

## 6. Виды усилителей и преобразователей электрических сигналов

### 6.1 Усилители мощности

Усилителем мощности называют усилитель, предназначенный для обеспечения заданной мощности нагрузки  $P_H$  при заданном сопротивлении нагрузки  $R_H$ . Основным назначением выходного каскада является отдача в нагрузку максимально возможной мощности при наименьшем потреблении энергии от источника питания и допустимых условиях нелинейных и частотных искажений.

Усилители мощности бывают **однотактные** и **двухтактные**, причем первые работают в режиме  $A$ , а вторые – в режиме  $B$  или  $AB$ . По способу подключения нагрузки усилительные каскады могут быть трансформаторными и бестрансформаторными. В случае применения трансформаторной связи можно достигнуть максимальной передачи мощности и значительно повысить КПД.

**Однотактные усилители мощности.** Отличие трансформаторного усилителя (рис. 6.13) от резистивного усилителя с ОЭ (рис. 6.9) заключается в том, что в коллекторную цепь транзистора вместо резистора включена первичная обмотка трансформатора.

Рассмотрим схему однотактного усилителя мощности, работающего в классе  $A$ . Для получения максимально возможной мощности амплитуду входного сигнала увеличивают до уровня, при котором используется весь рабочий участок динамической характеристики.

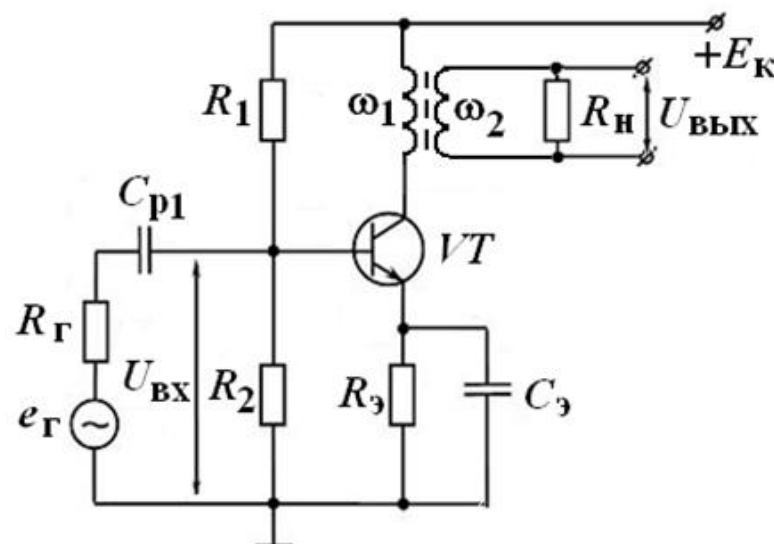


Рис. 6.13. Схема однотактного усилителя мощности с трансформаторной связью

В схеме резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  обеспечивают выбранный режим работы по постоянному току. Сопротивление  $R_3$  выбирается малым, чтобы

не было потерь за счет большого тока  $I_K$ . Резистор  $R_3$  – это элемент ООС. Температурная стабилизация рабочей точки осуществляется с помощью  $R_3$  и  $C_3$ . Конденсатор  $C_{p1}$  разделяет в режиме работы по постоянному току источник сигнала и усилитель мощности.

Входной гармонический сигнал создает в выходной цепи трансформатора ток, изменяющийся по гармоническому закону, при этом и положительная, и отрицательная полуволны усиливаются одним активным элементом за один такт, поэтому эта схема называется одноконтурной.

Для получения от транзистора наибольшей выходной мощности линию нагрузки следует проводить как касательную к гиперболе  $P_K$  доп в пределах области, ограниченной допустимыми значениями  $I_{K \max}$  и  $U_{K \max}$  (рис. 2.7).

Мощность переменного тока  $P_K$ , поступающая от каскада в первичную обмотку трансформатора, и мощность, отдаваемая в нагрузку  $P_H$ , связаны соотношением  $P_K = \frac{P_H}{\eta_{тр}}$ , где  $\eta_{тр}$  – КПД трансформатора.

Коэффициент усиления каскада по мощности равен  $K_p = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = P_K / P_{\text{ВХ}}$ .

**Двухтактные усилители мощности** применяют для получения большой мощности с высоким КПД (режим усиления  $B$ ), см. рис. 6.14. Схема двухтактного трансформаторного усилителя мощности содержит два усилительных элемента (биполярные транзисторы  $VT1$  и  $VT2$ ), в коллекторную цепь которых включен выходной трансформатор  $Tr2$ , имеющий вывод от средней точки в первичной обмотке. Он суммирует переменные выходные токи и напряжения транзисторов. Ко вторичной обмотке  $Tr2$  подключена нагрузка с сопротивлением  $R_H$ .

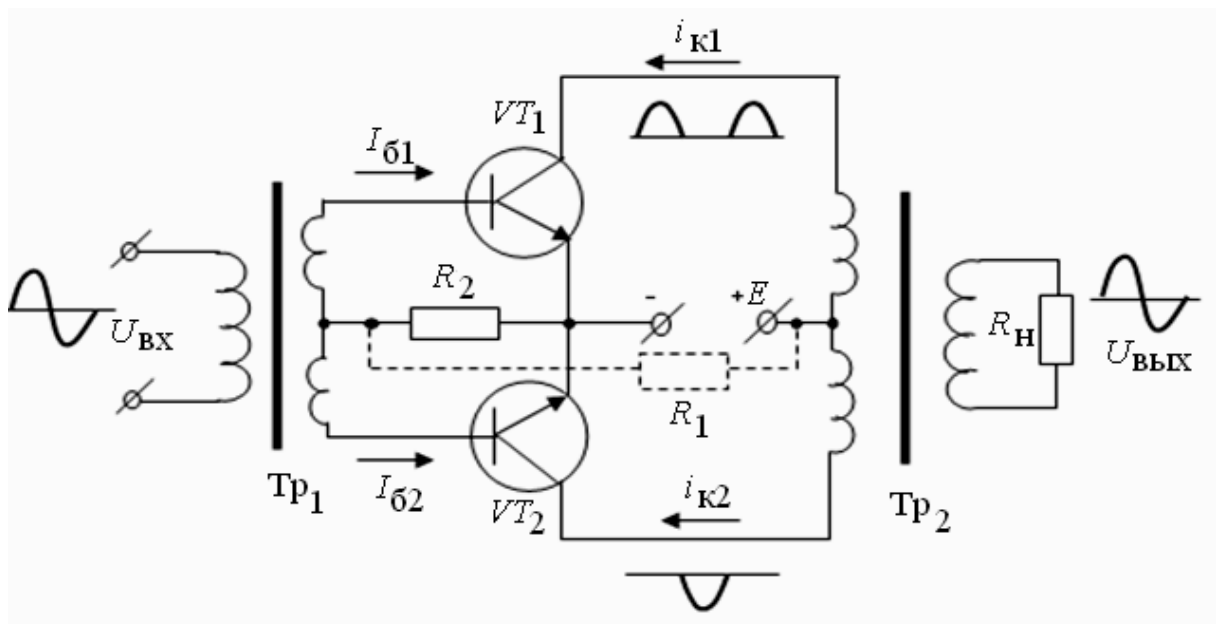


Рис. 6.14. Схема двухтактного усилителя мощности с трансформаторной связью

Оба транзистора включены по схеме с ОЭ, на их входы должны подаваться два сигнала, находящиеся в противофазе. Это условие обеспечивается трансформатором Тр1, имеющим вывод от средней точки во вторичной обмотке. Режим входной цепи транзисторов по постоянному току обеспечивается делителем напряжения, состоящим из резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .

Двухтактный каскад может работать в режиме  $B$  или  $AB$ . Режим  $AB$  осуществляется подачей с помощью резисторов  $R_1$  и  $R_2$  напряжения смещения на базы обоих транзисторов от источника питания  $E$ . В режиме  $B$  начальное смещение не создается и резистор  $R_1$  отсутствует.

Назначение элементов двухтактного усилителя аналогично назначению соответствующих элементов однотактного усилителя с учетом того, что они обслуживают два транзистора.

Рассмотрим работу каскада в режиме  $B$ . При  $U_{вх} = 0$  оба транзистора находятся в состоянии отсечки:  $i_{к1} = i_{к2} = 0$ . Следовательно, при отсутствии сигнала токи в транзисторах отсутствуют, и к коллекторам транзисторов прикладывается напряжение  $E_{п}$ .

При поступлении на вход усилителя сигнала  $U_{вх}$  каждая полуволна открывает поочередно один из транзисторов, и через первичную обмотку трансформатора Тр2 протекает ток полуволны. Процесс усиления входного сигнала происходит в два такта. Транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  работают поочередно. В течение полупериода сигнала при положительной полярности на входном трансформаторе будет открыт транзистор  $VT_1$  ( $i_{к1}$  повторяет по форме входное напряжение), в течение другого полупериода транзистор  $VT_1$  закроется и перейдет в состояние отсечки, а транзистор  $VT_2$  откроется и перейдет в активный режим ( $i_{к2}$  повторяет форму входного напряжения). Токи  $i_{к1}$ ,  $i_{к2}$  в первичной обмотке трансформатора Тр2 протекают встречно друг другу и потому на вторичной обмотке создают напряжение противоположного знака. В результате на выходе схемы возникает практически не искаженный входной сигнал, в то время как активные элементы работают в режиме  $B$ .

## 6.2. Усилители постоянного тока

Усилителем постоянного тока (УПТ) называется усилитель, сохраняющий постоянство коэффициента усиления при уменьшении частоты входного сигнала вплоть до нуля. На рис. 6.3, б показана АЧХ УПТ.

Поскольку такие устройства пропускают наряду с переменной еще и постоянную составляющую сигнала, то отдельные каскады должны быть связаны между собой либо непосредственно (гальваническая связь), либо через резисторы, но не через разделительные конденсаторы или трансформаторы, которые не пропускают постоянную составляющую.

В УПТ возникают сложности с отделением полезного сигнала от постоянных составляющих напряжений и токов, необходимых для

нормальной работы каскада. Кроме того, отсутствие конденсатора или трансформатора приводит к тому, что через усилитель одновременно могут проходить полезный сигнал и сигнал помехи. На входе УПТ оба сигнала (полезный и помехи) складываются, и различить их невозможно. Это создает ложное представление об истинном значении усиленного полезного сигнала.

Отделение постоянных составляющих напряжения, как правило, производится компенсационным методом. Для уменьшения дрейфа нуля стабилизируют источники питания, вводят отрицательную обратную связь, а также применяют специальные балансные схемы.

Основную проблему усилителей постоянного тока представляет **дрейф нуля** – отклонение напряжения на выходе усилителя от начального (нулевого) значения при отсутствии входного сигнала. Причиной этого явления являются температурная и временная нестабильность параметров активных элементов схемы усилителя, резисторов, а также источников питания.

**Основными характеристиками УПТ** являются дрейф нулевого уровня выходного напряжения, коэффициенты усиления  $K_u$  и  $K_i$ , диапазон изменений входного и выходного напряжения  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  и полоса пропускания  $\Delta f$ .

Одним из возможных путей уменьшения дрейфа нуля является использование дифференциальных усилителей.

### 6.2.1 Дифференциальный усилитель

**Дифференциальным каскадом** называется устройство, усиливающее разность двух напряжений. Наиболее эффективным методом уменьшения дрейфа нуля является применение балансных параллельных каскадов УПТ, получивших название дифференциальных усилителей (ДУ). Дифференциальный каскад имеет два входа и два выхода. Питание ДУ осуществляется от двух источников, напряжения которых равны (по модулю) друг другу.

Основой построения балансного каскада является четырехплечий мост (рис. 6.15, *а*). Если сопротивления  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$  равны друг другу, а транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  имеют идентичные параметры, то схема будет симметрична.

Таким образом, ДУ представляет собой сбалансированную мостовую схему, состоящую из двух транзисторных усилителей с двумя входами и двумя выходами. Два плеча моста образованы коллекторными резисторами  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$ , а два других плеча образованы внутренними сопротивлениями транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  (рис. 6.15, *б*).

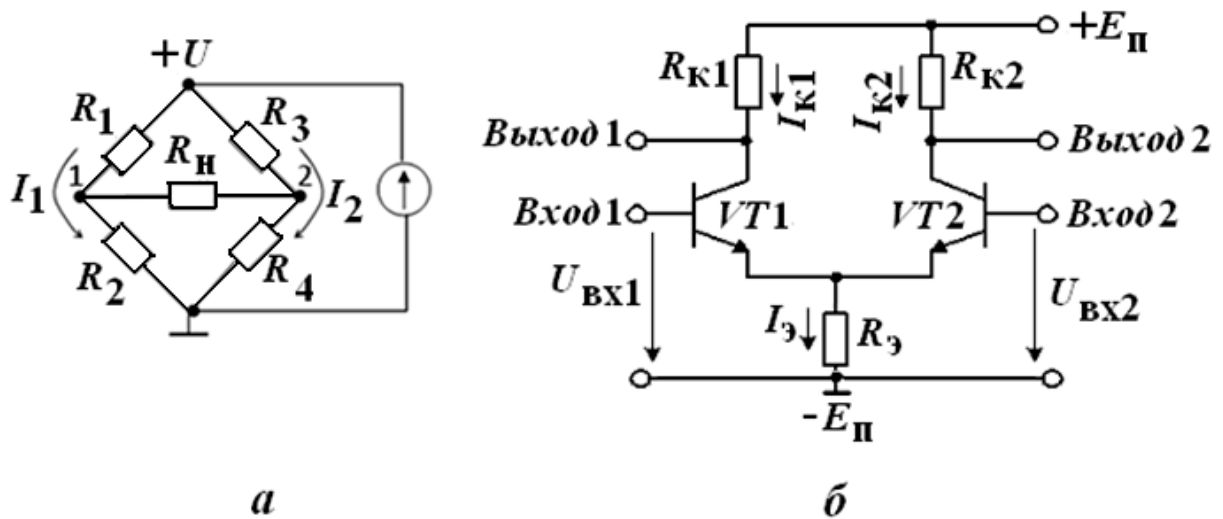


Рис. 6.15. Дифференциальный усилительный каскад: *а* – четырехплечий мост; *б* – принципиальная схема

К вертикальной диагонали подключается напряжение питания, а нагрузка включается в другую диагональ между коллекторами транзисторов. Каждое общее плечо ДУ является каскадом ОЭ. Таким образом, ДУ состоит из двух каскадов ОЭ. В цепь эмиттеров транзисторов включен резистор  $R_3$ , которым задается их общий ток.

Если источник сигнала подключен между базами транзисторов, а его средняя точка заземлена, то дифференциальный каскад имеет **симметричный вход**. Если источник сигнала подключен между базой одного из транзисторов и общим проводом, то дифференциальный каскад имеет **несимметричный вход**. Если выходное напряжение снимается между коллекторами, то дифференциальный каскад имеет **симметричный выход**. Если напряжение снимается с одного из коллекторов, то **выход называется несимметричным**. Для симметричного выхода коэффициент усиления будет в два раза больше, чем для несимметричного выхода. Коэффициент усиления по напряжению дифференциального усилителя всегда больше, чем в каскаде на одиночном транзисторе.

Если сигнал подается на вход и снимается с выхода несимметрично, каскад может быть инвертирующим и неинвертирующим.

При идеальной симметрии обоих плеч в отсутствии входных сигналов ( $U_{\text{вх1}} = 0$ ,  $U_{\text{вх2}} = 0$ ) коллекторные токи и потенциалы коллекторов транзисторов будут одинаковы, а выходное напряжение  $U_{\text{вых}} = 0$ . Таким образом, всякое изменение характеристик транзистора независимо от причин, приводящим к этим изменениям, вызывает одинаковое изменение токов в обоих плечах. Поэтому разбаланса схемы не произойдет и *дрейф выходного напряжения* будет практически равен нулю.

Условие баланса моста, при котором его выходное напряжение равно нулю, определяется как

$$R_{VT1} R_{K2} = R_{VT2} R_{K1}. \quad (6.4)$$

Нарушение этого условия приводит к разбалансировке моста и появлению выходного напряжения. Это может произойти, например, при изменении выходных сопротивлений транзисторов  $R_{VT1}$  и  $R_{VT2}$ , которые, в свою очередь, зависят от входных напряжений  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ .

Подача на оба входа ДУ сигналов с одинаковой фазой и амплитудами (**синфазные сигналы**)  $U_{вх1} = U_{вх2}$ , вследствие симметрии плеч, не вызовет изменения коллекторных токов, и они останутся неизменными и равными:

$$I_{к1} = I_{к2} = 0,5\alpha I_{э},$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера.

Следовательно, потенциалы коллекторов остаются равными, а  $U_{вых} = U_{к1} - U_{к2} = 0$ . Это значит, что идеальный **дифференциальный каскад не реагирует на синфазные сигналы**. Синфазные сигналы обычно обусловлены помехами, наводками и являются вредными для работы усилителя. Для подавления синфазных сигналов в ДУ вводят резистор  $R_э$ , который является элементом последовательной ООС по току.

Рассмотрим работу ДУ для *основного рабочего входного сигнала – дифференциального*. **Дифференциальными** (противофазными) называют сигналы, имеющие равные амплитуды, но противоположные фазы. Будем считать, что входное напряжение подано между входами ДУ (симметричный вход), т.е. на каждый вход поступает половина амплитудного значения входного сигнала, причем в противоположных фазах. За счет действия дифференциального сигнала ток одного плеча увеличивается за счет уменьшения тока другого плеча  $\Delta I_{э1} = -\Delta I_{э2}$ , так как сумма токов всегда равна:

$$I_{э1} + I_{э2} = I_{э}. \quad (6.5)$$

Потенциал коллектора одного транзистора уменьшается, а другого увеличивается на одно и то же значение  $\Delta U_{к}$ . На выходе ДУ появится разность потенциалов, равная  $U_{вых} = 2\Delta U_{к}$ .

В результате на выходе ДУ появится выходное напряжение  $U_{вых} = U_{к1} - U_{к2} \neq 0$ . Следовательно, идеальный ДУ **реагирует только на дифференциальный** (разностный) **сигнал**. Отсюда вытекает название этого типа усилителей. ООС для дифференциального сигнала отсутствует. Это позволяет получать от ДУ большое усиление.

Выход каскада со стороны коллектора транзистора  $VT1$  ( $U_{вых1}$ ) является **инвертирующим** (переворачивает фазу выходного напряжения на  $180^\circ$ ), а со стороны коллектора транзистора  $VT2$  ( $U_{вых2}$ ) – **неинвертирующим** (не переворачивает фазу выходного напряжения).

Коэффициент усиления ДУ:

$$U_{вых} = (U_{вх1} - U_{вх2})K_{уд}. \quad (6.6)$$

Достоинства ДУ: малый дрейф нуля; высокая степень подавления синфазных помех. Недостатки ДУ: требует двухполярного источника питания; необходима очень высокая симметрия схемы.

### 6.3. Усилители на полевых транзисторах

Принципы построения и работы усилительных устройств на ПТ в целом аналогичны усилителям на БТ. На рис. 6.16 приведена типовая схема усилительного каскада с общим истоком (ОИ) – аналог схемы ОЭ, хорошо усиливает и по току, и по напряжению.

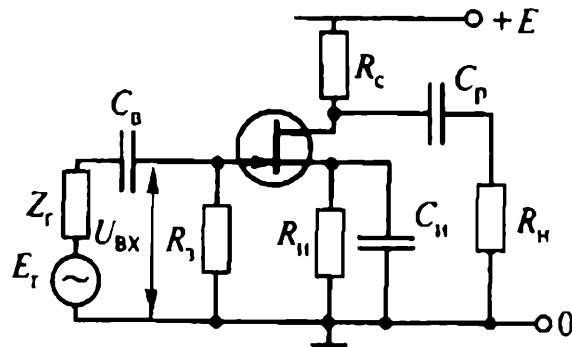


Рис. 6.16. Усилительный каскад на ПТ с общим истоком

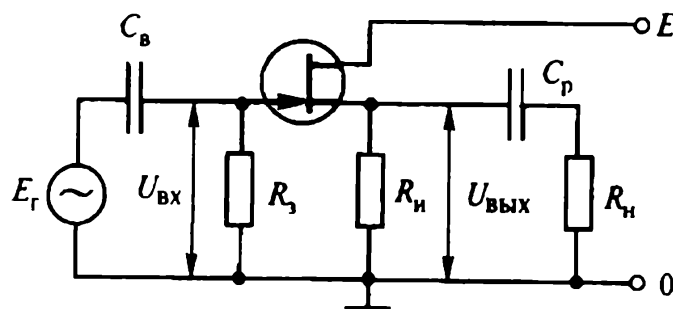


Рис. 6.17. Усилительный каскад на ПТ с общим стоком

На рис. 6.17 показана схема с общим стоком (ОС) – истоковый повторитель, аналог схемы ОК, эмиттерного повторителя, он усиливает только по току.

Показанные в качестве примера на рис. 6.16 и 6.17 схемы построены на ПТ с управляющим переходом, которые должны работать в режиме обеднения канала, т.е. при обратном напряжении на затворе. С этой целью в цепи истока обязательно должен быть резистор  $R_{н}$ , «поднимающий» (при протекании тока стока  $I_c$ ) потенциал истока относительно «земли» и потенциала затвора. Аналогичный вид будет и у схем на МОП-транзисторе со встроенным каналом.

Резистор в цепи затвора необходим для протекания тока от источника входного сигнала, поскольку в затвор полевого транзистора ток не втекает ввиду большого входного сопротивления (напомним, что у затвора р-п-переход в обратном направлении или слой диэлектрика).

Назначение остальных элементов схемы такое же, как в усилителях на БТ.

Схема на МОП-транзисторе с индуцированным каналом (рис. 6.18) будет аналогична схеме на БТ: поскольку изначально транзистор закрыт (в

нем отсутствует канал), на затвор необходимо подавать отпирающее напряжение через делитель R1, R2 (сравните с рис. 6.9, 6.11).

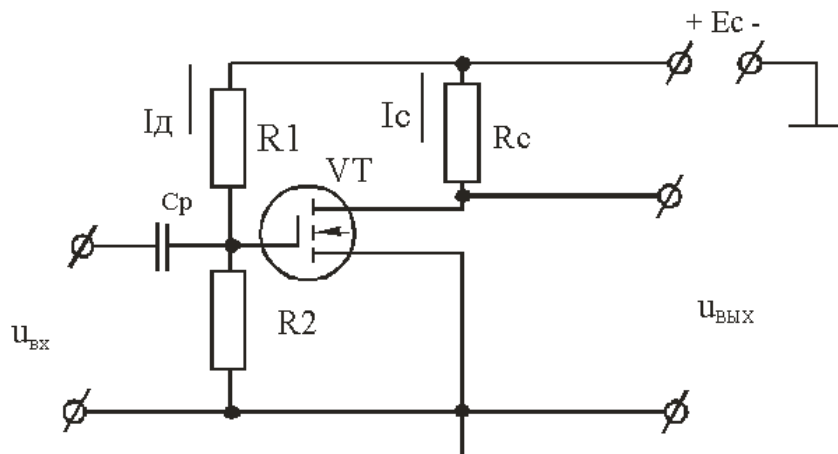


Рис. 6.18. Усилительный каскад с общим истоком на МОП-транзисторе с индуцированным каналом n-типа

#### 6.4. Операционные усилители

Операционный усилитель (ОУ) относится к усилителям постоянного тока (УПТ) с большим коэффициентом усиления, имеющим дифференциальный вход и один общий выход. Условное обозначение ОУ показано на рис. 6.19. Один из входов усилителя  $U_{(+)}$  называется **неинвертирующим**, а второй  $U_{(-)}$  – **инвертирующим**. При подаче сигнала на неинвертирующий вход выходной сигнал совпадает по фазе с входным сигналом (сигналы синфазны). Если подать сигнал на инвертирующий вход, то выходной сигнал будет повернут на  $180^\circ$  относительно входного сигнала (сигналы противофазны). Чтобы обеспечить работу ОУ при подаче на вход положительного или отрицательного сигналов, для его питания используют два разнополярных источника питания.

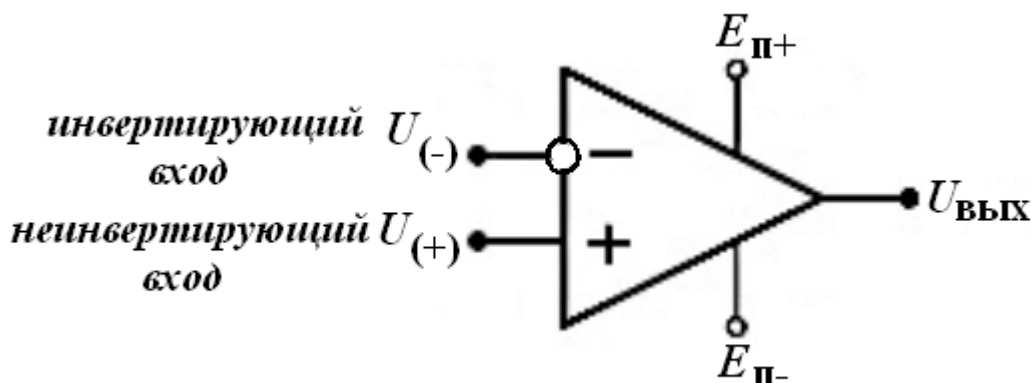


Рис. 6.19. Условное обозначение ОУ



ОУ характеризуется большим коэффициентом усиления:  $K_U \approx 10^4 - 10^6$ . Основу ОУ составляет дифференциальный каскад (ДУ), применяемый в качестве входного каскада усилителя (рис. 4.2). Усилитель напряжения (УН) обеспечивает основное усиление по напряжению. Выходным каскадом ОУ обычно служит эмиттерный повторитель (ЭП), имеющий низкое выходное сопротивление и обеспечивающий требуемую нагрузочную способность всей схемы.

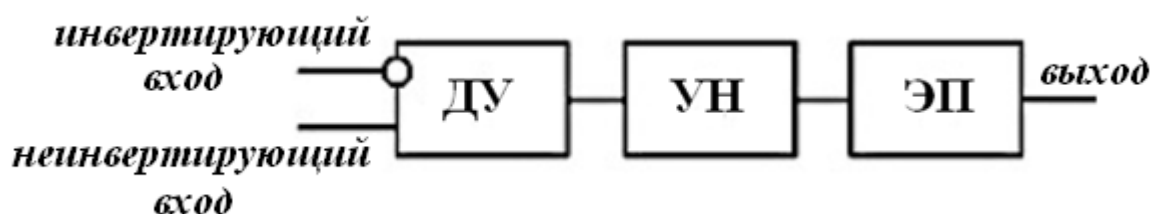


Рис. 6.20. Структурная схема ОУ

Передаточную характеристику ОУ  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  представляют в виде двух кривых, относящихся к инвертирующему и неинвертирующему входам (рис. 6.21). Передаточная характеристика ОУ имеет одну линейную и две области насыщения. В линейной области ОУ ведет себя как усилитель напряжения с большим коэффициентом усиления. Характеристики снимают при подаче сигнала на один из входов ОУ при нулевом сигнале на другом.

Горизонтальные участки кривых соответствуют режиму полностью открытого (насыщенного) либо закрытого транзистора выходного каскада. При изменении напряжения входного сигнала на этих участках выходное напряжение усилителя остается постоянным и определяется максимальными выходными напряжениями  $U_{\text{ВЫХ,max}}^+$ ,  $U_{\text{ВЫХ,max}}^-$ .

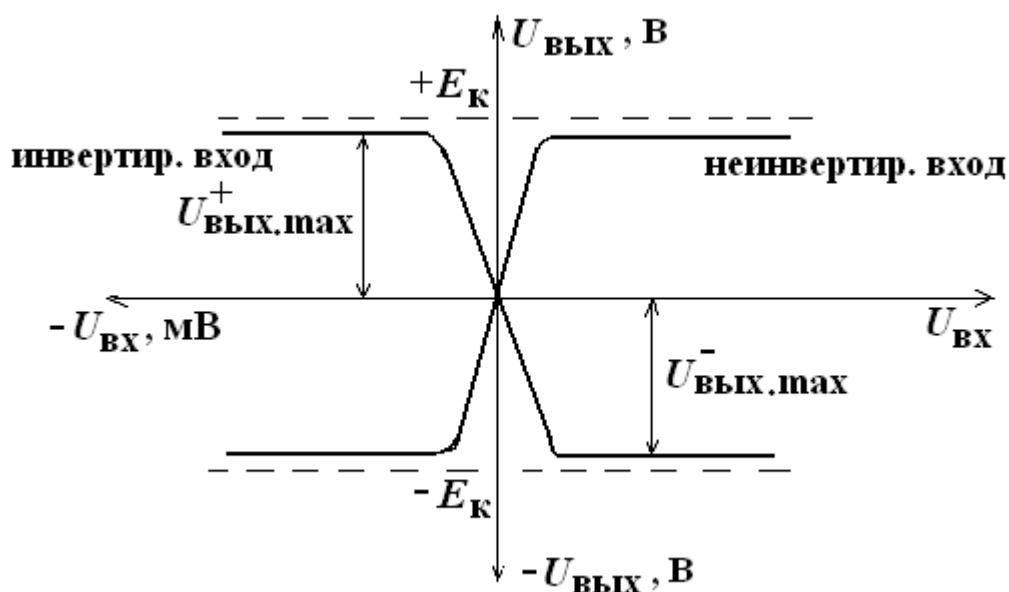


Рис. 6.21. Передаточные характеристики ОУ

Наклонному (линейному) участку кривых соответствует пропорциональная зависимость  $U_{\text{вых}}$  от  $U_{\text{вх}}$ , а сигнал на выходе повторяет по форме сигнал на входе усилителя.

При нелинейном режиме (насыщение): форма сигнала на выходе ОУ отличается от формы сигнала  $U_{\text{вх}}$  (в частности, синусоидальный входной сигнал ограничивается по амплитуде и на выходе ОУ становится прямоугольным либо трапецеидальным).

**Амплитудно-частотная характеристика ОУ** показана на рис. 6.3, б.

Для анализа цепей с операционными усилителями вводят понятие идеального ОУ. **Идеальный операционный усилитель** имеет бесконечно большое входное сопротивление, вследствие чего  $I_{\text{вх}} \rightarrow 0$ ; нулевое выходное сопротивление; обладает бесконечно большим и частотно независимым коэффициентом усиления  $K_{\text{д}} \rightarrow \infty$ ; коэффициент передачи синфазного сигнала близок к нулю  $K_{\text{сф}} \rightarrow 0$  и выполняется условие баланса: при  $U_{\text{вх}} = 0$  и  $U_{\text{вых}} = 0$ .

## 6.5. Усилительные схемы на ОУ

Несмотря на то что ОУ сочетает в себе качества усилительных устройств, непосредственно в качестве усилителя он не применяется. Это связано с большим коэффициентом усиления ОУ. При  $K_U \geq 10^5$  ОУ будет быстро насыщаться (рис. 6.21) уже при наличии на входе сигнала в несколько десятков микровольт. Поэтому обычно ОУ используется для усиления сигналов только в сочетании с отрицательной обратной связью.

*В ОУ обратная связь отрицательна, если она подается с выхода усилителя на инвертирующий вход; и положительна при подаче на неинвертирующий вход.*

В простейшем случае цепь ОС представляет собой резистивный делитель напряжения. При этом схема с ОУ действует как линейный усилитель, режим работы которого находится в пределах линейного участка передаточной характеристики (рис. 6.21).

Существует два различных варианта подключения входного сигнала к ОУ. Если сигнал подан на инвертирующий вход ( $U_+$ ), то получаем инвертирующий усилитель. Если сигнал подан на неинвертирующий вход, то получаем неинвертирующий усилитель ( $U_-$ ).

**Инвертирующий усилитель** представляет собой ОУ, охваченный цепью параллельной ООС по напряжению (рис. 6.22), которая осуществляется резистором обратной связи  $R_{\text{ОС}}$ . Коэффициент усиления усилителя с ОС задается делителем напряжения  $R_{\text{ОС}}$  и  $R_1$ . Усилитель способен усиливать сигналы как переменного, так и постоянного тока. На рис. 6.22 к инверсному входу ОУ через входной резистор  $R_1$  приложено положительное напряжение  $E_{\text{вх}}$ . Напряжение между входами ( $U_+$ ) и ( $U_-$ ) практически равно  $U_0 \approx 0$ . Поэтому неинверсный входной зажим также находится под нулевым потенциалом.

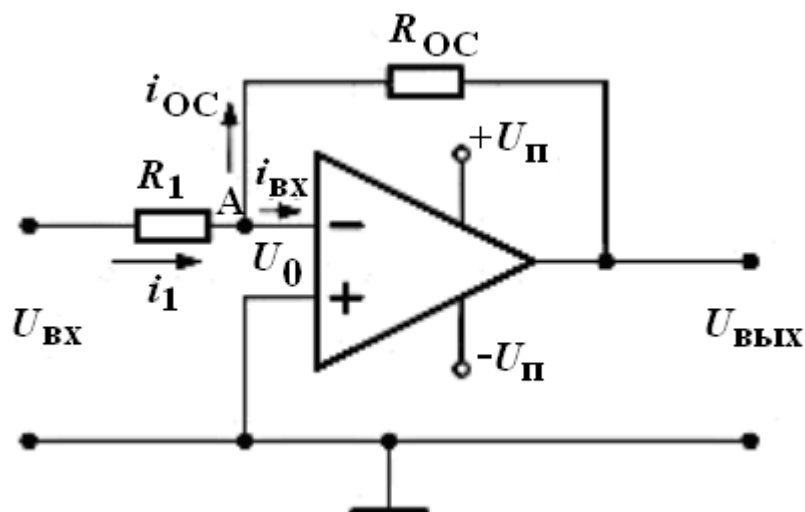


Рис. 6.22. Схема инвертирующего усилителя на ОУ

Параметры схемы определим с помощью уравнения токов для узла А. Если принять, что сопротивление входа бесконечно велико ( $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ ), то входной ток ОУ будет стремиться к нулю ( $I_{\text{ОУ}} \rightarrow 0$ ), а ток  $I_{\text{вх}}$  будет определяться только током ОС:  $I_{\text{вх}} = I_{\text{ОС}}$ . Отсюда

$$\frac{U_{\text{вх}} - U_0}{R_1} = \frac{U_{\text{вых}} - U_0}{R_{\text{ОС}}}. \quad (6.7)$$

При коэффициенте усиления ОУ  $K_{\text{ОУ}} \rightarrow \infty$  напряжение на входе будет  $U_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{K_{\text{ОУ}}} \rightarrow 0$ , тогда выражение (6.7) преобразуется к виду:

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{ОС}}}. \quad (6.8)$$

Таким образом, коэффициент усиления схемы инвертирующего усилителя с отрицательной обратной связью можно рассчитать по формуле:

$$K_{U(\text{ОС})} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}. \quad (6.9)$$

Знак «минус» указывает на инверсию выходного сигнала.

Из полученного выражения следует, что коэффициент усиления идеального инвертирующего ОУ **не зависит от величины коэффициента усиления самого ОУ, а определяется только параметрами пассивной части схемы**, т.е. величинами резисторов в цепи ОС.

**Неинвертирующий усилитель** представляет собой ОУ, охваченный цепью последовательной ООС по напряжению (рис. 4.6). ООС включена между выходом и инвертирующим входом.

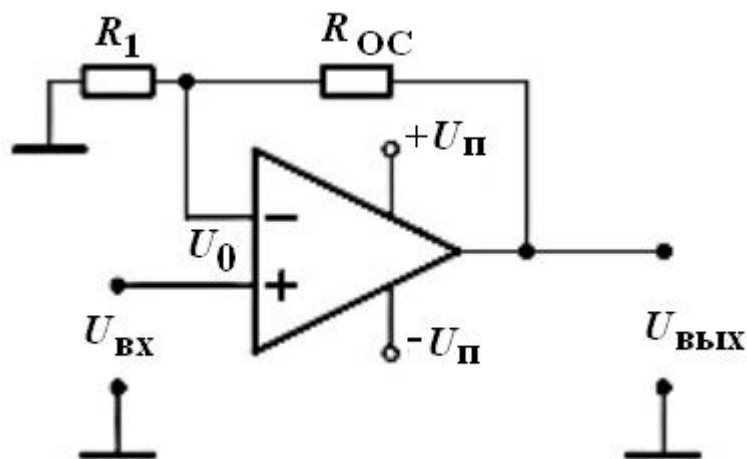


Рис. 6.23. Схема неинвертирующего усилителя

При этом инвертирующий вход заземляется через резистор  $R_1$ , а входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Коэффициент обратной связи в этой схеме равен:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_{OC}}. \quad (6.10)$$

Поскольку для линейной части характеристики напряжение между входами достаточно мало ( $U_0 \rightarrow 0$ ), входное напряжение связано с выходным напряжением соотношением  $U_{ВХ} = U_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_{OC}}$ . Отсюда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K_{U(OC)} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = 1 + \frac{R_{OC}}{R_1} \quad (6.11)$$

т.е.  $K_{U(OC)}$  определяется лишь отношением сопротивлений  $(R_1 + R_{OC})/R_1$  и не зависит от  $K_U$ .

Как следует из формулы (4.5), коэффициент усиления неинвертирующего усилителя не может быть меньше единицы, тогда как для коэффициента усиления инвертирующего усилителя (4.3) такого ограничения не существует.

**Инвертирующий сумматор** предназначен для суммирования величин входных напряжений (рис. 6.24). Схема выполнена на базе инвертирующего усилителя с числом входных параллельных ветвей, равных количеству сигналов, предназначенных для сложения.

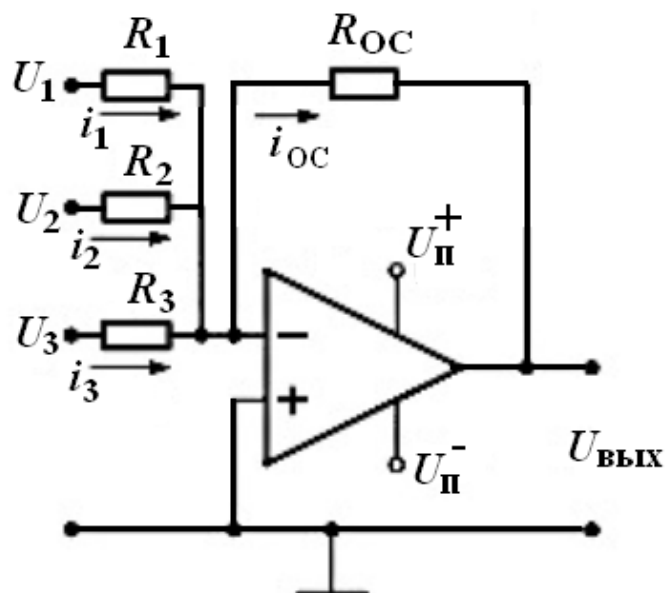


Рис. 6.24. Схема инвертирующего сумматора

Принцип работы аналогового сумматора основан на суммировании токов входных сигналов, протекающих через одинаковые резисторы  $R_i$ . При  $R_{\text{вхОС}} \gg R_i$ ,  $I_{\text{вхОУ}} \rightarrow 0$  и  $I_1 + I_2 + I_3 + \dots = I_{\text{ОС}}$ . Поскольку напряжение  $U_0$  между входами ОУ пренебрежимо мало, то сумма входных токов, протекающих по  $R_{\text{ОС}}$ , создает на нем напряжение, равное  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(I_1 + I_2 + I_3)R_{\text{ОС}}. \quad (6.12)$$

Поставим вместо токов их выражения  $\frac{U_{\text{вх}i}}{R_i}$  и, приняв

$R_{\text{ОС}} = R_1 = R_2 = R_3$ , получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{U_{\text{вх1}}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх2}}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх3}}}{R_1}\right)R_{\text{ОС}} = -(U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + U_{\text{вх3}}) \quad (6.13)$$

Т.е. выходной сигнал схемы равен сумме входных сигналов с обратным знаком.

**Интегратор** – схема, выполняющая математическую операцию интегрирования. Интегратор выполняется на базе инвертирующего ОУ, в которой резистор  $R_{\text{ОС}}$  заменен на конденсатор (рис. 6.25).

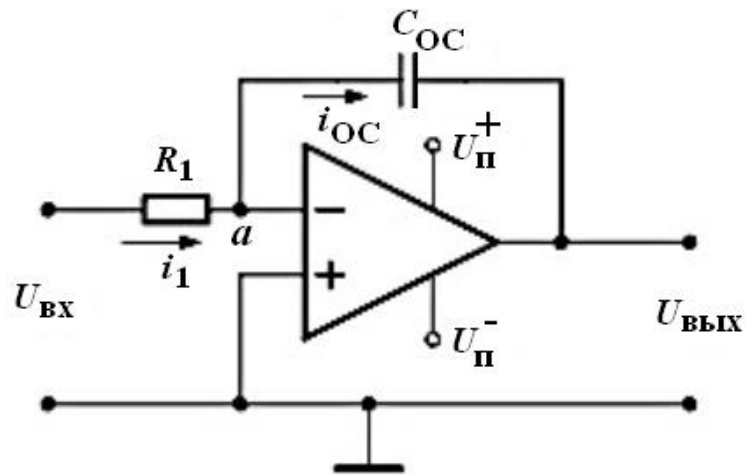


Рис. 6.25. Схема интегратора на ОУ

По аналогии со схемой инвертирующего усилителя  $i_C = i_R$ , можно записать

$$\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} = -C \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt}, \quad (6.14)$$

или в интегральной форме:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt + U_{\text{вых}0}, \quad (6.15)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}0}$  – выходное напряжение при  $t = 0$ . Таким образом, значение напряжения на выходе интегратора пропорционально интегралу от входного напряжения.

Интеграторы широко используются при построении генераторов линейно изменяющегося напряжения.