

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 сдвоенные 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

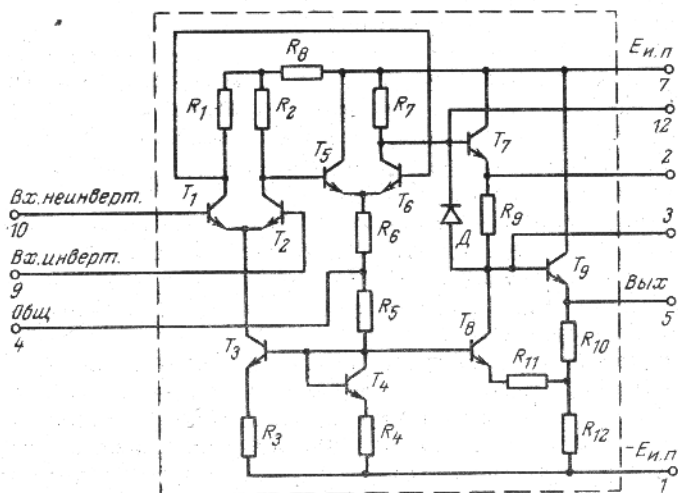


Рис. 5.1. Схема интегрального операционного усилителя 140УД1

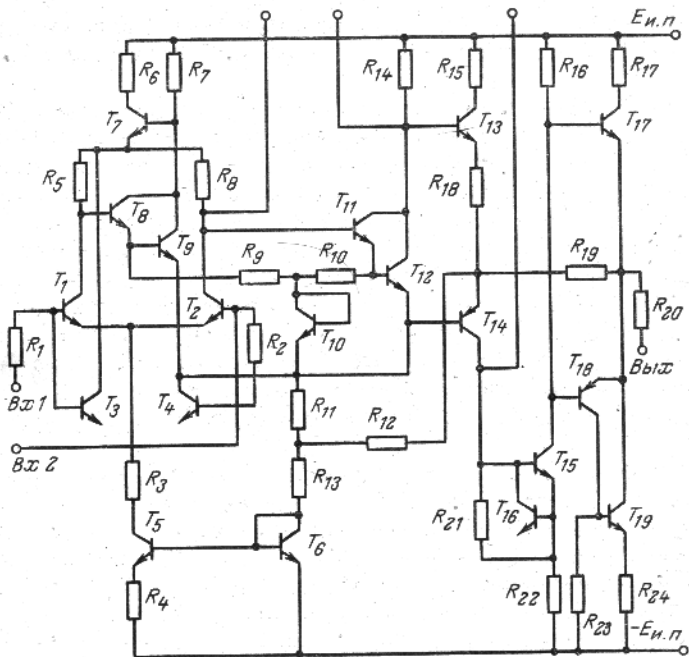


Рис. 5.11. Схема операционного усилителя  $\mu A744$

жду цепями возможных соединений с шинами источников питания. В нормальных условиях усилитель  $\mu A744$  обладает такими же характеристиками, что и усилитель  $\mu A709$ . При воздействии ионизирующего излучения наиболее существенно изменяются коэффициент усиления и входной ток. Усилитель  $\mu A744$  сохраняет работоспособность при воздействии нейтронного потока до  $10^{14}$  н/см<sup>2</sup> и ионизирующей радиации до  $5 \cdot 10^6$  рад/с, восстанавливает свою работоспособность после импульсного воздействия ионизирующей радиации  $5 \cdot 10^{10}$  рад/с. Повышенной радиационной стойкостью обладают также операционные усилители типов  $\mu A735$  и RA909.

## 5.6. МИКРОМОЩНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Микрометрические ИОУ — это усилители с микроваттным потреблением мощности, которое достигается как путем уменьшения тока потребления, так и путем снижения напряжений источников питания. К числу таких ИОУ относится усилитель

типа 140УД12 (рис. 5.12), потребляющий мощность около 150 мкВт при напряжении источников питания  $\pm 3$  В, тока смещения 1,5 мкА и около 5 мВт при напряжении источников питания  $\pm 15$  В, тока смещения 15 мкА (табл. 5.2). При работе в микроощном режиме  $K_u = 50\,000$ ;  $U_{вх.см} = 5$  мВ;  $I_{вх.сл} = 3$  нА;  $I_{вх.см} = 7,5$  нА;  $R_{вх} = 50$  МОм;  $U_{вых} = \pm 2$  В. При увеличении напряжений источников питания до  $\pm 15$  В и тока смещения до 15 мкА коэффициент усиления возрастает вдвое, входное сопротивление уменьшается на порядок, максимальное выходное напряжение достигает  $\pm 10$  В.

На входе усилителя включены каскоды, построенные на повторителях напряжения ( $T_1$  и  $T_2$ ), работающих на повторители тока ( $T_3$  и  $T_4$ ). Нагрузкой каскодных усилителей (наряду с резисторами  $R_1$  и  $R_2$ ) служат транзисторные структуры  $T_5$  и  $T_6$ , которые одновременно производят преобразование двухфазного сигнала в однофазный, поступающий на вход второго каскада. Этот каскад состоит из повторителя напряжения на  $T_{12}$  и усилительного каскада на  $T_{15}$  с динамической нагрузкой на  $T_{16}$ . Третий каскад на  $T_{20}$  с нагрузкой  $T_{17}$  и  $R_3$  раскачивает двухтактный выходной каскад на комплементарных транзисторах  $T_{23}$  и  $T_{24}$ , работающих в режиме АВ. В ИМС предусмотрена внутренняя коррекция с помощью конденсатора  $C = 30$  пФ, обеспечивающая устойчивую работу усилителя при глубокой связи.

Чтобы обеспечить нормальную работу усилителя 140УД12 в широком диапазоне изменения напряжений источников питания (от  $\pm 1,2$  до  $\pm 18$  В), в ИМС предусмотрена регулировка токов смещения с помощью внешнего источника, подключаемого к выводу 8. Источники стабилизированного тока  $T_8$ ,  $T_9$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{14}$  взаимосвязаны через стабилизирующий транзистор

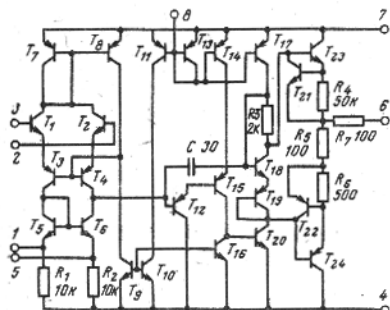


Рис. 5.12. Схема операционного усилителя 140УД12

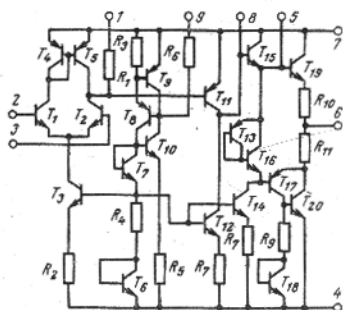


Рис. 5.13. Схема микроощного операционного усилителя 153УД4

Таблица 5.2. Электрические параметры микро мощных ИОУ.

Параметр	140УД12				153УД4
	$E_{и.п} = \pm 3 \text{ В};$ $I_{см} = 1,5 \text{ мкА}$	$E_{и.п} = \pm 3 \text{ В};$ $I_{см} = 15 \text{ мкА}$	$E_{и.п} = \pm 15 \text{ В};$ $I_{см} = 1,5 \text{ мкА}$	$E_{и.п} = \pm 15 \text{ В};$ $I_{см} = 15 \text{ мкА}$	$E_{и.п} = \pm 6 \text{ В}$
$K_u, \text{ В/МВ}$	50	50	200	100	5
$K_{ос, сф}, \text{ дБ}$	70	70	70	70	70
$R_{вх}, \text{ МОм}$	50	5	50	5	0,2
$R_{вых}, \text{ КОм}$	5	1	5	1	—
$\pm U_{вх, см}, \text{ мВ}$	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
$I_{вх, см}, \text{ нА}$	7,5	75	7,5	50	400
$I_{вх, сд}, \text{ нА}$	3	15	3	15	150
$\Delta U_{вх, см} / \Delta T, \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$	3	—	—	—	50
$I_{вх, сд} / \Delta T, \text{ нА/}^\circ\text{С}$	—	—	—	—	3
$V_{U, вых}, \text{ В/мкс}$	0,03	0,035	0,1	0,8	0,1
$\pm U_{вх}, \text{ В}$	1	1	10	10	2
$\pm U_{вых}, \text{ В}$	2	2,1	10	10	4
$I_{пот}, \text{ мкА}$	25	125	30	170	700

$T_{13}$  в диодном включении. При изменении тока коллектора  $T_{13}$  (при помощи внешнего источника, подключенного к выводу 8) изменяются токи смещения, задаваемые источниками на  $T_8, T_9, T_{11}, T_{14}$ . Это приводит к изменению токов базы и коллектора входных транзисторов (через источники тока на  $T_8$  и  $T_9$ ), усилительного каскада на  $T_{15}$  (через  $T_{14}$ ). Это позволяет регулировать основные параметры усилителя:  $K_u, R_{вх}, I_{вх, см}, I_{вх, сд}$ .

Микро мощный операционный усилитель 153УД4, схема которого показана на рис. 5.13, уступает по своим характеристикам усилителю 140УД12, однако является более технологичным (изготавливается по обычной планарной технологии). Входной каскад этого усилителя представляет собой дифференциальный каскад на  $T_1$  и  $T_2$  с активными нагрузками в виде транзисторных структур  $T_4$  и  $T_5$ , которые одновременно обеспечивают преобразование двухфазного сигнала в однофазный. Для сдвига потенциального уровня используется усилительный каскад с повторителем напряжения на транзисторах  $T_{11}, T_{15}$ . Смещение потенциального уровня определяется суммой напряжений на коллекторном переходе  $T_{11}$  и эмиттерном переходе  $T_{15}$ . Выходной каскад построен на комплементарной паре  $T_{19}$  и  $T_{17}$ , работающей в режиме АВ. Вторая половина выходного каскада на торцевом  $p-n-p$ -транзисторе  $T_{17}$  с низким  $\beta$  дополнена  $n-p-n$ -транзистором  $T_{20}$ , который вместе с  $T_{17}$  образует составной транзистор со сравнительно высоким  $\beta_{соч}$ . Транзисторы  $T_4, T_6, T_7, T_{13}, T_{18}$  в диодном включении используются для зада-

ния и стабилизации режима транзисторов  $T_5$ ,  $T_3$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{17}$  и  $T_{19}$ ,  $T_{20}$ .

В этой ИМС тоже предусмотрена регулировка токов при помощи внешнего источника, подключаемого к выводу 9. При этом, изменив ток коллектора  $T_8$ , меняют ток стабилизирующего диода  $T_6$  и соответственно токи эмиттеров входных транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ , задаваемых источником стабилизированного тока на  $T_3$ .

Усилитель 153УД4 также способен работать в широком диапазоне изменений напряжений источников питания. При  $E_{н.п} = \pm 6$  В потребляемый ток составляет 0,7 мА.

## **5.7. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВАХ**

Интегральные ОУ, представляющие собой универсальные и многофункциональные ИМС, с успехом используются в аналоговых устройствах для выполнения различных функций. В этом параграфе кратко рассматриваются особенности аналоговых схем, построенных на основе ИОУ. Так как для реализации различных функций ИОУ его охватывают обратной связью, прежде всего рассмотрим влияние обратных связей на характеристики усилителя.

### **5.7.1. Обратные связи в ИОУ**

Параметры ИОУ можно варьировать при помощи обратных связей, построив на их основе усилители с заданными значениями коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений, времени нарастания фронта выходного импульса и т. д. Так как ИОУ обладают высоким коэффициентом усиления, соответствующим подбором глубины обратной связи можно реализовать аналоговые устройства с параметрами, варьируемыми в широком диапазоне.

Чтобы обеспечить решение проблемы устойчивости, в аналоговых устройствах обычно применяют отрицательную обратную связь, что реализуется путем подачи сигнала обратной связи на инвертирующий вход ИОУ. Однако даже при отрицательной обратной связи (в области средних времен) необходимо принимать специальные меры, чтобы предотвратить самовозбуждение ИОУ в области высших частот. Неустойчивость многокаскадных усилителей в указанной области частот объясняется фазовыми сдвигами сигналов, обусловленными действием паразитных емкостей и инерционностью транзисто-