

начнет увеличиваться, то это приведет к увеличению напряжений U_{RI} и $U_{из}$, что будет препятствовать значительному увеличению тока I_{CH} .

Модуль коэффициента усиления каскада в области средних частот определяется равенством

$$K_U = S \frac{R_C R_H}{R_C + R_H},$$

где S — крутизна стокзатворной характеристики полевого транзистора, которую определяют по справочникам.

Назначение конденсаторов $C1$, $C2$ и $C4$ аналогично назначению соответствующих конденсаторов RC -усилителя на биполярном транзисторе.

Частотные характеристики рассматриваемого усилителя подобны частотным характеристикам RC -усилителя на биполярном транзисторе.

2.5. Усилители постоянного тока

Усилителями постоянного тока называют такие устройства, которые могут усиливать медленно изменяющиеся электрические сигналы, т. е. они способны усиливать и переменные, и постоянные составляющие входного сигнала. Усилители постоянного тока имеют много разновидностей (дифференциальные, операционные, с преобразованием входного сигнала и др.). Поскольку такие устройства пропускают наряду с переменной составляющей еще и постоянную, то отдельные каскады должны быть связаны между собой либо непосредственно, либо через резисторы, но не через разделительные конденсаторы или трансформаторы, которые не пропускают постоянную составляющую.

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

Один из возможных путей уменьшения дрейфа нуля — использование дифференциальных усилителей.

2.5.1. Дифференциальные усилители

Принцип работы дифференциального усилителя поясним на примере четырехплечевого моста (рис. 2.28, *a*), выполненного на резисторах $R1$ – $R4$. В одну диагональ включен источник напряжения U , а в другую — сопротивление нагрузки R_H . Если выполняется условие

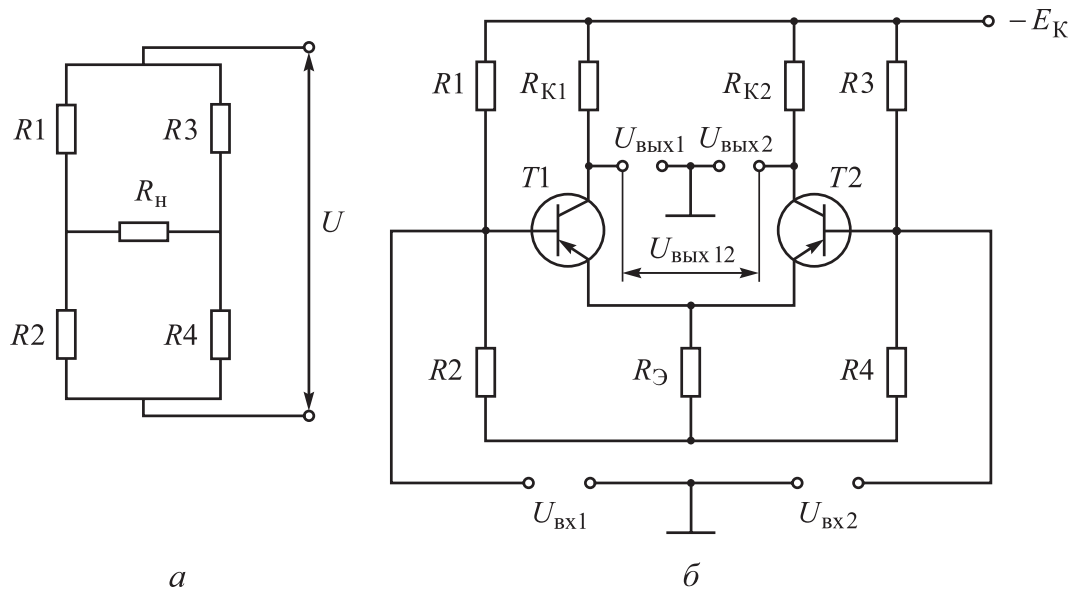


Рис. 2.28. Схемы четырехплечевого моста (а) и дифференциального усилителя (б):

U — источник напряжения; R_H — сопротивление нагрузки; R_1 – R_4 — сопротивления, обеспечивающие баланс схемы; U_{BX1} , U_{BX2} — входные напряжения; $U_{ВЫХ12}$ — выходное дифференциальное напряжение; $U_{ВЫХ1}$, $U_{ВЫХ2}$ — выходные напряжения; R_E — сопротивление в эмиттерной цепи; R_{K1} , R_{K2} — равные сопротивления в коллекторной цепи; E_K — источник напряжения в выходной цепи; T_1 , T_2 — одинаковые транзисторы

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (2.12)$$

то мост сбалансирован и ток в R_H будет равен нулю. Баланс не нарушится, если будут меняться напряжение U и сопротивления резисторов плеч моста, но при условии, что соотношение (2.12) сохранится.

На рис. 2.28, б представлена схема простейшего дифференциального усилителя. Она аналогична схеме моста на рис. 2.28, а. Если R_2 и R_4 заменить транзисторами T_1 и T_2 и считать, что $R_1 = R_{K1}$, $R_3 = R_{K2}$, сопротивления R_{K1} и R_{K2} следует выбирать равными, а транзисторы T_1 и T_2 — идентичными. Тогда при отсутствии входного сигнала U_{BX1} и U_{BX2} выходное напряжение $U_{ВЫХ12}$ также равно нулю. При температурном воздействии на оба идентичных транзистора их параметры изменяются одинаково, а разность $U_{ВЫХ1}$ и $U_{ВЫХ2}$ остается неизменной.

Если на входы схемы U_{BX1} и U_{BX2} подать одинаковые сигналы по величине и фазе, называемые синфазными, то соответственно одинаково будут изменяться и входные напряжения $U_{ВЫХ1}$ и $U_{ВЫХ2}$, а следовательно, напряжение $U_{ВЫХ12}$ будет сохраняться равным нулю. Если на входы U_{BX1} и U_{BX2} подать одинаковые по величине, но сдвинутые по фазе на 180° сигналы, называемые дифференциальными, то возрастание тока в одном плече будет

сопровождаться уменьшением тока в противоположном, вследствие чего появится напряжение на дифференциальном выходе $U_{\text{вых}12}$.

Изменение температуры, паразитные наводки, старение элементов и другие факторы можно рассматривать как синфазные входные воздействия. Исходя из этого дифференциальный каскад обладает очень высокой устойчивостью работы и малочувствителен к помехам.

2.5.2. Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах

Схема дифференциального усилителя представлена на рис. 2.29.

При анализе дифференциального усилителя широко используют дифференциальное входное напряжение $u_{\text{вх.диф}}$ и синфазное входное напряжение $u_{\text{вх.синф}}$. Дифференциальное входное напряжение определяется выражением

$$u_{\text{вх.диф}} = u_{\text{вх}2} - u_{\text{вх}1}.$$

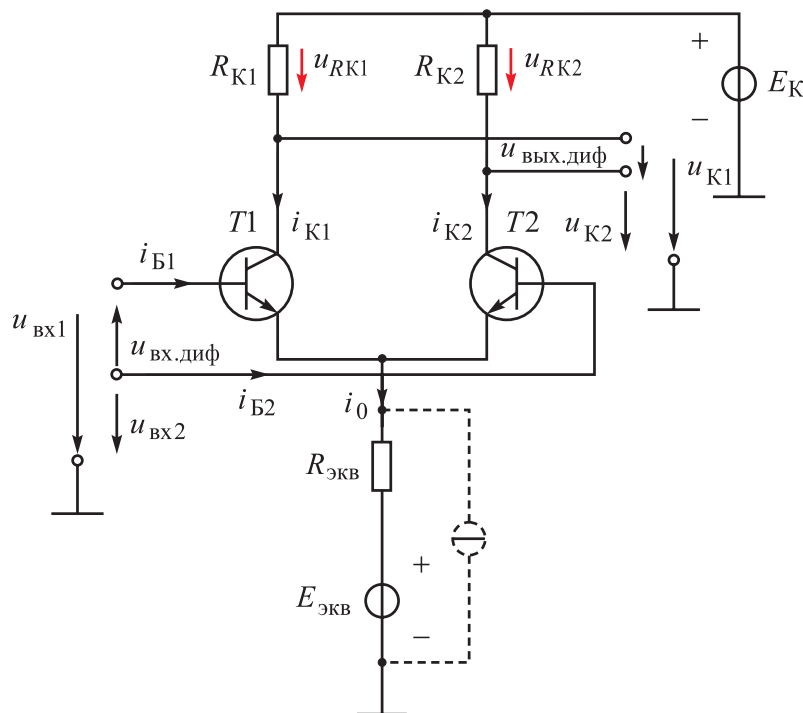


Рис. 2.29. Схема дифференциального усилителя:

R_{K1} , R_{K2} — сопротивления в коллекторной цепи; $E_{\text{экв}}$ — источник напряжения; $R_{\text{экв}}$ — его внутреннее сопротивление; u_{RK1} , u_{RK2} — напряжения на сопротивлениях нагрузки транзисторов; u_{K1} , u_{K2} — выходные напряжения на транзисторах $T1$ и $T2$; $u_{\text{вх.диф}}$, $u_{\text{вых.диф}}$ — дифференциальные входное и выходное напряжения соответственно; $u_{\text{вх}1}$, $u_{\text{вх}2}$ — напряжения входных сигналов; i_{K1} , i_{K2} — токи коллекторов; i_0 — ток в цепи эмиттера; i_{B1} , i_{B2} — токи баз транзисторов; $T1$, $T2$ — одинаковые транзисторы; E_K — источник питания

Пусть $u_{\text{вх.диф}} = 0$, тогда $u_{\text{вх.синф}} = u_{\text{вх}2} = u_{\text{вх}1}$. Напряжение $u_{\text{вых.диф}}$ называют выходным дифференциальным сигналом, причем $u_{\text{вых.диф}} = u_{\text{к}1} - u_{\text{к}2}$.

Основная идея, реализованная в дифференциальном каскаде, состоит в применении в одной схеме двух совершенно одинаковых половин плечевого моста. Эта идея достаточно часто применяется в электронике. Это приводит к тому, что выходное напряжение $u_{\text{вых.диф}}$ очень слабо зависит от входного синфазного напряжения и практически определяется только напряжением $u_{\text{вх.диф}}$. Усилитель называют дифференциальным потому, что напряжение $u_{\text{вых.диф}}$ пропорционально напряжению $u_{\text{вх.диф}}$ (пропорционально разности напряжений $u_{\text{вх}2}$ и $u_{\text{вх}1}$). Другие дестабилизирующие факторы, кроме синфазного напряжения, также оказывают слабое влияние на $u_{\text{вых.диф}}$.

Если увеличилась температура и возросли тепловые токи $I'_{\text{к}01}$ и $I'_{\text{к}02}$ соответственно транзисторов $T1$ и $T2$, то из-за изменения напряжений $u_{\text{рк}1}$ и $u_{\text{рк}2}$ на резисторах $R_{\text{к}1}$ и $R_{\text{к}2}$ изменяются напряжения $u_{\text{к}1}$ и $u_{\text{к}2}$. Если сопротивления $R_{\text{к}1}$ и $R_{\text{к}2}$ равны, а изменения токов $I'_{\text{к}01}$ и $I'_{\text{к}02}$ одинаковы, то напряжение $u_{\text{вых.диф}}$ не изменится.

Допустим, что ток i_0 является неизменным, а схема полностью симметрична и $u_{\text{вх.диф}} = 0$, тогда $i_{\text{к}1} = i_{\text{к}2} = \frac{i_0}{2}$, поскольку ток коллектора каждого

транзистора примерно равен току эмиттера. В случае изменения входного синфазного сигнала токи $i_{\text{к}1}$ и $i_{\text{к}2}$ не изменяются и поэтому не изменяются напряжения $u_{\text{к}1}$ и $u_{\text{к}2}$ и напряжение $u_{\text{вых.диф}}$. В соответствии с этим в реальных усилителях вместо резистора $R_{\text{экв}}$ и источника напряжения $E_{\text{экв}}$ для ослабления влияния синфазного сигнала часто используют ту или иную схему на транзисторах, которая выполняет функцию источника тока. При анализе схемы (см. рис. 2.29) $R_{\text{экв}}$ и $E_{\text{экв}}$ обычно заменяют источником тока (на рис. 2.29 выделен штриховой линией).

В интегральных схемах области полупроводника, соответствующие транзисторам, располагают очень близко друг к другу. Поэтому параметры транзисторов оказываются эквивалентными, что обеспечивает симметрию дифференциального усилителя.

Рассмотрим кратко процессы, происходящие в усилителе при поступлении на его вход положительного сигнала $u_{\text{вх.диф}}$. При увеличении этого сигнала, во-первых, растут ток базы $i_{\text{б}2}$ и ток коллектора $i_{\text{к}2}$ транзистора $T2$. Это приводит к повышению напряжения $u_{\text{рк}2}$ и снижению напряжения $u_{\text{к}2}$. Во-вторых, уменьшаются ток базы $i_{\text{б}1}$ и ток коллектора $i_{\text{к}1}$ транзистора $T1$. Это приводит к уменьшению напряжения $u_{\text{рк}1}$ и увеличению напряжения $u_{\text{к}1}$. В результате напряжение $u_{\text{вых.диф}}$ растет. Если напряжение $u_{\text{вх.диф}}$ чрезмерно велико, то транзистор $T2$ может войти в режим насыщения, а транзистор $T1$ — в режим отсечки. При отрицательном напряжении $u_{\text{вх.диф}}$ транзисторы меняются ролями.

могут использоваться в высокоточных устройствах. Еще одним достоинством усилителей МДМ-типа является возможность изолировать с помощью трансформатора входную и выходную части.

2.6. Операционный усилитель

Операционным усилителем (ОУ) называют высококачественный усилитель, который предназначен для усиления постоянных и переменных сигналов. Такие усилители использовали главным образом в аналоговых вычислительных устройствах для выполнения математических операций, что объясняет происхождение термина «операционный».

В настоящее время ОУ выпускают в виде интегральных микросхем, содержащих большое число элементов, но по размерам и стоимости они приближаются к отдельным транзисторам.

При инженерной разработке электронных устройств на основе ОУ полезно иметь представление о внутренней структуре ОУ, особенно об устройстве входных и выходных каскадов, что помогает правильно согласовать ОУ с источниками входных сигналов и приемниками преобразованных сигналов. Однако во многих случаях нет необходимости учитывать особенности электронной схемы, реализованной в том или ином ОУ. При этом ОУ рассматривается как «черный ящик», который описывается характеристиками и параметрами, соответствующими токам и напряжениям только внешних выводов. Особенности электрических процессов во внутренних цепях операционного усилителя при таком подходе не учитываются.

Представление ОУ в форме «черного ящика» значительно упрощает анализ электронных схем и обычно дает вполне приемлемые практические результаты.

2.6.1. Схемотехника операционного усилителя

В состав ОУ входит несколько транзисторных каскадов. Наиболее простое схемное решение имеет ОУ К140УД1 (рис. 2.32), изготовленный на кремниевой пластине размером 1,1×1,1 мм и содержащий девять транзисторов. Данная схема обеспечивает сравнительно невысокий коэффициент усиления ($K_U = 2000$), способствует ослаблению синфазного сигнала (коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{\text{осл.синф}} = 60$ дБ) и имеет невысокое входное сопротивление ($R_{\text{вх}} = 4$ кОм).

Последующие разработки позволили улучшить параметры ОУ за счет усложнения схемы. Так, в ОУ К140УД7 входное сопротивление составляет 400 кОм при входном токе 200 нА, коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{\text{осл.синф}} = 70$ дБ.

Параметры ОУ характеризуют его эксплуатационные возможности. Основными параметрами ОУ являются:

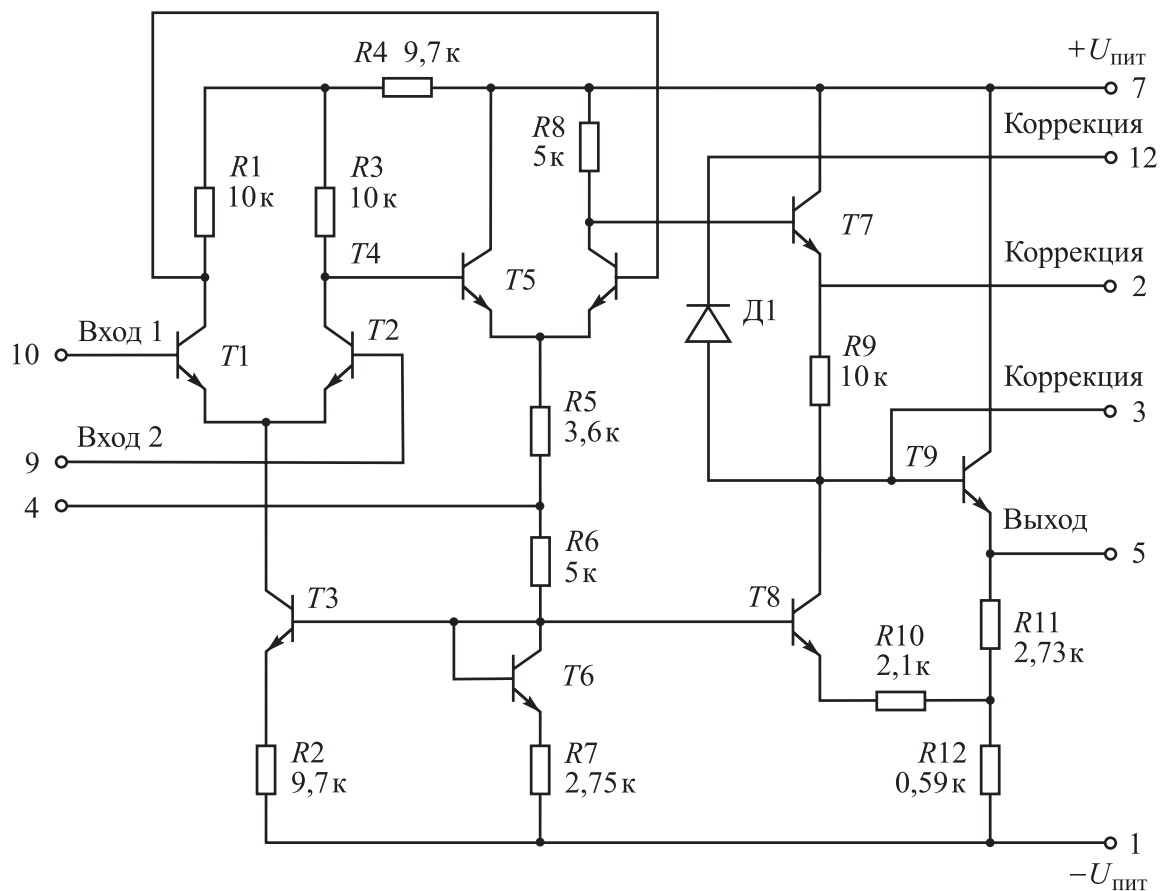


Рис. 2.32. Электрическая принципиальная схема ОУ К140УД1:

$R1-R12$ — резисторы; $D1$ — диод; $T1-T9$ — транзисторы

1) коэффициент усиления по напряжению без ОС K_U , показывающий, во сколько раз напряжение на выходе превышает напряжение сигнала, поданного на дифференциальный вход. Типовое значение $K_U = 10^5 \dots 10^6$;

2) коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{осл.синф}$, показывающий, во сколько раз дифференциальный сигнал сильнее синфазного. Данный параметр определяется свойствами входного дифференциального каскада и составляет 80...100 дБ;

3) напряжение смещения нуля $U_{см}$, представляющее собой постоянное напряжение определенной полярности, которое необходимо подать на вход при отсутствии входного сигнала для того, чтобы напряжение на выходе стало равным нулю. Наличие отклонения выходного напряжения от нуля обусловлено хотя и малым, но неизбежным дисбалансом плеч дифференциального каскада. Практически $U_{см} = 5 \dots 20$ мВ;

4) температурный дрейф напряжения смещения $TKU_{см} = \frac{\Delta U_{см}}{\Delta T}$, характеризующий изменение напряжения $U_{см}$ при изменении температуры; он составляет 1...30 мкВ/°C;

5) входное сопротивление для дифференциального сигнала $R_{\text{вх.диф}}$, которое измеряется со стороны любого входа в то время, когда другой вход соединен с общим выводом; значение $R_{\text{вх.диф}}$ лежит в пределах от сотен килоом до единиц мегаом;

6) входное сопротивление для синфазного сигнала $R_{\text{вх.синф}}$, которое измеряется между соединенными вместе входами операционного усилителя и корпусом. Данное сопротивление на несколько порядков больше, чем сопротивление для дифференциального сигнала;

7) выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$. Значение выходного сопротивления для операционного усилителя составляет десятки—сотни ом.

Промышленностью выпускается большое разнообразие ОУ, которые подразделяют на две группы: общего и частного применения. Операционные усилители частного применения бывают быстродействующими (скорость нарастания выходного напряжения $U_{\text{вых}} = 50...70$ В/мкс), прецизионными (обладают высоким коэффициентом $K_U = 10^6...10^7$, высоким коэффициентом $K_{\text{осл.синф}} = 120$ дБ, малым $U_{\text{см}} = 1$ мВ), микромощными (питаются от источников ± 3 и ± 6 В и потребляют ток менее 1 мА), мощными (обеспечивают выходной ток до 1 А) и высоковольтными.

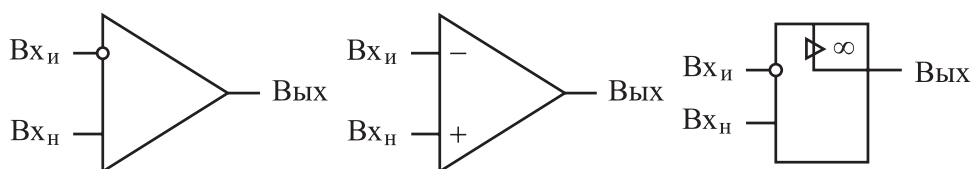


Рис. 2.33. Условные графические обозначения ОУ:

$V_{\text{хн}}$ — неинвертирующий (прямой) входной контакт; $V_{\text{хи}}$ — инвертирующий входной контакт; $V_{\text{ых}}$ — выходной контакт

Условные графические обозначения ОУ приведены на рис. 2.33. Один из входов, обозначенный знаком «+», называют *неинвертирующим (прямым)*, так как сигнал на выходе и сигнал на этом входе имеют одинаковую полярность, второй вход, обозначенный знаком «−» (его также обозначают знаком инверсии «о»), называют *инвертирующим*, так как сигнал на выходе по отношению к сигналу на этом входе имеет противоположную полярность. Помимо трех сигнальных контактов (двух входных и одного выходного) ОУ содержит дополнительные контакты (обычно число контактов составляет 14 или 16).

2.6.2. Передаточная характеристика операционного усилителя

Операционный усилитель достаточно полно характеризует его передаточная характеристика $u_{\text{вых}} = f(u_{\text{диф}})$, где f — некоторая функция; $u_{\text{диф}} = u^+ - u^-$ — дифференциальное входное напряжение. Передаточная характеристика ОУ К140УД1 приведена на рис. 2.34 ($R_{\text{н}} = 5$ кОм).

2.7. Линейные схемы на основе операционных усилителей

2.7.1. Основные схемы на операционных усилителях

Операционные усилители используются в самых различных электронных устройствах. Их широко применяют как в аналоговых, так и в импульсных устройствах электроники. В то же время существуют и часто используются типовые линейные схемы на основе ОУ. Для понимания их принципа действия и анализа достаточно овладеть простыми приемами, основанными на ряде допущений, характерных для идеальных ОУ.

1. Входное сопротивление ОУ равно бесконечности, токи входных электродов равны нулю ($R_{вх} \rightarrow \infty, i_+ = i_- = 0$).

2. Выходное сопротивление ОУ равно нулю, т. е. ОУ со стороны выхода является идеальным источником напряжения ($R_{вых} \rightarrow 0$).

3. Коэффициент усиления по напряжению равен бесконечности, а дифференциальный сигнал в режиме усиления равен нулю (при этом не допускается закорачивания выводов ОУ).

4. В режиме насыщения напряжение на выходе равно по модулю напряжению питания, а его знак определяется полярностью входного напряжения. Однако дифференциальный сигнал нельзя всегда считать равным нулю.

5. Синфазный сигнал не действует на ОУ.

6. Напряжение смещения нуля равно нулю.

Практика показывает, что получаемые на основе этих допущений результаты имеют допустимую погрешность.

Вид выполняемых ОУ операций определяется внешними по отношению к нему элементами. От параметров ОУ зависит только точность выполняемых операций. Рассмотрим наиболее распространенные схемы на основе ОУ.

2.7.2. Инвертирующий усилитель на основе операционного усилителя

На рис. 2.40 изображена схема инвертирующего усилителя на идеальном ОУ, осуществляющем усиление аналоговых сигналов с поворотом фазы на 180° , в которой действует параллельная ОС по напряжению. Так как $i_- = 0$, в соответствии с первым законом Кирхгофа $i_1 = i_2$.

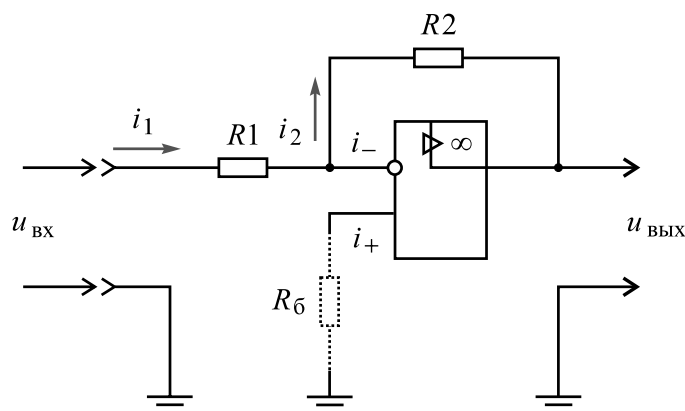


Рис. 2.40. Схема инвертирующего усилителя на идеальном ОУ:

$u_{вх}, u_{вых}$ — входное и выходное напряжения соответственно; $R1, R2$ — равные по номиналу резисторы; R_6 — балластный резистор для уменьшения влияния входных токов; i_1, i_2 — входной и выходной токи в цепи ОС; i_-, i_+ — токи на инвертирующем и неинвертирующем входах соответственно

Предположим, что ОУ работает в режиме усиления, тогда $u_{\text{диф}} = 0$ и на основании второго закона Кирхгофа имеем

$$i_1 = \frac{u_{\text{вх}}}{R_1}, \quad i_2 = -\frac{u_{\text{вх}}}{R_2}. \quad (2.15)$$

Учитывая, что $i_1 = i_2$, получаем

$$u_{\text{вых}} = -u_{\text{вх}} \frac{R_2}{R_1}.$$

Таким образом, инвертирующий усилитель характеризуется коэффициентом усиления по напряжению

$$K_U = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (2.16)$$

Отсюда следует, что K_U определяется внешними резисторами R_1 и R_2 . В современных ОУ $R_{\text{вх}}$ и K_U достаточно велики, поэтому на практике расчет по формуле (2.16) обеспечивает достаточную точность.

Для уменьшения влияния входных токов ОУ на выходное напряжение в цепь неинвертирующего входа включают резистор с сопротивлением R_6 , которое находят из выражения

$$R_6 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Входное сопротивление инвертирующего усилителя на низких частотах значительно ниже собственного входного сопротивления ОУ. Это полностью соответствует сделанному ранее выводу о том, что параллельная ООС, имеющая место в схеме, уменьшает входное сопротивление. При $u_{\text{диф}} \approx 0$ входное сопротивление усилителя на низких частотах приблизительно равно R_1 .

Выходное сопротивление инвертирующего усилителя на низких частотах $R_{\text{вых}} \text{ ОС}$ существенно меньше выходного сопротивления на низких частотах $R_{\text{вых}}$ собственно ОУ. Это является следствием действия ООС по напряжению. Отсюда

$$R_{\text{вых}} \text{ ОС} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + K_U \frac{R_1}{R_1 + R_2}},$$

где K_U — коэффициент усиления по напряжению ОУ.

2.7.3. Неинвертирующий усилитель на основе операционного усилителя

Рассмотрим схему неинвертирующего усилителя (рис. 2.41), где имеет место последовательная ОС по напряжению.

Используя принятые в 2.7.1 допущения и выражения (2.15), выполним анализ схемы, приведенной на рис. 2.41.

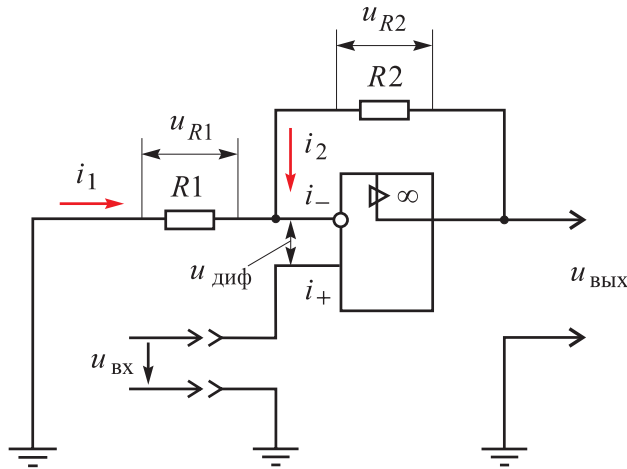


Рис. 2.41. Схема неинвертирующего усилителя:

$u_{\text{BX}}, u_{\text{ВЫХ}}$ — входное и выходное напряжения соответственно; u_{R1}, u_{R2} — напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ соответственно; $u_{\text{диф}}$ — дифференциальное напряжение; i_1, i_2 — входной и выходной токи в цепи ОС; i_-, i_+ — токи на инвертирующем и неинвертирующем входах соответственно

В соответствии с указанными в 2.7.1 допущениями входные токи ОУ равны нулю, т. е. $i_+ = i_- = 0$, и, следовательно, $i_1 = i_2$.

Предположим, что ОУ работает в режиме усиления, тогда $u_{\text{диф}} = 0$. На основании второго закона Кирхгофа получаем

$$u_{R1} = -u_{\text{BX}}; \quad u_{R2} = u_{\text{BX}} - u_{\text{ВЫХ}};$$

$$i_1 R1 = -u_{\text{BX}}; \quad i_2 R2 = u_{\text{BX}} - u_{\text{ВЫХ}}; \quad i_1 = -\frac{u_{\text{BX}}}{R1};$$

$$i_2 = \frac{u_{\text{BX}} - u_{\text{ВЫХ}}}{R2}; \quad -\frac{u_{\text{ВЫХ}}}{R1} = \frac{u_{\text{BX}} - u_{\text{ВЫХ}}}{R2};$$

$$u_{\text{BX}} \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{R2};$$

$$u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{BX}} \frac{R1 + R2}{R1}; \quad u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{BX}} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right).$$

Таким образом, неинвертирующий усилитель характеризуется коэффициентом усиления по напряжению

$$K_U = 1 + \frac{R2}{R1}. \quad (2.17)$$

Используем общее выражение (2.1) для коэффициента усиления усилителя, охваченного последовательной ООС по напряжению. Предположим, что на входе действует входной сигнал низкой частоты, поэтому будем считать коэффициенты K_U , β и $K_{U\text{ОС}}$ вещественными. В соответствии с общим выражением (2.1) имеем

$$K_{U\text{ОС}} = \frac{K_U}{1 + K_{U\text{ОС}} \beta}.$$

При $K_U \rightarrow \infty$

$$K_{UOC} = \frac{1}{\beta},$$

где β — коэффициент деления выходного напряжения на делителе $R1-R2$, показанного на рис. 2.41:

$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2}.$$

Таким образом, при $K_U \rightarrow \infty$

$$K_{UOC} = 1 + \frac{R2}{R1},$$

что совпадает с результатом (см. (2.17)), полученным на основании используемых допущений (см. 2.2.4, 2.2.5 и 2.7.1).

Обратимся к общим выражениям для входного и выходного сопротивлений (см. 2.2.4, 2.2.5). Предполагая, что усилитель работает на низкой частоте, используем вещественные сопротивления $R_{вх}$, $R_{вх OC}$, $R_{вых}$, $R_{вых OC}$. Получим сопротивление рассматриваемого усилителя

$$R_{вх OC} = R_{вх} \left(1 + K_U \frac{R1}{R1 + R2} \right),$$

причем при $K_U \rightarrow \infty$ $R_{вх OC} \rightarrow \infty$. Аналогично имеем

$$R_{вых OC} = \frac{R_{вых}}{1 + K_U \frac{R1}{R1 + R2}}.$$

Очевидно, что при $K_U \rightarrow \infty$ выходное сопротивление $R_{вых OC} \rightarrow 0$.

На входах ОУ, применяемого в неинвертирующем усилителе, имеется синфазный сигнал, равный напряжению $u_{вх}$. Это недостаток такого усилителя. В инвертирующем усилителе синфазный сигнал отсутствует.

2.7.4. Повторитель напряжения на основе операционного усилителя

Схема повторителя напряжения на ОУ (рис. 2.42) легко может быть получена из схемы неинвертирующего усилителя (см. рис. 2.41) при $R1 \rightarrow \infty$, $R2 \rightarrow 0$.

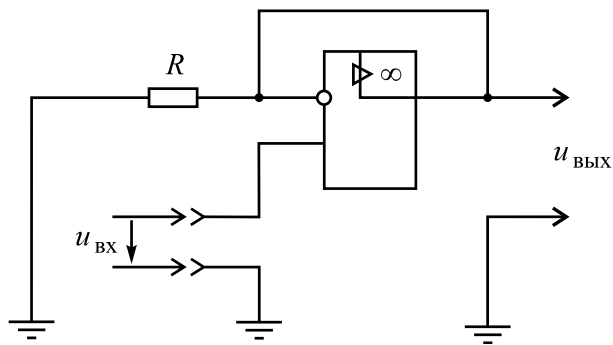


Рис. 2.42. Схема повторителя напряжения на ОУ:

R — сопротивление в цепи ОС; $u_{\text{ВХ}}$, $u_{\text{ВЫХ}}$ — входное и выходное напряжения соответственно

Предполагается, что ОУ работает в режиме усиления ($u_{\text{диф}} \approx 0$). Исходя из общего выражения (2.17) для напряжения $u_{\text{ВЫХ}}$ или второго закона Кирхгофа получаем $u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВХ}}$.

2.7.5. Сумматор напряжений

Рассмотрим схему сумматора, приведенную на рис. 2.43.

Предположим, что ОУ работает в режиме усиления, тогда $u_{\text{диф}} = 0$.

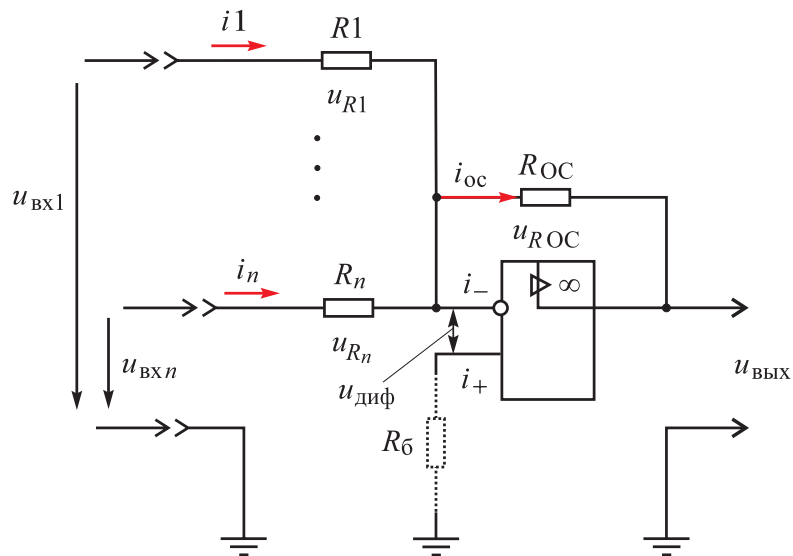


Рис. 2.43. Схема сумматора напряжений на идеальном ОУ:

R_{OC} — сопротивление ОС; $R_1 \dots R_n$ — входные сопротивления; R_6 — балластный резистор для уменьшения влияния входных токов; $i_1 \dots i_n$ — токи, протекающие через входные сопротивления $R_1 \dots R_n$ соответственно; i_{OC} — ток в ветви обратной связи; i_- , i_+ — входные токи инвертирующего и неинвертирующего входов соответственно; $u_{\text{ВХ1}} \dots u_{\text{ВХn}}$ — сигналы, поступающие на инвертирующий вход; $u_{\text{ВЫХ}}$ — выходное напряжение; $u_{R_{\text{OC}}}$ — напряжение на сопротивлении ОС; $u_{\text{диф}}$ — дифференциальное напряжение; $u_{R_1} \dots u_{R_n}$ — напряжения на входных сопротивлениях

Учитывая, что $i_+ = i_- = 0$, имеем

$$\sum_{j=1}^n i_j = i_{OC}.$$

При $u_{\text{диф}} = 0$

$$u_{R_j} = u_{\text{вх}j}, \quad j = 1, \dots, n, \quad u_{R_{OC}} = u_{\text{вых}}.$$

На основании последних выражений после несложных преобразований, аналогичных выполненным для инвертирующего усилителя, получим

$$u_{\text{вых}} = -R_{OC} \sum_{j=1}^n \frac{u_{\text{вх}j}}{R_j}.$$

В цепь неинвертирующего входа включают резистор с сопротивлением

$$R_6 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel \dots \parallel R_n \parallel R_{OC}$$

для уменьшения влияния входных токов ОУ.

2.7.6. Вычитающий усилитель

В вычитающем усилителе (рис. 2.44) один входной сигнал подается на инвертирующий вход, а второй — на неинвертирующий.

Предположим, что ОУ работает в линейном режиме. Тогда все устройство можно считать линейным и для анализа использовать принцип суперпозиции (наложения).

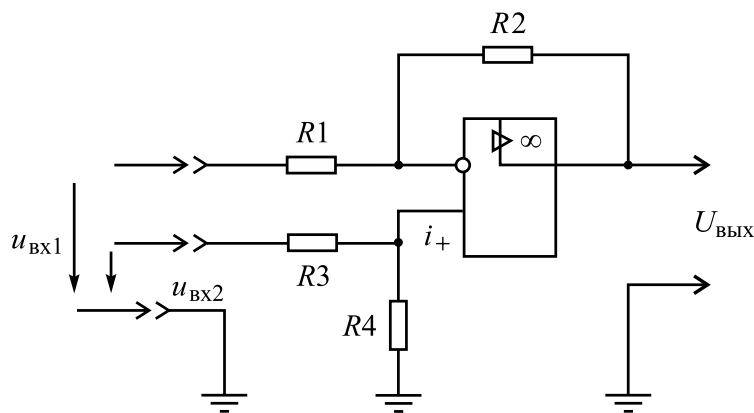


Рис. 2.44. Схема вычитающего усилителя на идеальном ОУ:

$u_{\text{вх}1}$, $u_{\text{вх}2}$ — напряжения входных сигналов; $u_{\text{вых}}$ — выходное напряжение; R_1 – R_4 — сопротивления в цепях ОС; i_+ — входной ток на неинвертирующем входе

Пусть $u_{\text{BX}2} = 0$, тогда соответствующее напряжение $u'_{\text{ВЫХ}}$ определим по выражению, соответствующему инвертирующему усилителю:

$$u'_{\text{ВЫХ}} = -u_{\text{BX}1} \frac{R2}{R1}.$$

Найдем напряжение на выходе $u''_{\text{ВЫХ}}$ при $u_{\text{BX}1} = 0$. Тогда на основе теоремы об эквивалентном генераторе преобразуем цепь, подключенную к неинвертирующему входу (рис. 2.45).

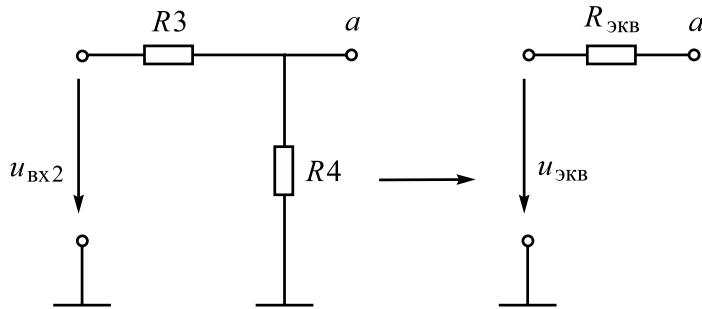


Рис. 2.45. Эквивалентное преобразование входной цепи:

a — выход делителя напряжения; $R3$, $R4$ — сопротивления, обеспечивающие режим работы схемы; $R_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентное сопротивление делителя $R3 \parallel R4$; $u_{\text{BX}2}$ — напряжение входного сигнала; $u_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентное входное напряжение

Из теоремы об эквивалентном генераторе следует

$$u_{\text{ЭКВ}} = u_{\text{BX}2} \frac{R4}{R3 + R4}; \quad R_{\text{ЭКВ}} = R3 \parallel R4 = \frac{R3R4}{R3 + R4}.$$

В рассматриваемом случае напряжение на выходе $u''_{\text{ВЫХ}}$ будет определяться выражением, соответствующим неинвертирующему усилителю:

$$u''_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ЭКВ}} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) = u_{\text{BX}2} \frac{R4}{R3 + R4} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right).$$

Согласно принципу суперпозиции общее напряжение на выходе $u_{\text{ВЫХ}}$ находят по формуле

$$u_{\text{ВЫХ}} = u''_{\text{ВЫХ}} + u'_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{BX}2} \frac{R4}{R3 + R4} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) - u_{\text{BX}1} \frac{R2}{R1};$$

при $R1 = R2 = R3 = R4$

$$u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{BX}2} - u_{\text{BX}1}.$$

2.7.7. Схемы с диодами и стабилитронами на основе операционного усилителя

Схемы, включающие диоды и стабилитроны, являются нелинейными. Однако часто такие схемы анализируют без использования ЭВМ как линейные. При этом диоды и стабилитроны считают идеальными и заменяют открытые диоды и стабилитроны короткими замыканиями, запертые диоды и стабилитроны — разрывами, а стабилитроны, работающие в режиме пробоя, — источниками напряжения.

При использовании подобных способов линеаризации нелинейных схем перед их анализом необходимо определить, в каком режиме работает каждый нелинейный элемент. Предположим, например, что первый диод открыт, второй закрыт и т. д., и проведем анализ схемы. Затем проверим его правильность и убедимся, что через предположительно открытый диод, замененный

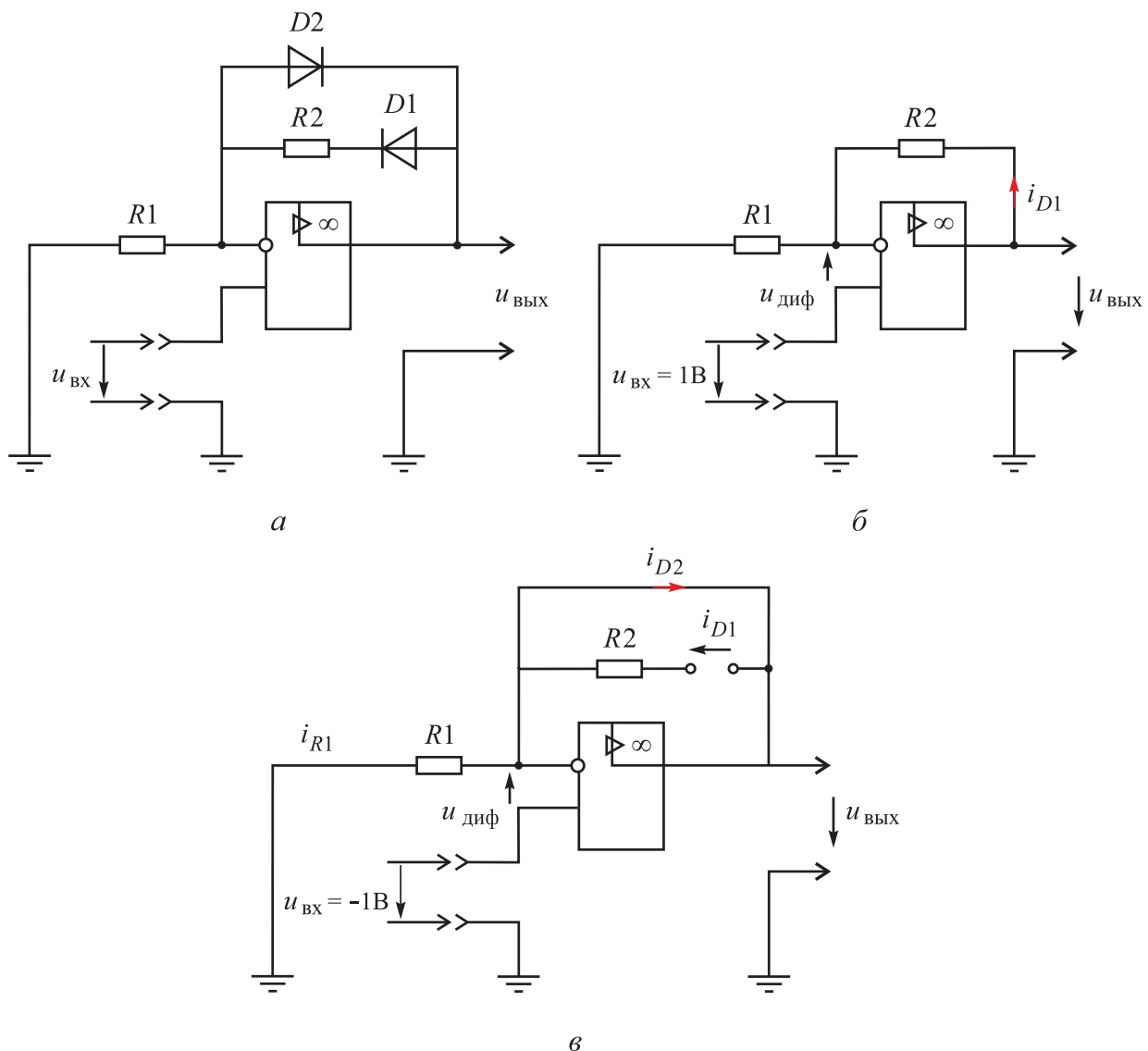


Рис. 2.46. Схема переключения уровней сигналов:
a — при разомкнутом ключе $D2$; *б* — при замкнутом ключе $D1$;
в — при замкнутом ключе $D2$; i_{D1} , i_{D2} — токи через $D1$ и $D2$

коротким замыканием, ток протекает в прямом направлении. При анализе таких схем с использованием ЭВМ они рассматриваются как нелинейные.

Для примера выполним анализ схемы, приведенной на рис. 2.46, *а*, предположив, что диоды идеальные.

Пусть $u_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$. Если диод $D1$ открыт (заменяем его коротким замыканием), а диод $D2$ — закрыт (заменяем его разрывом), то получим эквивалентную схему, приведенную на рис. 2.46, *б*, из которой следует

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) = 3 \text{ В}.$$

Проверим правильность сделанного предположения, для чего определим ток i_{D1} диода $D1$ и напряжение u_{D2} диода $D2$. Используя допущение о том, что $u_{\text{диф}} \approx 0$, получаем $u_{D2} = -2 \text{ В}$ и $i_{D1} = 0,2 \text{ мА}$. Так как напряжение на диоде $D2$ отрицательное, а ток через диод $D1$ положителен, можно утверждать, что предположение было правильным.

Пусть теперь $u_{\text{вх}} = -1 \text{ В}$. Если диод $D1$ закрыт, а диод $D2$ открыт, то получим эквивалентную схему, приведенную на рис. 2.46, *в*, из которой следует

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} \left(1 + \frac{0}{R1} \right) = -1 \text{ В}.$$

Для проверки правильности сделанного предположения определим

$$i_{D2} = i_{R1} = -\frac{u_{\text{вх}}}{R1} = 0,2 \text{ мА}.$$

Очевидно, что $u_{D1} = 0$. Полученные результаты позволяют утверждать, что предположение было правильным.

2.7.8. Логарифмирующий усилитель

Логарифмирующий усилитель получается в том случае, когда вместо резистора $R2$ в цепь ОС включают полупроводниковый диод (рис. 2.47).

При этом постоянный ток во входной и выходной цепи

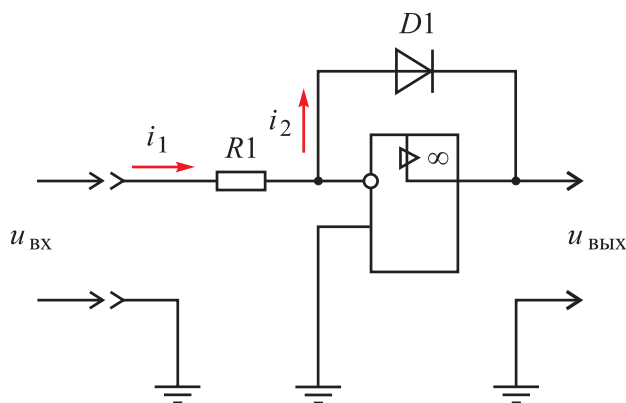
$$i_1 = \frac{u_{\text{вх}}}{R1}; \quad i_2 = i_0 e^{\frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}}}.$$

Так как $i_1 = i_2$,

$$\frac{u_{\text{вх}}}{R1} = i_0 e^{\frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}}},$$

Рис. 2.47. Схема логарифмического усилителя:

$D1$ — диод; $R1$ — входное сопротивление; i_1 , i_2 — входные токи; $u_{\text{ВХ}}$, $u_{\text{ВЫХ}}$ — входное и выходное напряжения соответственно



отсюда выходное напряжение

$$u_{\text{ВЫХ}} = -u_{\text{ВХ}} \ln \frac{u_{\text{ВХ}}}{i_0 R1}.$$

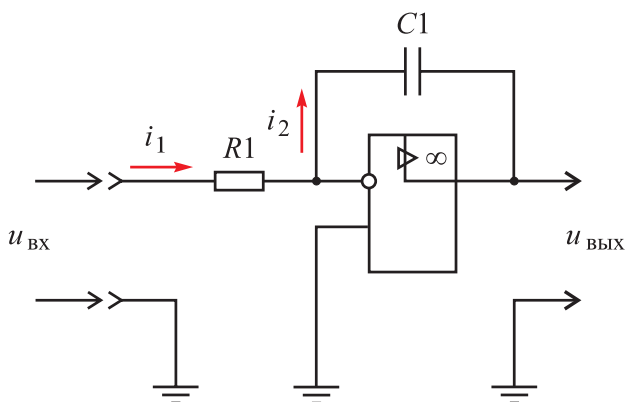
Из этого выражения следует, что выходное напряжение пропорционально логарифму входного постоянного напряжения.

2.7.9. Интегрирующий усилитель

Интегрирующий усилитель получается в том случае, когда вместо резистора $R2$ в цепь обратной связи включен конденсатор $C1$ (рис. 2.48).

Рис. 2.48. Схема интегрирующего усилителя:

i_1 , i_2 — входной и выходной токи в цепи ОС; $u_{\text{ВХ}}$, $u_{\text{ВЫХ}}$ — входное и выходное напряжения соответственно; $R1$ — входное сопротивление резистора; $C1$ — конденсатор



В этом случае

$$i_1 = \frac{u_{\text{ВХ}}}{R1}; \quad i_2 = -C1 \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt}.$$

Так как $i_1 = i_2$,

$$\frac{u_{\text{ВХ}}}{R1} = -C1 \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt}.$$

Отсюда $u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R1 C1} \int u_{\text{ВХ}} dt.$

2.7.10. Дифференцирующий усилитель

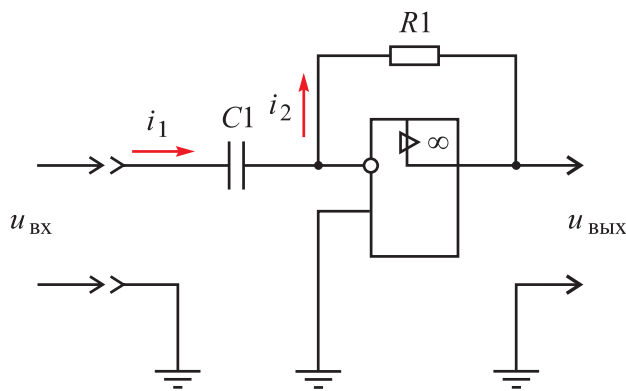


Рис. 2.49. Схема дифференцирующего усилителя:

i_1, i_2 — входной и выходной токи в цепи ОС; $u_{\text{ВХ}}$, $u_{\text{ВЫХ}}$ — входное и выходное напряжения соответственно; $R1$ — сопротивление ОС; $C1$ — конденсатор

Дифференцирующий усилитель получается в том случае, когда резистор $R1$ и конденсатор $C1$ меняют местами (рис. 2.49).

При этом

$$i_1 = C1 \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}; \quad i_2 = -\frac{u_{\text{ВХ}}}{R1}.$$

Так как $i_1 = i_2$,

$$C1 \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt} = -\frac{u_{\text{ВХ}}}{R1}.$$

$$\text{Отсюда } u_{\text{ВЫХ}} = -R1C1 \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Контрольные вопросы и задания

1. Приведите классификацию усилителей и их основные параметры.
2. Приведите характеристики усилителей (амплитудную, АЧХ и ФЧХ).
3. Приведите классификацию ОС в усилителях.
4. Приведите характеристики усилителя, охваченного ОС.
5. Получите формулы для входного и выходного сопротивлений усилителя, охваченного ОС.
6. Приведите схемы стабилизации рабочей точки усилителя на биполярном транзисторе.
7. Перечислите режимы работы транзистора в усилителе.
8. Каков принцип работы усилителя по схеме с ОЭ и эмиттерной стабилизацией?
9. Что такое ОУ? Каков принцип работы инвертирующего и неинвертирующего усилителей на основе ОУ?
10. Какие факторы влияют на выходное напряжение ОУ?
11. Каков принцип работы вычитающего усилителя (усилителя с дифференциальным входом)?