

Низкая стабильность характеристик полосовых усилителей, собранных по структурным схемам на рис. 4.24, обусловлена отсутствием общей обратной связи в такой структуре. Стабильность характеристик можно существенно повысить, охватив общей обратной связью каскадную структуру. При этом полосовую характеристику можно получить и при нулевой расстройке резонансных частот каскадов.

Схемы избирательных усилителей на основе интегральных операционных усилителей рассматриваются в § 5.7.4.

## Глава пятая

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

## 5.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В классической электронике операционным усилителем принято называть линейный преобразователь, при помощи которого можно осуществить различные математические операции — суммирование, вычитание, логарифмирование, интегрирование, дифференцирование и др. Это и определило название таких усилителей — операционные (решающие), на основе которых путем введения обратных связей можно производить математические операции. Для повышения точности выполняемых математических операций необходимо построить усилитель так, чтобы он имел следующие основные параметры:

возможно больший коэффициент усиления по напряжению при разомкнутой цепи обратной связи;

высокую стабильность характеристик, в особенности коэффициента усиления;

малое выходное сопротивление и большое входное;

низкий уровень линейных и нелинейных искажений.

Интегральные операционные усилители (ИОУ) представляют собой высококачественные прецизионные усилители, удовлетворяющие указанным требованиям значительно более полно, чем их дискретные аналоги. Причем такие усилители, являясь универсальными и многофункциональными элементами, используются не только (и даже не столько) для выполнения математических операций (т. е. в качестве действительно операционных усилителей), но и для усиления, преобразования, обработки, детектирования и формирования сигналов. Большое число как линейных, так и нелинейных устройств можно построить на основе ИОУ путем соответствующих коммутаций

внешних цепей обратных связей. Поэтому по своему назначению, по характеру применения и использования ИОУ следует отнести к классу аналоговых ИМС универсального назначения. При этом не совсем точное название «операционные усилители» указывает только на то, что это микросхемы, удовлетворяющие требованиям, характерным для классических операционных усилителей.

Интегральные ОУ обычно состоят из входного каскада, каскадов усиления, каскада сдвига потенциального уровня и выходного каскада, образующих усилитель с непосредственными связями между каскадами (как в большинстве аналоговых ИМС). Почти во всех выпускаемых ИОУ на входе включается дифференциальный каскад, применение которого приводит к повышению стабильности выходного потенциала (благодаря низкому уровню дрейфа) и расширению функциональных возможностей усилителя (как результат наличия двух входов: инвертирующего и неинвертирующего).

В ИОУ с низким коэффициентом усиления ограничиваются усилением сигнала входным каскадом, что в большинстве случаев оказывается недостаточным. В более сложных микросхемах для повышения коэффициента усиления применяют дополнительные каскады, представляющие собой дифференциальные каскады с однофазным выходом. К выходу каскадов усиления подключается каскад сдвига потенциального уровня, который обеспечивает установление на выходе усилителя потенциала, равного входному потенциалу (в отсутствие усиливаемого сигнала). Выходной каскад представляет собой усилитель мощности и предназначен для согласования усилителя с нагрузкой.

Для питания ИОУ обычно используют два разнополярных источника, позволяющих получить выходной потенциал, равный нулю, т. е. потенциалу общей шины питания. Потенциал входных зажимов также равен нулю, что облегчает непосредственное соединение отдельных микросхем между собой. Интегральный ОУ допускает подключение внешних цепей обратной связи между различными точками микросхемы, благодаря чему разработчик может обеспечить выполнение самых разнообразных функций при помощи одного и того же ИОУ.

Интегральные ОУ изготавливаются в монолитном и гибридном исполнении. Монолитные ИОУ выполняются как по полупроводниковой, так и по совмещенной технологии.

Операционные усилители характеризуются теми же параметрами, что и обычные усилители.

Одним из основных параметров ИОУ, как и всякого усилителя, является коэффициент усиления парафазных (дифференциальных) сигналов  $K_u$ . Интегральные ОУ обладают достаточ-

но высоким коэффициентом усиления: как правило,  $K_u$  не менее нескольких тысяч. У современных образцов ИОУ коэффициент усиления достигает нескольких миллионов. Интегральные ОУ обладают достаточно высоким входным сопротивлением и низким выходным. Наименьшее значение  $R_{вх}$  составляет десятки килоом, а в усилителях с повышенным входным сопротивлением достигает  $10^{11} - 10^{12}$  Ом. Выходное сопротивление обычно не более десятков и сотен ом.

Интегральные ОУ обеспечивают усиление сигналов в полосе нескольких мегагерц и даже десятков мегагерц. Скорость нарастания выходного напряжения  $V_{U_{вых}}$ , определяемая наибольшей крутизной нарастания фронта или среза выходного сигнала, у быстродействующих усилителей достигает 1000 В/мкс и более.

Для характеристики ИОУ как усилителя постоянных сигналов применяются те же параметры, что и для дифференциальных усилителей (см. § 4.3). Для различных типов ИОУ эти параметры имеют следующие значения: коэффициент ослабления синфазных входных напряжений  $K_{ос.сф} = 60 \div 120$  дБ, коэффициент влияния нестабильности напряжений источников питания  $K_{в.л.и.п} = (5 \div 60)$  мкВ/В; входной ток смещения  $I_{вх.см} = (0,1 \div 100)$  нА; приведенный ток сдвига нуля  $I_{вх.сд} = (0,01 \div 50)$  нА; приведенное ко входу напряжение смещения нуля  $U_{вх.см} = (0,5 \div 10)$  мВ. Последние два параметра дополняются еще графиками их зависимости от температуры, при помощи которых характеризуется температурный дрейф тока сдвига и напряжения смещения.

В справочниках обычно указываются следующие предельно допустимые параметры ИОУ: максимально допустимое напряжение для синфазного и парафазного сигналов; максимально допустимый входной ток; максимально допустимый выходной ток (постоянный и пиковый); максимально и минимально допустимые напряжения питания.

Широкое распространение находят двоярные ИОУ, которые изготавливаются на одном кристалле, благодаря чему имеют почти одинаковые характеристики. Это позволяет решать ряд схемотехнических задач, связанных с уменьшением влияния дрейфа и т. д.

В настоящее время ИОУ достигли высокого совершенства. Дальнейший прогресс в разработке ИОУ идет по пути повышения входного сопротивления, уменьшения смещения нуля, повышения быстродействия, особенно при большом сигнале.

Следует отметить, что в настоящее время разработчики аналоговых ИМС все большее внимание обращают на специализированные микросхемы.

Интегральные ОУ можно разбить на несколько групп. Рассмотрим особенности этих усилителей для каждой группы в отдельности.

## 5.2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Интегральные ОУ общего назначения представляют собой универсальные и многофункциональные усилители, нашедшие наибольшее распространение в радиоэлектронной аппаратуре. Такие усилители применяются в аналоговой технике для выполнения различных математических операций, используются в качестве прецизионных усилителей, повторителей напряжения, логарифмических и антилогарифмических усилителей, компараторов. На их основе можно построить избирательные и полосовые усилители, генераторы синусоидальных сигналов, релаксационные устройства, генераторы сигналов различной формы (прямоугольной, экспоненциальной, линейно-изменяющейся и т. д.), регуляторы и стабилизаторы напряжения, преобразователи напряжения, тока, импедансов, гираторы, детекторы с низким уровнем порога и т. д.

Одним из первых отечественных ИОУ, получивших широкое распространение, является усилитель 140УД1 (1УТ401), схема которого показана на рис. 5.1. Это монолитная полупроводниковая ИМС на кремниевой пластине размером  $1,1 \times 1,1 \text{ мм}^2$ . Входной дифференциальный каскад построен на транзисторах

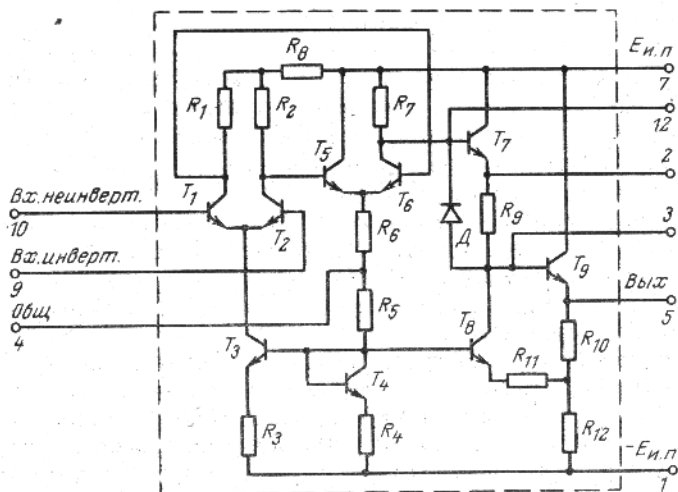


Рис. 5.1. Схема интегрального операционного усилителя 140УД1

$T_1$  и  $T_2$  с диффузионными резисторами в коллекторных цепях  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_8$ . Токи эмиттеров  $I_{e1}$  и  $I_{e2}$  задаются источником стабилизированного тока, построенным на транзисторной структуре  $T_3$  с резистором в эмиттере  $R_3$ . Ток этого транзистора задается и стабилизируется транзистором  $T_4$  в диодном включении с последовательно включенными резисторами  $R_4$  и  $R_5$ . Эта же цепь одновременно используется для задания и стабилизации режима транзисторной структуры  $T_8$ , которая также применяется в качестве источника тока и высокоомного сопротивления в цепи эмиттера повторителя напряжения на  $T_7$ . Выходное напряжение входного каскада усиливается инвертором на  $T_6$ , который совместно с эмиттерным повторителем на  $T_5$  одновременно реализует преобразование двухфазного сигнала в однофазный (см. § 3.7). Сдвиг уровня осуществляется при помощи эмиттерного повторителя на  $T_7$ . Для уменьшения выходного сопротивления ИОУ используется повторитель напряжения на  $T_9$ , который охвачен положительной обратной связью (через  $T_8$ ), для повышения коэффициента усиления в 2,5 раза. Каскад сдвига уровня с выходным повторителем, охваченным положительной обратной связью, был подробно рассмотрен в § 3.3. Зарядная емкость диода  $D$  выполняет функции ускоряющего конденсатора, способствующего уменьшению искажений крутых перепадов.

Усилитель 140УД1 является аналогом  $\mu$  А702, который послужил основой и прототипом для разработки многих подобных ИОУ, выпускаемых различными изготовителями (например, СА3008, СА3010, МС1712).

Типичные параметры ИОУ приведены в табл. 5.1. Усилитель 140УД1 обладает достаточно широкой полосой пропускания при разомкнутой цепи обратной связи. Его можно использовать как усилитель в диапазоне частот до 5 МГц. При охвате усилителя обратной связью для предотвращения самовозбуждения применяются корректирующие RC-цепи, для подключения которых предусмотрен специальный вывод (см. рис. 5.1, вывод 12). При включении неглубокой обратной связи усилитель сохраняет свою широкополосность. Однако при глубокой обратной связи для предотвращения самовозбуждения придется применять корректирующие конденсаторы большой емкости, что приводит к значительному сужению полосы пропускания. При подключении корректирующего конденсатора к выходу ИОУ ухудшается также амплитудная характеристика; уменьшается максимальный размах выходного сигнала. Недостатками 140УД1 являются и малое значение допустимого синфазного сигнала положительной полярности, а также сравни-

тельно небольшой коэффициент усиления ( $K_u = 300 \div 4000$ ) и низкое входное сопротивление ( $R_{вх} \geq 4 \text{ кОм}$ ).

Более высококачественным является ИОУ типа 153УД1; схема которого показана на рис. 5.2. Этот усилитель обладает значительно большим коэффициентом усиления, типичное значение которого  $K_u = 40\,000$  (см. табл. 5.1), более высоким входным сопротивлением  $R_{вх} = 100 \text{ кОм}$  и низким выходным сопротивлением  $R_{вых} = 200 \text{ Ом}$ . Усилитель имеет небольшое напряжение смещения нуля (около  $\pm 5 \text{ мВ}$ ) и ток сдвига нуля ( $0,6 \text{ мкА}$ ), допускает подачу большого входного синфазного сигнала до  $\pm 8 \text{ В}$ . Недостатком усилителя 153УД1 (как и 140УД1) является заметное сужение полосы пропускания при введении общей обратной связи из-за включения корректирующих конденсаторов, необходимых для предотвращения самовозбуждения усилителя.

Усилитель 153УД1, так же как и 140УД1, выполнен по диффузионно-эпитаксиальной технологии на 15 транзисторах и 15 резисторах. В этом усилителе применены торцевые  $p\text{-}n\text{-}p$ -транзисторы  $T_9, T_{13}$  горизонтальной структуры.

Входной дифференциальный каскад на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  работает с малыми эмиттерными токами, благодаря чему удается увеличить входное сопротивление усилителя:

$$R_{вх} \approx 2(r_6 + r_3\beta) \approx 2\varphi T\beta/I_3.$$

Однако из-за глубокой внутренней обратной связи коэффициент усиления этого каскада оказывается небольшим, поэтому приходится применять промежуточный усилитель, представляющий собой дифференциальный каскад на составных транзисторах  $T_3, T_5$  и  $T_4, T_6$ , который наряду с повышением усиления позволяет преобразовать двухфазный выход в однофазный (см. § 3.7). Выход этого каскада подключается ко входу каскада для сдвига уровня, построенного на комплементарных транзисторах  $T_8$  и  $T_9$ , которые включены по каскадной схеме. Сигнал с выхода каскада поступает на выход усилительного каска-

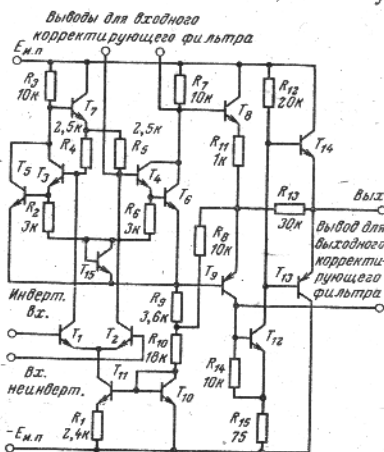


Рис. 5.2. Схема интегрального операционного усилителя 153УД1

Таблица 5.1. Электрические параметры интегральных операционных

Параметр	Операционные					
	Общего назначения					
	140УД1А	140УД1Б	140УД7	153УД1	153УД2	153УД6
$K_{д}$ , В/МВ	0,6–4,5	1,6–11,5	50	20–80	50	50
$K_{ос}$ , сф, дБ	60	60	70	65	70	—
$R_{вх}$ , МОм	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,1	0,3	—
$R_{вых}$ , Ом	700	700	—	200	—	—
$\pm U_{вх.см}$ , мВ	7,5	7,5	4	5	5	2
$I_{вх.см}$ , мКА	6,0	9,0	0,2	0,6	0,5	0,075
$I_{вх.сд}$ , нА	$1,7 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	50	0,25	200	10
$\Delta U_{вх.см}/\Delta T$ , мкВ/°С	20	20	6	30	20	—
$\Delta I_{вх.сд}/\Delta T$ , нА/°С	30	30	0,4	17	2	—
$f_{пр}$ , МГц	5	20	0,8	5	3	—
$V_{U_{вых}}$ , В/мкс	0,2	0,5	10	0,06	0,5	—
$\pm U_{вх}$ , В	1,5	1,5	—	5	12	—
$\pm U_{вых}$ , В	3,0	6,3	11,5	10	11	10
$I_{потр}$ , мА	6	12	2,8	6	3	3
$\pm E_{в.п}$ , В	6,3	12,6	15	15	15	15

<sup>1</sup> I — ИОУ с повышенным входным сопротивлением; II — быстрыей

да на транзисторе  $T_{12}$ . На выходе усилителя используется эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах  $T_{13}$  и  $T_{14}$ , работающих в режиме В. Такой режим работы способствует уменьшению мощности, отбираемой от источников питания. При этом благодаря использованию комплементарной пары транзисторов  $T_{13}$  и  $T_{14}$  выходной каскад обеспечивает передачу сигналов как положительной, так и отрицательной полярности. При появлении в коллекторной цепи  $T_{12}$  сигналов положительной полярности отпирается  $n-p-n$ -транзистор  $T_{14}$  и передает сигнал на выход, а при появлении сигналов отрицательной полярности отпирается  $p-n-p$ -транзистор  $T_{13}$ , также обеспечивая передачу сигнала на выход.

Выходной каскад на транзисторах  $T_{12} - T_{14}$  охвачен глубокой отрицательной обратной связью по напряжению. Сигнал обратной связи, представляющий собой часть выходного напряжения, через делитель  $R_{13} - R_{11}$ , повторитель тока на  $T_9$  поступает на вход усилительного каскада на  $T_{12}$ . Эта обратная связь стабилизирует характеристики выходного каскада; в частности, его коэффициент усиления практически опреде-

Частного применения<sup>1</sup>

I		II		III	IV		
140УД6А	140УД14	140УД8А	544УД1	μА715	140УД10	153УД5А	μА744
70	50	50	50	30	50	10 <sup>3</sup>	45
80	85	90	70	90	80	120	90
2	30	100	100	1	1	1,5	0,25
—	—	—	—	75	—	—	150
5	2	20	15	2	4	1	2
0,03	0,002	2·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>	0,4	0,25	0,1	0,3
10	0,2	0,15	0,05	70	50	20	100
20	3	50	20	600	—	5	—
0,1	—	—	—	—	—	0,5	—
1	1	1	1	65	15	1	—
2,5	0,3	3	1	20	50	0,2	—
11	14	10	10	12	11,5	—	10
12	13	10	10	13	—	10	13
2,8	0,6	5	3,5	5,5	15	3,5	—
15	15	15	15	15	8	10	15

ствующие ИОУ; III — прецизионный ИОУ; IV — радиационно-стойкий ИОУ.

ляется отношением сопротивлений резисторов делителя в цепи обратной связи  $R_{13}$  и  $R_{11}$ .

По своим характеристикам к усилителю 153УД1 близок μА709. В настоящее время этот ИОУ выпускается многими фирмами под различными названиями, как, например, МС1709, ТАА521, LM709, LIC709, MIC709, SN72709, TOA2709.

Дальнейшее усовершенствование ИОУ общего назначения привело к появлению микросхем 153УД2, 153УД6 (рис. 5.3), которые по сравнению с усилителем 153УД1 имеют несколько большее входное сопротивление ( $R_{вх} = 300 \div 800$  кОм), повышенный коэффициент усиления ( $K_u$  от 40 000 до 160 000) при меньших токах потребления ( $I_{пот}$  3 мА) и почти такой же полосе пропускания<sup>1</sup>.

Улучшение характеристик ИОУ второго поколения 153УД2, 153УД6 по сравнению с усилителями первого поколения (к числу которых относятся 140УД1, 153УД1 и аналогичные им

<sup>1</sup> Микросхема 153УД2 (аналог LM101) отличается от 153УД6 схемой задания режима входного каскада и, соответственно, параметрами входной цепи  $I_{вх.см}$ ;  $I_{вх.сд}$ ;  $U_{вх.см}$  (см. табл. 5.1).



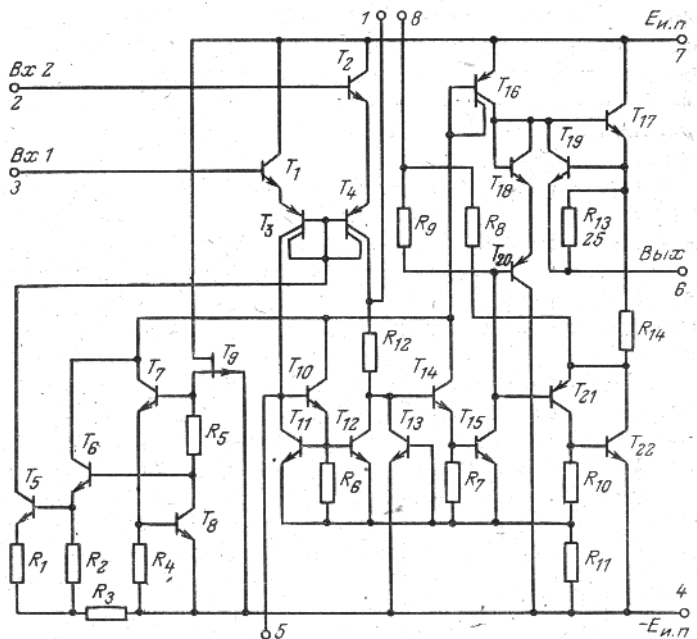


Рис. 5.3. Схема интегрального операционного усилителя 153УД6

ИМС) достигнуто благодаря применению составных транзисторов, повышающих коэффициент передачи тока базы торцевых  $p-n-p$ -транзисторов ( $\beta_{\text{соч}} \approx 100$ ), высокоомных резисторов (в виде пинч-резисторов  $R_2, R_6, R_7, R_{10}$ ) и МДП-структуры на  $T_9$ , также используемой в качестве высокоомного резистора.

На входах усилителей 153УД2, 153УД6 включены эмиттерные повторители на транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ , выходной ток которых поступает на входы токовых повторителей на  $T_3$  и  $T_4$ . В коллекторные цепи повторителей тока включены транзисторные структуры  $T_{11}$  и  $T_{12}$  (совместно с  $T_{10}$ ) вместо высокоомных резисторов. Использование этих структур в качестве активных нагрузок способствует повышению коэффициента усиления (достигающего 2000) при сравнительно низковольтном напряжении питания. Последующие каскады (эмиттерный повторитель на транзисторе  $T_{14}$  и усилитель напряжения на  $T_{15}$ ) тоже обеспечивают достаточно большое усиление сигнала. Выходной каскад на комплементарных транзисторах  $T_{21}, T_{22}$  и  $T_{17}$ , работающих в режиме АВ, осуществляет передачу двупо-

лярных сигналов без заметных нелинейных искажений. В нижнем плече выходного каскада применяется составной транзистор на структурах  $T_{21}$  и  $T_{22}$ , первая из которых представляет собой  $p-n-p$ -транзистор с низким  $\beta$ , а вторая —  $n-p-n$ . Включение  $n-p-n$ -транзистора способствует увеличению коэффициента передачи тока базы составного транзистора.

Транзисторная структура  $T_{16}$  используется в качестве резистора в цепи задания тока коллектора  $T_{18}$ , применяемого как диод для стабилизации режима  $T_{17}$ . Транзистор  $T_{19}$  предохраняет усилитель от перегрузок при передаче сигналов положительной полярности: когда ток нагрузки превышает 25 мА, перепад напряжения на резисторе  $R_{13}$  возрастает до напряжения отпираания транзистора  $T_{19}$ , он отпирается и, отбирая ток базы  $T_{17}$ , ограничивает ток нагрузки. Для защиты от триггерного режима включен транзистор  $T_{13}$ .

В усилителях 153УД2, 153УД6 увеличен также допустимый диапазон изменения напряжения источника питания (от  $\pm 20$  до  $\pm 5$  В) благодаря удачно построенной схеме задания и стабилизации режима транзисторов в усилительных каскадах. Эта схема построена на двух источниках стабилизированного тока (см. транзисторы  $T_5$  и  $T_7$ ), при помощи которых задаются и стабилизируются токи транзисторов  $T_3$ ,  $T_4$  и  $T_{16}$  (у этих транзисторов вторые коллекторы используются в качестве диодов, стабилизирующих токи рабочих коллекторов). В схеме стабилизатора напряжения на транзисторах  $T_6$ ,  $T_8$  и  $T_9$ , питающего цепи смещения источников тока на  $T_5$  и  $T_7$ , применяется полевой транзистор  $T_9$ , проводимость которого меняется с изменением напряжения источников питания. Благодаря этому изменение в широком диапазоне напряжений источников питания не приводит к заметному отклонению режимных токов  $T_3$ ,  $T_4$  и  $T_{16}$  от номинальных значений.

Подобными характеристиками обладают и усилители LM101, LM101A, RM4131,  $\mu$ A741, LM107, которые незначительно отличаются от рассмотренного усилителя как по схемной конфигурации, так и по техническим параметрам.

Интегральные ОУ типов 153УД2, 153УД6 содержат всего два усилительных каскада. Однако благодаря использованию транзисторов в качестве активных коллекторных нагрузок их коэффициент усиления почти в 4 раза больше, чем у 153УД1. Уменьшение числа каскадов, способных заметно изменить фазу сигнала в полосе частот, облегчает решение проблемы коррекции; для предотвращения самовозбуждения обычно требуется всего один конденсатор емкостью 30 пФ, который может быть изготовлен непосредственно в кристалле (что и сделано в ИМС 140УД7,  $\mu$ A741, LM107).