

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

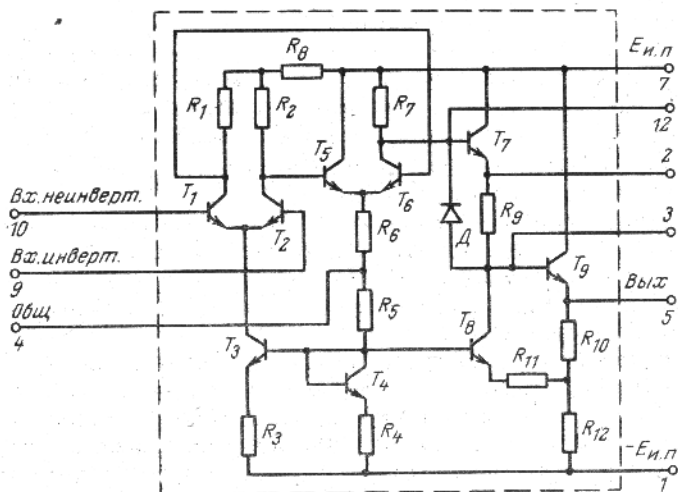


Рис. 5.1. Схема интегрального операционного усилителя 140УД1

сигналов, а второй — низкочастотного спектра. Примером такого ИОУ является усилитель 140УД11 (рис. 5.9) с $f_{\text{пр}} = 15$ МГц и $V_{U_{\text{вых}}} = 50$ В/мкс. В этом ИОУ устойчивая работа высокочастотного канала обеспечивается при помощи конденсаторов $C_1 - C_3$. Высокочастотный сигнал, минуя второй усилительный каскад на низкочастотных $p-n-p$ -транзисторах T_{21} и T_{22} , с коллектора T_4 , через конденсатор C_1 ($C_1 = 6$ пФ) поступает непосредственно на вход предоконечного каскада на T_{30} . При этом второй каскад на T_{21} и T_{22} с динамическими нагрузками T_{24} и T_{26} (дополненным повторителем T_{25} для преобразования двухфазного сигнала в однофазный) предназначен для усиления низкочастотного спектра сигналов. Конденсатор C_3 , шунтируя левое плечо дифференциального каскада на T_3 и T_4 (с динамическими нагрузками T_{11} и T_{12}), ослабляет усиление высокочастотного сигнала транзистором T_3 . Для предотвращения самовозбуждения, свойственного быстродействующим ИОУ, применяется конденсатор $C_2 = 20$ пФ, который обеспечивает внутреннюю коррекцию. При необходимости емкость корректирующего конденсатора можно увеличить путем подключения дополнительного конденсатора к выводам 1 и 8.

Наибольшим быстродействием обладают операционные усилители, изготовленные по гибридной технологии. Быстродействующие ИОУ наиболее часто используются в аналоговых схемах и аналого-цифровых преобразователях.

5.5. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ЧАСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Интегральные ОУ частного применения — это усилители, к которым предъявляются повышенные требования по какому-либо параметру. К числу таких усилителей относятся усилители с повышенным входным сопротивлением, с очень высоким коэффициентом усиления, малозумящие усилители с низким уровнем дрейфа, с повышенной радиационной стойкостью, прецизионные усилители и т. д. Такие усилители изготавливаются как по монолитной, так и по гибридной технологии.

Интегральные ОУ с высоким входным сопротивлением рассматривались в § 5.3. Примером прецизионного ИОУ может послужить микросхема 153УД5 (рис. 5.10), особенностями которой являются малое напряжение смещения ($U_{\text{вх.см}} \leq 1$ мВ) с незначительным дрейфом ($\Delta U_{\text{вх.см}}/\Delta T \leq 5$ мкВ/°С), высокий коэффициент усиления ($K_u \geq 10^6$) и низкий уровень шумов. Высокоточные характеристики обеспечиваются путем соответствующего размещения входных транзисторов T_1 и T_2 , которые расположены крест-накрест и занимают примерно

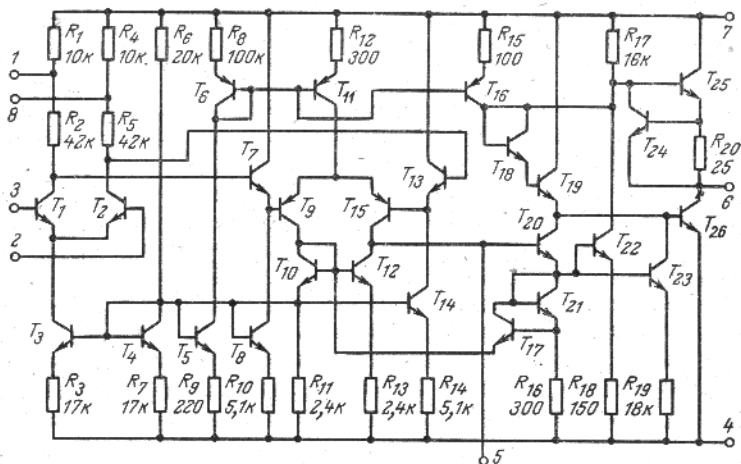


Рис. 5.10. Схема прецизионного операционного усилителя 153УД5

третью часть кристалла, что заметно уменьшает влияние теплового воздействия со стороны мощных выходных транзисторов. Для этой же цели во входном каскаде в качестве коллекторных нагрузок используют резисторы R_1 , R_2 и R_4 , R_5 , а не динамические нагрузки в виде транзисторных структур, включение которых привело бы к увеличению отклонения от нуля выходного напряжения и его дрейфа. Своеобразно построена цепь установки нуля; образующая мостовую схему на резисторах R_1 , R_2 , R_4 и R_5 , что обеспечивает плавную установку нуля (внешний потенциометр включается в диагональ моста). Чтобы ослабить влияние последующих каскадов на входную цепь, напряжение с выхода первого дифференциального каскада снимается через повторители напряжения T_7 и T_{13} . Для получения высокого коэффициента усиления во втором дифференциальном каскаде на T_9 и T_{15} используются динамические нагрузки (T_{10} и T_{12}), при помощи которых одновременно производится преобразование двухфазного сигнала в однофазный. На выходе имеется двухтактный мощный каскад на транзисторах T_{25} и T_{26} , работающих в режиме АВ. Защита ИМС от короткого замыкания на выходе обеспечивается транзисторами T_{23} и T_{24} .

Интегральный ИОУ 153 УД5 применяется в измерительных приборах, где требуются высокая стабильность характеристик, низкий уровень дрейфа и шума. Так как усилитель обладает большим коэффициентом усиления, в большинстве случаев имеется возможность охватить его очень глубокой обратной

связью, стабилизирующей его характеристики. Например, при $K_u = 1000$ за счет обратной связи можно обеспечить $\Delta K_u / K_u \leq \pm 0,3\%$.

Определенный интерес представляют малощумящие ИОУ с низким уровнем дрейфа, к числу которых относятся 153УД5, $\mu A725$, $\mu A739$. У этих усилителей шумовое напряжение, приведенное ко входу, составляет десятые доли милливольт, дрейф напряжения смещения и тока сдвига нуля — соответственно десятые доли микровольта и не более десятков пикоампер на градус. Уменьшение шума и снижение дрейфа достигнуты путем усовершенствования технологии изготовления ИМС, которое позволило существенно снизить уровень дефектов, образуемых в кристалле в процессе технологического цикла, и, соответственно, уменьшить концентрацию поверхностных центров рекомбинации и увеличить объемное время жизни носителей.

При умеренных уровнях радиации можно использовать ИОУ общего назначения. Однако для работы в условиях сильного или длительного воздействия ионизирующего излучения применяются операционные усилители, при разработке которых используются специальные схемотехнические меры и технологические приемы, повышающие радиационную стойкость усилителя. К таким схемотехническим мерам относятся: включение дополнительных диодов для закорачивания фототоков, способных вывести из строя усилитель, включение резисторов в цепи питания с тем, чтобы предотвратить короткое замыкание источников питания, применение мер, обеспечивающих работоспособность ИМС при заметном уменьшении коэффициента передачи тока базы транзисторов и увеличении тепловых токов. К технологическим приемам относятся: использование диэлектрической изоляции между элементами (вместо изоляции *p-n*-переходом, так как изолирующие свойства *p-n*-перехода чувствительны к радиации), применение тонкопленочных резисторов вместо диффузионных¹, улучшение защиты поверхности кристалла.

На рис. 5.11 показана схема операционного усилителя $\mu A744$, выполненного по совмещенной технологии с диэлектрической изоляцией. Электрическая схема этого усилителя в основном повторяет схемную конфигурацию усилителя $\mu A709$ (153УД1), однако отличается от него наличием транзисторов T_3 , T_4 , T_{16} , T_{18} в диодном включении для закорачивания фототоков и включением резисторов R_1 , R_2 , R_3 , R_6 , R_{15} , R_{17} , R_{24} ме-

¹ Диффузионные резисторы, так же как и транзисторы, при высоком уровне ионизации закорачиваются фототоками.

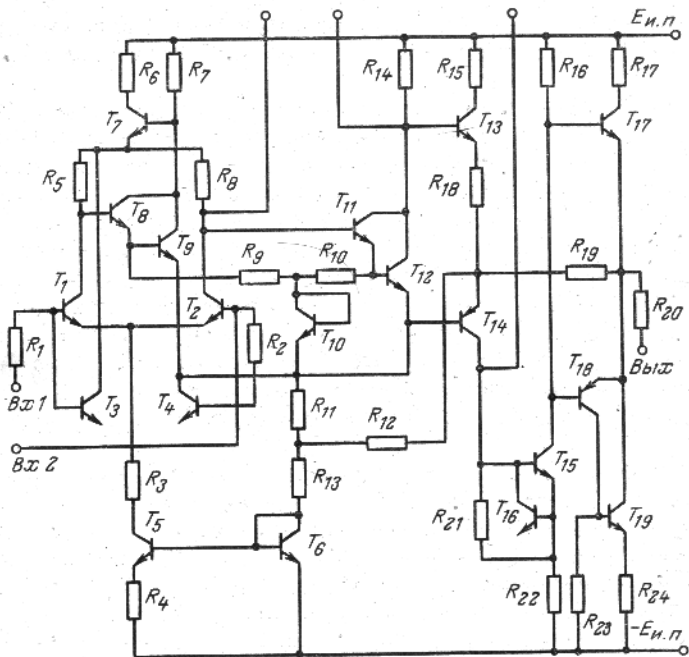


Рис. 5.11. Схема операционного усилителя $\mu A744$

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/см² 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