

ВВЕДЕНИЕ

Операционные усилители (ОУ), являющиеся практически идеальными усилителями напряжения, находят широкое применение в аналоговой схемотехнике. Несмотря на ряд ограничений, присущих реальным ОУ, при анализе и синтезе большинства схем используют идеальные модели операционных усилителей, считая, что коэффициент усиления дифференциального напряжения бесконечно велик и не зависит от частоты сигнала; коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю; сопротивление по обоим входам бесконечно велико; отсутствует сдвиг нуля выходного напряжения и его дрейф; скорость изменения выходного напряжения бесконечно велика.

Параметры реальных ОУ несколько хуже. Однако знание реальных значений параметров конкретного операционного усилителя позволяет достаточно просто оценить погрешность схемы и решить вопрос о целесообразности использования данного ОУ в конкретном устройстве.

В настоящем пособии рассмотрение подавляющего большинства применений операционных усилителей производится на основе идеализации их характеристик и лишь в последнем разделе анализируется влияние ограничений, свойственных реальным ОУ, на работу схем. Достаточно подробно рассмотрено влияние на выходное напряжение таких параметров, как входные токи смещения; входной ток сдвига; входное напряжение сдвига; температурный дрейф; скорость нарастания выходного напряжения; частотная характеристика.

Пособие написано на основе части курса лекций, читаемых автором студентам направления 5515 по дисциплине «Электроника в приборостроении» на кафедре «Измерительно-вычислительные комплексы» Ульяновского государственного технического университета. Может быть полезно студентам других нерадиотехнических направлений и специальностей высших и средних специальных учебных заведений.

1. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Свое название операционные усилители (ОУ) получили из-за того, что первоначально применялись для выполнения математических операций сложения, вычитания, умножения и деления. Первые ОУ, использовавшиеся в аналоговых вычислительных машинах на лампах, работали с напряжениями порядка ± 100 В.

Интегральные ОУ унаследовали прежнее название от своих предшественников и очень широко распространены в аналоговой схемотехнике. В настоящее время ОУ выполняются, как правило, в виде монолитных интегральных микросхем и по своим размерам и цене практически не отличаются от отдельно взятого транзистора. Благодаря практически идеаль-

ным характеристикам операционных усилителей реализация различных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на отдельных транзисторах.

Структурная схема. Операционный усилитель, выполненный в виде интегральной микросхемы, имеет в своем составе: дифференциальный входной каскад (ДВК), промежуточные каскады усиления (ПКУ) и оконечный каскад (ОК), рис. 1.1.

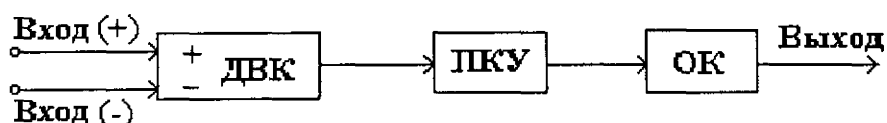


Рис. 1.1. Структурная схема ОУ

Дифференциальный каскад обеспечивает: большой коэффициент усиления по отношению к разности входных сигналов (дифференциальному сигналу), малый коэффициент усиления относительно синфазных помех, малый дрейф нуля и большое входное сопротивление. Промежуточные каскады позволяют получить большое усиление напряжения сигнала, изменить на 180° или сохранить нулевым фазовый сдвиг усиливаемого сигнала. В качестве промежуточных каскадов используют дифференциальные или однополюсные каскады. Оконечный каскад обеспечивает: малое выходное сопротивление и достаточную мощность сигнала для низкоомной нагрузки, большое входное сопротивление. Последнее необходимо для сохранения большого коэффициента усиления напряжения промежуточных каскадов. В качестве оконечного каскада обычно используют эмиттерный повторитель.

Обозначение ОУ на принципиальных схемах. Любой ОУ имеет не менее пяти выводов: два входных (инвертирующий и неинвертирующий), два вывода для подключения питания и один выходной вывод. Варианты обозначения операционных усилителей на принципиальных схемах представлены на рис. 1.2 (1 – инвертирующий вход, 2 – неинвертирующий вход, 3 – выход, 4 и 5 – выводы для подключения источника питания).

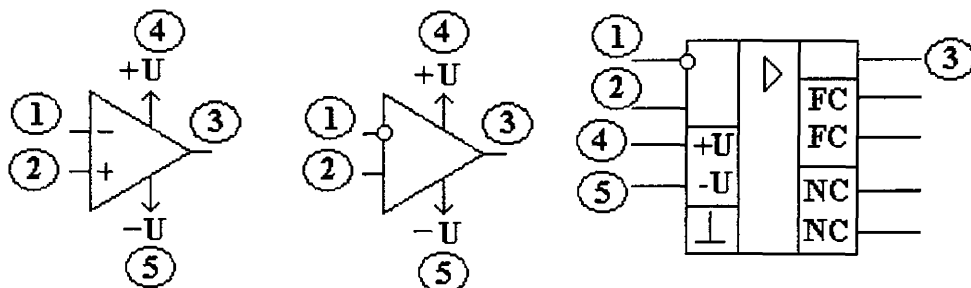


Рис. 1.2. Обозначение ОУ на принципиальных электрических схемах

Многие ОУ дополнительно имеют несколько выводов, не несущих функциональной нагрузки (вспомогательные), к которым подключаются цепи коррекции АЧХ (метки FC), цепи для подключения элементов балансировки по постоянному току (метки NC), а также вывод металлического корпуса (\perp) для соединения с общим проводом устройства, в которое входит ОУ.

Подключение ОУ к источнику питания. В общем случае для работы операционного усилителя требуется двухполярный (расщепленный) источник питания; типичные значения напряжений источника составляют ± 6 В; ± 12 В; ± 15 В (иногда ± 18 В). Схема подключения ОУ к двухполярному источнику питания и нагрузке представлена на рис. 1.3.

В ряде случаев для питания ОУ используется несимметричное питание, например, $+12$ и -6 В или даже однополярное питание, например, $+30$ В и земля. Так как в представленной схеме земля не подключена к ОУ, токи возвращаются от ОУ к источнику питания через внешние (навесные) элементы схемы (в нашем случае это сопротивление нагрузки R_H).

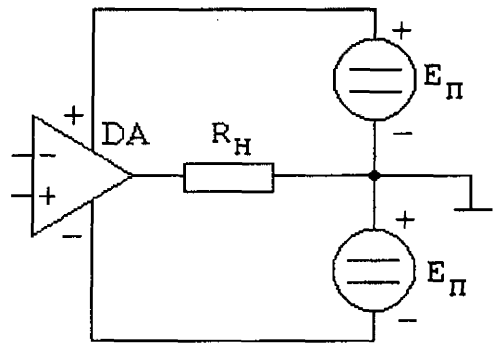


Рис. 1.3. Типовая схема включения ОУ

Входное и выходное напряжения. Выходное напряжение ОУ зависит от разности напряжений на его входах $E_d = U_{вх(+)} - U_{вх(-)}$, где $U_{вх(+)}$ и $U_{вх(-)}$ – напряжения на неинвертирующем и инвертирующем входах усилителя. Поэтому для ОУ справедливо

$$U_{вых} = K \cdot E_d, \quad (1.1)$$

где K – коэффициент усиления ОУ без обратной связи (разомкнутого усилителя). Предположим, что $E_d > 0$ (напряжение на входе (+) положи-

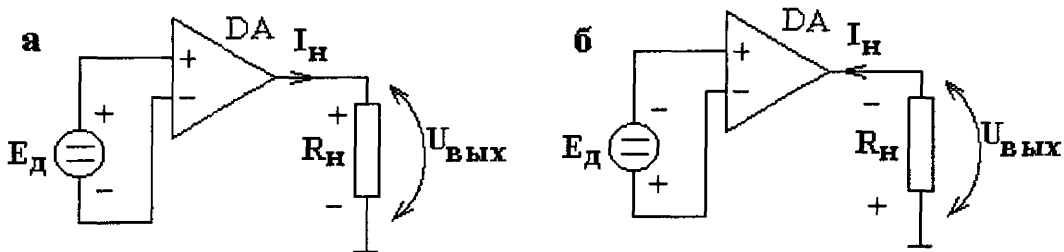


Рис. 1.4. Полярность выходного напряжения в зависимости от дифференциального сигнала:

- а – при положительном дифференциальном напряжении;
- б – при отрицательном дифференциальном напряжении

тельно по отношению к напряжению на входе (-)), тогда выходное напряжение положительно, рис. 1.4,а.

В случае, если $E_d < 0$ (напряжение на входе (+) отрицательно по отношению к напряжению на входе (-)), выходное напряжение отрицательно, рис. 1.4,б. Общая зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = F(E_d)$ представлена на рис. 1.5. Выходное напряжение линейно зависит от E_d лишь в некотором диапазоне изменения последнего (от $-E_{d\text{max}}$ до $+E_{d\text{max}}$) и не может превышать величины напряжения источника питания.

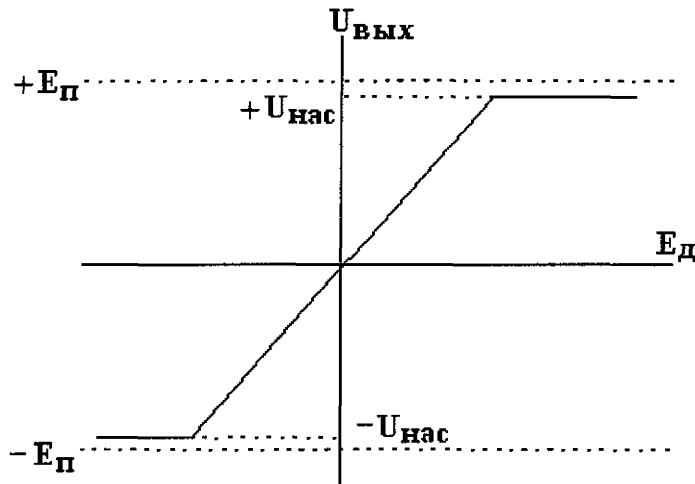


Рис. 1.5. Выходная характеристика ОУ

Два правила, справедливые для идеального ОУ. Определим значения $-E_{d\text{max}}$ и $+E_{d\text{max}}$. В соответствии с (1.1) имеем

$$\begin{aligned} -E_{d\text{max}} &= \frac{-U_{\text{НАС}}}{K}, \\ +E_{d\text{max}} &= \frac{+U_{\text{НАС}}}{K}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Величина K чрезвычайно велика; она может достигать 200000 единиц и более. Приняв $K=200000$, для ОУ, запитанного от источника ± 12 В, на основании (1.2) получим:

$$\begin{aligned} -E_{d\text{max}} &= \frac{-12 \text{ В}}{200000} = -60 \text{ мкВ}, \\ +E_{d\text{max}} &= \frac{+12 \text{ В}}{200000} = +60 \text{ мкВ}. \end{aligned}$$

Здесь допущено, что $+U_{\text{НАС}} = +E_{\text{П}}$ и $-U_{\text{НАС}} = -E_{\text{П}}$. Напряжение 60 мкВ очень мало. В типичном измерительном приборе напряжения наведенных шумов,

сетевых наводок и напряжения от токов утечки могут превышать 1 мВ (1000 мкВ). В силу этого можно принять $+E_{Д\max} = -E_{Д\max} \approx 0$. Последнее позволяет сформулировать важное правило.

Правило 1. Если ОУ находится в линейном режиме (выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} \neq +U_{\text{НАС}} \neq -U_{\text{НАС}}$), разность напряжений между его входами равна нулю ($U_{\text{ВХ}}(+)=U_{\text{ВХ}}(-)$).

Для того чтобы ОУ работал в линейном режиме, в схему необходимо ввести отрицательную обратную связь (ООС). Образно можно сказать, что будучи охвачен ООС, операционный усилитель сделает все от него зависящее, чтобы устранить разность напряжений между своими входами.

ОУ является хорошим усилителем напряжения с большим входным сопротивлением. Для идеального ОУ сопротивления по обоим входам можно считать равными бесконечности. Отсюда следует второе важное правило.

Правило 2. Входы ОУ тока не потребляют.

Идеальный и реальный ОУ. Для идеального ОУ справедливо:

- Коэффициент усиления дифференциального сигнала K бесконечно велик и не зависит от частоты сигнала.
- Коэффициент усиления синфазного сигнала (напряжения общего для обоих входов) $K_{\text{СИНФ}}$ равен нулю.
- Сопротивление по обоим входам бесконечно велико.
- Отсутствует сдвиг нуля выходного напряжения.
- Скорость изменения выходного напряжения бесконечно велика.
- Дрейф (изменение во времени выходного напряжения) отсутствует.

Параметры реального ОУ несколько хуже. Однако в большинстве случаев для анализа схем на операционных усилителях можно использовать оба правила, справедливые для идеального ОУ. Этот подход и будет использоваться в дальнейшем. Знание реальных значений параметров конкретного ОУ позволяет оценить погрешность схемы преобразования сигнала и решить вопрос о целесообразности использования данного ОУ в конкретной схеме.

Параметры и характеристики ОУ. Рассмотрим вкратце основные параметры и характеристики ОУ. Более подробно некоторые из них рассматриваются в разделе 3 «Ограничения, присущие реальным операционным усилителям».

Параметры и характеристики ОУ можно условно подразделить на входные, выходные и характеристики передачи.

К входным параметрам относятся: напряжение сдвига (напряжение сдвига нуля); токи смещения (входные токи); ток сдвига (разность входных токов); входные сопротивления; коэффициент ослабления синфазного сигнала (синфазного напряжения); диапазон синфазных входных напряжений; температурный дрейф напряжения смещения нуля; температурные

дрейфы токов смещения и тока сдвига; напряжение шумов, приведенное ко входу; коэффициент влияния нестабильности источника питания на напряжение сдвига.

Напряжение сдвига $U_{сдв}$ – это потенциал на выходе усилителя при нулевом входном сигнале, который поделен на коэффициент усиления усилителя.

Токи смещения $I_{см}$ – обусловлены необходимостью обеспечить нормальный режим работы входного дифференциального каскада на биполярных транзисторах. В случае использования полевых транзисторов – это токи всевозможных утечек. Другими словами, $I_{см}$ – это токи, потребляемые входами ОУ.

Ток сдвига $I_{сдв}$ – это разность токов, потребляемых входами ОУ.

Входные сопротивления в зависимости от характера подаваемого сигнала подразделяются на дифференциальное (для дифференциального сигнала) и синфазное (сопротивление общего вида).

Входное сопротивление для **дифференциального сигнала $R_{вх, диф}$** – это полное входное сопротивление со стороны любого входа, в то время как другой вход соединен с общим выводом (заземлен).

Входное сопротивление для **синфазного сигнала $R_{вх, синф}$** характеризует изменение среднего входного тока при приложении к входам синфазного напряжения. Оно на несколько порядков выше сопротивления для дифференциального сигнала.

Для измерения $R_{вх, диф}$ можно использовать схему, рис. 1.6. Сопротивление резистора R_2 берется небольшим (десятки или сотни Ом), так, чтобы выполнялись неравенства $R_2 \ll R_{вх, диф}$, $R_2 \ll R_1$, $R_2 \ll R_3$. В этом случае точку А можно считать заземленной по переменному току.

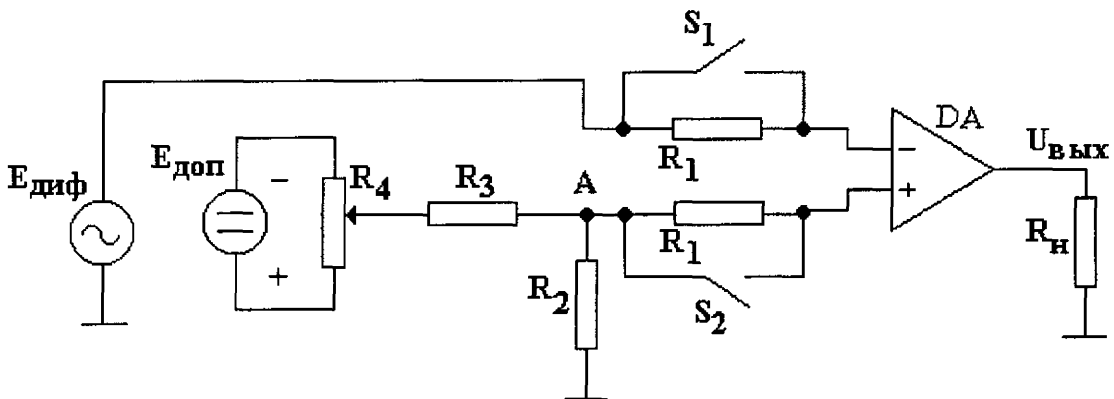


Рис. 1.6. Схема для измерения дифференциального входного сопротивления

Наличие сопротивления R_2 необходимо для подачи на вход (+) постоянного напряжения от дополнительного источника $E_{доп}$ через делитель напряжения, выполненный на резисторе R_4 . Перед началом измерений ($E_{диф}=0$) с помощью резистора R_4 устанавливается нулевое выходное на-

пряжение. При подаче входного напряжения и замкнутых ключах S_1 и S_2 выходное напряжение ($U_{\text{ВЫХ}}$) равно произведению коэффициента усиления K на дифференциальное напряжение:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K \cdot E_{\text{ДИФ}} \quad (1.3)$$

После размыкания ключей S_1 и S_2 последовательно с входным сопротивлением для дифференциального сигнала оказывается включенным сопротивление $2R_1$, что вызывает изменение входного и выходного напряжений:

$$U'_{\text{ВХ}} = \frac{E_{\text{ДИФ}} \cdot R_{\text{ВХ ДИФ}}}{R_{\text{ВХ ДИФ}} + 2 \cdot R_1},$$

$$U'_{\text{ВЫХ}} = K \cdot U'_{\text{ВХ}} = \frac{K \cdot E_{\text{ДИФ}} \cdot R_{\text{ВХ ДИФ}}}{R_{\text{ВХ ДИФ}} + 2 \cdot R_1}. \quad (1.4)$$

Разделив (1.3) на (1.4), т.е. $\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U'_{\text{ВЫХ}}} = \frac{R_{\text{ВХ ДИФ}} + 2 \cdot R_1}{R_{\text{ВХ ДИФ}}}$, получим

$$R_{\text{ВХ ДИФ}} = \frac{2 \cdot R_1 \cdot U'_{\text{ВЫХ}}}{(U_{\text{ВЫХ}} - U'_{\text{ВЫХ}})}. \quad (1.5)$$

Частота дифференциального сигнала при данной схеме измерений должна быть небольшой (единицы или десятки герц). Так как в выражении (1.5) величина дифференциального входного напряжения не присутствует, то отпадает необходимость точного измерения достаточно малой величины $E_{\text{ДИФ}}$. Для чистоты эксперимента достаточно только ее стабильности.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{\text{ОС СИНФ}}$ определяется как отношение напряжение синфазного сигнала, поданного на оба входа, к дифференциальному входному напряжению, которое обеспечивает на выходе тот же сигнал, что и в случае синфазного напряжения:

$$K_{\text{ОС СИНФ}} = \frac{U_{\text{ВХ СИНФ}}}{U_{\text{ВХ ДИФ}}} \Bigg|_{U_{\text{ВЫХ СИНФ}} = U_{\text{ВЫХ ДИФ}}} \quad (1.6)$$

С учетом (1.6) напряжение на выходе ОУ, появляющееся при одновременной подаче дифференциального и синфазного входных сигналов, равно $U_{\text{ВЫХ}} = K \cdot \left(U_{\text{ВХ ДИФ}} + \frac{U_{\text{ВХ СИНФ}}}{K_{\text{ОС СИНФ}}} \right)$.

Для каждого ОУ указывается диапазон изменения $U_{\text{ВХ ДИФ}}$ и $U_{\text{ВХ СИНФ}}$, превышение предельных значений которых может привести к потере работоспособности усилителя.

Температурные дрейфы напряжения смещения и входных токов характеризуют изменения соответствующих параметров с температурой и составляют мкВ/°С и нА/°С. Наиболее важно учитывать данные параметры

в прецизионных устройствах, так как компенсация их влияния на выходное напряжение затруднительна. Температурные дрейфы являются основной причиной появления температурных погрешностей устройств с ОУ.

Напряжение шумов, приведенное ко входу, – это действующее значение напряжения на выходе усилителя при нулевом входном сигнале и нулевом сопротивлении источника сигнала, подключенного ко входу, деленное на коэффициент усиления ОУ. Обычно задается спектральная плотность напряжения шумов, которая оценивается как корень квадратный из квадрата приведенного напряжения шумов, деленного на полосу частот Δf , в которой выполнено измерение этого напряжения. Таким образом оцениваются шумы, имеющиеся в полосе 1 Гц. Размерность их $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Коэффициент влияния нестабильности источника питания на напряжение сдвига характеризует приведение ко входу изменения выходного напряжения ОУ $\Delta U_{\text{сдв}}$ при колебаниях напряжения источника питания $\Delta U_{\text{пит}}$: $K_v = \Delta U_{\text{сдв}} / \Delta U_{\text{пит}}$.

К группе выходных параметров относятся выходное сопротивление, напряжение и ток выхода. Для измерения **выходного сопротивления** $R_{\text{вых}}$ можно использовать схему (рис. 1.7), но при этом необходимо, чтобы коэффициент усиления ОУ без ОС был известен. Сопротивление резисторов R_1 и R_2 равны, причём их значения достаточны большие (порядка 1 МОм).

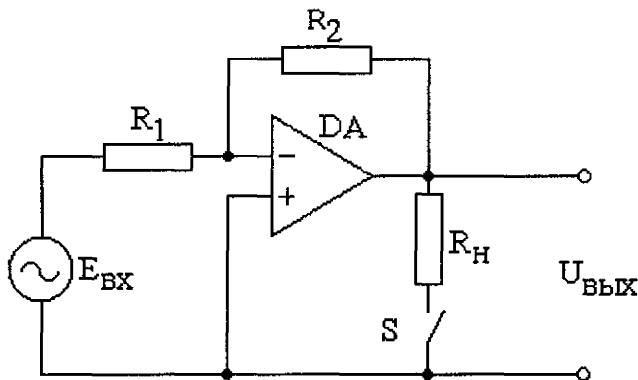


Рис. 1.7. Схема для измерения выходного сопротивления ОУ

Выходное напряжение при замкнутом ключе S равно

$$U_{\text{ВЫХ}2} = U_{\text{ВЫХ}1} - I_{\text{Н}} \cdot R_{\text{ВЫХ ОС}},$$

где $U_{\text{ВЫХ}1}$ – выходное напряжение при разомкнутом ключе S,
 $R_{\text{ВЫХ ОС}}$ – выходное сопротивление ОУ, охваченного ОС,
 $I_{\text{Н}}$ – ток нагрузки.

$$R_{\text{ВЫХ ОС}} = \frac{R_{\text{Н}} \cdot (U_{\text{ВЫХ}1} - U_{\text{ВЫХ}2})}{U_{\text{ВЫХ}2}}.$$

Учитывая наличие в схеме параллельной ОС по напряжению

$$R_{\text{ВЫХ ОС}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{(1 + \beta \cdot K)},$$

где β – коэффициент передачи цепи ОС (при $R_1=R_2$ $\beta=0,5$), можно получить выражение для расчёта выходного сопротивления ОУ:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}}}{U_{\text{ВЫХ2}}} \cdot R_{\text{Н}} \cdot \left(1 + \frac{K}{2}\right).$$

Максимальные выходные напряжение и ток указываются в технических условиях на изготовление ОУ.

К характеристикам передачи относятся: коэффициент усиления по напряжению, частота единичного усиления, скорость нарастания выходного напряжения, время установления выходного напряжения, время восстановления, АЧХ.

Коэффициент усиления по напряжению ОУ K может быть определён экспериментальным путём, рис. 1.8. Входное дифференциальное напряжение ОУ равно падению напряжения на R_3 :

$$U_{R_3} = \frac{U_A \cdot R_3}{(R_2 + R_3)},$$

где U_A – потенциал точки А.

Так как сопротивления резисторов R_1 , соединяющих источник сигнала и выход усилителя, равны между собой, то коэффициент передачи ОУ с такой ОС равен единице ($U_{\text{ВЫХ}}=E_{\text{ВХ}}$). Следовательно,

$$K = \frac{E_{\text{ВХ}}}{U_{R_3}} = \frac{E_{\text{ВХ}} \cdot (R_2 + R_3)}{U_A \cdot R_3}.$$

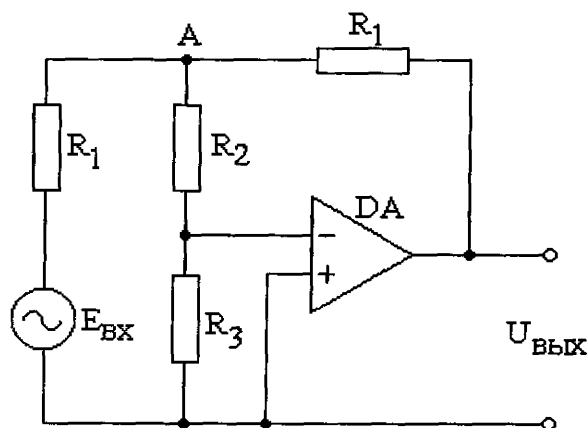


Рис. 1.8. Схема для определения коэффициента усиления ОУ

Частота единичного усиления f_1 – это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице.

Скорость нарастания выходного напряжения – это максимальная скорость изменения выходного сигнала при максимальном значении его амплитуды.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В настоящее время в электронике широкое распространение получила цифровая обработка сигналов. Цифровые методы, основывающиеся на использовании микропроцессоров, проникли во множество областей радио-