

## Глава 6. Операционный усилитель

### 6.1 Параметры операционного усилителя

Операционными усилителями (ОУ) называется широкий класс усилителей постоянного тока с большим коэффициентом усиления, предназначенных для работы с глубокой обратной связью. Эта обратная связь настолько велика, что параметры схем на ОУ практически полностью определяются видом и характеристиками элементов, включенных в цепь обратной связи.

Рассмотрим ряд электрических параметров, определяющих основные свойства ОУ. Понимание значения того или иного параметра позволяет выбрать необходимый тип ОУ для каждого конкретного применения и схемотехнически обеспечить его работу в допустимом режиме.

**Идеальным ОУ** называется усилитель, обладающий очень высокими или, как принято говорить, идеальными параметрами. Основные характеристики такого ОУ:

коэффициент усиления бесконечно велик ( $K \rightarrow \infty$ );

полоса пропускания бесконечно велика ( $\Delta F \rightarrow \infty$ );

входное сопротивление бесконечно велико ( $R_{вх} \rightarrow \infty$ );

выходное сопротивление бесконечно мало ( $R_{вых} \rightarrow 0$ );

выходное напряжение равно нулю при нулевом напряжении на входе.

Хотя столь высокие параметры не могут быть реализованы, развитие техники ОУ идет в направлении приближения характеристик реальных усилителей к идеальным, а качество ОУ определяется степенью этого приближения.

Переходя к реальным значениям параметров, характеризующих современные ОУ, необходимо иметь в виду, что параметры ОУ, охваченных цепями обратных связей, в конкретных схемах включения могут значительно отличаться от собственных параметров ОУ, рассматриваемых ниже.

**Коэффициент усиления ОУ** определяется отношением изменения входного напряжения к вызвавшему его изменению напряжения между дифференциальными входами усилителя при разомкнутой цепи обратной связи. В современных ОУ величина коэффициента усиления достигает десятков, а иногда и сотен тысяч.

Коэффициент усиления ОУ без обратной связи зависит от сопротивления нагрузки, температуры окружающей среды, напряжения питания и др. ОУ редко используются с разомкнутой цепью обратной связи, за исключением случаев применения в компараторах напряжений.

**Входное сопротивление.** 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. Оно имеет величину от нескольких  $k(\text{Ом})$  до нескольких  $M(\text{Ом})$ . Входное сопротивление для синфазного сигнала, т. е. сопротивление ОУ для входного напряжения, приложенного одновременно к обоим дифференциальным входам ОУ относительно земли, определяется сопротивлением между замкнутыми накоротко входами ОУ и заземляющей шиной. Входное сопротивление для синфазных сигналов обычно очень велико и составляет десятки  $M(\text{Ом})$ .

**Выходное сопротивление** – это сопротивление ОУ, измеренное со стороны подключения нагрузки. Для разных типов ОУ находится в пределах от 50 до 2000  $\text{Ом}$ . 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.

**Полоса пропускания** определяется видом частотной характеристики ОУ, т. е. зависимостью его усиления от частоты входного сигнала. Типовая идеализированная частотная характеристика ОУ (рис. 6.1) имеет две характерные точки, лежащие на частотах  $f_c$  и  $f_1$ , где  $f_c$  – частота среза, соответствующая падению усиления на 3 дБ, т. е. до уровня 0.707;  $f_1$  – частота усиления, на которой коэффициент усиления становится равным единице.

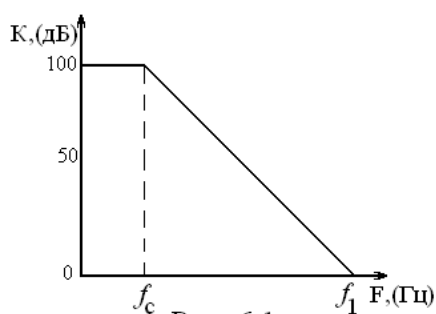


Рис. 6.1

Зависимость коэффициента усиления от частоты не полностью характеризует частотные свойства реального усилителя. С повышением частоты уменьшается предельно достижимая амплитуда выходного сигнала из-за ограничения по току, наступающего в одном из каскадов ОУ. При этом сохраняется неизменной скорость нарастания выходного напряжения, максимальная величина которой и используется для характеристики этой особенности ОУ. Максимальная скорость нарастания современных ОУ находится в пределах 0.3 – 50  $\text{В/мкс}$ .

**Смещение уровня выходного напряжения ОУ.** Как отмечалось выше, идеальный ОУ при входном напряжении, равном нулю, должен иметь точно нулевое напряжение на выходе. Однако в реальном усилителе из-за неизбежного рассогласования параметров схемных элементов даже при отсутствии входного сигнала на выходе ОУ появляется небольшое постоянное напряжение. Величина этого напряжения, а главное, его уход (дрейф) в зависимости от температуры, времени и других факторов, который неотличим от полезного сигнала, является одним из главных ограничений,

определяющим точность работы ОУ. Эти погрешности можно оценить с помощью приведенных ниже параметров.

**Напряжение смещения нуля** 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. Типичная паспортная величина напряжения смещения нуля  $10 - 50 \text{ мВ}$ . Величина дрейфа  $1 - 50 \text{ мкВ} / ^\circ\text{C}$ .

**Входные токи ОУ** обусловлены конечной величиной входного сопротивления реального ОУ. Для характеристики входных токов используются два параметра;

начальный входной ток, который определяется входным сопротивлением ОУ; обычно сила входного тока составляет  $1 - 100 \text{ мкА}$ ;

начальный разностный входной ток, определяемый разностью начальных входных токов каждого из входов усилителя и вызванный разностью коэффициентов усиления по току входных транзисторов дифференциального каскада. Как правило сила разностного тока лежит в пределах  $0.1 - 10 \text{ мкА}$ . Входные токи усилителя протекают по внешним цепям каждого из его входов через сопротивление соответствующего источника сигнала. Если эти сопротивления неодинаковы, то разность падения напряжения на них вызывает смещение напряжения на выходе ОУ. Для исключения этой погрешности необходимо при проектировании схем с ОУ стремиться к выравниванию сопротивлений, включенных между входами усилителя и землей, однако не во всех схемах включения ОУ это возможно.

Кроме того даже в этом случае остается погрешность за счет разностного входного тока. Так же как и напряжение смещения, входные токи и разностный ток зависят от температуры и других факторов. Для компенсации смещения уровня во многих ОУ предусматривается начальная балансировка с помощью подключения подстроечного резистора. Подстройка производится при заземленных входах ОУ до установки напряжения на выходе равного нулю.

**Коэффициент подавления синфазных сигналов.** Одно из важных достоинств ОУ – подавление совпадающих по фазе сигналов. В идеальном случае коэффициенты усиления по обоим входам должны быть одинаковы по величине и противоположны по знаку. И если к обоим входам приложено одинаковое напряжение, выходное напряжение не должно изменяться. Реально коэффициенты усиления по обоим входам не точно равны друг другу и на выходе присутствует выходное напряжение. Отношение изменения выходного напряжения к изменению входных напряжений, совпадающих по фазе, деленное на коэффициент усиления ОУ без обратной связи, называется коэффициентом подавления синфазного сигнала. Его величина лежит в пределах от 80 до 100 дБ.

$$K_{\text{ПСС}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}} K_{\text{БЕЗ(ООС)}}}. \quad (6.1)$$

## 6.2 Базовые схемы включения ОУ

**Инвертирующий усилитель**, схема которого представлена на рис. 6.2, преобразует входные сигналы, поступающие на инвертирующий вход ОУ, так, что выходной сигнал имеет фазу, противоположную фазе входного сигнала.

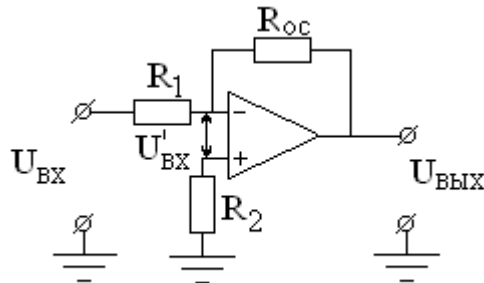


Рис. 6.2

Если при рассмотрении этой схемы считать ОУ «идеальным», у которого входной ток равен нулю, а коэффициент усиления  $K$  достаточно велик, то можно определить токи в схеме по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_{BX} - U'_{BX}}{R_1}, \quad I = \frac{U'_{BX} - U_{ВЫХ}}{R_{oc}}. \quad (6.2)$$

При этом  $I_1 = I_{oc}$ , так как эти токи протекают по одной цепи. В тоже время из выражения  $U_{ВЫХ} = -KU'_{BX}$  видно, что  $U'_{BX} \rightarrow 0$ , так как  $K \rightarrow \infty$ . С учетом этого в уравнениях для токов можно пренебречь членом  $U'_{BX}$ . Тогда

$$\frac{U_{BX}}{R_1} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{oc}} \quad (6.3)$$

или

$$K_{oc} = -\frac{U_{ВЫХ}}{U_{BX}} = -\frac{R_{oc}}{R_1}. \quad (6.4)$$

Как видно из этого выражения, коэффициент передачи  $K_{oc}$  при инвертирующем включении целиком определяется параметрами элементов цепи обратной связи. Кроме того, напряжение  $U'_{BX}$  на инвертирующем входе при достаточно большом коэффициенте усиления  $K$  и заземленном неинвертирующем входе пренебрежимо мало, что позволяет рассматривать инвертирующий вход как точку «кажущейся земли». Из этого также следует, что входное сопротивление инвертирующего усилителя равно сопротивлению резистора  $R_1$ , так как его правый вывод подключен к точке с нулевым потенциалом.

Хотя коэффициент усиления реального ОУ на постоянном токе и низких частотах весьма велик, все же его величина конечна. С учетом этого коэффициент усиления инвертирующего усилителя имеет вид:

$$K_{oc} = \frac{K}{1 + K \frac{R_1}{R_{oc}}}. \quad (6.5)$$

Следует отметить, что на низких частотах, где собственный коэффициент усиления ОУ велик, усиление схемы определяется практически только цепью обратной связи. На высоких же частотах глубина обратной связи падает из-за снижения величины  $K$ , которая начинает оказывать заметное влияние на усиление усилителя с замкнутой обратной связью.

Выходное сопротивление инвертирующего усилителя уменьшается при увеличении глубины обратной связи и определяется следующим соотношением:

$$R = \frac{R_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{oc}}{KR_1}. \quad (6.6)$$

Это соотношение справедливо при условии  $K \gg \frac{R_{oc}}{R_1}$ , когда собственный коэффициент усиления ОУ значительно больше отношения  $\frac{R_{oc}}{R_1}$ , т. е. при условии достаточно глубокой отрицательной обратной связи.

Полоса пропускания ОУ с замкнутой петлей обратной связи определяется значением частоты единичного усиления  $f_1$  и увеличивается при снижении общего коэффициента усиления схемы  $K_{oc}$ :

$$f = \frac{R_1 f_1}{R_{oc}}. \quad (6.7)$$

Выходное напряжение смещения инвертирующего усилителя из-за входных погрешностей на входе ОУ определяется следующим выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{cm} \frac{R_{oc}}{R_1} + I_{\text{ВХ1}} R_{oc} - I_{\text{ВХ2}} R_2 \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1}. \quad (6.7)$$

Для уменьшения выходного напряжения смещения сопротивление резистора  $R_2$  выбирается равным сопротивлению параллельно соединенных резисторов  $R_1$  и  $R_{oc}$  т. е.

$$R = \frac{R_1 R_{oc}}{R_1 + R_{oc}}. \quad (6.8)$$

Тогда

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{cm} \frac{R_{oc}}{R_1} + I_{\text{ВХ1}} R_{oc} - I_{\text{ВХ2}} R_{oc} = U_{cm} \frac{R_{oc}}{R_1} + \Delta I_{\text{ВХ}} R_{oc} = \left( \frac{U_{cm}}{R_1} + \Delta I_{\text{ВХ}} \right) R_{oc}. \quad (6.9)$$

Как видно из приведенного выражения, выходное напряжение смещения равно алгебраической сумме входного напряжения смещения самого ОУ, умноженного на коэффициент усиления инвертирующего усилителя, и напряжения, создаваемого разностным током на сопротивлении обратной связи. При работе инвертирующего усилителя от низкоомного источника, когда  $\frac{U_{cm}}{R_1} > \Delta I_{\text{ВХ}}$ , входная погрешность определяется напряжением смещения

самого ОУ, а в случае высокоомного источника, когда  $\frac{U_{cm}}{R_1} < \Delta I_{BX}$ , – разностью входных токов. Для уменьшения входных погрешностей необходимо, чтобы входной ток сигнала всегда был больше токов входных погрешностей:

$$\frac{U_{BX}}{R_1} \gg \frac{U_{cm}}{R_1} + \Delta I_{BX}. \quad (6.10)$$

**Неинвертирующий усилитель**, схема которого представлена на рис. 6.3, в отличие от предыдущей схемы не изменяет фазу входного сигнала и имеет очень большое входное сопротивление.

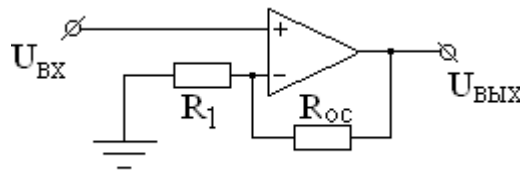


Рис. 6.3

Входное сопротивление усилителя равно входному дифференциальному сопротивлению ОУ, умноженному на отношение собственного коэффициента усиления операционного усилителя  $K$  к усилению по неинвертирующему входу с замкнутой петлей обратной связи:

$$R_{BX} = \frac{K}{K_{oc}} R_{д} \quad (6.11)$$

Коэффициент передачи неинвертирующего усилителя определяется следующим выражением:

$$K = \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1} \quad (6.12)$$

и становится равным единице при  $R \rightarrow \infty$  или  $R_{oc} = 0$ . В этом случае схема имеет наибольшее входное сопротивление и является по существу аналогом эмиттерного повторителя.

Выходное сопротивление неинвертирующего усилителя зависит от глубины обратной связи и выходного сопротивления ОУ при разомкнутой обратной связи:

$$R_{ВЫХ} = \frac{R_{ВЫХ\_ОУ} (R_1 + R_{oc})}{KR_1}. \quad (6.13)$$

Для уменьшения выходных погрешностей за счет входных токов в схеме неинвертирующего усилителя сопротивление параллельно соединенных резисторов  $R_1$  и  $R_{oc}$  должно быть равно сопротивлению источника сигнала, а для случая единичного усиления сопротивление резистора  $R_{oc}$  должно быть равно сопротивлению источника сигнала. При использовании емкостной связи с источником сигнала вход неинвертирующего усилителя нельзя оставлять незаземленным. В этом случае сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_{oc}$

должны выбираться в соответствии с сопротивлением резистора, включенного с неинвертирующего входа на землю.

**Суммирующий усилитель**, схема которого представлена на рис. 6.5, является частным случаем инвертирующего усилителя, на выходе которого получается инвертированный сигнал, пропорциональный алгебраической сумме входных сигналов.

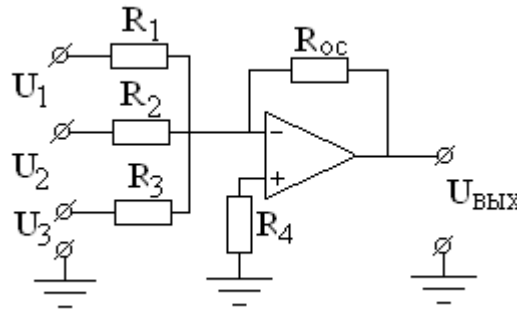


Рис. 6.5

Усиление каждого входного сигнала равно отношению сопротивления резистора  $R_{oc}$  к сопротивлению соответствующего входного резистора. Ширина полосы пропускания определяется так же, как у инвертирующего усилителя, где в качестве входного сопротивления подразумевается сопротивление параллельно соединенных входных резисторов сумматора.

Главным достоинством сумматора является то, что суммирование производится без взаимных помех источников сигнала, так как эти сигналы суммируются в точке с «нулевым» потенциалом. Выходное напряжение сумматора равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \right) R_{oc}. \quad (6.14)$$

Условия правильного включения ОУ те же самые, что и для инвертирующего усилителя.

**Дифференциальный (разностный) усилитель**, схема которого показана на рис. 6.6, усиливает разность двух входных напряжений и является сочетанием инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

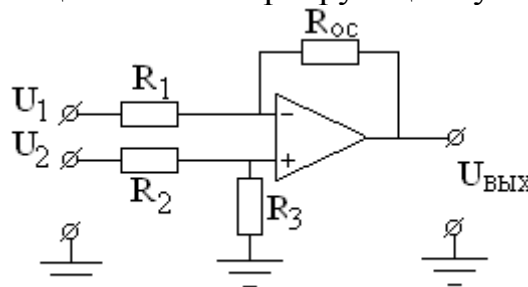


Рис. 6.6

Эта схема позволяет преобразовать дифференциальный незаземленный источник сигнала в источник, выходное напряжение которого изменяется относительно земли (корпуса).

Коэффициент усиления равен:

$$K_{oc} = \frac{R_1 + R_{oc}}{R_2 + R_3} \frac{R_3}{R_1} U_2 - \frac{R_{oc}}{R_1} U_1. \quad (6.15)$$

Для случая когда  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_{oc}$ , коэффициент усиления равен:

$$K = \frac{R_{oc}}{R_1} (U_2 - U_1). \quad (6.16)$$

Этот случай соответствует минимальной входной погрешности за счет входных токов.

Ширина полосы пропускания определяется так же, как и для инвертирующего усилителя.

Входные сопротивления дифференциального усилителя по двум входам не обязательно одинаковы. Входное сопротивление по инвертирующему входу такое же, как у инвертирующего усилителя, а по неинвертирующему – равно сумме сопротивлений резисторов  $R_2$  и  $R_3$ .

**Интегратор.** Схема интегратора (рис. 6.7) совершенно идентична схеме инвертирующего усилителя за исключением того, что в место резистора обратной связи здесь включен конденсатор.

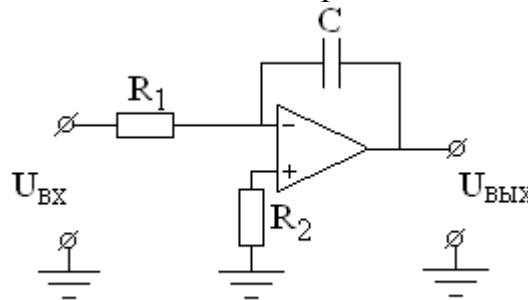


Рис. 6.7

Это устройство предназначено для выполнения математической операции интегрирования. В интеграторе скорость изменения выходного напряжения пропорциональна напряжению на входе и обратно пропорциональна постоянной времени  $\tau = R_1 C$ :

$$U_{вых} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^T U_{вх} dt. \quad (6.17)$$

При ступенчатом изменении входного сигнала скорость изменения выходного напряжения будет равна:

$$\frac{\Delta U_{вых}}{\Delta t} = -\frac{U_{вх}}{R_1 C}, \quad (6.18)$$

т. е. на выходе интегратора будет формироваться линейно-нарастающее (спадающее) напряжение.

Для синусоидального входного сигнала интегратор является фильтром нижних частот, коэффициент усиления которого обратно пропорционален частоте.

Выходное напряжение «идеального» интегратора не изменяется, если напряжение на входе становится равным нулю, т. е. входной ток равняется



нулю. Он как бы хранит предыдущее значение. Это свойство интегратора используется в схеме динамического запоминающего устройства. Однако реально выходное напряжение интегратора при нулевом входном напряжении изменяется, достигая в пределе величины максимального выходного напряжения ОУ, за счет того, что конденсатор  $C$ , перезаряжается входным током ОУ и током смещения, определяемым входным напряжением смещения и входным резистором  $R_1$ . Для установки начальных условий интегрирования обычно применяют ключи, один из которых подключают параллельно конденсатору  $C$ , а с другой параллельно или последовательно источнику входного сигнала.

**Дифференциатор.** Менее широко используемая схема дифференциатора (рис. 6.8) предназначена для выполнения математической операции дифференцирования.

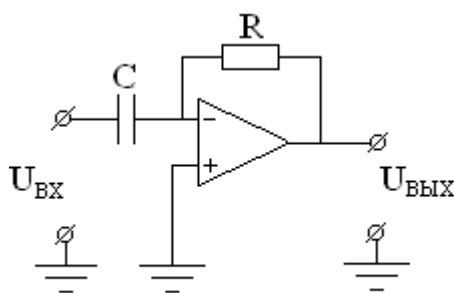


Рис. 6.8

Выходное напряжение дифференциатора пропорционально скорости изменения входного напряжения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_1 C \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}. \quad (6.19)$$

При синусоидальном входном напряжении дифференциатор работает как фильтр верхних частот, коэффициент усиления которого пропорционален частоте входного сигнала.

Недостаток дифференциатора – чувствительность к шумам высокой частоты. Устраняется этот недостаток ограничением усиления на высоких частотах при помощи резистора  $R$ , включенного последовательно с емкостью  $C$ . В этом случае схема будет работать как дифференциатор до частот, меньших частоты, определяемой выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (6.20)$$

### 6.3 Источник тока на ОУ

На рис. 6.9 изображена схема, которая является хорошим приближением к идеальному источнику тока, без сдвига напряжения  $U_{\text{БЭ}}$ , характерного для транзисторного источника тока.

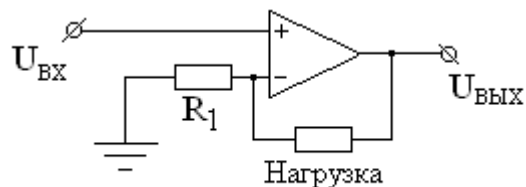


Рис. 6.9

Благодаря отрицательной ОС на инвертирующем входе поддерживается напряжение  $U_{ВХ}$ , под действием которого через нагрузку протекает ток:

$$I = U_{ВХ} R. \quad (6.21)$$

Основной недостаток этой схемы состоит в том, что нагрузка является «плавающей» (она не заземлена). С помощью такого источника тока нельзя, например, получить пригодный к использованию пилообразный сигнал, напряжение которого отсчитывалось бы относительно потенциала земли. Этот недостаток можно преодолеть, если, например, всю схему (источники питания и все остальное) сделать «плавающей», а нагрузку заземлить (рис. 6.10)

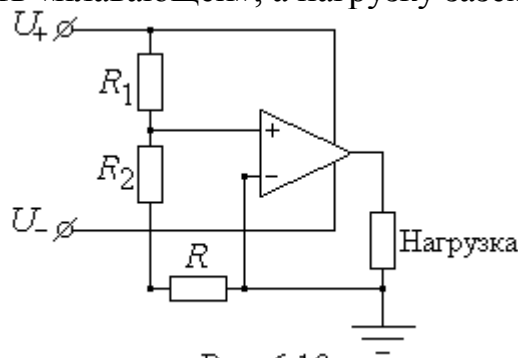


Рис. 6.10

Штриховой линией обведен рассмотренный выше источник тока с источником питания. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют делитель напряжения для установки тока. Представленную схему используют для формирования токов, протекающих через заземленную нагрузку, но ее существенный недостаток в том, что управляющий вход является плавающим, это значит, что выходной ток нельзя задать (запрограммировать) с помощью входного напряжения, отсчитываемого от потенциала земли.

#### 6.4 Источники тока для заземленных нагрузок

С помощью ОУ и подключенного к нему транзистора можно построить простой и высококачественный источник тока для заземленной нагрузки; небольшое дополнение к схеме ОУ позволяет использовать на управляющем входе напряжение, измеряемое относительно земли (рис. 6.11) В первой схеме обратная связь создает на резисторе  $R$  падение напряжения, равное  $U_{П} - U_{ВХ}$ , которое в свою очередь порождает эмиттерный ток (а следовательно, и выходной ток), равный:

$$I_{Э} = \frac{U_{П} - U_{ВХ}}{R}. \quad (6.22)$$

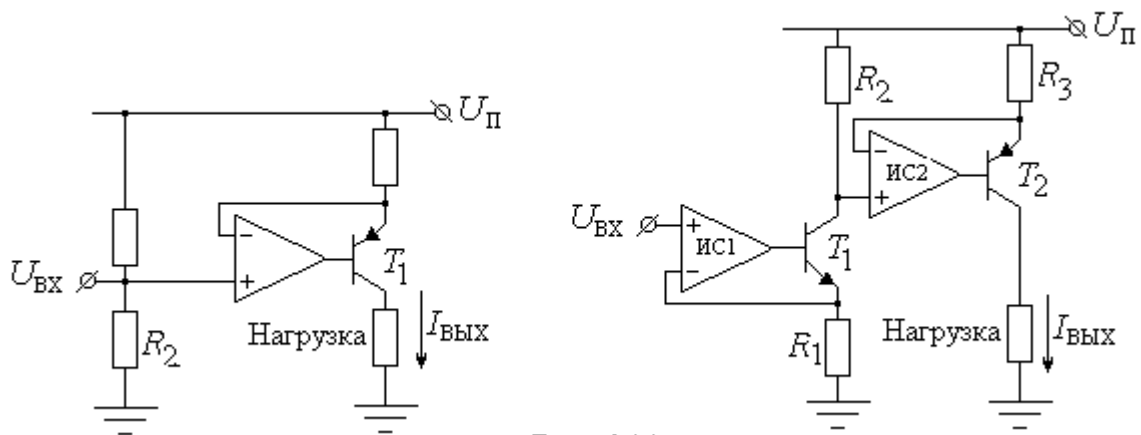


Рис. 6.11

При работе с этой схемой не приходится беспокоиться о напряжении  $U_{БЭ}$  и его изменениях, связанных с изменением температуры,  $I_K, U_{КЭ}$  и т. п. Несовершенство этого тока (не будем принимать во внимание ошибки ОУ  $I_{СМ}, U_{СДВ}$ ) проявляется лишь в том, что небольшой базовый ток может немного изменяться в зависимости от  $U_{КЭ}$  (предполагаем, что ОУ не потребляет входной ток); этот недостаток – небольшая плата за возможность использования заземленной нагрузки; если в качестве транзистора  $T_1$  использовать составной транзистор Дарлингтона, то погрешность будет существенно уменьшена. Погрешность возникает в связи с тем что ОУ стабилизирует эмиттерный ток, а в нагрузку поступает коллекторный ток. Если в этой схеме в место биполярного использовать полевой транзистор то проблема будет полностью решена, так как затвор полевого транзистора тока не потребляет.

В рассматриваемой схеме выходной пропорционален величине, на которую напряжение, приложенное к неинвертирующему входу ОУ, ниже, чем напряжение питания  $U_{\Pi}$ ; иными словами, напряжение, с помощью которого программируется работа схемы, измеряется относительно напряжения питания  $U_{\Pi}$  и все будет в порядке, если напряжение  $U_{\text{ВХ}}$  является фиксированным и формируется с помощью делителя напряжения; если же напряжение на вход должно подаваться от внешнего источника то возможны неприятности. Этому недостатка лишена вторая схема в которой аналогичный первый источник тока с транзистором  $n-p-n$  - типа служит для преобразования входного управляющего напряжения (измеряемого относительно земли) во входное напряжение, измеряемое относительно  $U_{\Pi}$ , для окончного источника тока. Существенным замечанием для второй схемы является то, что ОУ должен работать при условии, что напряжение на его входах близко или равно положительному питающему напряжению.