

Лекция 11

Тема: Аналоговые интегральные микросхемы (Продолжение).

- 1) Операционные усилители.
- 2) Параметры ОУ.
- 3) Схемотехника ОУ.

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционными усилителями (ОУ) называют усилители постоянного тока, предназначенные для выполнения различного рода операций над аналоговыми сигналами при работе в схемах с отрицательной обратной связью. Они обладают очень большим коэффициентом усиления напряжения, имеют дифференциальный вход с высоким входным сопротивлением и несимметричный выход с низким выходным сопротивлением. Условное обозначение ОУ приведено на рис. 88, *а*. Общую информационную шину (корпус) и цепи питания на схемах обычно не показывают. Один из входов ОУ, отмеченный знаком «+», называется неинвертирующим. При подаче сигнала на этот вход и соединении второго входа с корпусом выходное напряжение находится в фазе с входным. Второй вход ОУ, отмеченный знаком «-» (иногда его обозначают знаком инверсии «о»), называется инвертирующим. При подаче сигнала на этот вход и соединении другого входа с корпусом напряжение на выходе ОУ находится в противофазе со входным. Во многих случаях источник сигнала включается между обоими входами. Помимо трех сигнальных контактов (двух входных и одного выходного) ОУ содержит дополнительные контакты (число контактов обычно составляет 14 или 16). Для облегчения понимания назначения контактных выводов применяется более полное условное обозначение ОУ (рис. 88, *б*). Символами *НС* обозначают выводы балансировки, символами *ФС* – выводы частотной коррекции. Существуют и другие вспомогательные выводы.

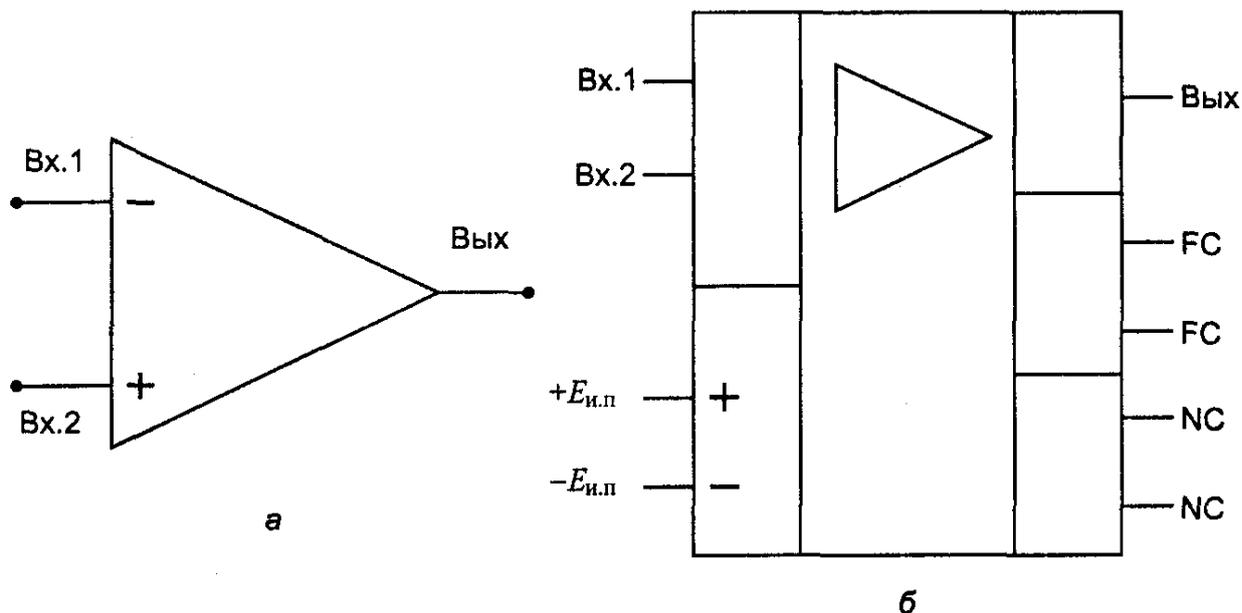


Рис. 88

ПАРАМЕТРЫ ОУ

Параметры ОУ характеризуют эксплуатационные возможности операционного усилителя. Основные параметры перечислены ниже.

1. Коэффициент усиления напряжения без обратной связи K_u , показывающий, во сколько раз напряжение на выходе ОУ превышает напряжение сигнала, поданного на дифференциальный вход. Практически $K_u = 10^5 - 10^6$.

2. Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{осл.сф}$ показывающий, во сколько раз дифференциальный сигнал сильнее синфазного. Практически определяется свойствами входного дифференциального каскада и составляет от 80 до 100 дБ.

3. Напряжение смещения нуля $U_{см}$, представляющее собой постоянное напряжение определенной полярности, которое необходимо подать на вход ОУ при отсутствии входного сигнала для того, чтобы напряжение на выходе стало равным нулю. Отклонение выходного напряжения от нуля обусловлено хотя и очень малым, но неизбежно

существующим дисбалансом плеч дифференциального каскада. Типовое значение $U_{см} = (5 - 20)$ мВ.

4. Температурный дрейф напряжения смещения

$$TKU_{см} = \frac{\Delta U}{U_{см}} \quad (58)$$

характеризует изменение напряжения $U_{см}$ при изменении температуры и составляет от 1 до 30 мкВ/°С.

5. Входные сопротивления для дифференциального $R_{вх.диф}$ и синфазного $R_{вх.сф}$ сигналов. Сопротивление $R_{вх.диф}$ измеряется со стороны любого входа в то время, когда другой вход соединен с общим выводом. Значения его лежат в пределах от сотен килоом до единиц мегаом. Сопротивление $R_{вх.сф}$ измеряется между соединенными вместе входными контактами ОУ и корпусом. Это сопротивление на несколько порядков выше сопротивления для дифференциального сигнала.

6. Выходное сопротивление $R_{вых}$. По отношению к внешней нагрузке ОУ ведет себя как генератор напряжения, обладающий внутренним сопротивлением, являющимся выходным сопротивлением ОУ. Величина этого сопротивления составляет десятки-сотни Ом.

7. Входные токи. Это токи, протекающие во входных выводах при присоединении последних к корпусу. Если входной дифференциальный каскад выполнен на биполярных транзисторах, то эти токи являются токами баз, их величина составляет от 10 до 100 мкА. Если входной дифференциальный каскад выполнен на полевых транзисторах, то эти токи существенно меньше, их величина составляет от 10 до 100 нА. Из-за асимметрии плеч дифференциального каскада эти токи различаются. В справочниках приводится среднее значение входного тока:

$$I_{вх.ср} = \frac{I_{вх1} + I_{вх2}}{2} \quad (59)$$

8. Разность входных токов $I_{вх} = I_{вх1} - I_{вх2}$ характеризует степень дисбаланса ОУ. При больших сопротивлениях резисторов, включенных на входах ОУ, за счет разности входных токов может появиться паразитный дифференциальный сигнал.

9. Частота единичного усиления f_1 , характеризует частотные свойства ОУ в режиме усиления малых сигналов. Это та частота, на которой коэффициент усиления напряжения становится равным единице. В ОУ предусмотрено включение корректирующих цепочек с тем, чтобы устранить самовозбуждение на высоких частотах, неизбежно возникающее при больших коэффициентах усиления и охвате ОУ обратной связью. Поэтому частотная характеристика ОУ имеет специфичный вид (рис. 89). Если рассматривать зависимость логарифма коэффициента усиления как функцию логарифма частоты, то, начиная с некоторой частоты f_0 , наблюдается линейное уменьшение $\lg K$ вплоть до частоты f_1 , на которой $K = 1$, а $\lg K = 0$. Практически $f_0 = 10 - 20$ Гц, $f_1 = 0,5 - 5$ МГц.

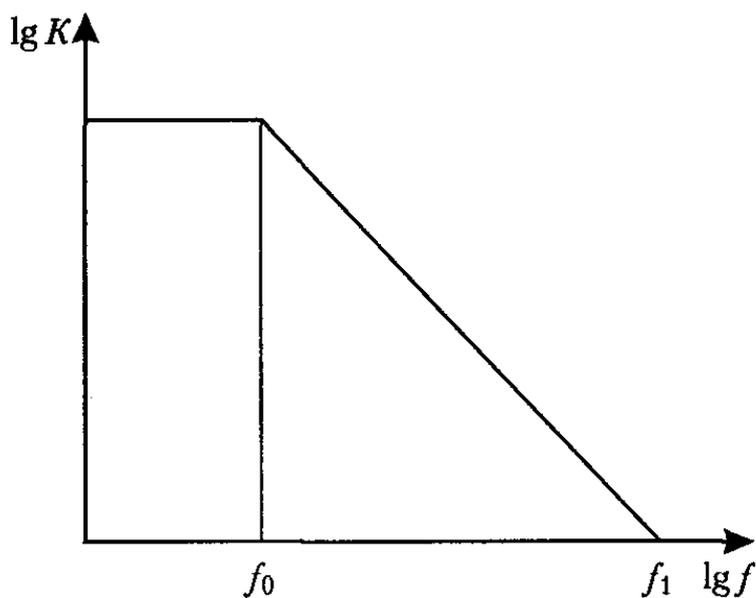


Рис. 89

10. Скорость нарастания выходного напряжения V_u характеризует быстродействие ОУ в режиме большого сигнала. Это скорость изменения

выходного напряжения при подаче на вход ОУ ступенчатого напряжения. У обычных ОУ она составляет от 0,5 до 5 В/мкс, у быстродействующих достигает 50 В/мкс.

Кроме указанных параметров в справочниках приводятся максимальные значения входного $\pm U_{вх.мах}$ и выходного $U_{вых.мах}$ напряжений, а также напряжение источника питания $\pm E_{ип}$ характеризующие амплитудные свойства ОУ (рис. 90). В справочниках также приводится величина потребляемого тока $I_{п}$ и ряд других параметров.

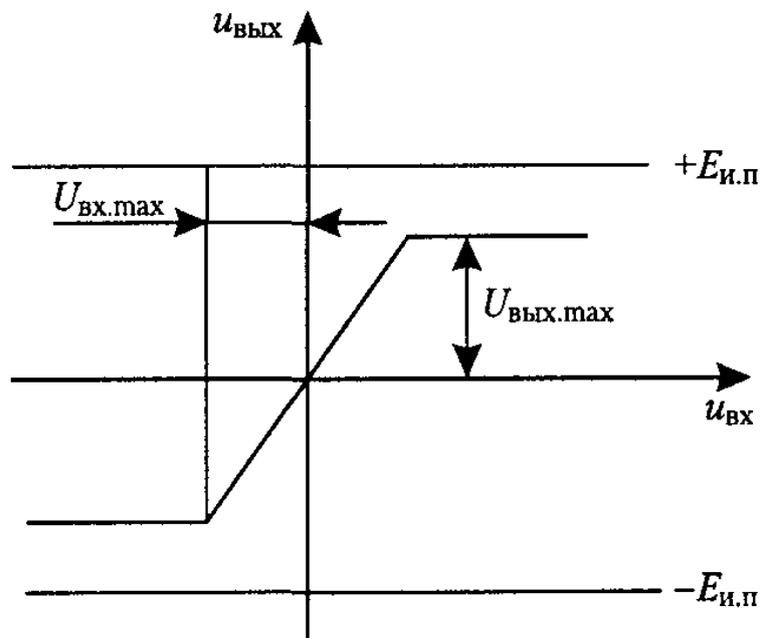


Рис. 90

СХЕМОТЕХНИКА ОУ

В состав ОУ входит несколько каскадов. Наиболее простое схемное решение имеет ОУ К140УД1 (рис. 91), изготовленный на кремневой пластине размером 1,1×1,1 мм и содержащий 9 транзисторов. Входной дифференциальный каскад выполнен на транзисторах VT_1 и VT_2 , он питается от генератора стабильного тока на транзисторах VT_3 и VT_4 .

Второй дифференциальный каскад выполнен на транзисторах VT_5 и VT_6 . Схема сдвига потенциала образована транзистором VT_7 , резистором R_9 и генератором стабильного тока VT_8 . Выходной каскад на транзисторе VT_9 представляет собой эмиттерный повторитель, охваченный неглубокой положительной обратной связью, компенсирующей ослабление сигнала схемой сдвига потенциала. Обратная связь осуществляется путем подачи части выходного сигнала на эмиттер VT_8 , который включен для этого сигнала по схеме с ОБ, и затем на базу эмиттерного повторителя VT_9 . Схема обеспечивает сравнительно невысокий коэффициент усиления $K_u = 2 \cdot 10^3$, дает ослабление синфазного сигнала $K_{осл.сф} = 60$ дБ и имеет невысокое входное сопротивление $R_{вх} = 4$ кОм.

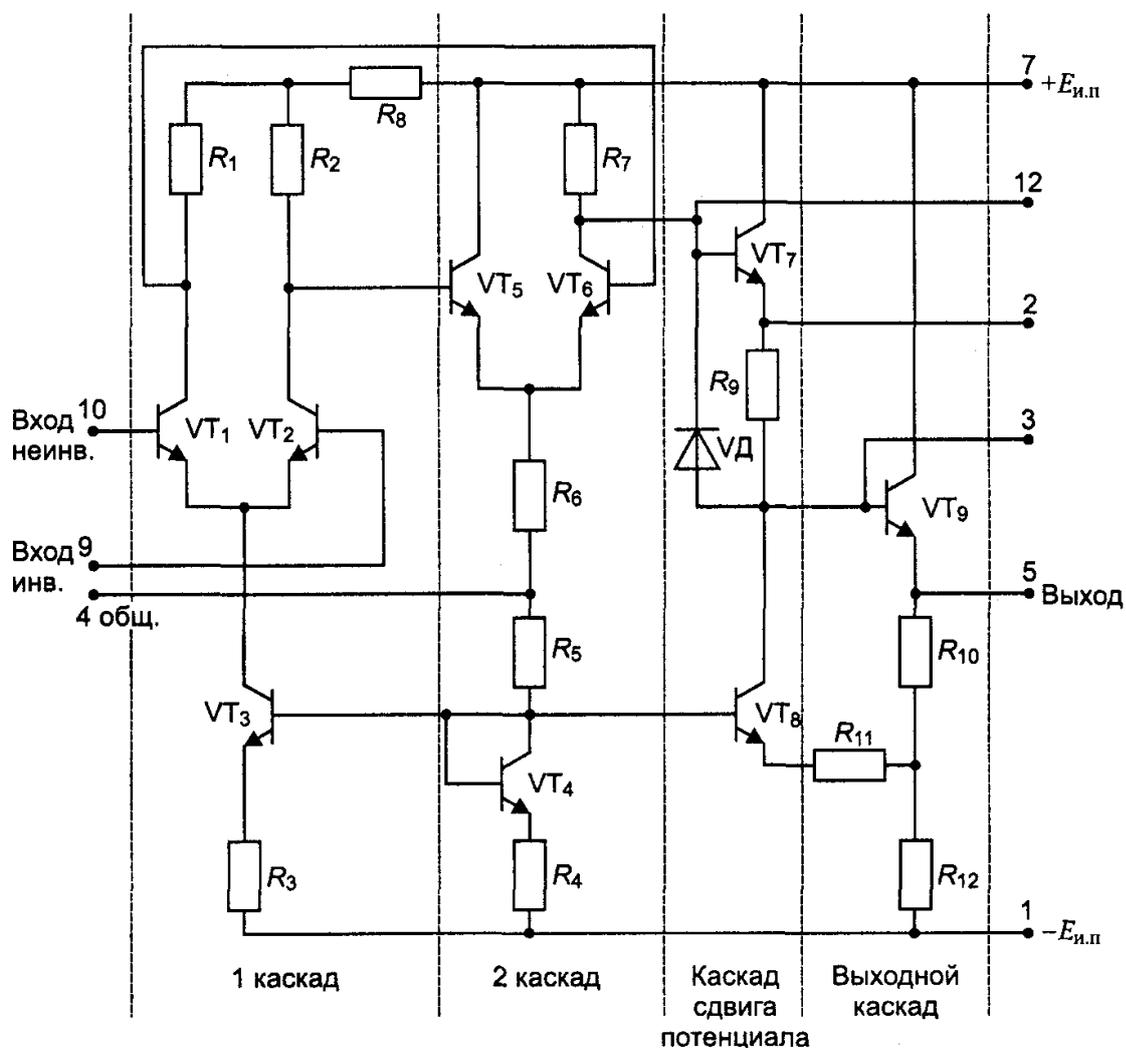


Рис. 91

Последующие разработки позволили улучшить параметры ОУ ценой усложнения схемы. Так, например, применение входного дифференциального каскада по каскодной схеме ОК-ОБ в ОУ К140УД7 позволило повысить входное сопротивление до 400 кОм при входном токе 200 нА, довести коэффициент усиления входного каскада до 300, повысить коэффициент ослабления синфазного сигнала до 70 дБ. Второй каскад выполнен на составных транзисторах с динамической нагрузкой и обеспечивает коэффициент усиления $K_u = 200$. Выходной каскад выполнен по двухтактной схеме с защитой от перегрузки. В схеме К140УД8 во входном дифференциальном каскаде применены полевые транзисторы, что позволило снизить входной ток до 0,2 нА и получить $K_{осл.сф} = 70$ дБ.

Большинство современных ОУ строится по двухкаскадной схеме. Упрощенная схема такого ОУ показана на рис. 92. Первый усилительный каскад выполняется на транзисторах VT_1 и VT_2 , питающихся от генератора стабильного тока I_{01} . Как правило, транзисторы в плечах ДК включаются по каскодной схеме ОК-ОБ или ОИ-ОЗ с динамической нагрузкой, обеспечивающей получение однофазного (несимметричного) выхода. Обычно на выходе ДК ставится эмиттерный повторитель, обеспечивающий передачу сигнала на вход второго каскада. В общей сложности число транзисторов, образующих первый ДК, достигает 13 (схема К140УД8) и более. Во многих случаях в первом каскаде предусматривается балансировка нуля выходного напряжения.

Второй усилительный каскад выполнен на транзисторе VT_3 с динамической нагрузкой в виде генератора тока I_{02} . В каскаде предусматривается включение корректирующего конденсатора между коллектором и базой транзистора, благодаря чему возрастает входная емкость каскада и уменьшается усиление на высоких частотах, что исключает возможность возникновения самовозбуждения при охвате ОУ отрицательной обратной связью. В коллекторную цепь включены диоды смещения VD_1 и VD_2 , обеспечивающие нормальный режим работы выходного каскада, выполненного по двухтактной схеме с защитой от перегрузок.

Промышленностью выпускается большое разнообразие ОУ, которые делятся на две группы: общего применения и частного применения. ОУ частного применения подразделяются на быстродействующие (обладают $V_u = 50 - 75$ В/мкс), прецизионные (обладают высоким $K_u = 10^6$, высоким $K_{осл.сф} = 120$ дБ и малым $U_{см} = 1$ мВ), микроомные (питаются от

источников питания $E_{\text{ип}} = \pm 3$ В или ± 6 В и потребляют ток менее 1 мА), мощные (обеспечивают выходной ток до 1 А) и высоковольтные.

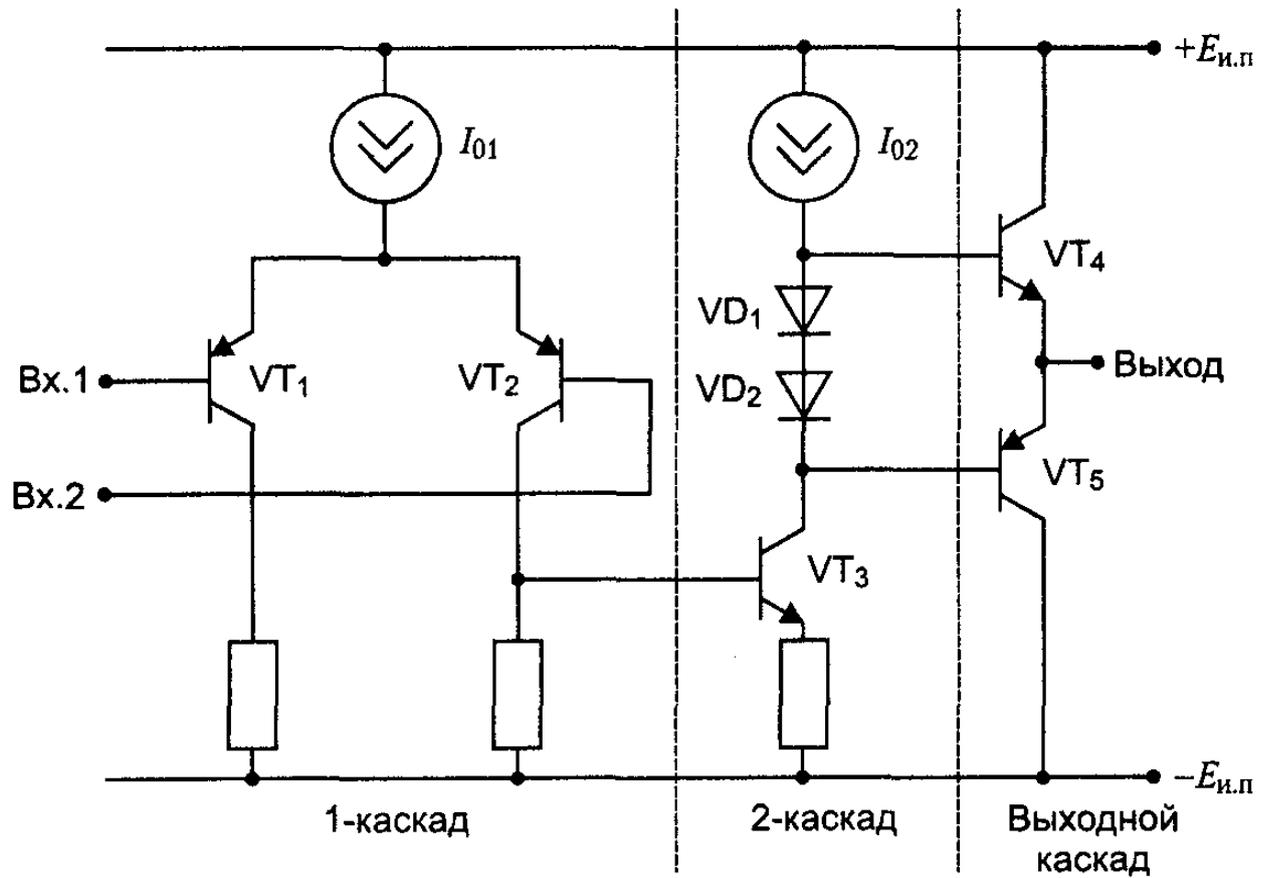


Рис. 92