

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

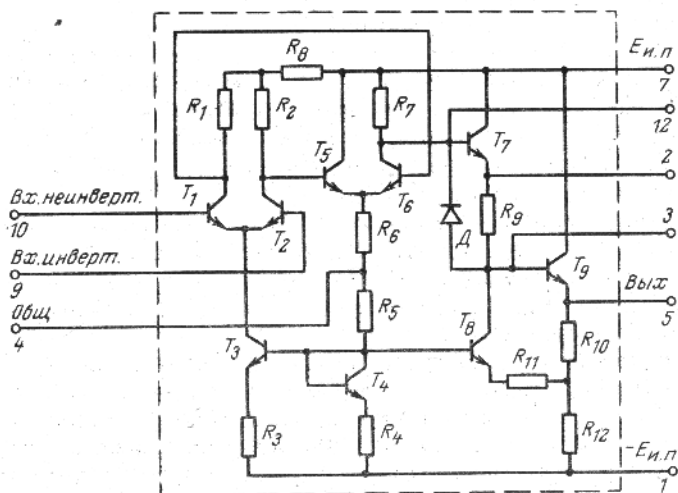


Рис. 5.1. Схема интегрального операционного усилителя 140УД1

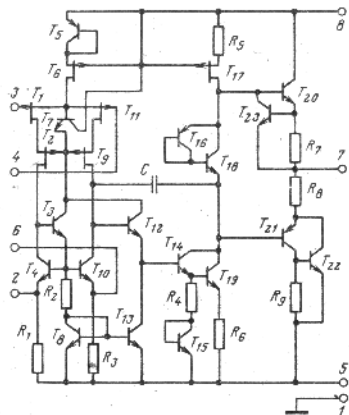


Рис. 5.7. Схема операционного усилителя 140УД8

полевых транзисторах. Для компенсации сдвига в обычных схемах требуется изменить токи стоков так, чтобы выходное напряжение стало равным нулю. В усилителях на полевых транзисторах компенсацию сдвига нуля следует осуществлять за счет изменения токов в последующих каскадах на биполярных транзисторах с тем, чтобы обеспечить режим работы для полевых транзисторов

с минимальным дрейфом нуля.

Однако при фиксации тока стока на определенном уровне резко уменьшается процент выхода годных микросхем, так как из-за имеющего место десятикратного разброса параметров полевых транзисторов (от партии к партии) нарушается нормальный режим работы транзисторов (рабочая точка оказывается близкой либо к нулевому смещению, либо к напряжению отсечки, поэтому ограничивается допустимый размах входных напряжений). Этот недостаток устранен в микросхеме 140УД8 (рис. 5.7) путем включения полевого транзистора T_6 в цепь, задающую ток истоков входных полевых транзисторов T_1 и T_{11} . Такое включение приводит к автоматической регулировке токов стока, так как отклонение параметров (от номинальных значений) полевых транзисторов, формируемых при едином технологическом цикле, оказывается почти одинаковым.

5.4. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Быстродействующие ИОУ также относятся к классу операционных усилителей общего назначения. Однако они отличаются от обычных ИОУ большим потреблением мощности, что иногда может привести к ограничению области их использования. Кроме того, они, как правило, уступают обычным усилителям по эксплуатационным характеристикам. Поэтому быстродействующие ИОУ применяются главным образом в тех случаях, когда обычные усилители типа 140УД1, 153УД1, 153УД2 и др. не удовлетворяют предъявляемым требованиям по своим частотным или переходным характеристикам.

Для повышения быстродействия прежде всего отказываются от использования сравнительно низкочастотных торцевых *p-n-p*-транзисторов в усилительных каскадах. Такие транзисторы применяются только в выходных эмиттерных повторителях для составления комплементарной пары. В усилительных каскадах исключительно применяются высокочастотные *n-p-n*-транзисторы, толщина базы которых составляет всего десятые доли микрона. При такой узкой базе искажения фронта импульса, обусловленные дисперсией времени пролета носителей через область базы, становятся пренебрежимо малыми. Они определяются главным образом рекомбинацией носителей в базе, влиянием емкости коллекторного перехода и паразитных емкостей. Для уменьшения искажений, обусловленных рекомбинацией, в усилительные каскады вводят обратную связь по току путем включения резистора в эмиттер транзистора. При этом паразитная емкость диффузионного резистора играет роль корректирующей емкости, способствующей уменьшению искажений фронта. Для уменьшения искажений, вызываемых действием емкости коллекторного перехода, применяется каскадное включение транзисторов. Благодаря этому ослабляется действие паразитной обратной связи, что приводит к уменьшению эффективного значения емкости коллектора почти в β раз (см. § 3.6). Часто для увеличения коэффициента передачи тока базы каскода в качестве первого транзистора включается составной транзистор.

На рис. 5.8 показана схема быстродействующего усилителя $\mu A715$, который обеспечивает усиление напряжения до частоты 60 МГц. Скорость нарастания при работе усилителя в режиме повторителя с большим сигналом равна 20 В/мкс. Недостатком усилителя является наличие четырех внешних частотно-корректирующих емкостных цепей.

Входной каскад усилителя построен на составных транзисторах T_1 , T_3 и T_2 , T_4 , которые с транзисторами T_{10} и T_{14} образуют каскадное включение с присущими ему достоинствами. В эмиттеры каскодов включены резисторы R_8 и R_9 , с помощью которых каскоды охватываются обратной связью по току, что способствует уменьшению искажений в области малых времен. Хотя сопротивление резисторов R_8 и R_9 небольшое (100 Ом), обратная связь оказывается достаточно глубокой, так как составные транзисторы T_1 , T_3 и T_2 , T_4 обладают высоким коэффициентом усиления по току. При введении глубокой обратной связи по току ухудшается устойчивость усилителя и он часто самовозбуждается даже при разомкнутой петле обратной связи. Поэтому во входных цепях усилителя включены резисторы R_1 и R_2 сопротивлением 400 Ом, способствующие

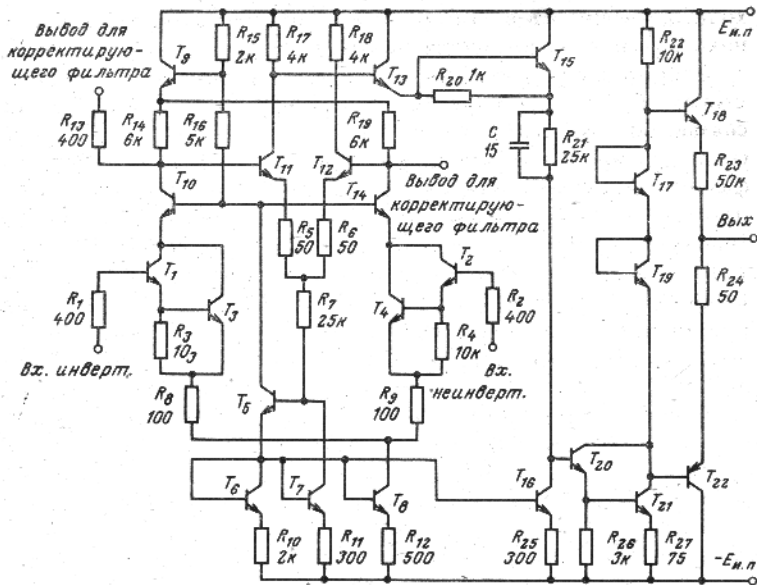


Рис. 5.8. Схема быстродействующего операционного усилителя $\mu A715$

щие повышению степени устойчивости усилителя. С увеличением сопротивлений резисторов R_1 и R_2 вероятность самовозбуждения усилителя уменьшается, однако ухудшается его быстродействие. Для этой же цели включен резистор R_{13} в цепь ввода корректирующего фильтра.

Токи эмиттеров входных транзисторов задаются при помощи источника тока на T_8 с транзистором T_6 в диодном включении. Последний одновременно используется для стабилизации тока источника тока на T_7 и T_{16} , первый из которых питает последующий дифференциальный каскад на T_{11} и T_{12} , а второй включен в каскад сдвига уровня. Для уменьшения изменений потенциалов во входном каскаде при воздействии синфазных сигналов изменение базового потенциала транзисторов T_{10} и T_{14} через транзистор T_5 подается в цепь смещения источника тока T_8 . С увеличением базового потенциала возрастает смещение на T_6 и растет ток транзистора T_8 , соответственно увеличиваются токи эмиттеров, что ограничивает повышение потенциалов на выходах дифференциального каскада. С уменьшением потенциала, наоборот, смещение на T_6 снижается, ток транзистора T_8 уменьшается, что препятствует снижению вы-

ходных потенциалов. Для развязки входного каскада от источника питания используется повторитель на T_9 .

Второй дифференциальный каскад, построенный на транзисторах T_{11} и T_{12} , тоже охвачен корректирующей обратной связью по току через резисторы $R_5 = R_6 = 50$ Ом. Этот же каскад одновременно выполняет функции преобразователя двухфазного выхода в однофазный, который подключается ко входу каскада сдвига уровня. Этот каскад построен на составных транзисторах T_{13} , T_{15} , работающих как эмиттерный повторитель, резистивно-емкостной цепи $R_{21}C$ и источнике тока на T_{16} . Емкость конденсатора ($C = 15$ пФ) выбирается так, чтобы корректировать искажения фронта, обусловленные включением высокоомного резистора $R_{21} = 25$ кОм в цепь передачи сигнала.

Последующий каскад на составном транзисторе T_{20} , T_{21} , охваченный обратной связью с помощью резистора $R_{27} = 75$ Ом, усиливает сигнал и передает на вход выходного повторителя напряжения на комплементарных транзисторах T_{18} и T_{22} , работающих в режиме АВ. Полоса пропускания усилителя $\mu A715$ составляет 2,5 МГц.

В литературе имеется описание и других быстродействующих ИОУ, содержащих два канала усиления, первый из которых предназначен для усиления высокочастотного спектра

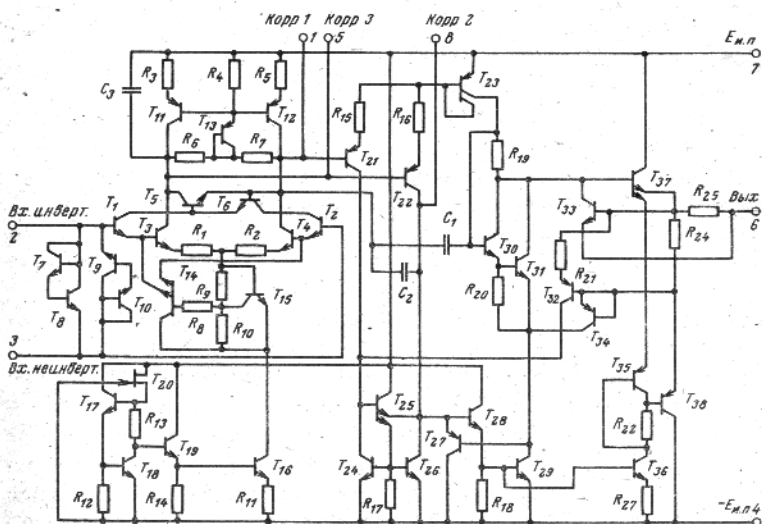


Рис. 5.9. Схема быстродействующего операционного усилителя 140УД11

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