10.4. Усилители электрических сигналов

10.4.1. Классификация усилителей

Усилителями называются устройства, предназначенные для увеличения значений параметров электрических сигналов за счёт энергии включенного источника питания.

Усилитель представляет собой в общем случае последовательность каскадов усиления (бывают и однокаскадные усилители), соединённых между собой прямыми связями. Каскад усиления – ступень усилителя, содержащая один или несколько усилительных элементов, цепи нагрузки и связи с предыдущими или последующими ступенями. В качестве усилительных элементов обычно используются электронные лампы или транзисторы (биполярные или полевые).

В настоящее время усилительная техника основана на широком внедрении усилителей в интегральном исполнении, поэтому актуальным становится не разработка самих усилителей, а их применение для реализации различных функциональных узлов систем автоматики, управления и измерения.

Различные усилители применяются для преимущественного усиления значений тех или иных параметров сигналов. По этому признаку они делятся на [1, 5, 11]:

- усилители напряжения;
- тока;
- мощности.

По диапазону усиливаемых частот различают:

- усилители медленно изменяющихся напряжений и токов или усилители постоянного тока (рис. 10.45, *а*);
- усилители низких частот (рис. 10.45, *б*);
- усилители высоких частот (рис. 10.45, *в*);
- широкополосные усилители (рис. 10.45, *г*);
- узкополосные усилители (рис. 10.45, *д*).

К основным параметрам усилителей относятся:

- напряжение питания *Uп*;
- номинальное входное напряжение *Uвх*;
- полоса усиливаемых частот (*полоса пропускания*);
- коэффициенты усиления по напряжению *Ки*, току *Кi* или мощности *Кр*;
- входное и выходное сопротивления.

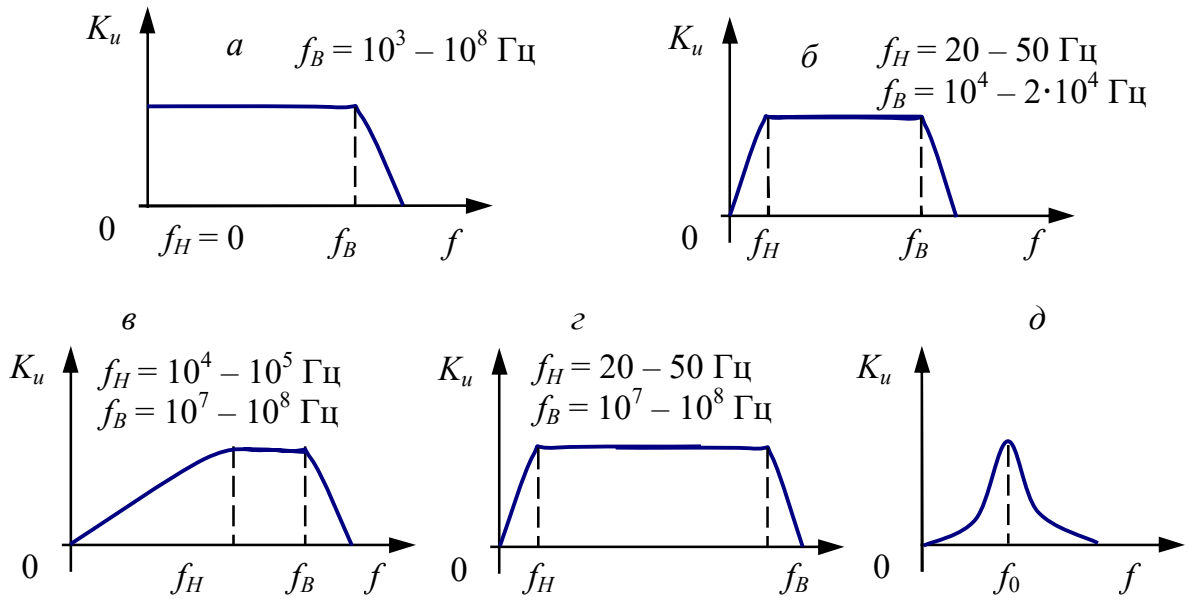


Рис. 10.45. Амплитудно-частотные характеристики усилителей:
а – постоянного тока; *б* – низкочастотного; *в* – высокочастотного;
г – широкополосного; *д* – узкополосного

Возможны линейный и нелинейный режимы работы усилителя. В усилителях с практически линейным режимом работы получается минимальное искажение формы усиленного сигнала, который всегда можно представить совокупностью гармоник различной частоты. Искажение будет минимальным, если без искажения будут усиливаться все гармонические составляющие.

В усилителях с нелинейным режимом работы при увеличении значения напряжения на входе больше некоторого граничного уровня изменение напряжения на выходе усилителя практически отсутствует. Такие усилители применяются главным образом в устройствах импульсной техники, в том числе логических.

Зависимость коэффициента усиления от частоты $K_u(f)$ – амплитудная частотная характеристика (АЧХ) и зависимость угла сдвига фаз выходного и входного сигналов от частоты $\varphi(f)$ – фазовая частотная характеристика (ФЧХ) характеризуют свойство усилителей усиливать гармонические сигналы. Коэффициент усиления K_u и частота входного сигнала f обычно представляются в логарифмическом масштабе.

Логарифмические частотные характеристики – АЧХ и ФЧХ, представленные в логарифмическом масштабе (рис. 10.46).

ЛАХ – $K_{дБ} = f(\lg f)$, ЛФХ – $\varphi = f(\lg f)$.

Ордината ЛАХ $K_{дБ}$ измеряется в ***децибелах*** [дБ].

Абсцисса ЛАХ и ЛФХ lg$f$ измеряется в ***декадах*** [дек].

Децибел – логарифмическая единица уровней и усилений.

1 Б = 10 дБ – это увеличение мощности сигнала в 10 раз.

2 Б = 20 дБ – это увеличение мощности сигнала в 100 раз;

3 Б = 30 дБ – это увеличение мощности сигнала в 1000 раз и т.д.

Параметры $K_{дБ}$ и lgω определяются следующим образом:

$$K_{дБ} = 20 \cdot \lg K_u; \qquad (10.52)$$

$$\lg f = b, \text{ где } f = 10^b. \qquad (10.53)$$

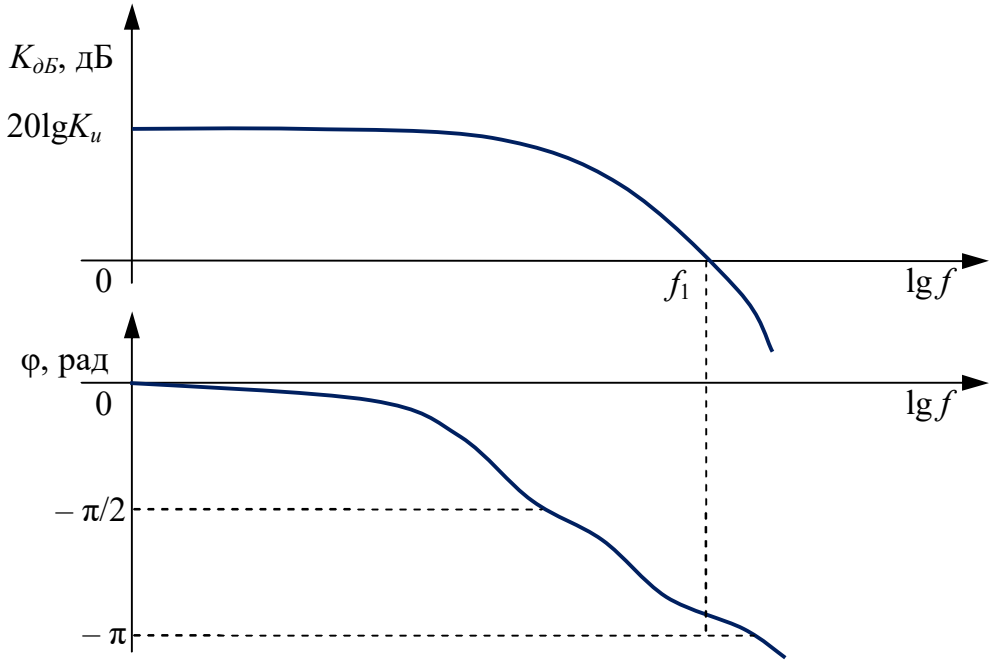
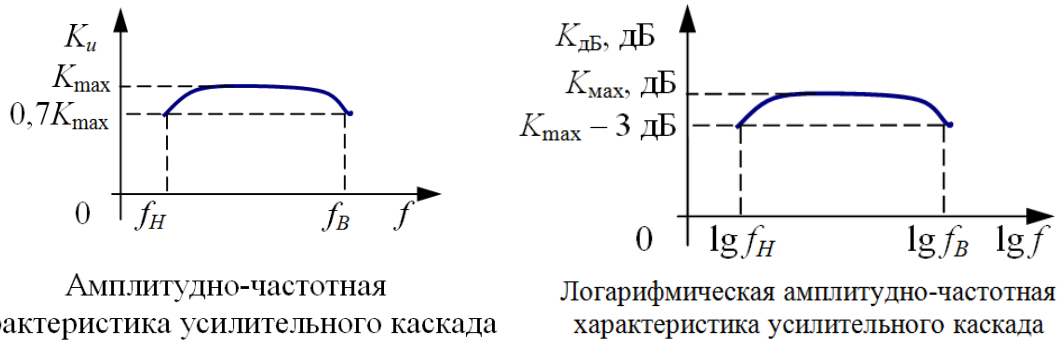


Рис. 10.46. Логарифмические частотные характеристики усилителя

По виду АЧХ усилителя можно определить его тип (усилитель низких частот или широкополостный). Частоты f_H и f_B, определяемые при коэффициенте усиления $K_{max}/\sqrt{2}$ или 0,7 K_u определяют диапазон усиливаемых частот (*полосу пропускания*) усилителя.



Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада

Рис. 10.47. Определение диапазона усиливаемых частот (полосы пропускания)

10.4.2. Усилительные каскады на биполярных транзисторах

Рассмотрим принцип усиления с помощью транзистора. На рис.10.48, *а* изображена схема усилительного каскада с транзистором типа *n-p-n*. Принято данную схему называть схемой с общим эмиттером, так как эмиттер является общей точкой для входа и выхода схемы. Для полноты понимания изобразим эквивалентную схему замещения данного усилительного каскада (рис. 10.48, *б*).

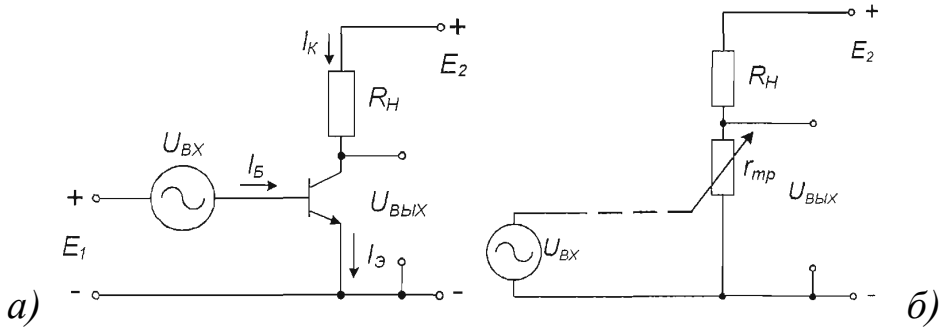


Рис. 10.48. Схема усилительного каскада с транзистором типа *n-p-n*: *а* – принципиальная; *б* – эквивалентная

Входное напряжение U_{BX} которое нужно усилить, подается от источника колебаний на участок база – эмиттер. На базу подано также положительное смещение от источника E_1, являющееся прямым напряжением для эмиттерного перехода. При этом в цепи базы протекает некоторый ток. Цепь коллектора питается от источника E_2. Для получения усиленного выходного напряжения в эту цепь включена нагрузка R_H.

Напряжение источника E_2 делится между сопротивлением нагрузки R_H и сопротивлением транзистора $r_{тр}$ постоянному току коллектора. Это сопротивление приблизительно равно сопротивлению коллекторного перехода r_{KO} для постоянного тока.

Если во входную цепь включается источник колебаний, то при изменении его напряжения меняется ток эмиттера, а, следовательно, сопротивление коллекторного перехода r_{KO}. Тогда напряжение источника E_2 будет перераспределяться между R_H и $r_{тр}$. При этом переменное напряжение на резисторе нагрузки может быть получено в десятки раз большим, чем входное переменное напряжение. Изменения тока коллектора почти равны изменениям тока эмиттера и во много раз больше изменений тока базы. Поэтому в рассматриваемой схеме получается значительное усиление тока, напряжения и мощности.

Временные диаграммы напряжений и токов транзистора изображены на рисунке 10.49. Следует обратить внимание, что напряжение $U_{КЭ}$ инвертировано по фазе относительно входного сигнала $U_{ВХ}$.

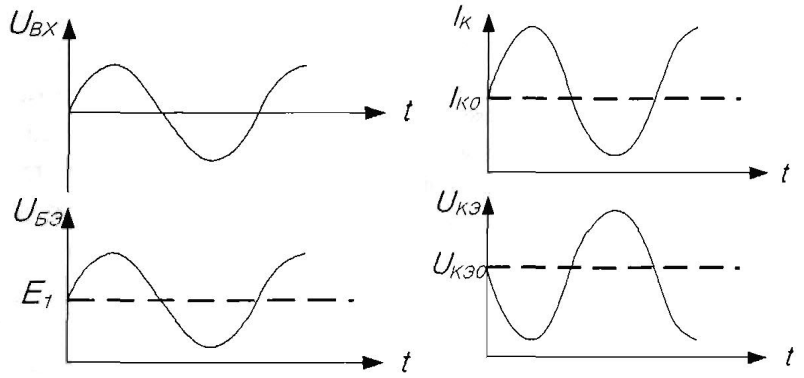


Рис. 10.49. Временные диаграммы напряжений и токов транзистора

Рассмотрим принцип работы типового усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 10. 50) [11, 14].

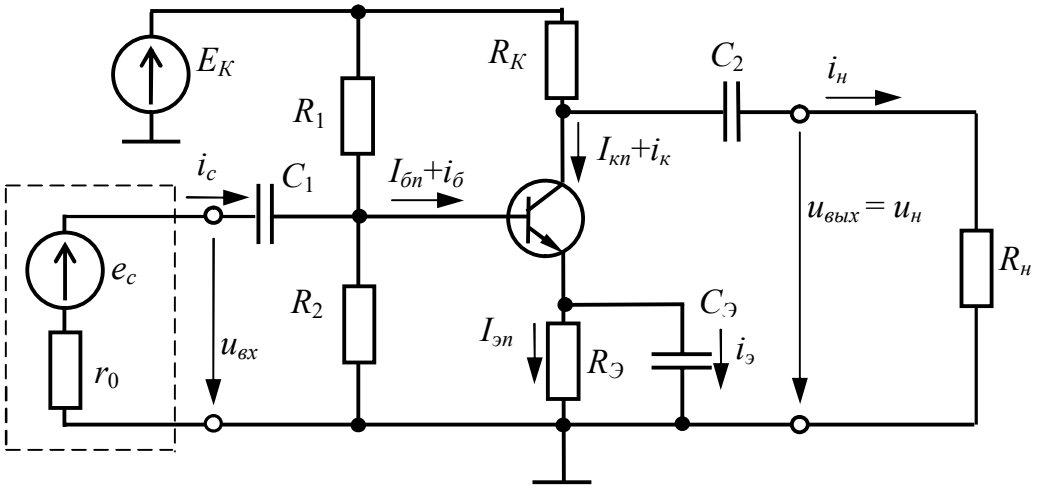


Рис. 10.50. Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Источник усиливаемого сигнала, показанный внутри штриховой линии, представляет собой источник с внутренним сопротивлением r_0 и ЭДС e_c. Конденсаторы большой ёмкости C_1 и C_2 отделяют цепь постоянного тока (цепь питания) от цепи источника сигнала и цепи приёмника с сопротивлением нагрузки $R_н$. Резисторы R_1, R_2, R_K в схеме обеспечивают необходимые значения постоянных напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах при питании всех цепей транзистора от одного общего источника питания E_K. Резистор $R_Э$ обеспе-

чивает температурную стабилизацию рабочей точки. С ростом температуры постоянная составляющая тока эмиттера $I_{эп}$ возрастает, вследствие чего увеличивается падение напряжения $R_Э \cdot I_{эп}$ на резисторе $R_Э$, при этом потенциал эмиттера относительно базы снижается, что уменьшает постоянную составляющую тока базы $I_{бп}$ и ограничивает степень нарастания тока покоя в цепи коллектора. Для устранения этого воздействия при прохождении по цепям транзистора переменных составляющих резистор $R_Э$ шунтируется конденсатором $C_Э$.

При изменении входного сигнала по синусоидальному закону:

- $R_{вх}=h_{11}$ – входное сопротивление (1–10 кОм);
- $R_{вых}=R_к$ – выходное сопротивление (1–100 кОм).

Коэффициент усиления по напряжению в режиме холостого хода $K_u = \frac{\dot{U}_н}{\dot{U}_c}$; $K_u = -(1–100)$.*

Коэффициент усиления по току $K_i = \frac{\dot{I}_н}{I_б}$; $K_i = -(15–80)$.*

Коэффициент усиления по мощности $K_p = \frac{P_н}{P_c} = K_u \cdot K_i$; $K_p = (0{,}2–5) \cdot 10^3$

* Фазы напряжения и тока на выходе усилительного каскада противоположны по отношению к фазам напряжения и тока на входе.

Усилители содержат комбинации активных и реактивных элементов, поэтому модуль коэффициента усиления и разность фазовых углов на выходе и входе усилителя являются частотно-зависимыми.

Одним из важнейших показателей, характеризующих свойства усилителей, является его комплексный коэффициент усиления, который в общем случае можно представить как отношение комплексного напряжения на выходе усилителя к комплексному напряжению на его входе:

$$\underline{K}_u = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{U_{вых} e^{j\psi_{вых}}}{U_{вх} e^{j\psi_{вх}}} = K_u e^{j(\psi_{вых} - \psi_{вх})} = K_u e^{j\varphi}, \qquad (10.52)$$

где K_u – модуль коэффициента усиления усилителя; φ – разность фазовых углов выходного и входного сигналов.

Особенности работы усилителя в области низких, средних и высоких частот могут быть установлены при анализе этой характеристики с использованием схемы замещения усилительного каскада с общим эмиттером (рис. 10.48).

При анализе частотной характеристики усилительного каскада в области средних частот ($\omega_H < \omega < \omega_B$) в эквивалентной схеме можно не учитывать внешние и внутренние ёмкости, а рассматривать эквивалентную схему усилительного каскада как частотно-независимую.

По схеме замещения усилительного каскада для переменных составляющих рассчитываются его основные параметры: коэффициенты усиления напряжении, тока, мощности, а также входное и выходное сопротивления. Выходное сопротивление определяется в режиме холостого хода (при отключенном приёмнике $R_н$).

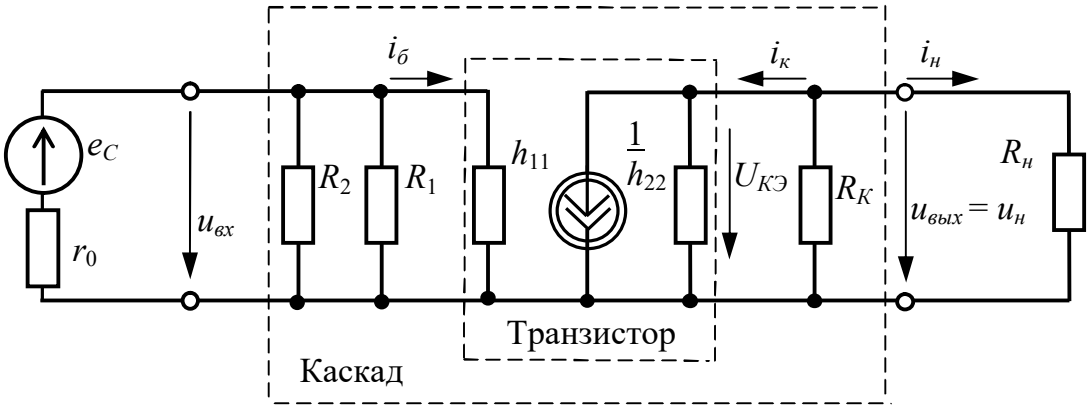


Рис. 10.48. Схема замещения усилительного каскада с общим эмиттером

Коэффициенты усиления:

- по току

$$K_i = \frac{i_{вых}}{i_{вх}} = \frac{h_{21}}{1 + h_{22}R_н}; \qquad (10.53)$$

- по напряжению

$$K_u = \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = \frac{h_{21}R_н}{h_{11}(1 + h_{22}R_н) - h_{12}h_{21}R_н}; \qquad (10.54)$$

- по мощности

$$K_p = K_i K_u. \qquad (10.55)$$

Сопротивления:

- входное

$$R_{вх} = \frac{h_{11}\left(h_{22} + 1/R_н\right) - h_{12}h_{21}}{h_{22} + 1/R_н}; \qquad (10.56)$$

- выходное

$$R_{вых} = \frac{h_{11} + r_0}{h_{22}\left(h_{11} + r_0\right) - h_{12}h_{21}}. \qquad (10.57)$$

Вместо биполярных транзисторов в усилителях можно использовать полевые транзисторы. Чаще других встречается схема включения полевого транзистора с общим истоком, главное достоинство которой – большое входное сопротивление. Общим недостатком усилителей на полевых транзисторах по сравнению с усилителями на биполярных транзисторах является их меньший коэффициент усиления.

10.4.3. Операционные усилители

На современном этапе развития схемотехники при проектировании электронных устройств используются не только дискретные элементы (транзисторы, диоды, резисторы и т.п.), но и законченные функциональные узлы, выполненные в виде унифицированных интегральных схем. Это позволяет значительно улучшить практически все показатели аппаратуры, существенно удешевить и сократить сроки её проектирования. В связи с этим широчайшее распространение среди устройств аналоговой и цифровой электроники нашли *операционные усилители*. Применение ОУ в электронике чрезвычайно широко: усилители, преобразователи, решающие аналоговые устройства и т.д.

Операционный усилитель (ОУ) – это высококачественный усилитель постоянного тока, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами при работе в схеме с отрицательной обратной связью (ОС). При этом под аналоговой величиной подразумевается непрерывно изменяющееся напряжение или ток [4].

ОУ получили такое название, так как ранее использовались исключительно в аналоговых вычислительных устройствах для выполнения математических операций суммирования и интегрирования, хотя в настоящее время их функционал заметно расширился. В настоящее время ОУ выполняются, как правило, в виде интегральных микросхем: отечественные серии К140, К544, К553, КР1040УД, КР1435 и др. и импортные серии AD8041, OP275, LM339 и др.

ОУ обладают широкой полосой пропускания переменного напряжения, непосредственной связью между каскадами (т.е. без разделительных конденсаторов), большим коэффициентом усиления напряжения, высоким входным и малым выходным сопротивлениями, а также низким уровнем шума при хорошей температурной стабильности.

По принципу действия ОУ сходен с обычным транзисторным усилителем. Как и обычный усилитель, он предназначен для усиления напряжения или мощности входного сигнала. Если свойства и параметры обычного усилителя полностью определены его внутренней схемой, то свойства и параметры ОУ определяются преимущественно параметрами цепи ОС, а, благодаря огромному входному и ничтожному выходному сопротивлению, его внутренняя электрическая цепь не влияет на работу внешних участков цепи устройства.

Изображают ОУ на принципиальных схемах по-разному. Широко распространено в отечественной и зарубежной технической литературе изображение ОУ в виде равнобедренного треугольника (рис. 10.49, *а*).

Согласно ГОСТ 2.759–82 «Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники» ОУ выполняют в виде прямоугольника (рис. 10.49, *б*), который может содержать дополнительные поля, расположенные по обе стороны от основного (рис. 10.49, *в*).

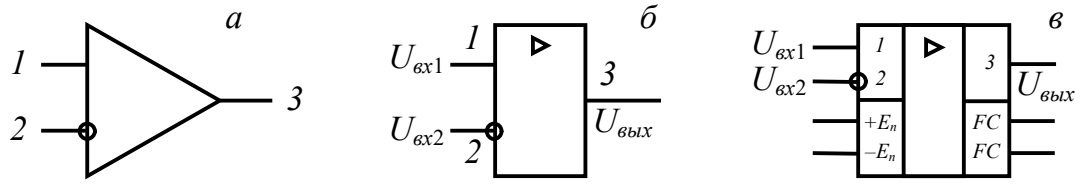


Рис. 10.49. Условно-графические обозначения операционного усилителя: *а* – упрощенное изображение; *б* – по ГОСТу; *в* – по ГОСТу с полями

Большинство ОУ имеют один несимметричный выход *3* и два входа *1* и *2*, симметричных по отношению к общему проводу. Прямой вход *1* еще называют *неинвертирующим*, так как фаза выходного сигнала совпадает с фазой сигнала, поданного на этот вход. Другой вход *2* называют *инвертирующим*, так как фаза выходного сигнала сдвинута на 180° относительно входного сигнала. Его обозначают кружком в месте присоединения к ОУ.

Линии питания зачастую не показывают на схемах, но подразумевают. Для того чтобы обеспечить возможность работы ОУ как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, требуется двухполярное питающее напряжение (±6,3...±15) В. Для этого необходимо предусмотреть два источника постоянного напряжения, которые подключаются к соответствующим выводам ОУ: $+E_п$, $-E_п$. Если питающих напряжений несколько, их условно нумеруют и указывают каждое у своего вывода в дополнительном поле.

Входной каскад устройства выполняется в виде *дифференциального усилителя*, поэтому он имеет два входа и реагирует на разность приложенных к ним напряжений, т. е. на дифференциальный сигнал. Поэтому входы оказывают на выходное напряжение равное в количественном отношении, но противоположное по знаку влияние. Если к входам приложены *синфазные сигналы* – одинаковые по величине и фазе относительно общего провода, то их влияние будет взаимно скомпенсировано, и на входе и выходе будет нулевой потенциал, благодаря чему параметры ОУ мало чувствительны к изменениям напряжения питания, температуры и других внешних факторов. Напряжение на выходе ОУ должно быть лишь в том случае, когда на его входах действуют различные по уровню и фазе сигналы.

Выходное напряжение, измеряемое относительно общего провода, пропорционально разности входных сигналов, называемой дифференциальным сигналом:

$$U_{диф} = U_{вх1} - U_{вх2}. \qquad (10.58)$$

Для увеличения прочности, защиты от внешних воздействий и механических повреждений каждый интегральный ОУ, как и любая ИС, покрывается лаком и монтируется в защитном корпусе. Наибольшее распространение на сегодняшний день нашли металлические (металлокерамические) (рис. 10.50, *а*) и пластиковые корпуса ОУ. Среди пластиковых корпусов можно выделить DIP- и SIP-корпуса для разъемного монтажа (рис. 10.50, *б*) и SOP-корпуса для поверхностного спаечного монтажа (рис. 10.50, *в*). Такие корпуса могут содержать 2, 4 и более ОУ в одной интегральной схеме.

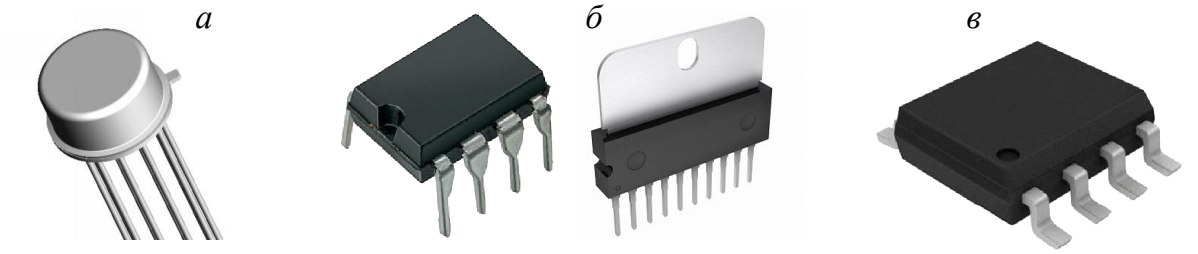


Рис. 10.50. Корпуса операционных усилителей

Современные интегральные ОУ имеют структуру (рис. 10.51), включающую в себя дифференциальный усилитель *ДУ*, усилитель напряжения *УН*, усилитель амплитуды *УА* и выходной эмиттерный повторитель *ЭП* [4].

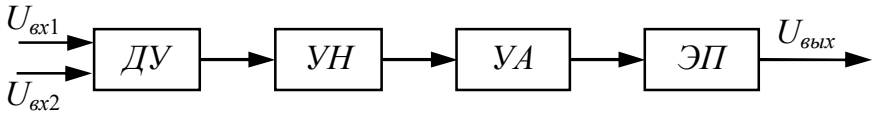


Рис. 10.51. Структурная схема операционного усилителя

Первый каскад ОУ – дифференциальный с эмиттерной связью и резисторной нагрузкой, необходимой для уменьшения дрейфа нуля, подавления синфазной помехи, увеличения входного сопротивления и усиления входного дифференциального сигнала.

Второй каскад – усилитель напряжения – обеспечивает основное усиление входного дифференциального сигнала по напряжению и включает в себя специальную схему сдвига потенциала.

В третьем каскаде – усилителе амплитуды – обычно совмещаются схемы усиления сигнала, схемы сдвига уровня и формирования выходного двухполярного неискаженного сигнала. Здесь закладывается основной коэффициент усиления ОУ.

Как правило, все схемы ОУ заканчиваются эмиттерными повторителями, которые определяют нагрузочную способность ОУ и не участвуют в формировании его коэффициента усиления.

Параметры и характеристики операционных усилителей

Основными параметрами ОУ являются:

- коэффициент усиления $K_{диф}$ (10^5 – 10^6);
- коэффициент подавления $K_{сф}$ (10^4 – 10^6);
- входное сопротивление $R_{вх}$ (10^4 – 10^8) Ом;
- выходное сопротивление $R_{вых}$ (10 – 100) Ом;
- входное напряжение смещения нуля $U_{см}$ (10 – 50 мВ);
- частота единичного усиления f_1, при которой $K_{диф} = 1$ (до 10^8 Гц);
- скорость нарастания выходного напряжения v (0,1 – 100 В/мкс) от $U_{вых} = 0$ до $U_{вых} = U_{вых.\max}$;
- время установления выходного напряжения $t_{уст}$ (0,05 – 2 мкс) от $U_{вых} = 0$ до $U_{вых} = U_{вых.\max}$.

Коэффициент усиления дифференциального сигнала $K_{диф}$ является основным параметром ОУ на очень низкой частоте, определяется отношением выходного напряжения $U_{вых}$ ОУ без ОС в режиме холостого хода к дифференциальному сигналу $U_{диф}$. Значения $K_{диф}$ приводятся либо в относительных единицах, либо в децибелах в форме $20\lg K_{диф}$ [4].

Влияние синфазного сигнала при малых его значениях на работу ОУ характеризуется *коэффициентом подавления синфазного сигнала* $K_{сф}$, который определяется отношением выходного напряжения $U_{вых}$ ОУ без ОС в режиме холостого хода к входному напряжению $U_{вх}$ при подаче на оба входа одинаковых напряжений. Поскольку синфазный сигнал схемой ОУ должен быть максимально ослаблен, то $K_{сф}$ имеет очень большое значение.

Входное сопротивление $R_{вх}$. В зависимости от способа подачи входного сигнала в ОУ с дифференциальными входами различают *дифференциальное входное сопротивление* и *входное сопротивление для синфазных сигналов*. Дифференциальное входное сопротивление, т. е. сопротивление ОУ для входного сигнала, разность потенциалов которого приложена между дифференциальными входами ОУ, определяется величиной сопротивления между этими входами. Входное сопротивление для синфазных сигналов обычно очень велико.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ – это сопротивление ОУ, измеренное со стороны подключения нагрузки. Величина выходного сопротивления определяет максимальную силу выходного тока независимо от вида нагрузки. Этот параметр особенно важен для ОУ с разомкнутым контуром обратной связи, например для компараторов.

У реального ОУ невозможно обеспечить полную симметрию схемы дифференциального каскада, поэтому при равенстве входных сигналов $U_{вх1} = U_{вх2}$ на выходе $U_{вых} \neq 0$. Входное напряжение смещения нуля $U_{см}$ определяется величиной напряжения, приложенного между входами усилителя, необходимого для приведения напряжения на выходе ОУ к нулю. Основную долю этого напряжения составляет разность напряжений база-эмиттер входных транзисторов дифференциального каскада. Напряжение смещения зависит от температуры и напряжения источников питания.

Амплитудные (*передаточные*) *характеристики* ОУ по постоянному току – это зависимости постоянного выходного напряжения $U_{вых}$ в режиме холостого хода от дифференциального сигнала $U_{диф}$ при подаче напряжения на неинвертирующий *1* и инвертирующий *2* входы ОУ (рис. 10.52).

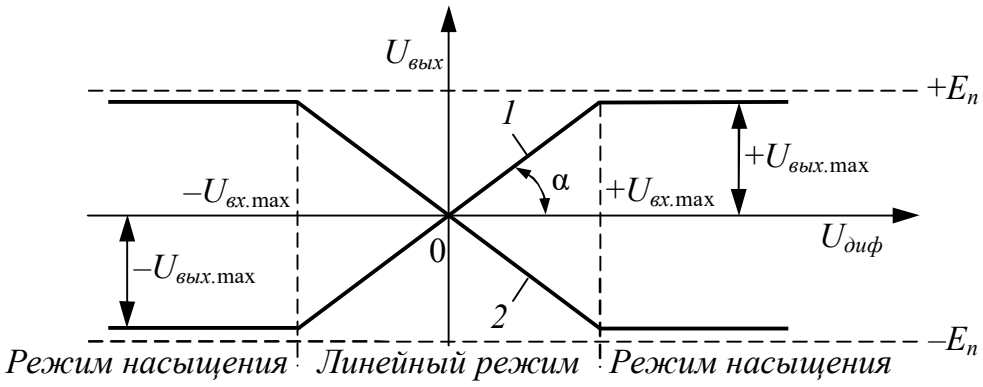


Рис. 10.52. Амплитудные характеристики операционного усилителя

При отсутствии ОС тангенс угла наклона характеристик α в линейном режиме усиления (от $-U_{вх.\max}$ до $+U_{вх.\max}$) равен коэффициенту усиления $K_{диф}$ ОУ. Режимам насыщения выходного каскада ОУ соответствуют горизонтальные участки характеристик (от $-\infty$ до $-U_{вх.\max}$ и от $+U_{вх.\max}$ до $+\infty$), где максимальное напряжение $\pm U_{вых.\max}$ близко к напряжению источников питания $\pm E_n$.

Динамические свойства ОУ при работе с переменным напряжением описывают частотные характеристики. В области высоких частот при подаче на вход реального ОУ синусоидального сигнала опре-

деленной амплитуды и фазы на выходе получается также синусоидальный сигнал, но с другими амплитудой и фазой.

Амплитудная частотная характеристика (*АЧХ*) ОУ – это зависимость коэффициента усиления дифференциального сигнала $K_{диф}$ от частоты входного сигнала f. *Фазовая частотная характеристика* (*ФЧХ*) – зависимость угла сдвига по фазе φ сигнала на выходе ОУ относительно входа от частоты входного сигнала f. Коэффициент усиления $K_{диф}$ и частота входного сигнала f обычно представляются в логарифмическом масштабе (рис. 10.53).

Вследствие наличия паразитных ёмкостей и многокаскадной структуры ОУ по своим свойствам аналогичен фильтру нижних частот высокого порядка, т.е. с увеличением частоты сигнала уменьшается коэффициент усиления $K_{диф}$ и увеличивается сдвиг по фазе φ.

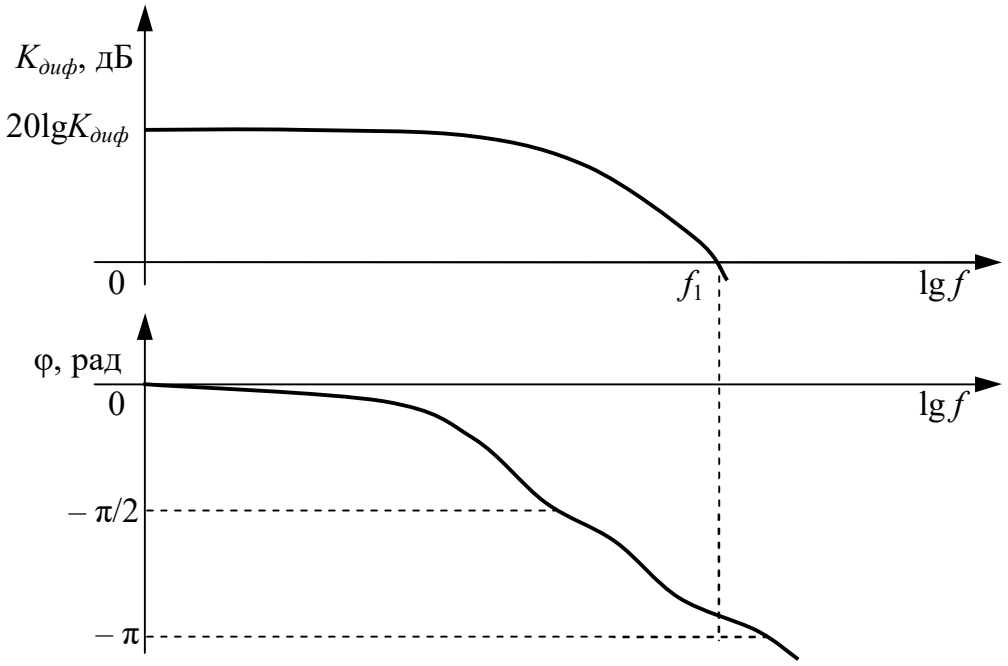


Рис. 10.53. Частотные характеристики операционного усилителя

С ростом частоты коэффициент усиления падает и график на частоте f_1 пересекает ось абсцисс (0 дБ), что соответствует $K_{диф} = 1$. Эта частота называется *частотой единичного усиления* (*частотой среза*) и определяет активную *полосу пропускания*, максимально реализуемую для данного типа ОУ. Характерные значения f_1 для ОУ общего применения 1 МГц, для быстродействующих – 10 – 15 МГц.

Для устойчивой работы ОУ необходимо, чтобы его фазовый сдвиг на частотах $f \le f_1$ был меньше – π (180°). Величина $\Delta\varphi = 180° - \varphi(f_1)$ называется *запасом по фазе*. Обычно достаточно запаса по фазе, рав-

ного 45°. Это значит, что на частоте единичного усиления f_1 фазовый сдвиг не должен превышать φ = 180° – 45° = 135°. В случае $\varphi(f_1) \geq 180°$ могут возникнуть условия баланса амплитуд и баланса фаз и на выходе ОУ возникнут автоколебания. Повышение устойчивости ОУ обеспечивается цепями частотной коррекции, действие которых сводится к уменьшению фазового сдвига на верхних частотах.

Схемы включения операционных усилителей

Большое значение коэффициента усиления по напряжению позволяет использовать глубокую отрицательную ОС для создания на основе ОУ аналоговых устройств различного функционального назначения. *Отрицательной обратной связью* принято называть участок внешней электрической цепи (обвязки) ОУ, соединяющей выход ОУ с одним из его инвертирующим входом [4].

В зависимости от того, на какой вход ОУ подаётся полезный сигнал, различают инвертирующее, неинвертирующее и дифференциальное включения ОУ.

Инвертирующее включение является одной из основных схем включения ОУ. В этом случае сигнал $U_{вх}$ подаётся на инвертирующий вход ОУ, а неинвертирующий вход «зануляется» к общему проводу через резистор R_2 или напрямую (рис. 10.54) [4].

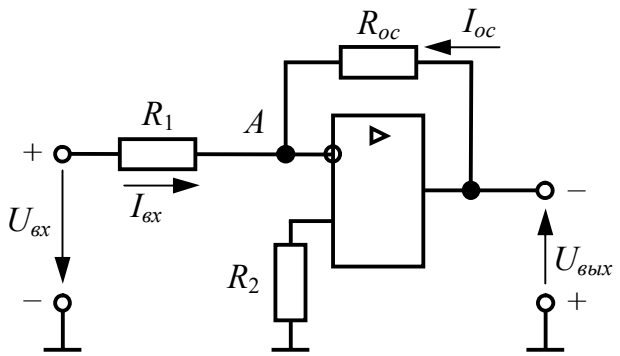


Рис. 10.54. Инвертирующее включение операционного усилителя

В этой схеме выходное напряжение $U_{вых}$ инвертировано по фазе по отношению к входному напряжению $U_{вх}$. Резисторы R_1 и $R_{ос}$ создают параллельную отрицательную ОС по напряжению. Резистор R_2 уменьшает паразитное постоянное напряжение на выходе каскада.

Введение ОС в схему приводит к тому, что ОУ стремится компенсировать дифференциальный сигнал $U_{диф}$, сводя его к нулю, за счет выходного напряжения, поступающего на инвертирующий вход усилителя. В идеальном ОУ $U_{диф} \to 0$, поэтому потенциал инвертирующего входа будет равен нулю, так как неинвертирующий вход за-

землен. Точка A называется «виртуальным нолём» схемы. Напряжение на резисторе ОС $R_{ос}I_{ос}$ равно выходному напряжению $U_{вых}$, и входной ток схемы $I_{вх}$, текущий через резистор R_1, равен току цепи ОС $I_{ос}$. Поэтому

$$\frac{U_{вх}}{R_1} = -\frac{U_{вых}}{R_{ос}}, \tag{10.59}$$

откуда коэффициент усиления напряжения K_u схемы инвертирующего ОУ определяется выражением

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{ос}}{R_1}. \tag{10.60}$$

Если $R_{ос} = R_1$, то $K_u = -1$ и ОУ становится *инвертирующим повторителем напряжения*, у которого $U_{вых} = -U_{вх}$.

Достоинством схемы является малое значение синфазного напряжения, практически равного нулю. Тот факт, что коэффициент усиления напряжения K_u определяется всего лишь соотношением двух сопротивлений, делает применение инвертирующего усилителя очень гибким.

Неинвертирующее включение ОУ. В этом случае сигнал $U_{вх}$ подается на неинвертирующий вход ОУ, а инвертирующий вход «зануляется» к общему проводу через резистор R_1 (рис. 10.55, *а*). В этой схеме выходное напряжение $U_{вых}$ совпадает по фазе со входным напряжением $U_{вх}$. Резисторы R_1 и $R_{ос}$ создают последовательную отрицательную ОС по напряжению, вследствие чего входное сопротивление схемы велико (для ОУ с биполярными транзисторами на входе оно превышает 10^8 Ом), а выходное – доли Ом [4].

В идеальном ОУ $U_{диф} \to 0$, поэтому потенциал инвертирующего входа – точка A – будет равен входному напряжению $U_{вх}$. ОС неинвертирующего усилителя представляет собой делитель выходного напряжения, тогда для инвертирующего входа можно записать выражение

$$U_A = U_{вх} = \frac{R_1}{R_1 + R_{ос}} U_{вых}, \tag{10.61}$$

откуда коэффициент усиления напряжения K_u схемы неинвертирующего ОУ определяется выражением

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{ос}}{R_1}. \tag{10.62}$$

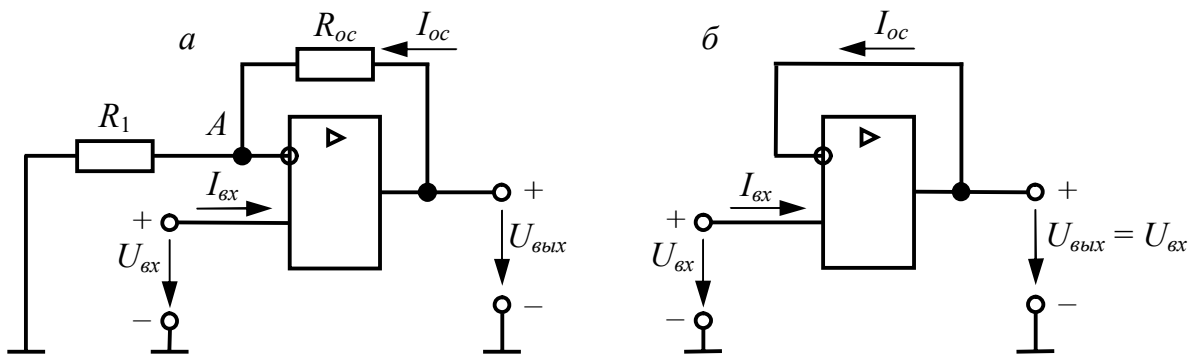


Рис. 10.55. Неинвертирующее включение операционного усилителя

При $R_1 = \infty$ и $R_{ос} = 0$ получаем *неинвертирующий повторитель* на ОУ, коэффициент усиления которого равен единице ($K_u = 1$) и который будет практически идеально повторять входное напряжение (рис. 10.55, *б*). Такой каскад обладает максимальным входным и минимальным выходным сопротивлением. Он обеспечивает максимальную развязку между входным и выходным зажимами и обычно используется как буферный каскад в тех случаях, когда необходимо минимизировать влияние предыдущего каскада на следующий.

Главное достоинство схемы – высокое входное сопротивление, недостаток – на входе ОУ имеется синфазное напряжение, равное входному сигналу.

Суммирующие включения ОУ. Для суммирования нескольких напряжений можно применить схему *инвертирующего сумматора*. Входные напряжения через добавочные резисторы подаются на инвертирующий вход усилителя (рис. 10.56). В схеме выходное напряжение $U_{вых}$ инвертировано по фазе по отношению ко входным напряжениям [4].

Полагаем, что на входы поданы положительные относительно общей точки схемы напряжения. Поскольку инвертирующий вход ОУ – точка *A* – в этой схеме является «виртуальным нолём», уравнения токов, выраженных через напряжения сигналов и сопротивления резисторов, согласно первому закону Кирхгофа, имеет вид

$$\frac{U_{вх1}}{R_1} + \frac{U_{вх2}}{R_2} + \frac{U_{вых}}{R_{ос}} = 0, \qquad (10.63)$$

откуда выходное напряжение $U_{вых}$ схемы инвертирующего сумматора на ОУ с учетом масштабных коэффициентов усиления определяется выражением

$$U_{вых} = -(K_{u1}U_{вх1} + K_{u2}U_{вх2}); \qquad (10.64)$$

$$K_{ui} = \frac{R_{oc}}{R_i}. \qquad (10.65)$$

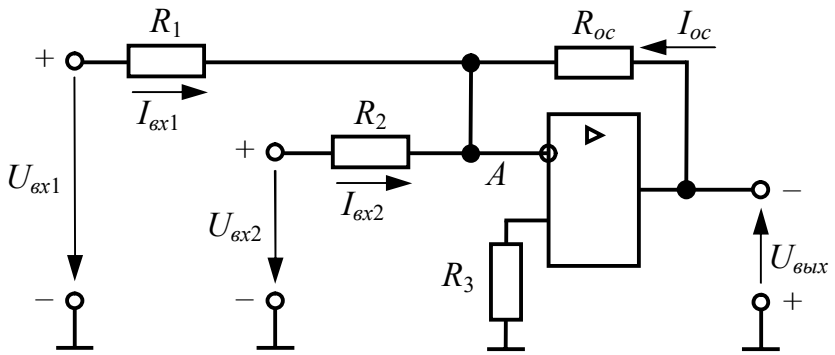


Рис. 10.56. Схема инвертирующего сумматора на ОУ

Достоинства схемы в отсутствии взаимного влияния входных сигналов, простота и возможность суммировать сигналы с различными масштабными коэффициентами. Недостатком схемы является инвертированное выходное напряжение.

Схема *неинвертирующего сумматора* позволяет суммировать сигналы с различными масштабными коэффициентами [4].

Входные напряжения, разделённые общим сопротивлением R_3, подаются через добавочные резисторы на неинвертирующий вход усилителя (рис. 10.57). В этой схеме выходное напряжение $U_{вых}$ совпадает по фазе со входными напряжениями.

В идеальном ОУ $U_{диф} \to 0$, поэтому потенциал инвертирующего входа – точка A – будет равен потенциалу неинвертирующего входа – точка B. ОС неинвертирующего сумматора представляет собой делитель выходного напряжения, тогда для инвертирующего входа можно записать выражение

$$U_A = U_B = \frac{R_4}{R_4 + R_{oc}} U_{вых}. \qquad (10.66)$$

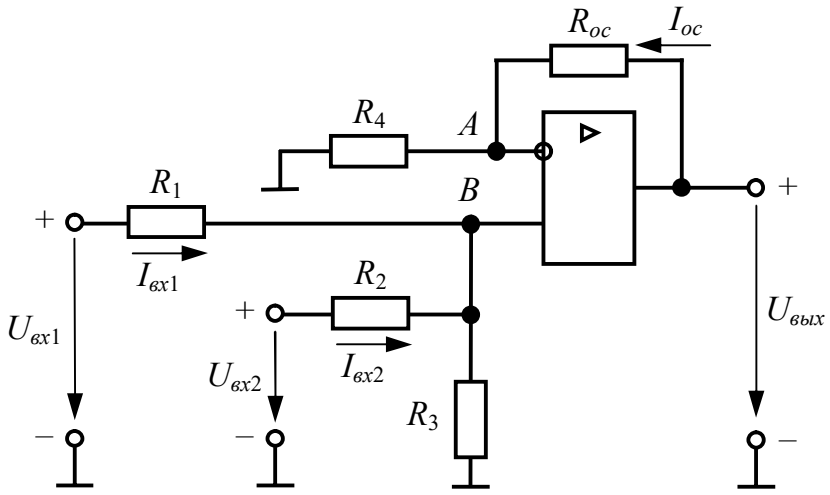


Рис. 10.57. Схема неинвертирующего сумматора на ОУ

Общим напряжением неинвертирующего входа усилителя является напряжение на разделительном сопротивлении R_3. Его можно выразить через суммируемые напряжения $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$:

$$U_B = U_{R3} = \frac{R_2 R_3 U_{вх1}}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} + \frac{R_1 R_3 U_{вх2}}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}, \qquad (10.67)$$

откуда выходное напряжение $U_{вых}$ схемы неинвертирующего сумматора на ОУ определяется выражением

$$U_{вых} = \left(1 + \frac{R_{ос}}{R_4}\right)\left(\frac{R_2 R_3 U_{вх1}}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} + \frac{R_1 R_3 U_{вх2}}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}\right). \qquad (10.68)$$

Главный недостаток данной схемы – сложность при настройке масштабных коэффициентов, так как каждый коэффициент зависит от всех резисторов многовходового делителя. Однако настройка коэффициентов заметно упрощается при равенстве входных сопротивлений $R_1 = R_2 = R_3$.

Вычитающие включения ОУ. Вычитатели сигналов строят, как правило, с использованием дифференциальной схемы включения ОУ [4].

Дифференциальная схема ОУ предназначена для усиления разности двух входных напряжений $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ (рис. 10.58). При этом напряжение, приложенное к обоим входам усилителя относительно земли (синфазная помеха), усиливаться не будет. Как правило, такие усилители используются как входные каскады при приёме сигнала с длинных линий. Схема является комбинацией схем инвертирующего и неинвертирующего включений ОУ. При этом для выравнивания коэффициентов передачи с обоих входов напряжение $U_{вх2}$ на неинвертирую-

щий вход ОУ подаётся через резистивные делители R_2 и R_3.

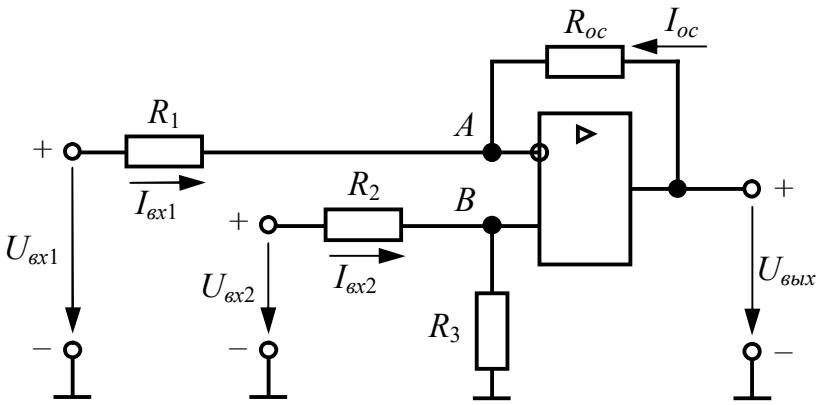


Рис. 10.58. Дифференциальная схема операционного усилителя

Пусть $U_{вх2} = 0$, тогда схема представляет собой инвертирующий усилитель с выходным напряжением

$$U'_{вых} = -\frac{R_{ос}}{R_1} U_{вх1}. \qquad (10.69)$$

На неинвертирующем входе имеется делитель напряжения, тогда для неинвертирующего входа можно записать выражение

$$U_B = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{вх2}. \qquad (10.70)$$

В случае $U_{вх1} = 0$ схема является неинвертирующим усилителем и выходное напряжение получается

$$U''_{вых} = \left(1 + \frac{R_{ос}}{R_1}\right) U_B. \qquad (10.71)$$

В случае наличия обоих входных напряжений итоговое выходное напряжение

$$U_{вых} = U'_{вых} + U''_{вых}. \qquad (10.72)$$

С учетом выражений (10.70), (10.71) и (10.72) получим

$$U_{вых} = \left(1 + \frac{R_{ос}}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_{вх2} - \frac{R_{ос}}{R_1} U_{вх1}. \qquad (10.73)$$

Недостаток данной схемы – сложность при настройке масштабных коэффициентов для напряжений. Однако настройка заметно упрощается при выполнении равенств сопротивлений $R_2 = R_1$ и $R_3 = R_{ос}$.

Тогда выражение (10.73) принимает вид

$$U_{вых} = \frac{R_{ос}}{R_1}\left(U_{вх2} - U_{вх1}\right). \qquad (10.74)$$

Достоинство схемы в одновременном использовании двух входов, что обеспечивает большой коэффициент ослабления синфазного сигнала. Недостатком схемы является несимметричность входных сопротивлений, что существенно сказывается при больших сопротивлениях источников сигналов.

Вышеописанных недостатков лишен *дифференциальный усилительный каскад* на трёх ОУ (рис. 10.59). Данная каскадная дифференциальная схема представляет собой два входных совмещенных неинвертирующих усилителя (DA1 и DA2) и один выходной дифференциальный усилитель DA3. За счёт этого обеспечивается симметрия схемы, очень высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала и очень высокие входные сопротивления [4].

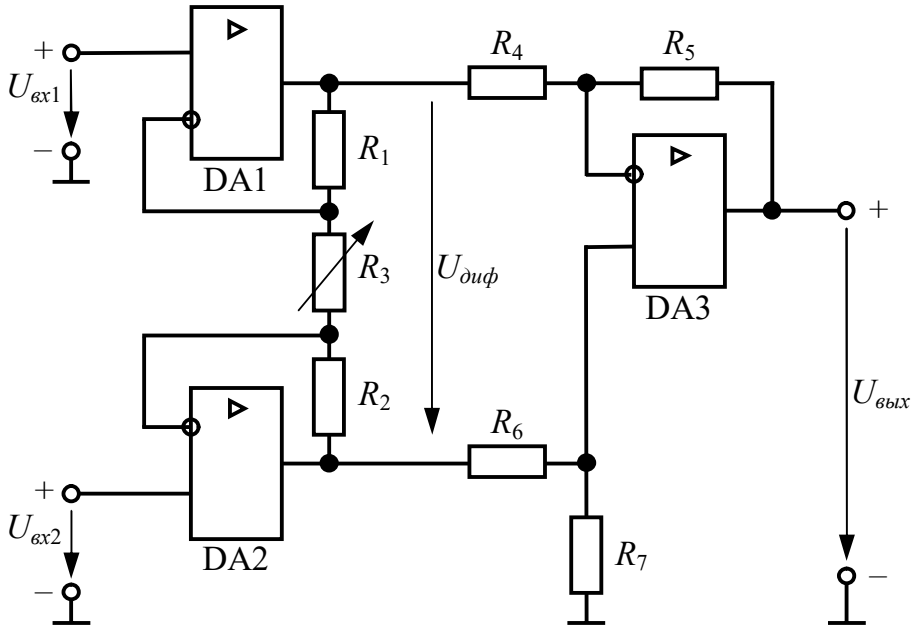


Рис. 10.59. Каскадная дифференциальная схема

Выходное напряжение входного неинвертирующего каскада

$$U_{диф} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3}\left(U_{вх1} - U_{вх2}\right). \qquad (10.75)$$

Этот дифференциальный сигнал усиливается выходным дифференциальным каскадом до напряжения $U_{вых}$. При выполнении равенств сопротивлений $R_1 = R_2$ и $R_4 = R_5 = R_6 = R_7$ можно с учётом фор-

мулы (10.75) записать следующее выражение:

$$U_{вых} = U_{диф} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_3}\right)\left(U_{вх1} - U_{вх2}\right). \qquad (10.76)$$

Резистор R_3 можно сделать переменным, тогда усилением всего усилителя можно управлять с помощью одного регулировочного резистора (обычно $R_3 << R_1 + R_2$). Такая каскадная дифференциальная схема называется *измерительным усилителем*, используемым в датчиках и тестирующем оборудовании.

Так как в таком усилителе содержатся исключительно ОУ и резисторы, то возможно построение измерительного усилителя на одном кристалле в виде единой интегральной микросхемы. Такие микросхемы называются также *инструментальными усилителями*, причем для резистора R_3 делаются внешние выводы и путем подключения единственного внешнего для ИМС сопротивления происходит регулировка усиления.

Интегрирующая схема на ОУ. Операция интегрирования широко применяется при обработке и генерировании электрических сигналов. Интегратор может служить источником линейно изменяющегося напряжения, необходимого, например, в осциллографах в качестве генератора развёртки, используемого также при реализации некоторых методов цифроаналогового преобразования. Если на вход интегратора подать постоянное напряжение, на выходе получим линейно-возрастающее напряжение, которое будет увеличиваться вплоть до напряжения насыщения [4].

В простейшем интеграторе, выполненном на основе инвертирующего усилителя (рис. 10.60, *а*), вместо резистора, соединяющего вход и выход ОУ, включается конденсатор *C*. В связи с использованием инвертирующего входа результат интегрирования на выходе схемы является инвертированным.

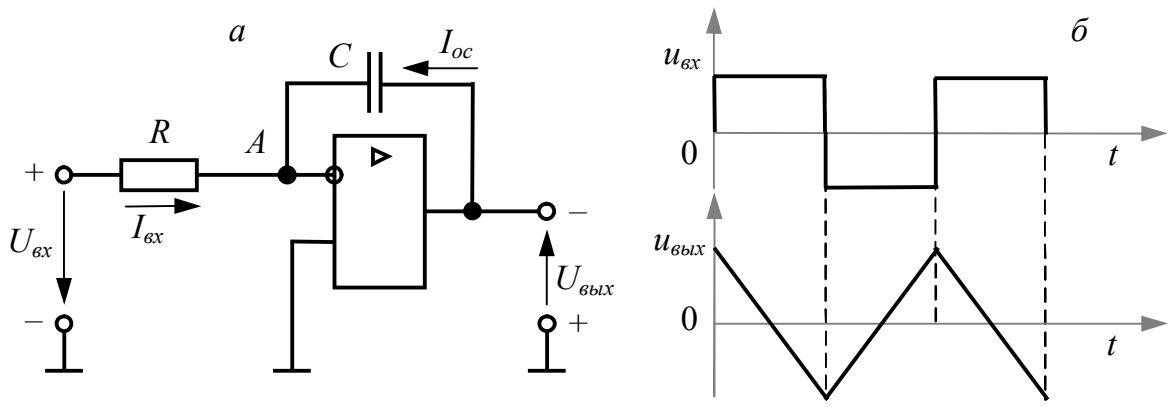


Рис. 10.60. Интегратор на операционном усилителе

Весь входной ток интегратора $I_{вх}$ течёт через конденсатор. Учитывая особенности работы конденсатора в переходном режиме, получаем для выходного напряжения интегратора выражение

$$U_{вых} = U_0 - \frac{1}{RC}\int U_{вх}(t)dt, \qquad (10.77)$$

где $U_0 = U_{вых}(0)$ – исходное выходное напряжение интегратора.

Интеграторы широко применяются на практике, например в аналоговых решающих устройствах или генераторах пилообразного напряжения. Если на вход интегратора подать прямоугольное гармоническое напряжение, то на выходе сигнал будет пилообразной формы (рис. 10.60, *б*), т.е. изменение выходного напряжения во времени представляет собой наклонную прямую с полярностью, противоположной полярности входного сигнала.

Результатом интегрирования гармонической синусоидальной функции является гармоническое синусоидальное напряжение, сдвинутое по фазе на 90°.

Дифференцирующая схема на ОУ. Дифференциатор создаёт выходное напряжение, пропорциональное скорости изменения входного. При дифференцировании усилитель должен пропускать только переменную составляющую входного напряжения и коэффициент усиления дифференцирующей схемы должен возрастать при увеличении скорости изменения входного сигнала. Выполнить эти требования позволяет использование в качестве входного элемента операционного усилителя конденсатора *C* [4].

Простейшая схема дифференциатора (рис. 10.61, *а*) построена также на основе инвертирующего усилителя. Выходное напряжение дифференциатора пропорционально производной от напряжения на входе и инвертировано по отношению к нему (рис. 10.61, *б*).

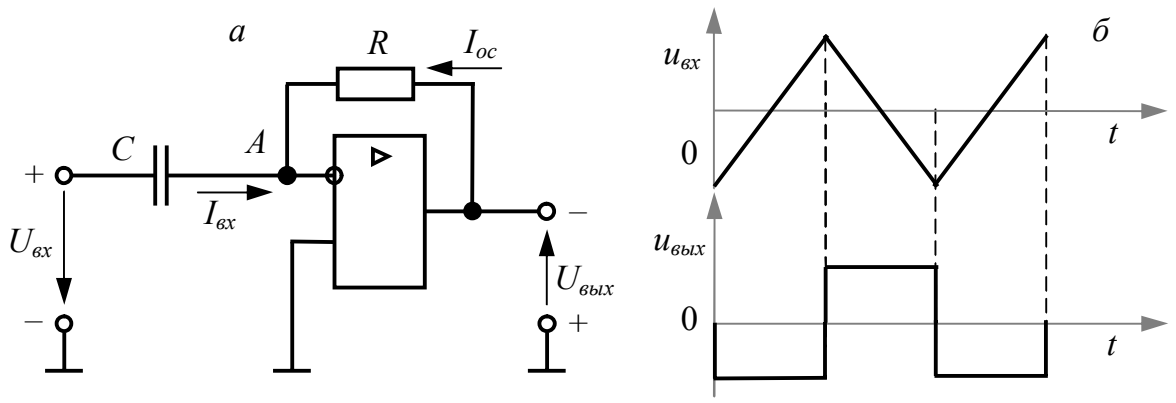


Рис. 10.61. Дифференциатор на операционном усилителе

Выходное напряжение $U_{вых}$ схемы дифференциатора на ОУ определяется выражением

$$U_{вых} = -RC\frac{dU_{вх}(t)}{dt}. \qquad (10.78)$$

Уменьшение реактивного сопротивления X_C входной цепи с увеличением частоты сигнала приводит к тому, что схема дифференциатора имеет высокий коэффициент усиления по отношению к высокочастотным составляющим на входе, даже если их частоты лежат выше полосы частот полезного сигнала. Однако вместе с высокочастотными составляющими спектра полезного входного сигнала схема усиливает собственные паразитные шумы сопротивлений и полупроводниковых элементов, что является «минусом» дифференциатора.

Чтобы устранить вышеописанный недостаток и понизить чувствительность к помехам, необходимо ослабить эффективное усиление дифференциатора на высоких частотах. Для этого последовательно со входным конденсатором C включают резистор (обычно 1кОм), а параллельно резистору R в ОС – конденсатор небольшой ёмкости (примерно – 100 пФ), экспериментально подбирают значения этих параметров так, чтобы достичь приемлемого компромисса между чувствительностью к помехам и точностью дифференцирования.

Компараторы на ОУ. Компараторы напряжения – устройства, предназначенные для сравнения по уровню двух аналоговых сигналов, один из которых является входным (измеряемым) $U_{вх}$, а второй – опорным (задающим) $U_{оп}$. В момент равенства мгновенных значений входных сигналов напряжение на выходе компаратора резко изменяется. Кроме функций сравнения, компаратор осуществляет формирование выходных сигналов в виде двух дискретных уровней, один из которых соответствует логической «1», а другой – логическому «0» [4].

Схема простейшего компаратора для сравнения однополярных сигналов приведена на рис. 10.62, *а*. В неё входит ОУ с цепями питания и коррекции. Схема не содержит ОС. Выходное напряжение компаратора равно

$$U_{вых} = K_u\left(U_{оп} - U_{вх}\right). \qquad (10.79)$$

Так как K_u велик, а ОС отсутствует, то оно принимает одно из двух дискретных значений: $-U_{вых.\max}$ или $+U_{вых.\max}$. При $U_{оп} > U_{вх}$, $U_{оп}$ поступает на неинвертирующий вход ОУ, поэтому достаточно даже незначительной разности входных сигналов ($U_{оп} - U_{вх}$), чтобы $U_{вых}$ приняло значение $+U_{вых.\max}$. При $U_{оп} < U_{вх}$ выходное напряжение принимает значение $-U_{вых.\max}$ (рис. 10.62, *б*).

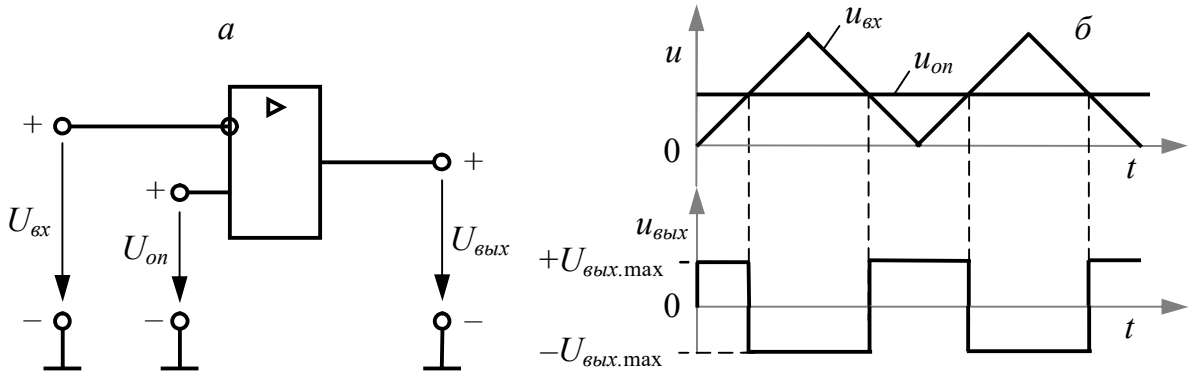


Рис. 10.62. Простейший компаратор на операционном усилителе

При смене знака разности входных потенциалов выходное напряжение не может мгновенно перейти из одного уровня насыщения к другому, так как величина скорости нарастания операционного усилителя ограничена, поэтому одним из параметров компаратора является *время переключения*.

Компараторы на ОУ позволяют сравнивать сигналы с порогом чувствительности, равным десяткам микровольт при времени переключения порядка единиц микросекунд. Специализированные интегральные компараторы имеют несколько худший порог чувствительности (порядка сотен микровольт) при меньшем времени переключения (порядка сотен наносекунд).

Рассмотренная на рис. 10.62, *а* схема обладает низкой помехоустойчивостью, так как компаратор может ложно переключиться под действием помехи с малым напряжением, наложенной на полезный сигнал. Это явление получило название *дребезга компаратора*, оно особенно проявляется при медленном изменении входного сигнала.

Более высокой помехоустойчивостью обладает компаратор, в который введена положительная ОС на резисторах R_1 и $R_{ос}$. Такая схема (рис. 10.63, *а*) известна под названием *триггер Шмидта*. Триггер Шмитта функционально является компаратором, уровни включения и выключения которого не совпадают, как у обычного компаратора, а различаются на величину, называемую *гистерезисом переключения* $\Delta U_г$. Если к инвертирующему входу приложено большое отрицательное напряжение $-U_{вх}$, то выходное напряжение компаратора составит $U_{вых} = +U_{вых.\max}$ и на неинвертирующем входе ОУ будет иметься напряжение

$$U_{R1.\max} = \frac{R_1}{R_1 + R_{ос}} U_{вых.\max}. \qquad (10.80)$$

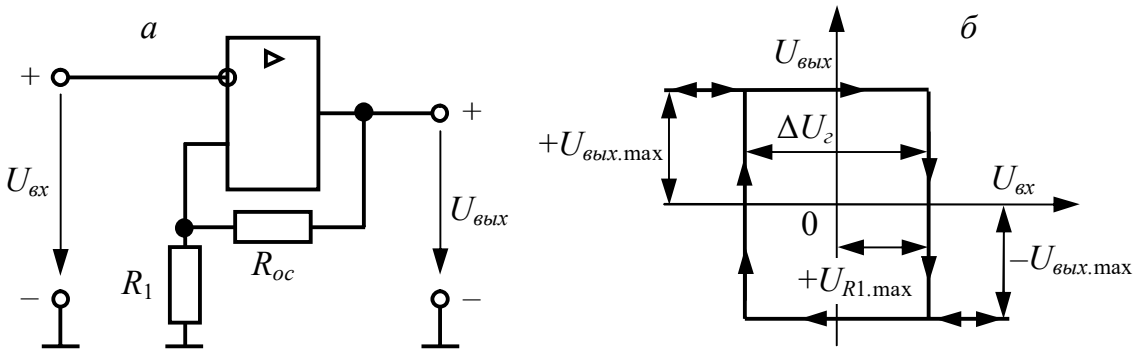


Рис. 10.63. Триггер Шмитта на операционном усилителе

Амплитудная характеристика триггера Шмидт представлена на рис. 10.63, *б*. При повышении входного напряжения $U_{вх}$ величина выходного напряжения $U_{вых}$ сначала не меняется, но как только $U_{вх}$ достигает значения $+U_{R1.\max}$, выходное напряжение начинает падать, а вместе с ним снижается и потенциал на неинвертирующем входе U_{R1}. В результате напряжение $U_{вых}$ падает до величины $-U_{вых.\max}$, а напряжение U_{R1} – до $-U_{R1.\max}$. Достигнутое состояние останется стабильным, пока входное напряжение $U_{вх}$ не уменьшится до значения $-U_{R1.\max}$.

Величина гистерезиса переключения определяется как

$$\Delta U_г = 2U_{R1.\max} = \frac{2R_1}{R_1 + R_{ос}} U_{вых.\max}. \qquad (10.81)$$

Временные диаграммы, соответствующие работе триггера Шмитта при гармоническом входном сигнале, представлены на рис. 10.64.

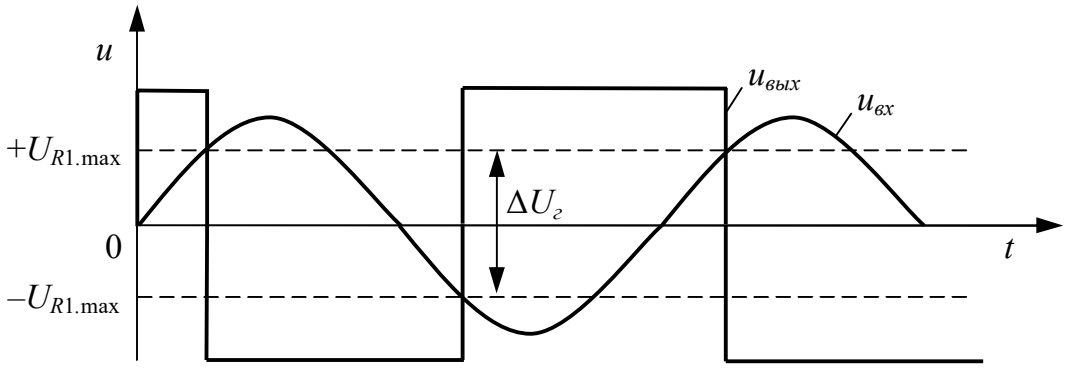


Рис. 10.64. Временные диаграммы триггера Шмитта

Введение гистерезиса переключения исключает ложное срабатывание компаратора, но при этом возникает временная задержка выходного сигнала по сравнению с простым компаратором.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие устройства называют усилителями? Перечислите режимы работы усилителей.
2. Изобразите амплитудно-частотную характеристику усилителя.
3. В чём заключается принцип работы типового усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенного по схеме с общим эмиттером?
4. Что называют комплексным коэффициентом усиления?
5. Перечислите основные параметры усилительного каскада.
6. Что называют операционным усилителем?
7. Какими особенностями обладают операционные усилители?
8. Какова область применения операционных усилителей?
9. Какие основные выводы имеет операционный усилитель?
10. Что является для операционного усилителя синфазным и дифференциальным сигналами?
11. Назовите основные параметры и характеристики операционных усилителей.
12. Почему операционный усилитель имеет две амплитудные характеристики?
13. Что такое АЧХ и ФЧХ операционного усилителя?
14. Что называют обратной связью операционного усилителя?
15. Какие схемы включения операционного усилителя существуют? Для каких целей они используются?

16. Изобразите схемы инвертирующего и неинвертирующего включения операционного усилителя и запишите их коэффициенты усиления.

17. Изобразите схему инвертирующего сумматора и запишите его коэффициент усиления.

18. Изобразите дифференциальную схему операционного усилителя и запишите его коэффициент усиления.

19. Из чего состоит дифференциальный усилительный каскад на операционных усилителях?

20. Изобразите схему интегратора на операционном усилителе и запишите для него формулу выходного напряжения.

21. Изобразите схему дифференциатора на операционном усилителе и запишите для него формулу выходного напряжения.

22. Что называют компаратором?

23. Приведите схему и принцип работы простого компаратора на операционном усилителе.

24. Что называют *дребезгом компаратора*?

25. Приведите схему и амплитудную характеристику триггера Шмитта на операционном усилителе.

26. Опишите принцип работы триггера Шмитта.

27. Чем определяется величина гистерезиса переключения триггера Шмитта?