

# ТЕМА 9 ЛИНЕЙНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

# КЛАССИФИКАЦИЯ АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Устройства классифицируются в зависимости от выполняемой ими функции обработки сигналов:

- **усиление** (масштабирование) – различного вида усилители напряжения, тока и мощности;
- **фильтрация** – фильтры, пропускающие различные диапазоны частот;
- **преобразование спектра** сигнала по частоте – преобразователи спектра частот входного сигнала в другие участки диапазона частот;
- **модуляция** – модуляторы по амплитуде, частоте, фазе и др. входного сигнала;
- **демодуляция** – демодуляторы (детекторы) сигналов модулированных по амплитуде, частоте, фазе и др.;
- **коррекция** формы и спектра сигнала – корректоры амплитуды и фазы спектральных составляющих сигналов;
- **математические преобразования** сигнала: возведение в квадрат – квадраторы напряжения, тока; интегрирование – интеграторы напряжения; логарифмирование – логарифматоры напряжения; извлечение корня квадратного, дифференцирование и др.

# ИЕРАРХИЯ ПОСТРОЕНИЯ ФУОС

- Иерархия построения функциональных устройств обработки ИС может быть представлена в виде своеобразной пирамиды:



- Физические процессы, связанные с преобразованием сигналов, протекают на всех уровнях “пирамиды”.

# ИЕРАРХИЯ ПОСТРОЕНИЯ ФУОС

- Нижний уровень является **элементной базой**, которая включает транзисторы, диоды, конденсаторы, микросхемы и т. д. Из соединения этих элементов составляются **звенья**, а объединение последних в функционально законченные цепи – **каскады**, такие как автогенератор, преобразователь частоты, модулятор, усилитель мощности, демодулятор и т. д.
- Следующий уровень – **блоки**, например, как блок обработки сигнала, блок усиления мощности СВЧ, блок модем-модулятора и демодулятора сигнала и т. д. Верхний уровень включает функционально законченные **устройства** – радиоприемники, радиопередатчики и т. д., которые работают самостоятельно в составе различных **систем**.
- В случае применения в устройствах только интегральных микросхем обычно нижним уровнем являются блоки.

# ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ФУОС

- Все функциональные устройства обработки сигналов подразделяются на линейные и нелинейные
- **Линейными** называются устройства, параметры которых не зависят от величины входного сигнала  $S_{вх}(t)$ . Передаточные функции таких устройств удовлетворяют условиям **аддитивности** (принцип суперпозиции) и **однородности**:
  - $f[S_1(t) + S_2(t)] = f[S_1(t)] + f[S_2(t)]$
  - $f[CS(t)] = Cf[S(t)]$ .
- Устройства, для которых не выполняются указанные требования, называются **нелинейными**.
- Устройства, характеризующиеся незначительной нелинейностью, или линейностью в определённых пределах изменения значений входного сигнала, называются **квазилинейными**. Практически все реализуемые устройства являются квазилинейными.

# УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

## НАЗНАЧЕНИЕ УУ

- **Усилителем** называется устройство, которое позволяет получить на его выходе тот же сигнал, который подан на его вход, но с большим уровнем мощности. Усилительные устройства широко применяются в технике.
- Усилительные устройства (УУ) предназначены для:
- 1) усиления сигналов до уровней, необходимых для нормальной работы преобразователей сигналов;
- 2) повышения чувствительности и расширения диапазона измерения;
- 3) компенсации затухания сигналов в каналах и трактах передачи, а также в отдельных блоках аппаратуры;
- 4) селективного усиления спектра сигналов;
- 5) выполнения математических операций при обработке сигналов.

# КЛАССИФИКАЦИЯ УУ

**Усилительные устройства классифицируют по ряду признаков.**

- 1) по физическому процессу усиления: электронные, параметрические, магнитные; диэлектрические; квантовые.**
- 2) по характеру и структуре измерительных сигналов различают: аналоговые усилители; усилители импульсных сигналов; индивидуальные, предназначенные для усиления индивидуального измерительного сигнала в заданном диапазоне частот; групповые, предназначенные для усиления групповых сигналов, несущих информацию о нескольких индивидуальных сигналах; линейные, предназначенные для усиления групповых сигналов, передаваемых в линейном спектре частот.**
- 3) по уровню усиливаемого сигнала и характеру его усиления:**
  - усилители малых сигналов или усилители напряжения;**
  - усилители больших сигналов или усилители мощности (тока);**
  - усилители с распределённым усилением.**

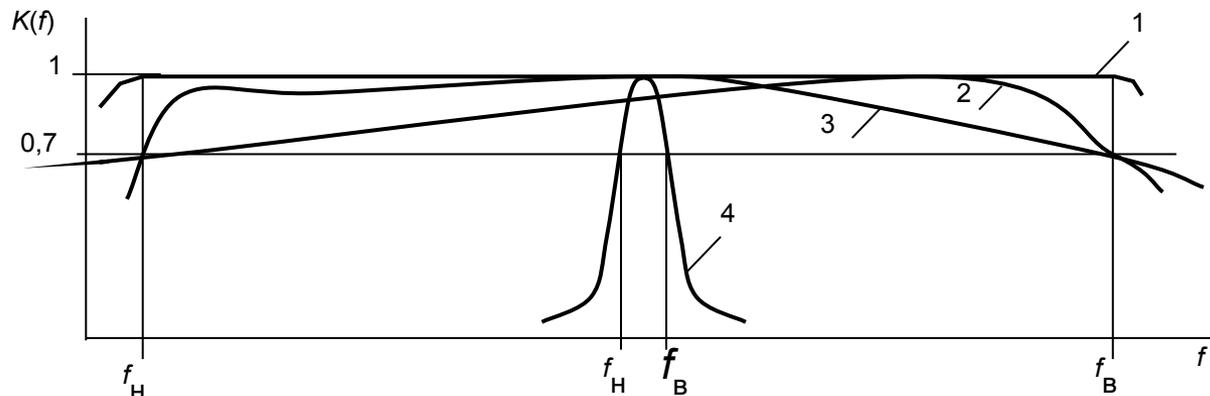
# КЛАССИФИКАЦИЯ УУ

4) по спектру усиливаемых частот сигнала:

- усилители постоянного тока (они усиливают сигналы, у которых нижняя граничная частота спектра  $f_H = 0$ );
- усилители переменного тока (они усиливают сигналы, у которых  $f_H > 0$ ).

5) по виду частотной зависимости коэффициента передачи усилителя:

- усилители с равномерной частотной характеристикой в полосе частот от  $f_H$  до  $f_B$  (кривая 1);
- частотно-зависимые усилители (кривые 2, 3 и 4);
- широкополосные ( $f_B / f_H \gg 1$ , кривые 2, 3);
- узкополосные ( $f_B / f_H \approx 1$ , кривая 4).

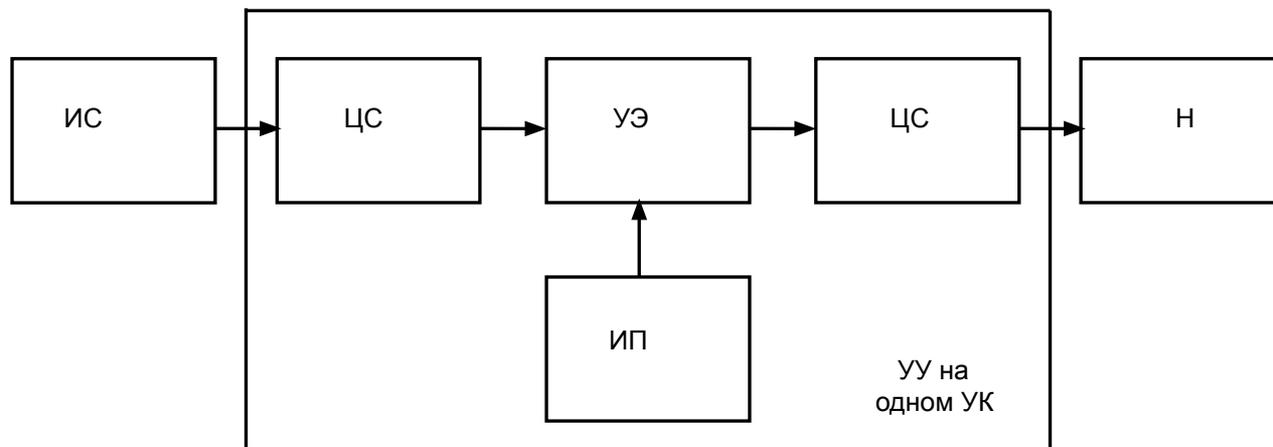


# КЛАССИФИКАЦИЯ УУ

- 6) по применению в составе аппаратуры: входные; выходные; универсальные; осциллографические; измерительные; электрометрические (измерение токов до  $10^{-16} \dots 10^{-18}$  А); селективные; компенсационные; операционные и т. п.
- 7) по типу применяемых усилительных элементов:
- ламповый усилитель (для больших мощностей);
  - транзисторный усилитель (на биполярных и полевых транзисторах);
  - интегральные усилители.
- 8) по конструктивному исполнению различают усилители: на дискретных элементах; на интегральных схемах.
- 9) по типу согласующих цепей связи в многокаскадном УУ:
- с непосредственной связью;
  - с емкостной связью;
  - с трансформаторной связью;
  - со сложными четырёхполюсными цепями связи.

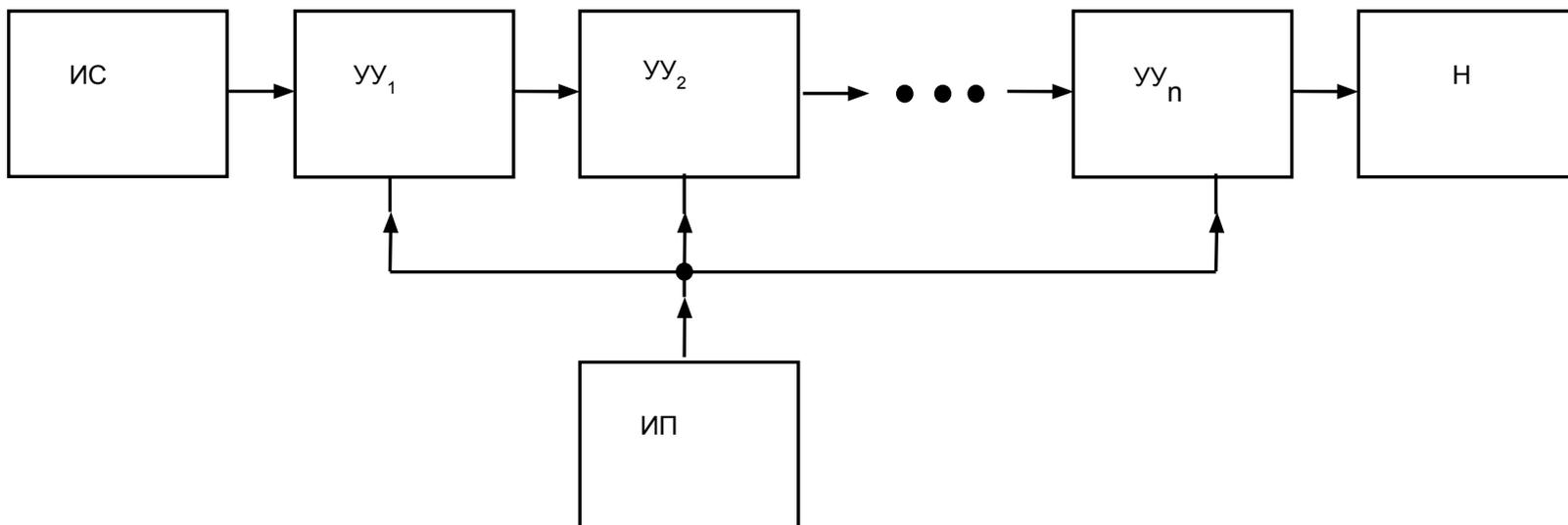
# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

- Усилительным каскадом (УК) называют усилительный элемент (УЭ) и отнесённые к нему элементы связи.
- Основа схемы усилительного каскада - УЭ, который обеспечивает усиление мощности входного сигнала, поступающего от источника сигнала ИС через согласующую входную цепь связи (ЦС). Усиление мощности сигнала происходит **за счёт преобразования мощности, потребляемой от источника питания (ИП)**. Усиленная мощность входного сигнала через выходную ЦС поступает в нагрузку Н.



# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

- Для получения значительного усиления мощности УУ строится по многокаскадной схеме:



# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

## • 1. Входные и выходные данные

- К **входным данным** усилителя относятся: **входное напряжение**  $U_{ВХ}$ , **входной ток**  $I_{ВХ}$ , **входная мощность**  $P_{ВХ}$ , **входное сопротивление**  $Z_{ВХ}$ , а также **ЭДС источника сигнала**  $E_{Г}$  и его **внутреннее (выходное) сопротивление**  $Z_{Г}$ , так как они влияют на показатели усилителя. В общем случае все величины являются **комплексными**, но во многих случаях в рабочей полосе частот  $Z_{ВХ}$  можно считать активным и равным  $R_{ВХ}$ . Тогда

$$U_{ВХ} = I_{ВХ} R_{ВХ}; \quad P_{ВХ} = U_{ВХ} I_{ВХ}; \quad R_{Г} = (E_{Г} - U_{ВХ}) / I_{ВХ}.$$

- К **выходным данным** усилителя относятся: **выходное сопротивление усилителя**  $Z_{ВЫХ}$ , **сопротивление нагрузки**  $Z_{Н}$ , **мощность сигнала, отдаваемая в нагрузку**  $P_{Н}$  (при условии, что коэффициент гармоник не превышает максимально допустимого значения), **напряжение на нагрузке**  $U_{Н}$  и **ток в нагрузке**  $I_{Н}$ .
- Если считать сопротивления  $Z_{Н}$  и  $Z_{ВЫХ}$  активными и равными  $R_{Н}$  и  $R_{ВЫХ}$ , то

$$U_{Н} = I_{Н} R_{Н}; \quad P_{Н} = U_{Н} I_{Н}; \quad R_{ВЫХ} = (U_{ВЫХ.ХХ} - U_{Н}) / I_{Н},$$

где  $U_{ВЫХ.ХХ}$  – напряжение выхода при отключенной нагрузке ( $R_{Н} = \infty$ ).

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

## • 2. Коэффициент усиления

- К этому параметру относят величины, показывающие способность усилителя изменять уровень сигнала:

- по мощности (коэффициент усиления по мощности)

$$K_p = P_H / P_{ВХ};$$

- по напряжению (коэффициент усиления по напряжению)  $|K_u| = U_H / U_{ВХ}$

- по ЭДС (сквозной коэффициент усиления)  $|K_E| = U_H / E_{г}$

- по току (коэффициент усиления по току)  $|K_i| = I_H / I_{ВХ}$

Эти величины **определяются в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале с частотой, равной средней частоте рабочего диапазона.**

Их значения зависят от соотношения  $R_{ВХ}$  и  $R_{г}$ ,  $R_{ВЫХ}$  и  $R_H$ .

Параметры  $K_p$ ,  $K_u$  и  $K_i$  связаны простым соотношением

$$K_p = K_u K_i \text{ или } K_{p,дБ} = 10 \lg K_p = 0,5(K_{u,дБ} + K_{i,дБ}).$$

Рассмотренные параметры характеризуют усилитель или его каскады.

Например, для трёхкаскадного усилителя

$$K_{\text{общ}} = K_1 K_2 K_3 \text{ или } K_{\text{общ,дБ}} = K_{1,дБ} + K_{2,дБ} + K_{3,дБ}.$$

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

- **3. Частотные характеристики**

- **Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики (АЧХ и ФЧХ)** определяют зависимость от частоты комплексного коэффициента усиления гармонических колебаний по модулю и фазе в установившемся режиме.

- Если напряжения  $U_{\text{ВХ}}(j\omega) = U_1 e^{j\phi_1(\omega)}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = U_2 e^{j\phi_2(\omega)}$ , то

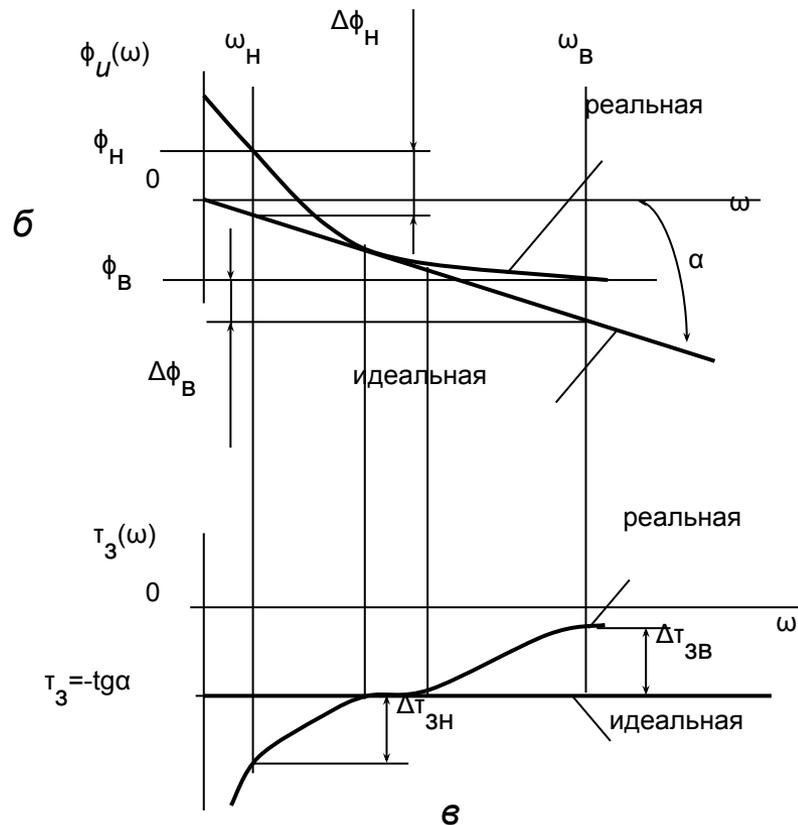
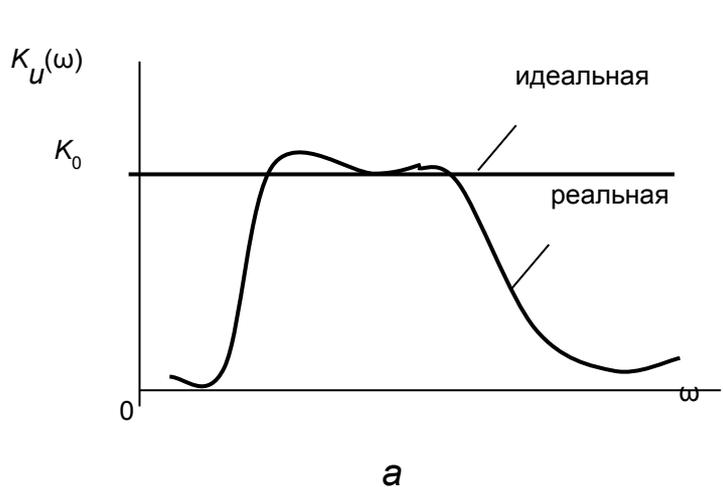
$$K_u(j\omega) = U_{\text{ВЫХ}}(j\omega) / U_{\text{ВХ}}(j\omega) = U_2 e^{j\phi_2(\omega)} / U_1 e^{j\phi_1(\omega)} = \\ = K_u(\omega) e^{j[\phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)]} = K_u(\omega) e^{j\phi_u(\omega)},$$

где  $\phi_u(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega)$ .

- Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты  $K_u(\omega)$  представляет собой АЧХ УУ, а функция  $\phi_u(\omega)$  – его ФЧХ.
- С точки зрения неискажённого усиления идеальной АЧХ является горизонтальная прямая  $K_u(\omega) = K_0 = \text{const}$ .
- Идеальной ФЧХ является прямая  $\phi_u(\omega) = -\omega\tau_3$ , имеющая любой угол наклона  $\alpha$  и проходящая через начало координат, при этом  $\tau_3 = -tg\alpha$  – постоянная величина, характеризующая время задержки усиливаемого сигнала.

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

## • 3. Частотные характеристики



# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

- **3. Частотные характеристики**

- При идеальных АЧХ и ФЧХ любая гармоническая составляющая входного периодического сигнала с амплитудой  $A_k$ , частотой  $\omega_k$  и начальной фазой  $\psi_k$  преобразуется на выходе в гармонический сигнал с амплитудой  $K_0 A_k$ , начальной фазой  $\gamma_k = \psi_k - \omega_k T_3$ . Следовательно, гармонические составляющие будут усилены в  $K_0$  раз без изменения формы и смещены по оси времени в сторону запаздывания на время  $T_3$ . Поэтому выходной сигнал будет иметь форму входного с амплитудой  $K_0 U_{m.вх}$ , задержанного на время  $T_3$ . На практике удобнее оценивать запаздывание гармонических составляющих спектра усиливаемого сигнала характеристикой ГВЗ (Групповое Время Задержки):

$$\tau_3(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}$$

- В реальных условиях АЧХ и ФЧХ имеют вид, отличный от идеальных. АЧХ обычно спадает на низких и высоких частотах, а ФЧХ нелинейная и не проходит через начало координат.
- В усилителях, являющихся минимально фазовыми цепями, существует однозначная связь между АЧХ и ФЧХ.

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

## • 3. Частотные характеристики

- При построении АЧХ и ФЧХ усилителей по оси абсцисс обычно откладывают частоты в логарифмическом масштабе (когда величины частот рабочего диапазона различаются в сотни и тысячи раз). А по оси ординат – отношение коэффициента усиления  $K_u(\omega)$  к коэффициенту усиления  $K_0$  на некоторой средней частоте рабочего диапазона в децибелах (иногда в неперах).
- Результирующая АЧХ, ФЧХ и ГВЗ многокаскадного усилителя соответственно определяются как

$$K_n(\omega)_{\text{дБ}} = \sum_{k=1}^n K_k(\omega)_{\text{дБ}}$$

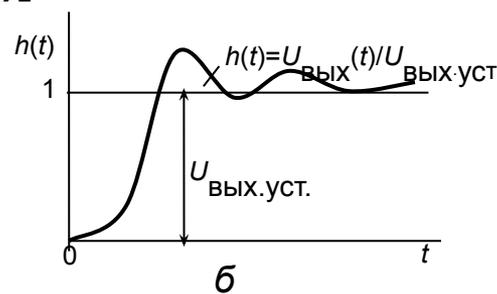
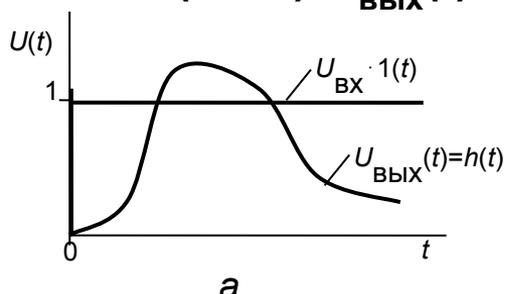
$$\varphi_n(\omega) = \sum_{k=1}^n \varphi_k(\omega)$$

$$\tau_{3n}(\omega) = \sum_{k=1}^n \tau_{3k}(\omega)$$

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

## • 4. Переходная характеристика

- Переходной характеристикой (ПХ) усилителя называют зависимость мгновенного значения выходного напряжения (тока) от времени при мгновенном скачкообразном изменении входного напряжения (тока)  $U_{\text{ВЫХ}}(t) = f[U_{\text{ВХ}} \cdot 1(t)]$ .

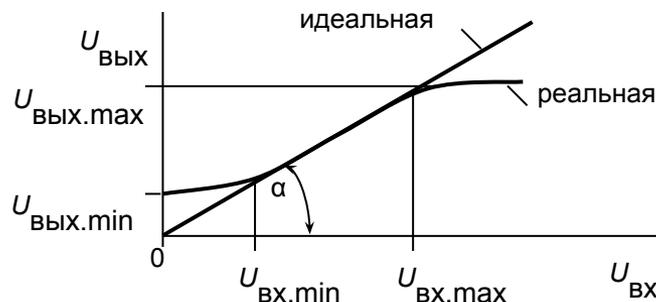


- Для практического использования удобны нормированные ПХ, определяемые как  $h(t) = [U_{\text{ВЫХ}}(t) / U_{\text{ВХ}}] \cdot 1(t)$ , где  $1(t)$  – единичный скачок напряжения.
- Для анализа прохождения импульсов часто используют нормированные ПХ, показывающие изменение во времени отношения  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  к его значению по окончании процесса установления импульса  $U_{\text{ВЫХ.УСТ}}$ . Для неискажённого усиления импульсов ПХ усилителя по форме не должна отличаться от единичного скачка. Так как ЧХ усилителя и его ПХ взаимосвязаны, можно судить о свойствах ЧХ усилителя по его ПХ и наоборот.

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

## • 5. Амплитудная характеристика

- Амплитудная характеристика (АХ) усилителя характеризует зависимость амплитуды напряжения первой гармоники на его выходе от амплитуды входного гармонического напряжения с частотой, обычно равной средней частоте АЧХ.
- Идеальная АХ - прямая, проходящая через начало координат, причём тангенс угла наклона её к оси абсцисс при одинаковом масштабе осей равен коэффициенту усиления  $U U \quad \text{tg}\alpha = K_0$ .



- Реальная АХ усилителей обычно нелинейная в области малых амплитуд  $U_{ВХ.мин}$ , что связано с шумами и фоном, а так же в области больших амплитуд  $U_{ВХ.мах}$ , где проявляются нелинейные свойства элементов схемы. При закороченном входе ( $U_{ВХ} = 0$ ) получаем действующее значение  $U_{ВЫХ.мин}$ , численно равное напряжению собственных шумов и фона усилителя  $U_{ВЫХ.мин} = \sqrt{U_{ш}^2 + U_{ф}^2}$

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

- **6. Динамический диапазон**
- Динамическим диапазоном усилителя называется отношение максимального допустимого уровня входного сигнала к минимальному при заданных критериях качества усиливаемого сигнала (например, когда коэффициент нелинейных искажений не превышает некоторой заданной величины, а отношение уровня сигнала к уровню шумов и помех не ниже некоторой заданной величины):

$$D_{y \text{ дБ}} = 20 \lg \frac{U_{\text{вх. max}}}{U_{\text{вх. min}}}$$

- Динамический диапазон усилителя определяется протяжённостью линейного участка АХ. Он должен быть шире динамического диапазона входного сигнала.

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

- **7. Согласование по входу и выходу**
- Условие, при котором обеспечивается максимальный коэффициент передачи мощности от источника в нагрузку, называется условием согласования и выполняется в случае равенства внутреннего сопротивления источника  $Z_{\text{и}}$  сопротивлению нагрузки  $Z_{\text{н}}$ .
- Согласование по входу означает, что внутреннее сопротивление источника сигнала равно входному сопротивлению устройства  $Z_{\text{и}} = Z_{\text{вх}}$ , а по выходу – равенство выходного сопротивления устройства сопротивлению нагрузки  $Z_{\text{вых}} = Z_{\text{н}}$ . Выполнение этих условий согласования по входу и выходу устройства называют полным согласованием.

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

## • 8. Коэффициент отражения (для длинных линий)

- При включении устройства в тракт передачи на высоких частотах на его входе и выходе возникают отражения сигнала, характеризуемые коэффициентом отражения, который определяется как отношение комплексных амплитуд напряжения (тока) отражённого сигнала к приходящему (такие сигналы можно представить в виде падающей и отраженной электромагнитных волн) и изменяется в пределах от 0 до 1:
- $K_{отр U} = U_{отр} / U_{пад} = (Z_H - Z_B) / (Z_H + Z_B)$ ,
- где  $Z_H$  и  $Z_B$  – соответственно, сопротивление нагрузки и волновое сопротивление линии.
- Обычно  $K_{отр U}$  определяют через коэффициент стоячей волны (КСВ) по напряжению (КСВ<sub>U</sub>, КСВН)

$$КСВ_U = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1 + |U_{отр} / U_{пад}|}{1 - |U_{отр} / U_{пад}|}$$

где  $U_{max}$  и  $U_{min}$  – соответственно, максимальное и минимальное напряжение стоячей волны,

или обратный ему коэффициент бегущей волны КБВ = 1 / КСВ:

$$|K_{отр U}| = (КСВ_U - 1) / (КСВ_U + 1).$$

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

- **8. Коэффициент полезного действия**

- Коэффициент полезного действия (КПД) обозначается  $\eta$  и равен отношению мощности усиленного сигнала переменного тока  $P_{\sim}$ , которая определяется в выходной цепи усилительного элемента (на выходе ЦС), к мощности, которая потребляется от источника питания выходным (оконечным) каскадом  $P_{= \text{ок}}$  или всеми каскадами усилителя  $P_{=}$ . В первом случае говорят о КПД оконечного каскада, во втором – о КПД усилителя в целом.

$$\eta_{\text{ок}} = P_{\sim} / P_{= \text{ок}}, \quad \eta = P_{\sim} / P_{=}.$$

- Очевидно, что  $\eta_{\text{ок}} > \eta$ .

- **9. Параметры, характеризующие искажения сигнала**

- Это предмет следующей темы.