

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КОМПАРАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЙ

### 9.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПАРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Компаратор, как следует из его названия, — это сравнивающее устройство. Современные интегральные компараторы напряжений (ИКН) предназначены для сравнения двух напряжений, поступающих на его входы. При этом в зависимости от знака разности напряжений на входах ИКН на выходе устанавливается потенциал, соответствующий либо логической 1, либо логическому 0. Для совмещения ИКН с цифровыми ИМС указанные абсолютные значения выходных потенциалов должны быть равны потенциалам, соответствующим логическим уровням цифровых ИМС.

Заметим, что ИОУ тоже можно использовать для сравнения двух напряжений, и, так как ИОУ обладает достаточно высоким коэффициентом усиления, при незначительной разнице входных напряжений его выходной потенциал будет фиксирован либо на высоком уровне, либо на низком (в зависимости от знака разности входных напряжений). Однако в ИОУ фиксированные уровни выходных потенциалов, определяемые напряжениями источников питания, как правило, не соответствуют логическим уровням цифровых ИМС. Поэтому для совмещения ИОУ с цифровыми ИМС требуется специальное согласующее устройство, преобразующее потенциальные уровни. В отличие от ИОУ в ИКН предусмотрено такое преобразование путем соответствующего выбора схемы включения каскадов и их режима работы.

Структурная схема ИКН совпадает со схемой ИОУ. Она содержит на входе дифференциальный каскад, выполняющий функции сравнивающего устройства. Для повышения чувствительности ИКН за входным дифференциальным каскадом обычно следует промежуточный усилитель с высоким коэффициентом усиления, обеспечивающий формирование перепадов напряжения большой амплитуды при незначительной разности входных напряжений. Чтобы формировать на выходе ИКН потенциалы, соответствующие логическим уровням, иногда требуется ограничение напряжения на выходе промежуточного усилителя на определенном уровне. В этом же усилителе одновременно производится сдвиг потенциального уровня, а также (если ИКН с однотактным выходом) преобразование двухфазного сигнала в однофазный. Основное отличие ИКН от ИОУ

состоит в построении их выходных каскадов. В ИКН выходной каскад работает в ключевом режиме, формируя потенциальные уровни, соответствующие логическим 1 и 0. Задача совмещения ИКН с цифровыми ИМС заметно упрощается при использовании в качестве выходного каскада ИКН простого или сложного инвертора, по структуре совпадающего с соответствующим инвертором цифровой ИМС.

Так как ИКН можно представить как нелинейный усилитель-формирователь, то он прежде всего характеризуется параметрами, свойственными усилителям: коэффициентом усиления по напряжению  $K_u$  при работе в активной области, входным и выходным сопротивлениями. Причем поскольку речь идет о нелинейном усилителе, то его параметры меняются в широких пределах. Так, например, при работе в активной области, границы которой определяются напряжениями переключения ИКН,  $K_u$  составляет несколько тысяч, тогда как в состояниях логической 1 или 0 ИКН практически не реагирует на изменения входного сигнала и тем самым перестает его усиливать. То же самое можно сказать о входном  $R_{вх}$  и выходном  $R_{вых}$  сопротивлениях ИКН. Так, входное сопротивление открытого транзистора существенно меньше входного сопротивления закрытого транзистора.

Точность сравнения входных напряжений определяется следующими параметрами ИКН:

входным напряжением сдвига  $U_{вх.сд}$ , определяемым разностью входных потенциалов, при которой ИКН переключается из одного состояния в другое (аналог  $U_{вх.см}$  для ИОУ);

входным током смещения  $I_{вх.см}$ , определяемым средним значением входных токов и характеризующим разность напряжений на входах ИКН из-за различий сопротивлений  $\Delta R_r$  во входной цепи;

входным током сдвига  $I_{вх.сд}$ , определяемым разностью входных токов и характеризующим разность входных напряжений, которая при одинаковых сопротивлениях  $R_r$  во входной цепи появляется на входах ИКН в результате асимметрии каскада;

коэффициентом влияния нестабильности источника питания  $K_{в.л.п.}$ , определяемым отношением изменений разности входных потенциалов и напряжения источника питания  $\Delta E_{и.п.}$ , вызвавшим изменение разности входных потенциалов.

При измерении параметров, характеризующих точность сравнения напряжений, указывается уровень выходного потенциала, свидетельствующий о переключении ИКН. Например, можно установить уровень переключения, определяемый 10%-ным изменением выходного напряжения (от полного раз-

маха  $\Delta U_{\text{лог}} = U_{\text{вых}}^1 - U_{\text{вых}}^0$ ). Расчет указанных параметров ИКН можно производить по формулам, полученным для соответствующих параметров дифференциального каскада (см. § 3.7). Это вполне оправданный подход, основанный на следующих предположениях. Во-первых, так же как и в ИОУ, точностные параметры ИКН определяются в основном входным дифференциальным каскадом. Во-вторых, так как ИКН обычно обладает большим коэффициентом усиления в зоне переключения, то по достижении разности входных напряжений, соответствующей порогу переключения, можно считать, что ИКН сработал.

Таким образом, разность сравниваемых напряжений, при которой ИКН переключается, определяется соотношением

$$\Delta U_{\text{вх.ср}} = U_{\text{вх.сд}} + 2\Delta R_{\Gamma} I_{\text{вх.см}} + R_{\Gamma} I_{\text{вх.сд}} + \sum_{\Gamma} \Delta E_{\text{и.пл}} K_{\text{вл.и.пл}} \quad (9.1)$$

Эту разность можно уменьшить путем балансировки (центрирования) ИКН, суть которой сводится к изменению режима каскадов усиления (при помощи внешней цепи смещения), обеспечивающего  $\Delta U_{\text{вх.ср}} \approx 0$ .

Дрейф разности сравниваемых напряжений характеризуется изменениями указанных параметров, обусловленными старением элементов, их температурной нестабильностью и дрейфом напряжения источников питания. В частности, температурный дрейф определяется формулой

$$(\Delta U_{\text{вх.ср.др}})_{T} = \Delta T \left( \frac{\partial U_{\text{вх.сд}}}{\partial T} + 2\Delta R_{\Gamma} \frac{\partial I_{\text{вх.см}}}{\partial T} + R_{\Gamma} \frac{\partial I_{\text{вх.сд}}}{\partial T} + \sum_{\Gamma} K_{\text{вл.и.пл}} \frac{\partial E_{\text{и.пл}}}{\partial T} \right) \quad (9.2)$$

Параметрами ИКН являются также уровни выходных потенциалов  $U_{\text{вых}}^1$  и  $U_{\text{вых}}^0$ , соответствующие логическим 1 и 0.

Быстродействие ИКН целесообразно характеризовать теми же динамическими параметрами, что и у цифровых ИМС: временами задержки включения  $t_{\text{зд}}^{1,0}$  и выключения  $t_{\text{зд}}^{0,1}$ ; временами перехода из одного состояния в другое  $t^{1,0}$  и  $t^{0,1}$ ; задержками распространения сигнала  $t_{\text{зд.р}}^{1,0}$  и  $t_{\text{зд.р}}^{0,1}$ . Динамические параметры ИКН существенно зависят от установленного порога срабатывания и разности входных напряжений, при которой ИКН переключается, а также амплитуды входного импульса. Поэтому при их измерении указываются перечисленные величины. Наиболее часто пользуются временами задержки  $t_{\text{зд}}^{1,0}$ ,  $t_{\text{зд}}^{0,1}$ ,  $t_{\text{зд.р}}^{1,0}$ ,  $t_{\text{зд.р}}^{0,1}$ , характеризующими время отклика (срабатывания) ИКН. При измерении времени задержки указываются амплитуда входного импульса и переключающее напряжение, определяемое превышением входного сигнала над порогом срабатыва-

Группа ИКН	Главные отличительные характеристики				Серийно выпускаемые ИКН
	$t_{зд}$ , нс	$K_{И}$ , В/МВ	$I_{вх. см.}$ , мкА	$I_{вх. сд.}$ , мкА	
Общего назначения	30–120	0,5–40	1–80	0,1–3	521CA1, 521CA2 ( $\mu$ A710, $\mu$ A711, MC1514, LM106)
Прецизионные	120–1000	> 40	0,1	0,03	521CA3 (LM111, LF111, MONO-01, MONO-02, $\mu$ A734)
Быстродействующие	< 30	0,5–10	10–60	1–8	521CA4, 597CA1 (LM160, LM161, AM685, $\mu$ A760)

Таблица 9.2. Электрические параметры интегральных компараторов напряжений

Параметры	Интегральные компараторы напряжений							
	общего назначения		прецизионные			быстродействующие		
	521CA2 ( $\mu$ A710)	521CA1 ( $\mu$ A711)	521CA3 (LM111, HA2111)	LF111	LM119 (сдвоен- ный)	521CA4	$\mu$ A760	597CA1
$U_{вх. сд.}$ , мВ	7,5	7,5	3,0	4,0	4,0	10	6,0	5
$I_{вх. сд.}$ , мкА	10	10	$10 \cdot 10^{-3}$	$25 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-3}$	0,1	7,5	3
$I_{вх. см.}$ , мкА	75	75	$100 \cdot 10^{-3}$	$50 \cdot 10^{-6}$	0,50	4	60	10
$K_{И}$ , В/МВ	0,75	0,70	200	200	40	5	—	1
$t_{зд}$ , нс	130	120	200	200	80	16	16	6,5
$U_{ПФ}$ , В	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 30$	$\pm 30$	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 5,0$	$\pm 3,5$
$U_{вых.}^1$ , В	3,2	4,5	—	—	—	3	3,2	-0,8
$U_{вых.}^0$ , В	-0,5	-0,5	—	—	—	0,5	0,25	-1,6
$I_{пот.}$ , мА	9,0	11,5	6,0	3,0	11,5	—	32	22
$I_{пот.}^-$ , мА	8,0	6,5	5,0	5,0	4,5	—	16,0	26
$E_{н. п.}$ , В	+12	+12	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 5$	+4,5	$\pm 6$
	-6	-6				$\pm 15$	$\pm 6,5$	-5,2
$I_{вых.}$ , мА	1,6	0,5	До 50	—	3,2	—	3,2	—
Логика	ТТЛ	ТТЛ	РТЛ, ДТЛ, ТТЛ, МДП	РТЛ, ТТЛ	РТЛ, ДТЛ	ТТЛ, ДТЛ	ТТЛ	ЭСЛ

ния, при котором ИКН срабатывает. При заданном значении опорного напряжения времена задержки уменьшаются с увеличением переключающего напряжения.

Современные ИКН относятся к классу аналого-цифровых элементов и представляют собой универсальные и многофунк-

циональные ИМС, которые находят широкое применение в РЭА. Интегральные компараторы напряжений прежде всего используются в качестве порогового элемента, составляющего основу большого класса электронных устройств: дискриминаторов амплитуды, детекторов уровня, триггера Шмитта, бистабильных индикаторов и т. д.

Сочетание порогового элемента с формирователем потенциальных уровней 1 и 0 в ИКН позволяет использовать их в различного рода преобразователях аналоговых сигналов в цифровые. К числу таких устройств относятся аналого-цифровые преобразователи (АЦП), преобразователи временных интервалов в последовательность импульсных сигналов и т. д.

На основе ИКН строят различного рода генераторы импульсов: прямоугольных, ступенчатых, линейно-изменяющихся. Их используют в качестве нелинейных усилителей-формирователей. С помощью ИКН можно управлять работой ключевых элементов, например ключевого регулятора питания, регулятора температуры и т. д. Сдвоенные ИКН применяются в двухпредельных пороговых детекторах, усилителях считывания сигналов магнитных запоминающих устройств.

Выпускаемые в настоящее время ИКН можно разбить на три основные группы: общего назначения, прецизионные и быстродействующие. В табл. 9.1 представлены отличительные характеристики указанных групп.

Параметры основных типов ИКН приведены в табл. 9.2. В последней строке указаны цифровые ИМС, с которыми можно согласовать ИКН. Время задержки  $t_{зд}$ , указанное в табл. 9.1 и 9.2, измерено при переключении ИКН импульсом амплитудой 100 мВ, превышающим порог срабатывания на 5 мВ (переключающее напряжение). В таблицах  $t_{зд}$  — это наибольшее время задержки из  $t_{зд}^{1,0}$  и  $t_{зд}^{0,1}$ .

## 9.2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КОМПАРАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЙ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Интегральные компараторы напряжений общего назначения применяются в электронных устройствах, к которым не предъявляются какие-либо жесткие требования по точности и быстродействию. Поэтому ИКН общего назначения представляют собой сравнительно простые ИМС с малым числом каскадов, обеспечивающие среднюю точность при относительно невысоком быстродействии.

Одним из первых ИКН общего назначения является ИМС типа 521СА2 (рис. 9.1). Входной дифференциальный каскад построен на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ , в эмиттеры которых подключен источник тока на  $T_9$  со стабилизирующим транзистором

вать токи эмиттеров входных транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ . Блокировку ИКН можно производить путем подачи низкого потенциала  $U_{\text{вых}}^0$  на стробирующий вход. Тогда отпирается транзистор  $T_9$  и образуемый от тока его коллектора перепад напряжения на резисторе  $R_9$  надежно запирает  $T_{11}$ . При этом остается закрытым и ключевой транзистор  $T_{15}$ , поэтому на выходе ИКН устанавливается высокий потенциал независимо от полярности разности сигналов на входах.

В последних разработках прецизионных ИКН стараются использовать во входных цепях полевые транзисторы, позволяющие заметно уменьшить входные токи смещения и сдвига и увеличить входное сопротивление. Так, например, в компараторе LF111, структурная схема которого совпадает со схемой рассмотренного ИКН, входные повторители построены на полевых транзисторах. Благодаря этому удалось уменьшить  $I_{\text{вх.см}}$  и  $I_{\text{вх.сд}}$  до ничтожно малых значений 50 и 25 пА соответственно. Максимальное входное напряжение сдвига составляет 4 мВ.

Недостатком прецизионных ИКН является низкое быстродействие: время задержки у 521СА3 составляет 300 нс, у LF111 около 200 нс. Для повышения быстродействия в современных разработках в качестве ключевых элементов используются диоды и транзисторы Шоттки. Благодаря этому, например, в прецизионных компараторах MONO-01 и MONO-02 удалось уменьшить время задержки до 90 и 160 нс.

#### 9.4. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КОМПАРАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Для повышения быстродействия ИКН прежде всего принимают меры по предотвращению глубокого насыщения транзисторов, работающих в ключевом режиме, и уменьшению паразитных емкостей и сопротивлений, ограничивающих крутизну нарастания сигналов. Приходится отказываться от применения низкочастотных торцевых  $p-n-p$ -транзисторов, а также каскадов преобразования двухфазных сигналов в однофазный, поэтому быстродействующие ИКН, как правило, имеют двухфазные выходы, на которых устанавливаются взаимноинверсные сигналы. Для уменьшения действия проходных емкостей (например, емкости коллектора  $C_K$  при базовом управлении) применяют каскадное включение транзисторов. Следует иметь в виду, что повышение быстродействия непременно связано с увеличением потребляемой мощности, что ограничивает области применения быстродействующих ИКН. Кроме того, они, как правило, уступают прецизионным ИКН по точности сравнения. Поэтому быстродействующие ИКН применяются главным образом

в тех устройствах, для которых основным требованием является малое время задержки.

Характерные особенности быстродействующих ИКН можно иллюстрировать на примере компаратора 521СА4 (рис. 9.4), представляющего собой аналог SE527. В этом компараторе снижение быстродействия, обусловленное насыщением транзисторов, исключено путем применения транзисторов Шоттки в узлах, где возможна их работа в насыщении. На входе компаратора включены повторители напряжения на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ , выходные напряжения которых усиливаются дифференциальным каскадом на транзисторах  $T_3$  и  $T_4$  с источником стабилизированного тока на транзисторе  $T_5$ . Входные каскады развязаны от источника питания  $E_{и.п}$  повторителем напряжения на  $T_6$ , обеспечивающим их стабилизированным напряжением питания  $U_{ст} + U_{бэ}$ . Выходные напряжения дифференциального каскада через повторители напряжения на  $T_7$  и  $T_8$  со стабилитронами  $D_5$  и  $D_4$ , сдвигающими потенциальные уровни, поступают на входы второго дифференциального каскада на транзисторах  $T_{11}$  и  $T_{12}$ , к коллекторам которых подключены ограничители напряжения на  $T_{13}$  и  $T_{14}$ . Последние фиксируют выходной потенциал при запираании транзистора, например,  $T_{11}$  на уровне  $U_{бэ13} + R_{11}I_{б13}$ .

Основы выходных каскадов составляют элементы ТТЛ с многоэмиттерными транзисторами  $T_{18}$  и  $T_{19}$  на входах и выходными сложными инверторами на транзисторах  $T_{21}$ ,  $T_{23}$ ,  $T_{25}$ ,  $T_{27}$ ,  $T_{29}$  (Вых 1) и  $T_{20}$ ,  $T_{22}$ ,  $T_{24}$ ,  $T_{26}$ ,  $T_{28}$  (Вых 2). Использование элементов ТТЛ на выходе существенно упрощает задачу согласования ИКН с цифровыми ИМС.

Многоэмиттерные транзисторы  $T_{18}$  и  $T_{19}$  используют также для блокировки соответствующего выхода ИКН. При подаче низкого потенциала  $U_{вых}^0$  на стробирующий вход отпирается эмиттер  $T_{18}$  или  $T_{19}$  и отключает транзистор  $T_{20}$  или  $T_{21}$ . При этом на блокируемом выходе устанавливается высокий потенциал  $U_{вых}^1$  независимо от разности сигналов на входах ИКН.

Большим быстродействием обладает компаратор 597СА1 (рис. 9.5), предназначенный для работы на микросхеме ЭСЛ (его аналог — АМ685). Максимальное время задержки этого ИКН составляет 7,5 нс, максимальные входные токи  $I_{вх.см} = 10$  мкА и  $I_{вх.сд} = 1$  мкА,  $K_u \approx 2000$ . Для повышения быстродействия в дифференциальных каскадах использовано каскодное включение транзисторов (см.  $T_1 - T_3$ ;  $T_2 - T_4$ ;  $T_{16} - T_{18}$ ;  $T_{15} - T_{17}$ ), в коллекторные цепи включены низкоомные резисторы (так же как в микросхемах ЭСЛ), съём сигналов с выходов дифференциальных каскадов производится при по-

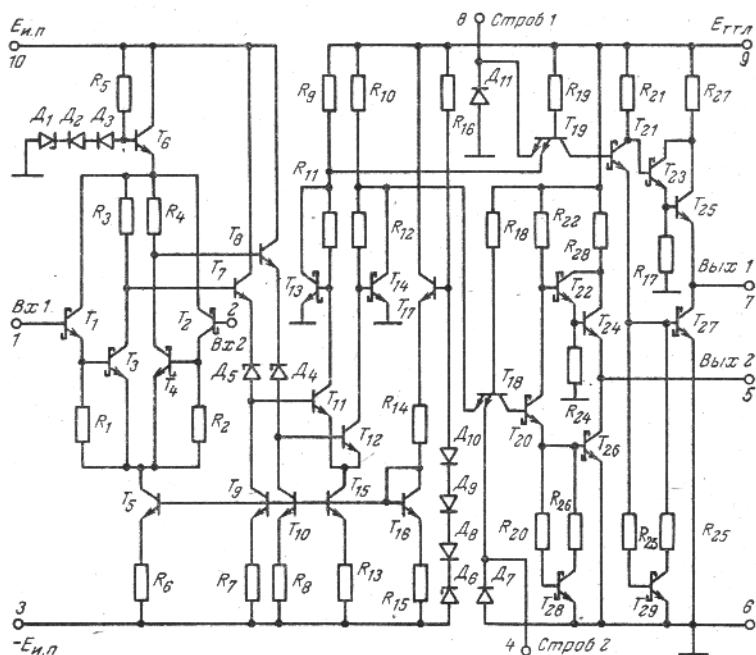


Рис. 9.4. Интегральный компаратор напряжений 521CA4

мощи повторителей напряжения, которые одновременно используются для сдвига потенциальных уровней (см.  $T_{13}$ ,  $T_{14}$ ,  $T_{19}$ ,  $T_{20}$  со сдвигающими стабилитронами  $D_5 - D_8$  в эмиттерах). Для сокращения времени перехода в дифференциальных каскадах применены ограничители амплитуды, построенные на быстродействующих диодах Шоттки (см.  $D_1 - D_4$ ). Выходной каскад представляет собой элемент ЭСЛ на переключателе тока  $T_{21}$  и  $T_{22}$  с выходными повторителями на  $T_{23}$  и  $T_{24}$ .

Для блокировки ИКН используется триггер, построенный на двухступенчатом элементе ЭСЛ (см. § 7.5). Нижняя ступень на переключателе тока на  $T_9 - T_{10}$  управляется сигналом разрешения, поступающим на базу транзистора  $T_9$ . При низком потенциале на базе  $T_9$  он запирается и отключает переключатель тока на транзисторах  $T_7 - T_8$  в верхней ступени, образующих триггер. При этом проводит транзистор  $T_{10}$ , обеспечивающий рабочее состояние второго переключателя тока в верхней ступени на транзисторах  $T_5$  и  $T_6$ . При подаче разрешающего сигнала  $U_{раз} = U_{вых}^1$  транзистор  $T_9$  отпирается и включает триггер, который запоминает состояние ИКН в данный мо-



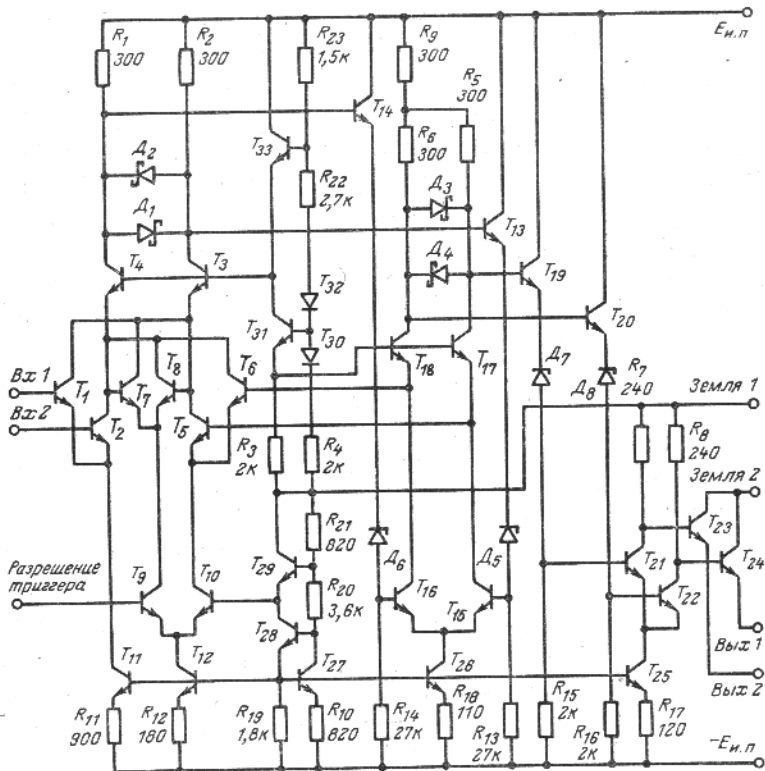


Рис. 9.5. Интегральный компаратор напряжений 597СА1

мент времени. Другими словами, в триггере записывается код, соответствующий взаимноинверсным сигналам на выходах транзисторов  $T_1$ ,  $T_2$ . После включения триггера на выходах ИКН устанавливаются потенциалы, соответствующие сигналам, которые запоминает триггер. Следует отметить, что в то время как в предыдущих ИКН при стробировании на выходе принудительно устанавливается одно фиксированное состояние, не зависящее от разности входных сигналов, в компараторе 597СА1 триггер фиксирует на выходе то состояние, в котором находился ИКН в момент подачи стробирующего сигнала. Таким образом, триггер, встроенный в компаратор 597СА1, выполняет функцию стробирования с хранением кода. Это особенно важно для запоминания коротких входных сигналов для дальнейшей их обработки. Заметим также, что так как триггер

управляется входными транзисторами  $T_1$  и  $T_2$ , то задержка распространения сигнала при записи в триггер достигает минимального значения.

## 9.5. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОМПАРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

Как отмечалось ранее, ИКН используются в различных узлах и блоках РЭА. В этом параграфе рассматриваются наиболее характерные примеры применения ИКН, за исключением импульсных устройств на основе ИКН, которые описываются в п. 10.3.2.

Типовая схема включения ИКН показана на рис. 9.6, а. Опорное напряжение  $U_{оп}$ , определяющее порог срабатывания ИКН

$$U_{пор} = U_{оп} \pm \Delta U_{вх.ср} = \\ = U_{оп} \pm (U_{вх.сд} + 2\Delta R_{г} I_{вх.см} + R_{г} I_{вх.сд} + \sum K_{вл.и.п} \Delta E_{и.п}), \quad (9.3)$$

подается на один вход, а входной сигнал  $U_{вх}$  — на другой. Когда  $U_{вх} = U_{пор}$  и разность входного сигнала и опорного напряжения становится меньше  $\pm \Delta U_{вх.ср}$  [см. (9.3)], ИКН переключается из одного состояния в другое. При этом, если опорное напряжение подано на инвертирующий вход, а входной сигнал на неинвертирующий (рис. 9.6, а), ИКН переходит из состояния логического 0 в состояние логической 1 (рис. 9.6, б и в). Если, наоборот, входной сигнал поступает на инвертирующий вход, а источник опорного напряжения подключен к неинвертирующему входу, то ИКН переходит из состояния логической 1 в состояние логического 0, когда входной сигнал, нарастая, достигает порогового уровня. Путем балансировки компаратора можно установить  $\Delta U_{вх.ср} = 0$  и тем самым обеспечить переброс ИКН при  $U_{пор} \approx U_{оп}$ .

Для защиты входных транзисторов от пробоя рекомендуется шунтировать входные выводы диодами, включенными навстречу друг другу и образующими двусторонний ограничитель амплитуды (по аналогии диодной защиты  $D_1 - D_2$  внутри ИКН в схеме на рис. 9.3). Входные транзисторы могут выходить из строя также при работе от высоковольтного источника входных сигналов с малым внутренним сопротивлением. В подобных случаях целесообразно ограничить максимальную амплитуду входного тока путем включения последовательно со входами ИКН резисторов. Подобного рода защита особенно нужна в устройствах, при включении которых напряжения ис-