

# Аналоговые компараторы напряжений

**Устройство и принцип действия.** Компараторами напряжений называют интегральные микросхемы, предназначенные для сравнения двух напряжений и выдачи результата сравнения в логической форме: больше или меньше. По сути дела, компаратор напряжения чувствителен к полярности напряжения, приложенного между его сигнальными входами. Напряжение на выходе будет иметь высокий уровень  $U_{\text{вых}}$  всякий раз, когда разность напряжений между неинвертирующим и

инвертирующим сигнальными входами положительна и, наоборот, когда разностное напряжение отрицательно, то выходное напряжение компаратора соответствует логическому нулю  $U_{\text{вых}}$ . Это правило записывают следующими образом:

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} U_{\text{вых}}^1 & \text{при } U_{\text{вх}+} > U_{\text{вх}-}, \text{ или } \Delta U_{\text{вх}} > 0, \\ U_{\text{вых}}^0 & \text{при } U_{\text{вх}+} < U_{\text{вх}-}, \text{ или } \Delta U_{\text{вх}} < 0. \end{cases} \quad (9.1)$$

Графическая зависимость выходного напряжения от разности входных напряжений приведена на рис. 9.1 а, а условное схематическое обозначение компаратора приведено на рис. 9.1 б. Как видно из обозначения, компаратор напряжения помимо основных сигнальных входов может иметь служебные входы различного назначения: стробирования, балансировки, согласования уровней и др.

Упрощенная структурная схема компаратора напряжения приведена на рис. 9.2. 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 подстроечного резистора и позволяет скорректировать напряжение смещения нулевого уровня в пределах до 1...2 мВ, возникающее в дифференциальном каскаде. С помощью балансировки можно также установить предпочтительное начальное состояние выхода.

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  $\nearrow$  или, наоборот, от высокого уровня к низкому  $\searrow$ . Пример такого обозначения стробирования приведен на рис. 9.1 в.

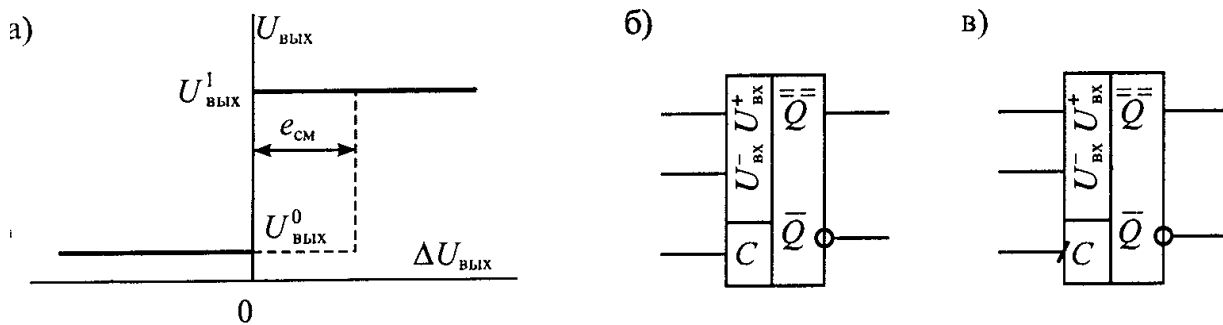


Рис. 9.1. Передаточная характеристика (а) и условное изображение стробируемых компараторов со стробированием по уровню (б) и по фронту (в)

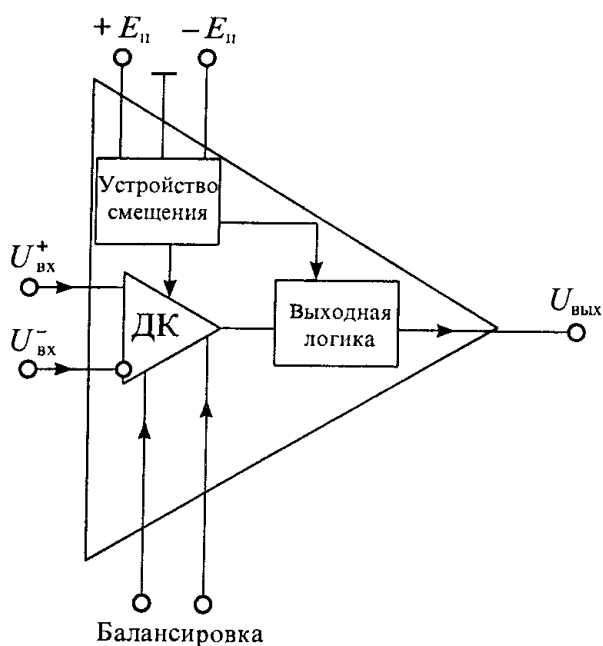


Рис. 9.2. Упрощенная структурная схема компаратора

Поскольку импульс стро́ба приходит одновременно с изменяющимся входным сигналом, то минимальная длительность стро́ба (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.

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

**Характеристики аналоговых компараторов.** Аналоговые компараторы описываются набором параметров, которые нужно учитывать при их использовании. Основные параметры можно разделить на статические и динамические. К статическим 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  $e_{см}$  — определяет смещение передаточной характеристики компаратора относительно идеального положения (см. рис. 9.1 а) (для коррекции этого смещения используют балансировку);
- входные токи  $I_{вх}^+$  и  $I_{вх}^-$  — токи, протекающие через входные выводы компаратора;
- разность входных токов  $\Delta I_{вх} = I_{вх}^+ - I_{вх}^-$  — ток, протекающий через закороченные входы;
- напряжение гистерезиса  $U_r$  — разность входных напряжений, вызывающих срабатывание компаратора при увеличении или уменьшении входного напряжения;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала  $K_{осс}$  — отношение синфазного сигнала  $U_{син}$  к дифференциальному сигналу  $\Delta U_{вх}$ , вызывающему срабатывание компаратора  $K_{осс} = 20 \lg(U_{син}/\Delta U_{вх})$ ;

- входное сопротивление — полное входное сопротивление для малого разностного сигнала;
- выходные логические уровни — значение напряжения  $U_{вых}^1$  и  $U_{вых}^0$ ;
- выходной ток  $I_{вых}$  — ток, отдаваемый компаратором в нагрузку.

Некоторые из перечисленных статических параметров компаратора влияют на его суммарную погрешность. К таким параметрам относятся: напряжение смещения  $e_{см}$  нулевого уровня и его температурный коэффициент  $de_{см}/dT$ , входные токи  $I_{вх}$  и их разность  $\Delta I_{вх}$ , а также напряжение гистерезиса  $U_i$ .

Гистерезис компаратора проявляется в том, что переход из состояния  $U_{вых}^0$  в состояние  $U_{вых}^1$  происходит при входном напряжении  $\Delta U_{вх1}$ , а возвращение из  $U_{вых}^1$  в  $U_{вых}^0$  — при напряжении  $\Delta U_{вх2}$ . Разность  $\Delta U_{вх1} - \Delta U_{вх2} = U_i$  называется напряжением гистерезиса. Напряжение гистерезиса входит в полную погрешность компаратора, если  $\Delta U_{вх}$  изменяет знак. Наличие гистерезиса связано с использованием в компараторе положительной обратной связи, которая позволяет устранить дребезг  $U_{вых}$  при  $\Delta U_{вх} = 0$ . Наличие гистерезиса приводит к появлению зоны неопределенности, внутри которой невозможно установить значение  $\Delta U_{вх}$ .

Основным динамическим параметром компаратора, определяющим его быстроедействие, является время задержки распространения скачкообразного входного сигнала. Иногда это время называют временем переключения компаратора. Это время отсчитывают от момента подачи входного сигнала  $\Delta U_{вх}$  до момента, когда выходной сигнал достигнет уровней  $U_{вых}^1$  или  $U_{вых}^0$ . Время задержки распространения существенно зависит от уровня входного дифференциального сигнала  $\Delta U_{вх}$ . При увеличении напряжения  $\Delta U_{вх}$  время задержки распространения уменьшается. На рис. 9.4 а показаны переходные характеристики компаратора при различных значениях уровня входного сигнала  $\Delta U_{вх} = 2 \dots 20$  мВ. Из приведенного графика следует, что при изменении входного напряжения на порядок время задержки изменяется примерно в 2,5 раза. График зависимости времени задержки распространения от уровня входного сигнала приведен на рис. 9.4 б.

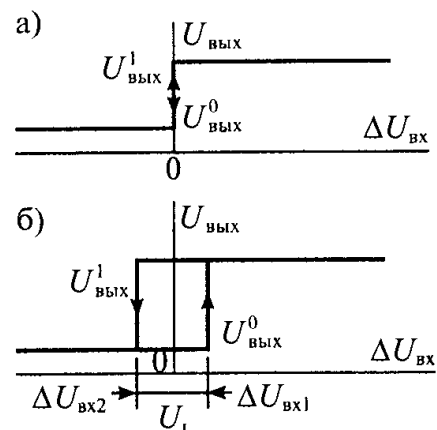


Рис. 9.3. Передаточная характеристика компаратора без гистерезиса (а) и с гистерезисом (б)

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.

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

- общего применения ( $t_{здр} < 300$  нс,  $K_y < 100$  дБ);
- быстродействующие ( $t_{здр} < 30$  нс);

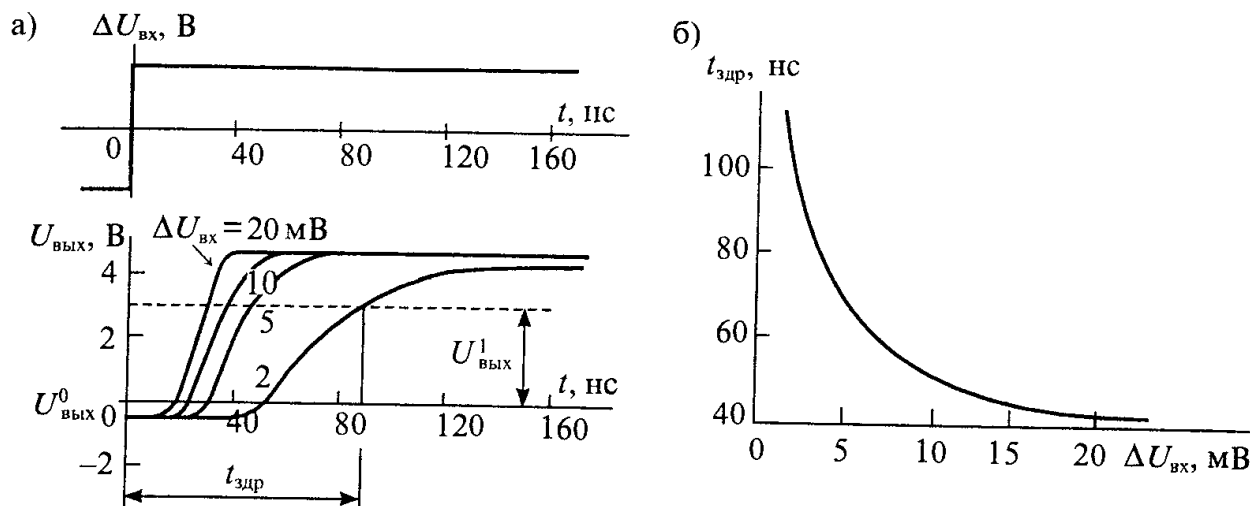


Рис. 9.4. Переходные характеристики компаратора напряжения (а) и зависимость времени задержки распространения от уровня входного сигнала (б)

- прецизионные ( $K_y > 100$  дБ,  $e_{\text{см}} < 3$  мВ,  $\Delta i_{\text{вх}} < 10$  нА).

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

В табл. 9.1 приведены основные параметры двух быстродействующих компараторов со стробированием. Оба компаратора содержат по три дифференциальных каскада, что обеспечивает достаточно высокую пороговую чувствительность. Кроме того, они обладают повышенным быстродействием в режиме непрерывного стробирования.

Компараторы общего применения имеют более скромные характеристики по сравнению с приведенными в табл. 9.1. Однако эти компараторы 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 задержки распространения меньше 3 мкс, ток потребления 2 мА, коэффициент усиления 90 дБ и напряжение смещения нулевого уровня меньше 5 мВ.

Таблица 9.1

## Основные параметры быстродействующих компараторов

Параметр	Тип компаратора	
	КМ597СА1	КМ597СА2
Выходные логические сигналы	ЭСЛ	ТТЛ
Пороговая чувствительность, мВ	0,25	0,25
Напряжение смещения, мВ	2	2
Температурный коэффициент напряжения смещения, мкВ/К	10	10
Входной ток, мкА	10	10
Разность входных токов, мкА	1	1
Коэффициент ослабления синфазного сигнала, дБ	80	80
Время задержки распространения, нс	6,5	12
Время разрешения выборки, нс	3	6
Максимальная частота стробирования, МГц	125	80
Наличие памяти	нет	есть

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. 9.5 а. Значение сопротивления нагрузочного резистора выбирают в пределах 100...1000 Ом. Меньшие сопротивления обеспечивают более высокую скорость переключения.

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. В качестве примера в табл. 9.2 приведены характеристики некоторых типов прецизионных компараторов. Наиболее высокие параметры имеет компаратор СМР-02 фирмы *Precision Monolithics*. Отечественный компаратор К554СА3 немного уступает ему по пороговой чувствительности и напряжению смещения нуля. Быстродействие этих компараторов практически одинаково.

**Применение аналоговых компараторов напряжения.** Основные особенности аналоговых компараторов связаны с отсутствием в них частотной коррекции и

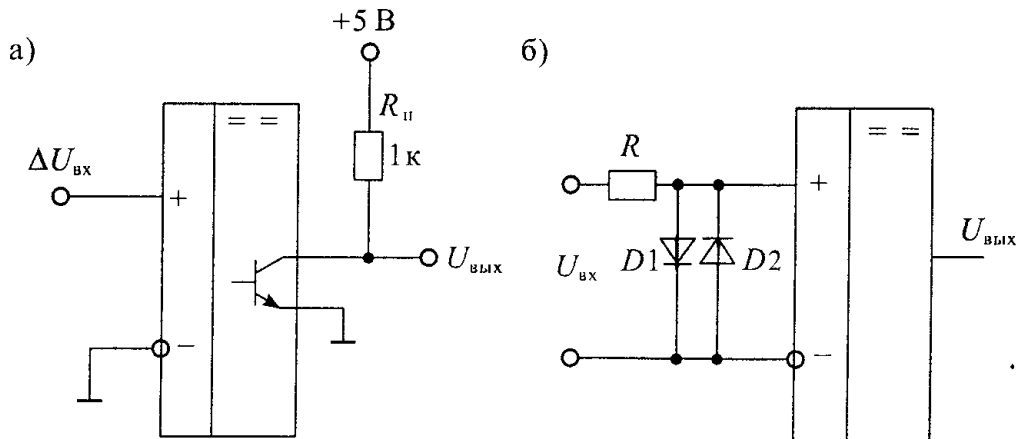


Рис. 9.5 Подключение нагрузки в компараторах с открытым коллекторным выходом (а) и схема диодной защиты компараторов напряжения (б)

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.

Таблица 9.2

**Основные параметры прецизионных компараторов**

Параметр	Тип компаратора	
	СМР-02	K554CA3
Коэффициент усиления	500 000	150 000
Напряжение смещения, мВ	0,8	3
Входной ток, нА	3	10
Время переключения, нс	190	200

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. 9.5 б.

Быстродействие компаратора существенно зависит от уровня входного дифференциального сигнала. С увеличением входного сигнала до определенного значения время переключения 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. 9.5 б, рекомендуется использовать диоды Шотки с малым падением напряжения. Рекомендуемое значение входного напряжения указывается в справочных данных на компаратор и обычно лежит в пределах 20...100 мВ.

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 свыше 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 цифровых и аналоговых сигналов. Простейшим примером такого применения является аналого-цифровой преобразователь параллельного типа, приведенный на рис. 9.6. В нем использованы четыре компаратора  $K1 \dots K4$  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 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. 9.7. В первой схеме (рис. 9.7 а) выход компаратора непосредственно соединен с входом цифровой микросхемы ТТЛ. Такую схему можно использовать при открытом коллекторном выходе в компараторе К.

Во второй схеме (рис. 9.7 б) компаратор К управляет коммутирующим транзистором  $T$ , который в свою очередь управляет цифровой микросхемой ТТЛ. Диод  $D$  в базе транзистора  $T$  выполняет защиту базы транзистора от пробоя отрицательным выходным напряжением компаратора.

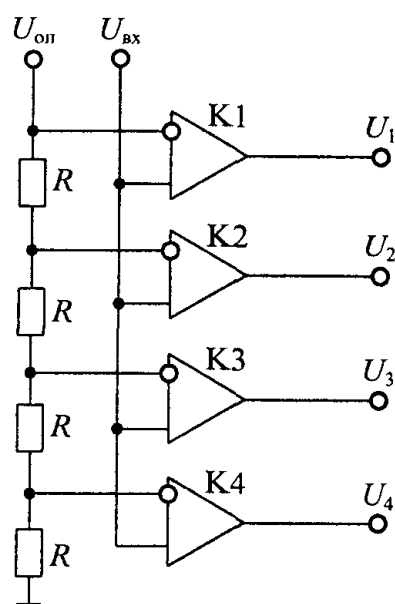


Рис. 9.6. Простейший аналого-цифровой преобразователь на компараторах напряжения

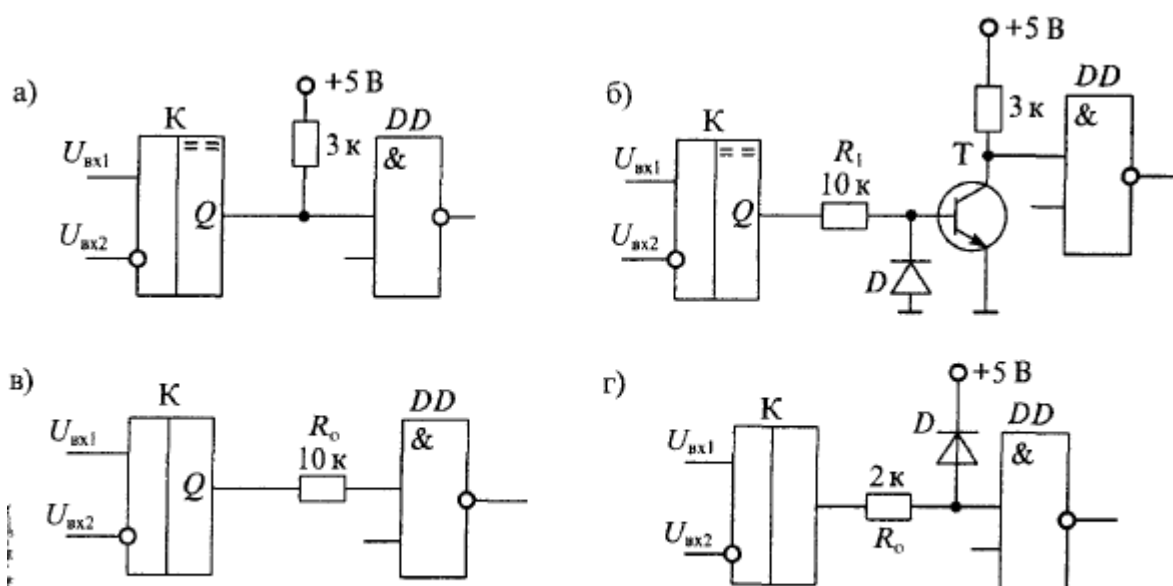


Рис. 9.7. Схемы подключения компараторов напряжения к цифровым микросхемам: с открытым коллектором (а), с коммутирующим транзистором (б), с токоограничивающим резистором (в), с фиксирующим диодом (г)

Третья схема (рис. 9.7 в) показывает подключение цифровой микросхемы к компаратору К через токоограничивающий резистор  $R_o$ . Такую схему лучше применять с цифровыми микросхемами серии КМОП.

И, наконец, в четвертой схеме (рис. 9.7 г) кроме токоограничивающего резистора  $R_o$  имеется фиксирующий диод  $D$ , 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.