплитуда. Это приведет к тому, что фронты прямоугольных импульсов будут более пологими, а вершины не изменятся.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

## Характеристики линейных элементов

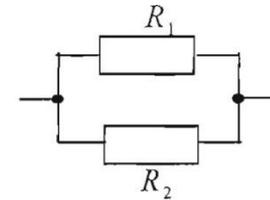
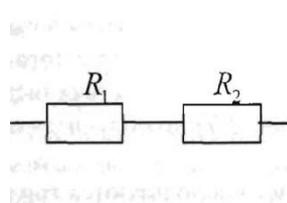
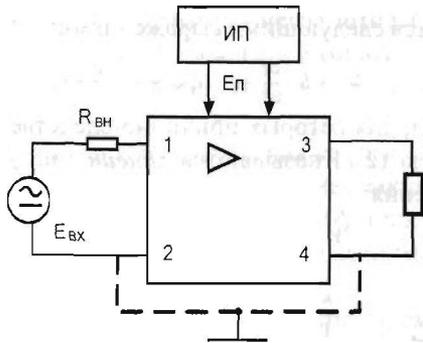


## Характеристики нелинейных элементов



Усилителем называют устройство позволяющее преобразовывать входной сигнал в сигнал большей мощности (тока, напряжения) без существенного искажения его формы. При усилении тока или напряжения одновременно происходит усиление мощности.

## Структурная схема усиления электрических сигналов



## Делитель напряжения Регулируемый делитель напряжения

