

## Интегральные компараторы

### 1. Принцип действия и разновидности

**Компараторами** называются специализированные ОУ с дифференциальным входом и логическим выходом, предназначенные для сравнения двух аналоговых сигналов. На один вход компаратора подается исследуемый сигнал  $u_{ВХ}$ , на другой – опорный сигнал  $u_{ОП}$ . Пусть  $u_{ВХ}$  подается на неинвертирующий вход,  $u_{ОП}$  – на инвертирующий. Когда входной сигнал меньше опорного, на выходе компаратора формируется низкий уровень напряжения, соответствующий логическому нулю, когда входной сигнал становится больше опорного, на выходе будет высокий уровень напряжения (логическая единица). Если сигнал  $u_{ВХ}$  подать на инвертирующий вход, а  $u_{ОП}$  на неинвертирующий, то получим инвертирующий компаратор.

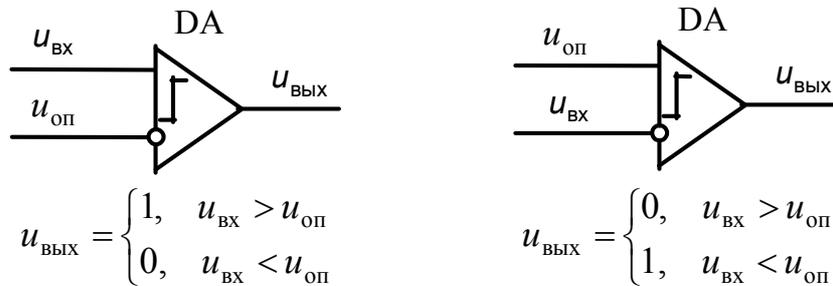


Рис. 1

### Передаточная характеристика

Графическая зависимость выходного напряжения от разности входных напряжений приведена на рис. 2, а условное схематическое обозначение компаратора приведено на рис. 3. Как видно из обозначения, компаратор напряжения помимо основных сигнальных входов может иметь служебные входы различного назначения: стробирования, балансировки, и др.

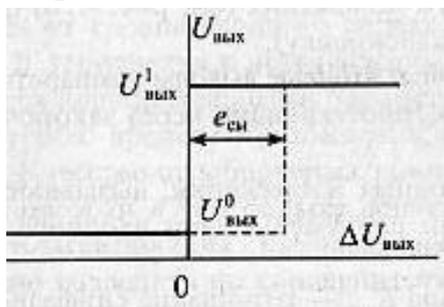


Рис. 2

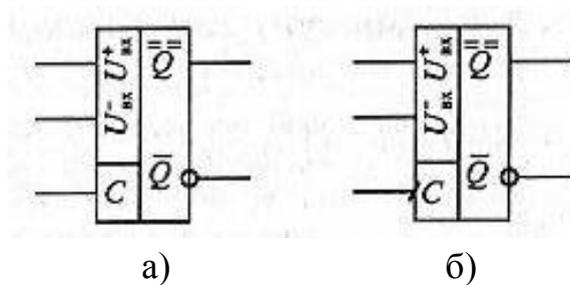


Рис. 3

Упрощенная структурная схема компаратора напряжения приведена на рис. 4. Она состоит из входного дифференциального каскада ДК, устройства смещения уровней и выходной логики. Входной дифференциальный каскад формирует и обеспечивает основное усиление разностного сигнала. Помимо этого, он позволяет осуществлять балансировку выхода при помощи внешнего подстроенного резистора и позволяет скорректировать напряжение смещения нулевого

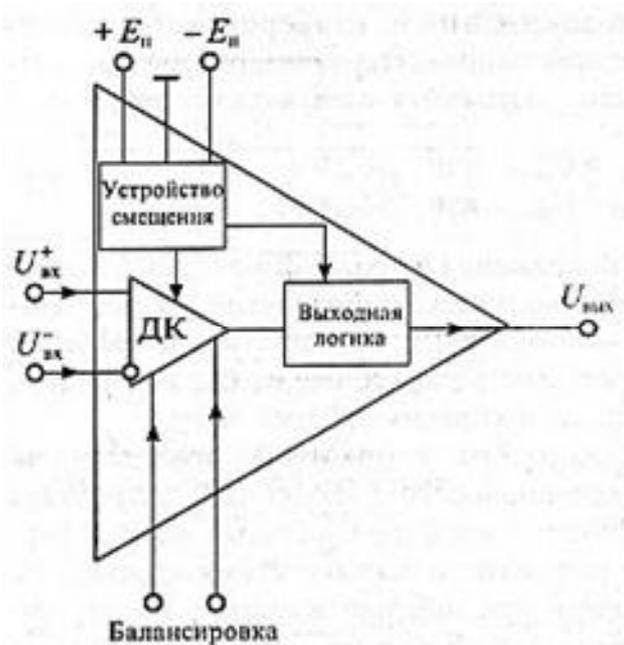


Рис. 4

уровня в пределах до 1... 2 мВ, возникающее в дифференциальном каскаде. С помощью балансировки можно также установить предпочтительное начальное состояние выхода. Цепь смещения, подключаемая к дифференциальному каскаду, обеспечивает получение оптимальных уровней токов в элементах дифференциального каскада и исключает его насыщение при большом уровне входных сигналов. Кроме этого, устройство смещения устанавливает также соответствующие уровни напряжения и тока в выходном логическом каскаде. Благодаря этому обеспечивается работа компаратора с определенным типом логики - ТТЛ, ЭСЛ или КМОП.

В настоящее время применяются компараторы со входом стробирования. Входы стробирования предназначены для фиксации момента времени, когда производится сравнение входных сигналов и выдача результата сравнения на выход. Для этого на вход стробирования подается импульсный сигнал разрешения сравнения. Результаты сравнения могут появляться на выходе компаратора только во время строба или могут фиксироваться в элементах памяти компаратора до прихода очередного импульса строба. Таким образом, стробируемые компараторы могут быть без памяти и с памятью. Кроме этого, стробирование может выполняться по уровню импульса или по его фронту (перепаду уровней). Для указания стробирования по фронту на входе стробирования изображается направление перепада от низкого уровня к высокому / или, наоборот, от высокого уровня к низкому \. Пример такого обозначения

стробирования приведен на рис. 3б. Поскольку импульс строга приходит одновременно с изменяющимся входным сигналом, то минимальная длительность строга (или его фронта) должна быть такой, чтобы входной сигнал успел пройти через дифференциальный каскад, прежде чем сработает ячейка памяти. Это время называют обычно временем разрешения выборки. Применение стробирования повышает помехозащищенность компаратора, так как помеха может изменить состояние выхода только в узкое время разрешения выборки.

Компаратор является простейшим аналого-цифровым преобразователем. Компаратор не предназначен для длительной работы на восходящей ветви характеристики вход–выход, т.е. в режиме линейного усиления, а служит для работы в режиме переключений. В соответствии с этим изменяются по сравнению с ОУ и требования, предъявляемые к компараторам.

## 2. Характеристики аналоговых компараторов

Аналоговые компараторы описываются набором параметров, которые нужно учитывать при их использовании. Основные параметры можно разделить на статические и динамические. К статическим специфическим параметрам относятся такие, которые определяют его состояние в установившемся режиме:

пороговая чувствительность — минимальный разностный сигнал, который можно обнаружить компаратором и зафиксировать на выходе как логический сигнал;

напряжение смещения  $U_{см}$  - определяет смещение передаточной характеристики компаратора относительно идеального положения (для коррекции этого смещения используют балансировку);

напряжение гистерезиса  $U_{г}$  — разность входных напряжений, вызывающих срабатывание компаратора при увеличении или уменьшении входного напряжения;

выходные логические уровни - значение напряжения  $U_{ВЫХ}^1$  и  $U_{ВЫХ}^0$  ;

выходной ток  $I_{ВЫХ}$  - ток, отдаваемый компаратором в нагрузку.

Гистерезис компаратора (рис. 5)

проявляется в том, что переход из состояния  $U_{ВЫХ}^0$  в состояние  $U_{ВЫХ}^1$  про-

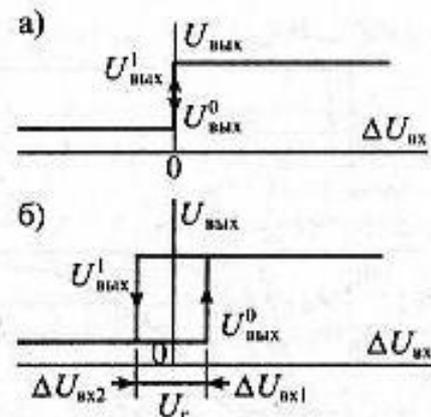


Рис. 5

исходит при входном напряжении  $\Delta U_{\text{вх1}}$ , а возвращение из  $U_{\text{вых}}^1$  в  $U_{\text{вых}}^0$  - при напряжении  $\Delta U_{\text{вх2}}$ . Разность  $\Delta U_{\text{вх1}} - \Delta U_{\text{вх2}} = U_{\text{г}}$  называется напряжением гистерезиса. Наличие гистерезиса связано с использованием в компараторе положительной обратной связи, которая позволяет устранить дребезг  $U_{\text{вых}}$  при  $\Delta U_{\text{вх}} = 0$ . Наличие гистерезиса приводит к появлению зоны неопределенности, внутри которой невозможно установить значение  $\Delta U_{\text{вх}}$ .

Основным динамическим параметром компаратора, определяющим его быстродействие, является время восстановления – определяется по переходной характеристике компаратора. Иногда это время называют временем переключения компаратора. Переходная характеристика компаратора (рис. 6) обычно снимается, когда на один вход подается напряжение перегрузки, равное 100 мВ, а на другой вход – перепад напряжения той же полярности, но большей амплитуды. Разница между амплитудами перепада напряжения и сигнала перегрузки называется напряжением восстановления  $U_{\text{в}}$ . Быстродействие компараторов принято характеризовать временем восстановления  $t_{\text{в}}$ , измеряемым от момента сравнения входных сигналов до момента, когда выходное напряжение достигает порога срабатывания логической схемы, подключенной к выходу,  $U_{\text{пор}}$ . Обычно в справочных данных приводится время восстановления для напряжения  $U_{\text{в}} = 5$  мВ. Время восстановления компараторов разбивается на две части: время задержки  $t_3$  и время нарастания  $t_{\text{н}}$ . Время восстановления существенно зависит от уровня входного дифференциального сигнала. График зависимости времени восстановления от уровня входного сигнала приведен на рис. 7.

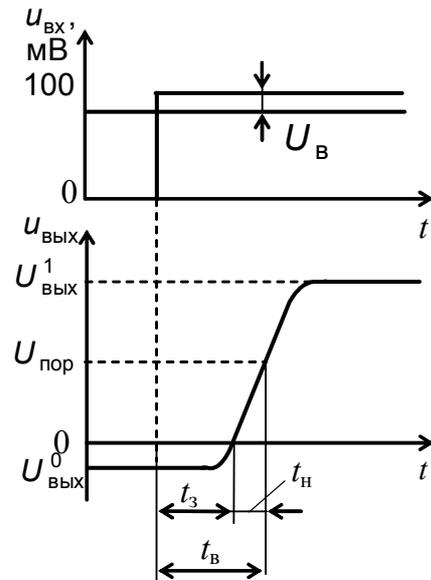


Рис. 6

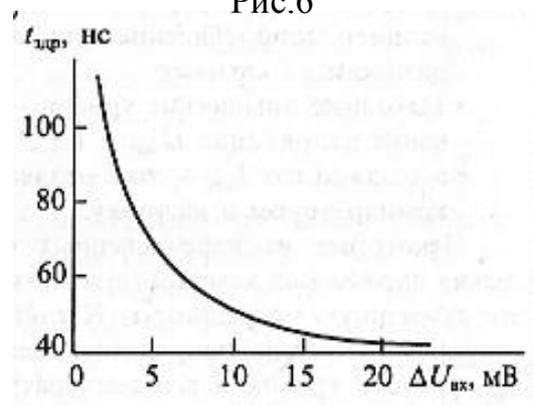


Рис. 7

Заметим, что режим перегрузки является нормальным для компараторов, в то время как в обычных ОУ при этом, как правило, происходит насыщение транзисторов.

В дополнение к перечисленным выше стробируемые компараторы характеризуются дополнительными параметрами, обусловленными использованием импульса строга: временем разрешения выборки и максимальной частотой стробирования. Качество стробируемых компараторов тем выше, чем меньше время разрешения выборки и чем больше допустимая частота стробирования.

### 3. Классификация компараторов

Интегральные микросхемы компараторов можно разделить по совокупности параметров на три группы:

общего применения ( $t_v < 300$ нс,  $K_d < 100$ дБ);

быстродействующие ( $t_v < 30$ нс);

прецизионные ( $K_d > 100$ дБ,  $U_{см} < 3$ мВ,  $\Delta i_{вх} < 10$ нА).

Кроме того, компараторы можно разделить на стробируемые и нестробируемые, а также с памятью и без памяти.

В табл. 1 приведены основные параметры быстродействующего компаратора со стробированием КМ597СА2. Компаратор содержит три дифференциальных каскада, что обеспечивает достаточно высокую пороговую чувствительность.

Таблица 1

Параметр	КМ597СА2
Выходные логические сигналы	ТТЛ
Пороговая чувствительность, мВ	0,25
Напряжение смещения, мВ	2
Температурный коэффициент напряжения смещения, мкВ/К	10
Входной ток, мкА	10
Разность входных токов, мкА	1
Коэффициент ослабления синфазного сигнала, дБ	80
Время восстановления, не	12
Время разрешения выборки, не	6
Максимальная частота стробирования, МГц	80
Наличие памяти	есть

Компараторы общего применения имеют более скромные характеристики по сравнению с приведенными в табл. 1. Однако эти компара-

торы имеют свои преимущества - они потребляют меньшую мощность, могут работать при низком напряжении питания и в одном корпусе располагается до четырех компараторов. Так, например, счетверенные компараторы среднего быстродействия и небольшого тока потребления типов К1401СА1 и К1401СА2 имеют время восстановления меньше 3 мкс, ток потребления 2мА, коэффициент усиления 90 дБ и напряжение смещения нулевого уровня меньше 5мВ.

Многие компараторы общего применения имеют на выходе транзистор с открытым коллектором, что позволяет подключать нагрузку этого транзистора к внешнему источнику питания, напряжение которого выбирается в зависимости от типа используемой логики. Схема включения внешней нагрузки к выходу компаратора приведена на рис. 8. Значение сопротивления нагрузочного резистора выбирают в пределах 100... 1000 Ом. Меньшие сопротивления обеспечивают более высокую скорость переключения.

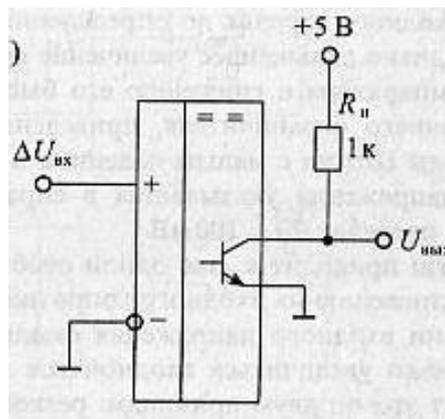


Рис. 8

Прецизионные компараторы отличаются от компараторов общего применения рядом улучшенных характеристик. Они имеют повышенный коэффициент усиления, меньшее пороговое напряжение переключения, пониженное напряжение смещения нулевого уровня и малый входной ток. Быстродействие этих компараторов обычно не очень высокое, время переключения обычно меньше 300 нс. Примером прецизионного компаратора является отечественный компаратор К554СА3.

#### **4. Применение аналоговых компараторов напряжения**

Основные особенности аналоговых компараторов связаны с отсутствием в них частотной коррекции и большим коэффициентом усиления. В отличие от операционных усилителей, в компараторах практически никогда не применяют отрицательную обратную связь, так как она понижает стабильность их работы. Специализированные компараторы напряжений имеют малые задержки, высокую скорость переключения, устойчивы к большим переключающим сигналам.

Для устранения многократных переключений в момент сравнения сигналов в компараторах часто используют положительную обратную

связь. Положительная обратная связь обеспечивает надежное переключение компаратора и устраняет дребезг выходного напряжения в момент сравнения. Однако при введении положительной обратной связи создается зона неопределенности, обусловленная гистерезисом. Если сигнал на входе компаратора изменяется монотонно, то наличие гистерезиса не отражается на погрешности компарирования.

Напряжения на входах компаратора из-за отсутствия отрицательной обратной связи могут существенно отличаться. Поэтому для ограничения входного напряжения на входе компаратора часто устанавливают двухсторонний диодный ограничитель, схема которого приведена на рис. 9.

Быстродействие компаратора существенно зависит от уровня входного дифференциального сигнала. С увеличением входного сигнала до определенного значения время восстановления уменьшается. Однако дальнейшее увеличение входного сигнала может привести к насыщению компаратора и снижению его быстродействия. В связи с этим в схеме двухстороннего ограничителя, приведенного на рис. 9, рекомендуется использовать диоды Шотки с малым падением напряжения. Рекомендуемое значение входного напряжения указывается в справочных данных на компаратор и обычно лежит в пределах 20... 100мВ.

Отказ от отрицательной обратной связи приводит к еще одной особенности применения компараторов напряжения - снижению их входного сопротивления и увеличению входного тока. При увеличении входного напряжения выше порогового значения у компараторов может резко увеличиться входной ток и понизиться входное сопротивление. Происходит это по двум причинам: резкое увеличение тока базы транзисторов дифференциального каскада и включение диодов защиты.

Основное применение компараторы напряжения находят в устройствах сопряжения

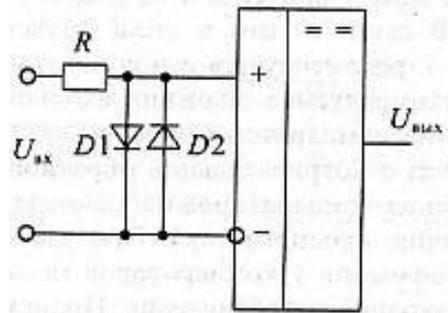


Рис. 9

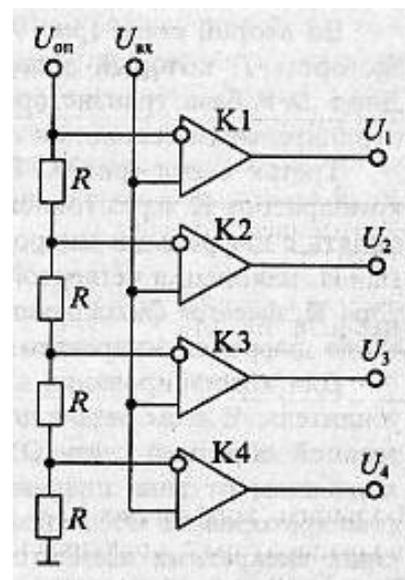


Рис. 10

цифровых и аналоговых сигналов. Простейшим примером такого применения является аналого-цифровой преобразователь параллельного типа, приведенный на рис. 10. В нем использованы четыре компаратора  $K1...K4$  и резистивный делитель опорного напряжения  $u_{оп}$ . При одинаковых значениях сопротивлений в резистивном делителе на инвертирующие входы компараторов подано напряжение  $nu_{оп}/4$ , где  $n$  - порядковый номер компаратора. На неинвертирующие входы компаратора подано напряжение  $u_{вх}$ . В результате сравнения входного напряжения с опорными напряжениями на инвертирующих входах компараторов на выходах компараторов образуется унитарный цифровой код входного напряжения. При помощи цифрового преобразователя кода этот код можно преобразовать в двоичный.

Различные варианты подключения аналоговых компараторов напряжения к цифровым логическим микросхемам серии ТТЛ приведены на рис. 11. В первой схеме (рис. 11, а) выход компаратора непосредственно соединен с входом цифровой микросхемы ТТЛ. Такую схему можно использовать при открытом коллекторном выходе в компараторе  $DA$ .

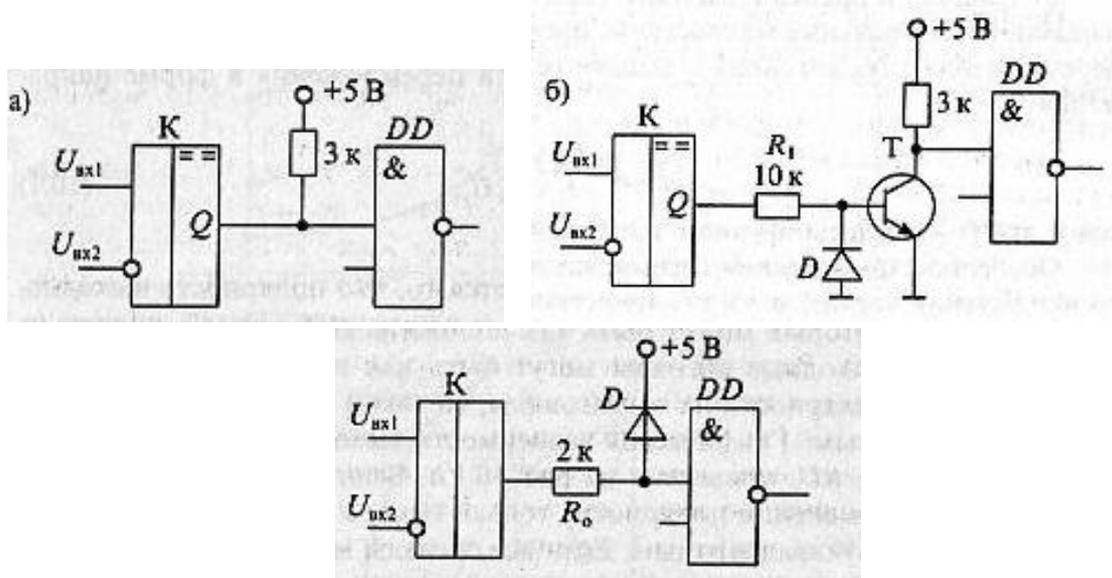


Рис. 11

Во второй схеме (рис. 11, б) компаратор  $DA$  управляет коммутирующим транзистором  $VT$ , который в свою очередь управляет цифровой микросхемой ТТЛ. Диод  $VD$  в базе транзистора  $VT$  выполняет защиту базы транзистора от пробоя отрицательным выходным напряжением компаратора  $DA$ .

В третьей схеме (рис. 11, в) кроме токоограничивающего резистора имеется фиксирующий диод VD, который отпирается, если напряжение на входе цифровой микросхемы поднимается выше 5 В.

Для компарирования аналоговых сигналов можно применять операционные усилители. В этом случае для ограничения выходного напряжения в цепь отрицательной обратной связи ОУ включают стабилитрон с напряжением включения, зависящим от типа цифрового логического элемента. Основными недостатками компараторов на ОУ являются: невысокое быстродействие и большое число внешних дискретных элементов. Время переключения таких компараторов обычно имеет значение 0,5... 1,0 мкс. Для устранения паразитной генерации используется внешняя положительная обратная связь, при помощи которой формируется зона гистерезиса.