

ОСОБЕННОСТИ И СВОЙСТВА РЕАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Структурная схема реального ОУ включает в себя **входной, предварительный, вспомогательный и выходной каскады**.

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

1. **Дифференциальный усилитель** - предназначен для усиления сигнала, имеет низкий уровень собственных шумов, высокое входное сопротивление и обычно дифференциальный выход.
2. **Усилитель напряжения** - обеспечивает высокое усиление сигнала по напряжению, имеет спадающую амплитудно-частотную характеристику с одним полюсом, и обычно имеет один выход.
3. **Выходной усилитель** (оконечный каскад) - обеспечивает высокую нагрузочную способность, низкое выходное сопротивление, ограничение тока и защиту при коротком замыкании.

Требования к ним:

малый входной ток смещения;

высокое $R_{вх}$

большой коэффициент усиления;

большой коэффициент подавления синфазного сигнала;

малое напряжение смещения и т.п.

Идеальный операционный усилитель обладает тремя свойствами.

1. У него **БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШОЕ** сопротивление входов. Т.е. ток в его входы не течет вообще.
2. У него **БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШОЙ** коэффициент усиления. Т.е. любой ничтожный сигнал превращается в бесконечно большое значение.

3. У него два дифференциальных входа и один выход. Дифференциальные входы означают то, что из напряжения пришедшего в прямой вход мы вычитаем напряжение пришедшее по инверсному входу, а результат этого вычисления умножаем на бесконечность, согласно пункту 2.

Основные понятия и определения

Предположение об идеальности ОУ очень часто используется при проектировании схем на ОУ, например схем широкого применения.

Идеальный ОУ имеет следующие характеристики:

1. Входной импеданс (и для дифференциального, и для синфазного сигналов) равен бесконечности, а входные токи – нулю.
2. Выходной импеданс (при разомкнутой ОС) равен нулю.
3. Коэффициент усиления по напряжению равен бесконечности.
4. Коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю.
5. Выходное напряжение равно нулю, когда напряжение на обоих входах одинаково (напряжение сдвига равно нулю).
6. Выходное напряжение может изменяться мгновенно (бесконечная скорость нарастания).

Перечисленные характеристики не зависят от температуры и изменений напряжения питания.

Реальный ОУ отличается от идеального. В режиме покоя (при отсутствии сигнала) через выходы реального усилителя текут входные токи покоя I_{vx+} , I_{vx-} . Он обладает некоторым коэффициентом усиления и для синфазного сигнала, имеет входные сопротивления для дифференциального и синфазного сигналов (R_{vxd} ; R_{vxs}) и выходное сопротивление, отличное от нуля. При эксплуатации ОУ существуют температурные, временные и режимные изменения выходного напряжения (дрейф нуля). Частотные свойства реального ОУ определяются граничной частотой f_v (по спаду усиления на 3 дБ) и частотой единичного усиления f_l (лежит в пределах от 1 до 10 МГц; $K_u(f = f_l) = 1$). Эти частоты зависят как от свойств усилительных

каскадов, входящих в ОУ, так и от применяемых схем коррекции и их параметров.

При проектировании высококачественных (прецизионных) схем необходимо учитывать реальные характеристики ОУ.

Поэтому нужно знать:

- 1) электрические характеристики реальных ОУ и уметь пользоваться справочными данными;
- 2) влияние реальных параметров ОУ на свойства и характеристики проектируемой электронной схемы⁴
- 3) способы компенсации некоторых нежелательных характеристик реальных ОУ.

В настоящее время выпускается большое количество ОУ с различными свойствами и характеристиками и разной степенью сложности электрической схемы (определяется количеством используемых транзисторов). Однако справочные данные (паспортные характеристики) любого ОУ обязательно включают в себя следующую информацию:

- 1) общее описание ОУ;
- 2) электрическую принципиальную схему (особого практического значения не имеет, так как что-либо изменить в ней нельзя);
- 3) конфигурацию выводов и вид корпуса;
- 4) абсолютные (максимальные) значения основных параметров ОУ (напряжение питания, мощность рассеяния, температурный режим, входное напряжение и др.);
- 5) электрические характеристики – это те параметры, которые могут влиять на параметры (а иногда их ограничивать) электронных схем на ОУ;
- 6) типичные характеристики и графики;
- 7) типовые схемы применения данного ОУ для реализации различных электронных схем.

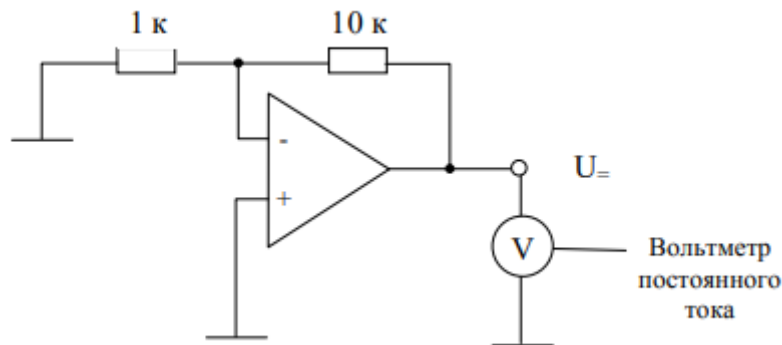
Статические параметры ОУ

1. Входное напряжение смещения $U_{см}$ – это такое постоянное напряжение, которое должно быть приложено к одному из входов ОУ (другой вход должен быть на корпусе), чтобы $U_{вых}=0$.

У идеального ОУ $U_{см}=0$. У реального ОУ $U_{см}$ может быть равен единицам или десяткам милливольт (как +, так и –). Проиллюстрируем один из методов измерения $U_{см}$ на основе инвертирующего усилителя с $K_u=10$ (рис. 1).

Оба входа ОУ соединяются с корпусом. На выходе включается вольтметр постоянного тока. Тогда

$$U_{см} = U_{\text{вых}} / K$$



2. Входной ток $I_{вх}$ – это среднее значение двух постоянных токов, которые текут в инвертирующий и неинвертирующий входы:

$$I_{вх} = \frac{I_{вх1} + I_{вх2}}{2}$$

Идеальный ОУ имеет $I_{вх1} = 0$ и $I_{вх2} = 0$, так как $R_{вх}$ идеального ОУ равно бесконечности. Реальный ОУ может иметь $I_{б}$ равный единицам – десяткам миллиампер.

Рассмотрим схему инвертирующего усилителя (рис. 2). Для определения $I_{вх}$ необходимо измерить U_{R2} и U_{R1} . Тогда

$$I_{\text{вх2}} = \frac{U_{R2}}{R_2}; I_{\text{вх1}} = \frac{U_{R1}}{R_1}; I_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{вх1}} + I_{\text{вх2}}}{2}.$$

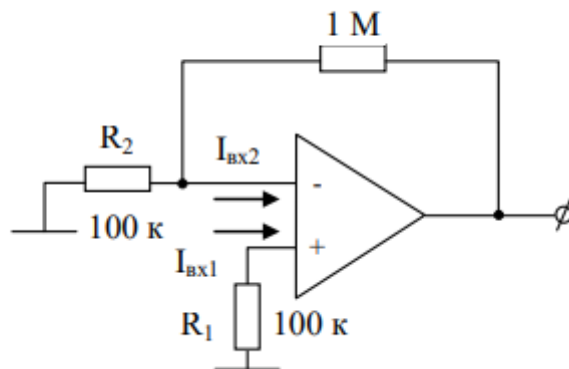


Рис.2.

3. Входной ток смещения $I_{\text{см}}$ есть разница между входными токами, т.е. $I_{\text{см}} = I_{\text{вх1}} - I_{\text{вх2}}$. Он может быть, как со знаком «+», так и «-». Типичные значения $I_{\text{см}}$ – единицы – десятки пикоампер.

4. Входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ – это сопротивление между инвертирующим (или неинвертирующим) входом и корпусом (другой вход при этом заземлен). Идеальный ОУ имеет $R_{\text{вх}} = \infty$. Типичное значение $R_{\text{вх}}$ – единицы – десятки мегаом (например, $\mu A741 - R_{\text{вх}} = 2 \text{ МОм}$).

Выходные статические параметры

1. Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ – это сопротивление между выходным выводом и корпусом. Для идеального ОУ $R_{\text{вых}} = 0$. Типичные значения $R_{\text{вых}}$ – единицы и десятки ом (например, $\mu A741 R_{\text{вых}} = 75 \text{ Ом}$).

2. Выходной ток короткого замыкания (максимальный постоянный ток нагрузки): $I_{\text{выхmax}} = I_{\text{нmax}}$.

Пример, приведен в презентации

Динамические параметры ОУ

Динамические параметры ОУ характеризуют его в динамике, т.е. при наличии внешних входных сигналов. 1. Коэффициент усиления K_0 –

коэффициент усиления ОУ без ООС. Типичное значение $K_0 = 10^5 - 10^6$ (например, $\mu A741 - K_0 = 200\,000$). 2. Скорость нарастания – время, в течение которого изменяется выходное напряжение электронной схемы на базе ОУ с ООС и $K_0 = 1$.

2. Скорость нарастания – время, в течение которого изменяется выходное напряжение электронной схемы на базе ОУ с ООС и $K_0 = 1$.

Идеально, выходное напряжение должно точно следовать за изменением входного сигнала без каких-либо искажений. Для быстро изменяющегося входного сигнала, например прямоугольной формы, выходной сигнал тоже должен быть прямоугольной формы. Однако на практике выходной сигнал увеличивается (или уменьшается) медленнее, чем соответствующий входной сигнал. На рис. 2.3 приведены примеры входных (рис. 2.3, а) и соответствующих выходных (рис. 2.3, б) сигналов. Скорость изменения

$$v = \Delta U_0 / \Delta t \text{ [В/мкс]}.$$

Для идеального ОУ скорость изменения напряжения бесконечна, так как $\Delta t = 0$. Для сравнительно медленных ОУ скорость изменения v порядка 0,5 В/мкс, для быстродействующих – 70 В/мкс.

3. Частота единичного усиления f_u – это частота, на которой K_0 уменьшается до 1 (0 дБ). Это связано с поведением амплитудно-частотной характеристики ОУ.

4. Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{осс}$ – это мера способности ОУ подавлять синфазные сигналы, воздействующие на оба входа

ОУ одновременно в фазе $K_{осс} = K_d / K_c \rightarrow \infty$. Чаще выражается в децибелах: $K_{осс} \text{ дБ} = 20 \lg K_{осс}$. Типичное значение $K_{осс} = 99 - 100$ дБ (чем больше, тем лучше).

5. Канальное разделение – это мера качества ИМС, имеющей внутри более чем один ОУ. В реальных условиях сигнал, приложенный к входам одного ОУ, будет вызывать небольшое выходное напряжение на выходе

другого ОУ даже при отсутствии на его входах входного сигнала. Существуют ИМС с двумя ОУ (например, 747 и 5558), с четырьмя ОУ. Типичное значение канального разделения – 100 – 120 дБ. Это означает, что если на входе одного ОУ будет $U_{вх} = 1$ В, то на выходе другого ОУ будет $U_{вых} = 1$ мВ (при использовании ИМС с канальным разделением 120 дБ). На практике этот параметр не вызывает проблем.

6. Время нарастания t_n – это время, в течение которого выходное напряжение изменяется по уровню от 0,1 до 0,9 своего установившегося значения. Типичное значение $t_n = 0,3$ мкс.

Во многих практических случаях требуется иметь достаточно высокое $R_{вх}$ (чтобы не нагружать выход источника сигнала) и достаточно низкое $R_{вых}$ (чтобы можно было подсоединить любую нагрузку, не перегружая схемы).

Для идеального ОУ $R_{вх} = \infty$; $R_{вых} = 0$. На практике это не так. Кроме того, введение ООС влияет не только на коэффициент усиления, но и на входное и выходное сопротивления. Так, в схемах повторителя напряжения, инвертирующего и неинвертирующего усилителей, а также дифференциального усилителя ООС снижает $R_{вых}$ схемы. Практика показывает, что так как $K = K_0 / F$, где $F = 1 + \beta K$ (глубина ООС), α , β – коэффициент передачи цепи ООС, причем $F \gg 1$, то $K \ll K_0$ и

$$R_{\text{вых. ОУ с ООС}} \approx \frac{R_{\text{вых.0}}}{F} = \frac{K}{K_0} R_{\text{вых.0}}.$$

Здесь $R_{\text{вых.0}}$ – выходное сопротивление собственно ОУ. Для

повторителя напряжения (ПН) $K = 1$, поэтому $R_{\text{вых. ПН}} \approx \frac{R_{\text{вых}}}{K_0}$.

Отсюда видно, что выходное напряжение схемы на ОУ с ООС может быть достаточно малым (менее 1 Ом).

Коэффициент ослабления синфазного сигнала

Сигналы, воздействующие на оба входа ОУ одновременно в фазе, называются синфазными. Этот случай иллюстрируется схемой

Входные сигналы U_1 и U_2 (например, шум с частотой 60 Гц) являются синфазными сигналами

Входные сигналы U_1 и U_2 (например, шум с частотой 60 Гц) являются синфазными сигналами. Если ДУ усиливает напряжение $U_d = (U_1 - U_2)$, то в идеале U_0 (выходное напряжение) в случае $U_1 = U_2$ будет равно 0, так как $U_0 = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$, где $\frac{R_2}{R_1} = K_d$.

Для реального ОУ $U_0 \neq 0$, $U_0 = K_c U_{\text{синф}}$, где K_c – коэффициент усиления синфазного сигнала.

Коэффициент ослабления (подавления) синфазного сигнала $K_{\text{осс}} = \frac{K_d}{K_c}$. Идеальный ОУ имеет $K_{\text{осс}} = \infty$. Для рассматриваемой схемы (см. рис. 2.15) выходное напряжение $U_0 = \left(\frac{U_{\text{синф}}}{K_{\text{осс}}} \right) \times K_d = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{U_{\text{синф}}}{K_{\text{осс}}} \right)$. Последнее выражение можно использовать для экспериментального измерения $K_{\text{осс}}$.

В общем случае выходное напряжение определяется как сумма напряжений идеального ОУ (пропорционально полезному дифференциальному входному сигналу) и синфазного (помеха), т.е. $U_0 = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) (U_2 - U_1) + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{U_{\text{синф}}}{K_{\text{осс}}} \right)$.

Чем больше $K_{\text{осс}}$, тем меньше помеха. Следовательно, качественный ОУ должен иметь $K_{\text{осс}}$ как можно больше. Очень часто

49

$K_{\text{осс}}$ измеряется в децибелах: $K_{\text{осс дБ}} = 20 \lg K_{\text{осс}}$. Например, $K_{\text{осс}} = 10^6$, значит $K_{\text{осс дБ}} = 120$ дБ.

Иногда простой выбор ОУ с высоким $K_{\text{осс}}$ не дает желаемых результатов. Особенно в случаях, когда уровень входного дифференциального сигнала очень маленький (уровни милливольт) по сравнению с уровнем синфазного входного сигнала, который может быть значительно выше (несколько вольт). Например, выходное напряжение несбалансированного моста постоянного или переменного тока находится в милливольтном диапазоне. Для усиления его используется схема (рис. 2.16).

Рис. 2.16

Очевидно, что в этом случае необходимо иметь K_d как можно больше. Однако из выражения для U_0 видно, что при этом увеличится и слагаемое (выходная компонента) с $U_{\text{синф}}$ ($U_{\text{вых синф}}$). Методы уменьшения этого слагаемого, рассмотренные выше, здесь не работают.

Если $U_{\text{вых см}}$ – это постоянное напряжение, то $U_{\text{вых синф}}$ – это переменное напряжение. Для увеличения $K_{\text{осс}}$ можно использовать потенциометр, как показано на схеме (рис. 2.17).

Рассмотрим, что может случиться, если источник питающего напряжения нестабилен и напряжение питания дрейфует от одного значения к другому или между двумя уровнями. Применительно к схемам на ОУ в этом случае вводится параметр чувствительности к источнику питания, который определяется отношением изменения входного напряжения смещения к соответствующему изменению напряжения питания:

$$\Delta U_{\text{вх см}} / \Delta E_{\text{пит}} = \delta \text{ мкВ/В}.$$

$$\Delta U_{\text{вых см}} = (1 + K) \Delta U_{\text{вх см}} = (1 + K) \delta \Delta E_{\text{пит}},$$

$$\text{где } U_{\text{вх см}} = |U_{\text{вх см}}| \Delta E_{\text{пит}} \delta.$$

Для инвертирующего усилителя

$$\Delta U_{\text{вых см}} = K \Delta U_{\text{вх см}} = K \delta \Delta E_{\text{пит}}.$$

Частотные свойства ОУ Идеальный ОУ имеет бесконечную полосу пропускания. Реальный ОУ имеет ограниченную полосу пропускания. В связи с этим необходимо знать частотные свойства ОУ. Информация об этом содержится в амплитудно-частотной характеристике ОУ. Типичная АЧХ ОУ представлена на рис. 2.20

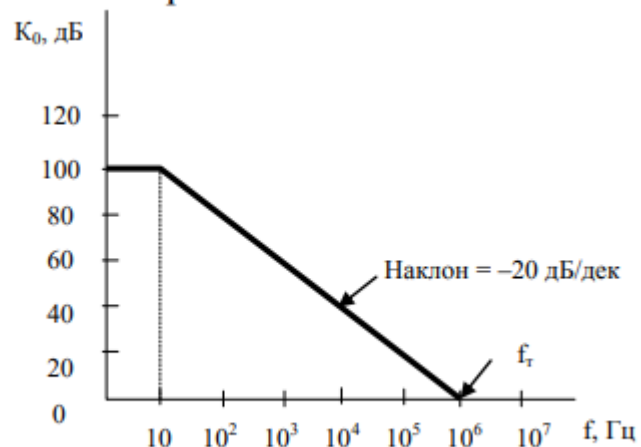


Рис. 2.20

В диапазоне частот от 0 до ~10 Гц коэффициент усиления ОУ const $K_0 =$ и равен примерно 100 дБ, что эквивалентно значению 105 . Выше 10 Гц K_0 линейно падает под углом -20 дБ/дек или -6 дБ/окт. Спад продолжается до тех пор, пока $K_0 = 1$. Частота, на которой $K_0 = 1$, называется частотой единичного усиления f_1 . Очевидно, что все параметры ОУ, которые зависят от K_0 , также зависят от f например K , $K_{\text{осс}}$, $R_{\text{вых}}$. В большинстве случаев нет необходимости знать АЧХ. Достаточно иметь другую характеристику – площадь усиления (ПУ). Например, для ОУ 741 ПУ =1 МГц, для LM318 ПУ =15 МГц. Численно ПУ равна частоте единичного усиления, а математически $\text{ПУ} = K_0 \Delta F$, где ΔF – полоса пропускания усилителя. Отсюда можно определить K_0 ОУ для данной полосы пропускания. Например, для ОУ 741 ПУ =1 МГц. Следовательно, для полосы пропускания 20 кГц необходимо иметь

$$K_0 = \frac{\text{ПУ}}{\Delta F} = \frac{1 \text{ МГц}}{20 \text{ кГц}} = 50.$$

Учитывая, что K_0 и K взаимосвязаны, то ПУ также определяет и максимум возможного K . На рис. 2.21 приведено семейство графиков коэффициента усиления для ОУ 741. Значение полосы пропускания определяется точкой пересечения графиков K_0 (2 – при замкнутой ООС) и K_0 (1 – при разомкнутой ООС). Для $K_0 = 100$ (40 дБ) максимум возможной полосы – 10 кГц. Однако,

если K_0 уменьшить до 10 (20 дБ), тогда максимум возможной полосы увеличивается до 100 кГц. Эта связь между K_0 и полосой, полученной из графика, базируется на вышеприведенном уравнении.