

**Проектирование
усилительных
устройств
на интегральных
микрохемах**

Проектирование усилительных устройств (на интегральных микросхемах)

Под ред. Б. М. Богдановича

*Допущено Министерством высшего и
среднего специального образования
БССР в качестве учебного пособия
по курсовому и дипломному проек-
тированию для студентов радиотех-
нических специальностей вузов*

МИНСК
«ВЫШЭЯШАЯ ШКОЛА»
1980

ББК 32.846 я73

П79

УДК 621.396.6 : 621.382.049.77.001.001.63]:378.244

Рецензенты: кафедра теоретических основ радиотехники Севастопольского приборостроительного института; *В. А. Силаев*, канд. техн. наук, доц. кафедры теоретической электротехники Московского института радиотехники, электроники и автоматики

Борис Михайлович Богданович, Евгений Алексеевич Богатырев, Элеазар Борисович Ваксер, Юрий Александрович Гребенко, Анатолий Иванович Шакирин.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ)

Под ред. Б. М. Богдановича

Редактор Е. В. Сукач. Мл. редактор Т. С. Капелян. Обложка В. М. Диденко. Худож. редактор Ю. С. Сергачев. Техн. редактор Г. М. Романчук. Корректор В. П. Шкредова

ИБ № 902

Сдано в набор 30.01.80. Подписано в печать 25.07.80. АТ 08642. Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 1. Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 13. Уч.-изд. л. 14,02. Изд. № 79—5. Тираж 8000 экз. Зак. 482. Цена 80 к.

Издательство «Вышэйшая школа» Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220048. Минск, Парковая магистраль, 11. Типография «Победа» г. Молодечно, Привокзальный пер., 11.

**Проектирование усилительных устройств (на
П79 интегральных микросхемах):** [Учеб. пособие для
радиотехн. спец. вузов]/ Б. М. Богданович, Е. А.
Богатырев, Э. Б. Ваксер и др.; Под ред. Б. М. Бог-
дановича. — Мн.: Выш. школа, 1980. — 208 с., ил.
В пер.: 80 к.

В пособии отражены тенденции и подходы к схемотехническому проектированию электронных усилителей на интегральных микросхемах. Приведен комплекс оригинальных программ, предназначенных для машинного проектирования с помощью ЕС ЭВМ.

Для дипломного и курсового проектирования студентов, специализирующихся в области радиотехники и связи, а также для широкого круга ИТР, занимающихся проектированием радиоэлектронного оборудования различного назначения.

П 30406—137

М304(05)—80 60—80

2403000000

ББК 32.846 я 73

6Ф2.1

ПРЕДИСЛОВИЕ

В планах развития народного хозяйства СССР микроэлектронике уделено большое внимание. Необходимо обеспечить создание и выпуск новых видов приборов и радиоэлектронной аппаратуры, основанной на широком применении микроэлектроники. Выполнению этой задачи должна способствовать и соответствующая подготовка радиоинженеров.

Цель данного пособия — углубленное освещение новых и сложных вопросов, связанных с микроэлектроникой, а также помощь читателю в освоении методологии проектирования современной радиоэлектронной аппаратуры. В пособии отражены тенденции и подходы к схемотехническому проектированию электронных усилителей на интегральных микросхемах. Основное внимание уделено машинным методам проектирования и особенностям микроэлектроники.

В гл. 1, 2 освещается начальный этап схемотехнического проектирования — эскизное проектирование, к которому относятся: выбор структурной схемы, составление принципиальной схемы и предварительный расчет. Материал, содержащийся в гл. 3—5, посвящен расчетным методам проектирования усилительных интегральных структур на базе современных ЭЦВМ и может быть использован как для проектирования гибридных, так и полупроводниковых микросхем. Приведенные программы являются оригинальными и опробованы в учебном проектировании. Материал этой части пособия изложен так, что предлагаемые программы могут быть легко использованы для проектирования усилительных интегральных структур при наличии современной машинной базы, например ЕС ЭВМ. Для удобства читателей показана процедура составления соответствующих алгоритмов и в ряде случаев дана оценка их эффективности. Универсальность программ позволяет использовать их также при проектировании усилительных интегральных структур на дискретных компонентах.

Книга отражает результаты работы кафедры радиоприемных устройств Минского радиотехнического института. Гл. 1, 2, 5 написаны Б. М. Богдановичем, Э. Б. Ваксером, А. И. Шакириным, гл. 4 — Е. А. Люфко, гл. 3 — сотрудниками кафедры радиоприемных устройств Московского энергетического института Е. А. Богатыревым и Ю. А. Гребенко.

Все отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 220048. Минск, Парковая магистраль, 11, издательство «Вышэйшая школа».

Авторы

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Общие сведения об электронных усилителях в интегральном исполнении	5
1.1. Классификация и основные определения	5
1.2. Параметры микросхем	6
1.3. Системотехническое проектирование	7
1.4. Разработка принципиальной схемы	9
 2. Микросхемы электронных усилителей	 18
2.1. Особенности схемотехники ГМС	18
2.2. Проектирование ГМС	22
2.3. Особенности схемотехники ПМС	24
2.4. Основные типы каскадов и особенности их реализации в ПМС	35
2.5. Типы ПМС ЭУ	43
2.6. Проектирование ПМС	51
 3. Структурный синтез высококачественных усилителей на микросхемах	 56
3.1. Особенности системотехнического проектирования высококачественных усилителей на микросхемах	56
3.2. Анализ усилителей на базе ИНУН	58
3.3. Синтез высокостабильных масштабных преобразователей	62
3.4. Реализация структурной схемы усилителя	69
3.5. Синтез усилителей с контролируемыми частотными характеристиками (синтез линейных преобразователей)	72
 4. Расчет статического режима УИС	 77
4.1. Методы расчета статического режима	77
4.2. Структура программы	82
 5. Анализ частотных и нелинейных свойств УИС	 90
5.1. Обобщенные передаточные характеристики электрической цепи	90
5.2. Получение обобщенных передаточных характеристик	95
5.3. Обобщенные передаточные характеристики типовых усилительных структур	104
5.4. Преобразование систем уравнений нелинейной электрической цепи к виду, удобному для расчетов на ЭЦВМ	114
5.5. Определение обобщенных передаточных характеристик с использованием численных методов решения системы уравнений	118
 Литература	 143
Приложения	147

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электронные усилители (ЭУ) в интегральном исполнении создаются либо в виде одной интегральной микросхемы (МС), либо собираются из отдельных МС.

Основные термины и определения, относящиеся к МС, установлены ГОСТом [11]. Согласно этому ГОСТу, МС — это микронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке или эксплуатации рассматриваются как единое целое.

Для ЭУ используются аналоговые МС, предназначенные для преобразования и обработки сигналов по закону непрерывной функции [11]. Частным случаем аналоговой МС является МС с линейной характеристикой (линейная МС).

Классификация и система обозначений МС устанавливается ГОСТом [13]. Согласно этому ГОСТу, МС классифицируются по функциональному назначению и конструктивно-технологическому исполнению.

Исходя из особенностей проектирования, условно разделим ЭУ в интегральном исполнении (МС ЭУ) на четыре группы: с низким уровнем интеграции (в основном однокаскадные), операционные усилители, усилители звуковых частот и широкополосные.

Усилители с низким уровнем интеграции — по существу функциональные модули [30], используемые при так называемом функционально-узловом методе проектирования. В этом случае от функциональных модулей требуется главным образом универсальность. Операционные усилители (ОУ) — это усилители электрических сигналов, предназначенные для выполнения различных операций над аналоговыми величинами [12]. К усилителям звуковых частот (УЗЧ) относятся усилители низких частот (УНЧ), предназначенные для работы в полосе частот обычно не выше 20 кГц, а к широкополосным усилителям напряжения (ШУН) — усилители с полосой, превышающей 20—50 кГц. ШУН получили распространение в трактах аналоговой обработки для усиления как гармонических, так и импульсных сигналов.

1.2. ПАРАМЕТРЫ МИКРОСХЕМ

Согласно ГОСТу [14], параметр МС — величина, характеризующая свойства или режим работы МС. ГОСТ устанавливает 9 групп параметров МС, имеющих различные размерности: напряжения, тока, мощности, частоты, времени, сопротивления, емкости, относительные параметры и проч.

Для ЭУ обычно используются следующие параметры.

1. Имеющие размерность напряжения: напряжение источника питания $U_{н.п.}$; входное напряжение $U_{вх}$, при этом различают минимальное $U_{вх \min}$ и максимальное $U_{вх \max}$ входное напряжение; выходное напряжение $U_{вых}$, при этом различают минимальное $U_{вых \min}$ и максимальное $U_{вых \max}$ выходное напряжение; выходное напряжение покоя $U_{0 \text{ вых}}$; напряжение смещения $U_{см}$; синфазные входные напряжения $U_{зф. вх}$; приведенное ко входу напряжение шумов $U_{ш. вх}$ и чувствительность S .

2. Имеющие размерность тока: входной ток $I_{вх}$; разность входных токов $\Delta I_{вх}$; выходной ток $I_{вых}$ и ток потребления МС $I_{пот}$.

3. Имеющие размерность мощности: выходная мощность $P_{вых}$; потребляемая мощность $P_{пот}$; рассеиваемая мощность $P_{рас}$.

4. Имеющие размерность частоты: нижняя граничная частота полосы пропускания f_1 ; верхняя граничная частота полосы пропускания $f_в$; полоса пропускания Δf , частота единичного усиления f_1 и частота среза $f_{ср}$.

5. Относительные параметры: коэффициент усиления напряжений $K_{ун}$; коэффициент ослабления синфазных входных напряжений $K_{ос. сф}$; коэффициент влияния нестациональности источников питания $K_{вл. н. п.}$; коэффициент гармоник K_g ; коэффициент неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $K_{нр. АЧХ}$.

6. Имеющие размерность сопротивления: входное сопротивление $R_{вх}$; выходное сопротивление $R_{вых}$.

7. Имеющие размерность емкости: входная емкость $C_{вх}$; выходная емкость $C_{вых}$.

8. Среди прочих параметров: скорость нарастания выходного напряжения $v_{\tau \text{ вых}}$ и фазовый сдвиг φ_c .

Помимо общих параметров, устанавливаемых для всех МС, имеются специфические показатели для усилителей различных классов. В частности, для оценки ОУ приняты [12] наряду с параметрами и такие показатели, как средний температурный дрейф напряжения смещения $dU_{см}/dT$, средний температурный дрейф разности входных токов $d\Delta I_{вх}/dT$, граничная частота $f_{гр}$ и др.

Параметры (и показатели) ОУ можно условно разделить на два вида: определяющие точность (точностные) и определяющие быстродействие. К точностным параметрам отнесем статические ($U_{см}$, $I_{вх}$, $\Delta I_{вх}$, $dU_{см}/dT$, $d\Delta I_{вх}/dT$), а также $R_{вх}$, к определяющим быстродействие — f_1 , $f_{ср}$ и $v_{U \text{ вых}}$. Оба вида параметров ОУ зависят от его структуры, технологии и схемотехнических решений.

Для ориентировочной оценки свойств ОУ вводят так называемый показатель качества (ПК):

$$PK = \frac{v_{U_{\text{вых}}}}{I_{\text{вх}} U_{\text{см}}} \quad (1.1)$$

При этом числитель в выражении (1.1) характеризует быстродействие ОУ, а знаменатель — точность. Для определенной технологии изготовления ОУ ПК имеет постоянное значение.

По ПК можно разделить ОУ на три основные группы:

1) универсальные (общего назначения), изготавливаемые по стандартной технологии (чаще всего это полупроводниковые МС — ПМС), в которых достигается определенный компромисс в отношении точности и быстродействия;

2) высокоточные (прецизионные), в которых приняты специальные меры для улучшения точностных параметров;

3) широкополосные (быстродействующие), в которых приняты специальные меры для повышения быстродействия.

1.3. СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

При проектировании ЭУ в интегральном исполнении возможны два подхода:

1) проектирование ЭУ при наличии уже разработанных МС, когда выбранная серия МС (или МС, выбранные из разных серий) полностью обеспечивает выполнение необходимых функций; такой подход назовем системотехническим;

2) разработка функциональных узлов ЭУ, не содержащихся в существующих сериях МС, или разработка новых МС; такой подход назовем схемотехническим. В этом случае возможны два варианта: разработка гибридных схем и разработка полупроводниковых схем. Соответственно изменяются и этапы проектирования.

Проектирование МС, т. е. схемотехнический подход, существенно отличается от проектирования ЭУ в дискретном исполнении. Эти отличия относятся как к этапам, так и к методам проектирования. Важнейшая особенность проектирования МС заключается в том, что объединяются два процесса, разрозненные для дискретной техники: разработка и изготовление компонентов и разработка и изготовление схем. В связи с этим происходит интеграция трех видов проектирования: схемотехнического, конструкторского и технологического.

Рассмотрим основные этапы проектирования ЭУ при системотехническом подходе.

Первый этап — выбор МС по функциональной схеме ЭУ. Такой выбор может оказаться неоднозначным в связи с разнообразием существующих МС. Поэтому составляют несколько вариантов [22] и, исходя из различных критериев (габаритно-весовых, энергетических, экономических и т. д.), в результате сравнения выбирают оптимальный.

При решении ряда задач аналоговой техники, в частности при использовании ОУ, возникает необходимость в синтезе структурной схемы. Такой синтез производится на первом этапе.

Второй этап — разработка принципиальной схемы ЭУ. На этом этапе решаются две основные задачи электрического расчета: выбор и расчет внешних компонентов, согласование или стыковка выбранных МС.

Необходимость во внешних компонентах связана с особенностями технологии МС, так как не все компоненты могут быть интегрированы [17]. Поэтому некоторые МС выпускаются в незавершенном виде и без внешних компонентов неработоспособны. Кроме того, с помощью внешних компонентов можно осуществить требуемое изменение выходных параметров МС (изменять усиление, глубину ОС и т. д.). Включение таких компонентов предусматривается при проектировании МС.

Согласование МС осуществляется по источникам питания и по импедансам. При необходимости в проектируемое устройство добавляют делители напряжения и развязывающие фильтры. Для согласования по импедансам в качестве согласующих элементов используются эмиттерные повторители.

Дальнейшие этапы проектирования ЭУ на МС при системотехническом подходе практически не отличаются от проектирования ЭУ на дискретных компонентах, роль которых частично выполняют МС: реализуется физическая модель ЭУ (макет); на макете осуществляется требуемая подгонка и вносятся соответствующие коррективы; производится конструктивная разработка и оформление документации.

На этапе разработки принципиальной схемы при электрическом расчете по сравнению с проектированием на дискретных компонентах возникают трудности, связанные с необходимостью иметь соответствующую информацию об электрических параметрах МС, которые выпускаются как готовые изделия электронной промышленности. Требуемая информация обычно содержится в руководящих технических материалах (РТМ) в виде соответствующих рекомендаций разработчиков МС или указывается в справочниках. Обычно указывают только (как и для полупроводниковых приборов) гарантируемые параметры. Если такой информации недостаточно, то имеются два пути: аналитический и экспериментальный. При аналитическом пути, исходя из имеющейся принципиальной электрической схемы МС и данных о номиналах ее элементов, а также параметров транзисторов, указываемых в справочниках, выполняют (как и для дискретных ЭУ) требуемые расчеты. При экспериментальном пути требуемые параметры определяют экспериментально [22].

Для гибридных МС (ГМС) требуемые расчеты могут быть проделаны сравнительно просто в случае МС с малым уровнем интеграции (одно- и двухкаскадных). По мере роста сложности схем при непосредственной связи каскадов и наличии нескольких петель ООС расчеты существенно усложняются. Для ПМС параметры элементов вообще не задаются, либо указываются их ориентировочные значения. Таким образом, в обоих случаях расчеты могут быть выполнены приближенно, с невысокой точностью и обычно

производятся вручную. Но поскольку создается макет, все неточности расчета корректируются при его подгонке. Проектирование такого типа является по существу экспериментальным, т. е. основано на эксперименте. Экспериментальные методы проектирования предполагают построение физической модели. При этом расчеты, производимые вручную, основываются на приближенных вычислениях и дополняются экспериментальной доработкой.

Основные тенденции системотехнического проектирования ЭУ на МС связаны с переходом от МС с низким уровнем интеграции к МС с высоким уровнем интеграции.

1.4. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ

1.4.1. МС с низким уровнем интеграции

Выбор и расчет внешних компонентов — одна из основных задач электрического расчета при системотехническом проектировании — решается по-разному, в зависимости от назначения МС. Рассмотрим некоторые случаи такого расчета.

ГМС или ПМС с низким уровнем интеграции содержит один или два усилительных каскада. В этом случае при заданных номиналах элементов МС электрический расчет включает: расчет на постоянном токе (определение исходных рабочих точек транзисторов); определение малосигнальных параметров транзисторов на переменном токе; расчет малосигнальных параметров ЭУ; выбор и расчет внешних компонентов.

Расчет на постоянном токе может быть выполнен при заданных значениях пассивных элементов МС одним из двух методов: последовательного приближения или обратного решения [32].

В качестве примера применения метода последовательного приближения рассмотрим ГМС — однокаскадный универсальный усилитель К2УС242 (рис. 1.1). Схема усилительного каскада для постоянного тока показана на рис. 1.2. Пусть заданы: напряжения

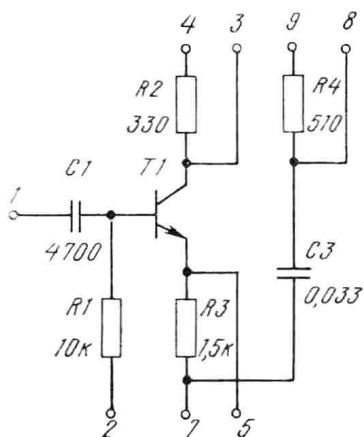


Рис. 1.1

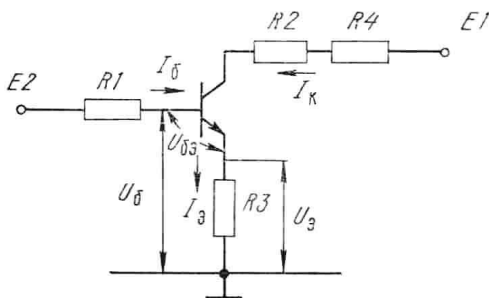


Рис. 1.2

источников питания E_1 и E_2 ; сопротивления всех резисторов МС; коэффициент усиления по току транзистора h_{213} .

Для расчета воспользуемся следующими формулами:

$$U_6 = E_2 - I_6 R_1; \quad (1.2)$$

$$U_3 = U_6 - U_{63}; \quad (1.3)$$

$$U_{63} = 0,0575 \lg(I_3 \cdot 2,5 \cdot 10^{13}); \quad (1.4)$$

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3}; \quad (1.5)$$

$$I_6 = \frac{I_3}{1 + h_{213}}, \quad (1.6)$$

где U_6 — напряжение на базе; I_6 — ток базы; U_3 — напряжение на эмиттере; U_{63} — напряжение между базой и эмиттером; I_3 — ток эмиттера.

Сначала пренебрегаем I_6 и из выражения (1.2) определяем $U_6 = E_2$. Затем принимаем $U_{63} = 0,6$ В и из (1.3) находим U_3 . Далее из соотношения (1.5) определяем приближенное значение I_3 . Затем находим I_6 из формулы (1.6) и с помощью выражений (1.2) — (1.5) определяем уточненное значение I_3 . Вновь находим I_6 из формулы (1.6) и повторяем процедуру до получения удовлетворительного совпадения двух найденных одно за другим значений I_3 .

При использовании для рассматриваемой схемы метода обратного решения порядок расчета следующий: задаемся значением I_3 ; из соотношения (1.5) находим $U_3 = I_3 R_3$; из выражения (1.4) определяем U_{63} ; из соотношения (1.3) находим $U_6 = U_3 + U_{63}$; из формулы (1.6) определяем I_6 ; из выражения (1.2) находим $E_2 = U_6 + I_6 R_1$.

Подобный расчет производится для ряда значений I_3 , и определяются соответствующие значения напряжения питания E_2 . Строится кривая зависимости $E_2(I_3)$, и с ее помощью решается обратная задача: находится величина I_3 , соответствующая заданному напряжению питания.

Для ПМС при использовании диодного смещения с помощью диодно-транзисторной структуры (ДТС) расчет на постоянном токе упрощается. Рассмотрим примеры такого расчета.

Пример 1. Для каскодного усилителя К1УС222 (рис. 1.3, а) по свойствам ДТС ток покоя может быть определен из выражения

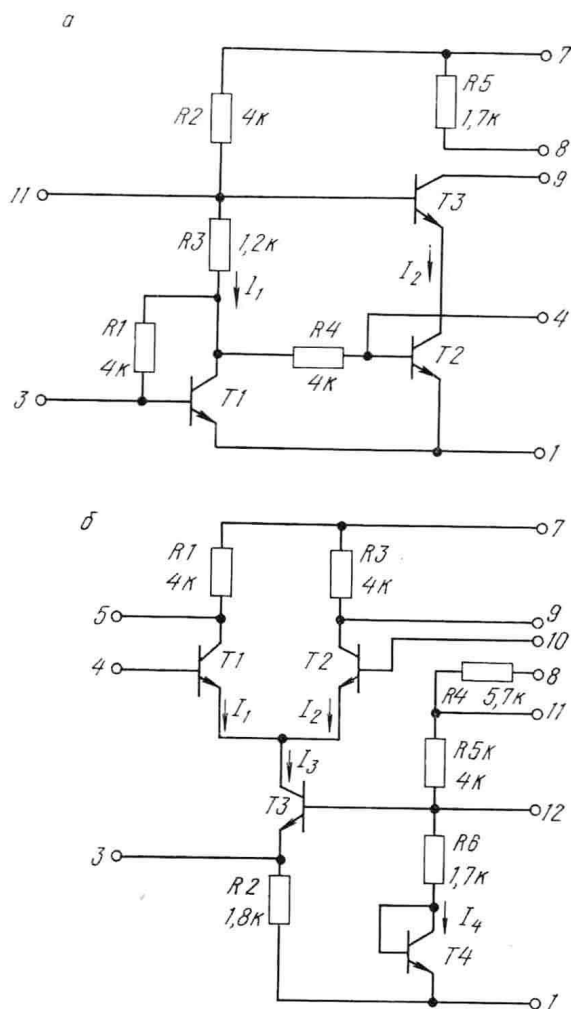
$$I_2 = I_1 = \frac{U_{н.п} - U_{63}}{R_2 + R_3 + \frac{R_1}{h_{213}}};$$

в первом приближении можно пренебречь в знаменателе членов R_1/h_{213} и принять $U_{63} = 0,6$ В.

Пример 2. Для универсального дифференциального усилителя К1УТ221 (рис. 1.3, б) при использовании двухполярного питания $|E_1| = |E_2| = U_{н.п.}$ и заземленном выводе II

$$I_3 = I_4 = \frac{U_{н. п} - U_{бэ}}{R_5 + R_6}.$$

При этом токи покоя дифференциальной пары $I_1 = I_2 = I_3/2$. В первом приближении можно задаться $U_{бэ} = 0,6$ В.



Р и с. 1.3

Определение малосигнальных параметров транзисторов на переменном токе и последующий расчет малосигнальных параметров ЭУ производятся по методике, принятой для дискретных элементов. При этом для определения Y -параметров биполярных транзисторов (БТ), помимо режима покоя, должны быть известны гарантируемые параметры [9, 24].

При использовании в каскадах сложных транзисторных структур сложные транзисторы можно рассматривать как один общий четырехполюсник с результирующими Y -параметрами, которые могут быть определены с помощью матричного метода [29].

1.4.2. МС УЗЧ

Выбор внешних компонентов МС УЗЧ обычно производится согласно РТМ для типовых схем включения. На рис. 1.4—1.6 приведены типовые схемы включения трех МС УЗЧ: гибридной К2УС371 (рис. 1.4) и полупроводниковых К157УС1А (рис. 1.5) и К174УН7 (рис. 1.6). Соответствующие электрические схемы этих ПМС приведены на рис. 1.7 и 1.8.

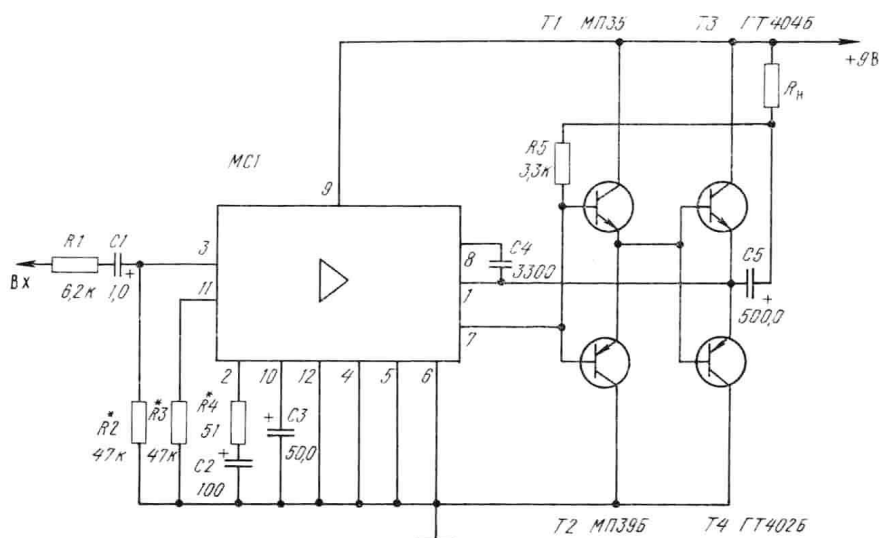


Рис. 1.4

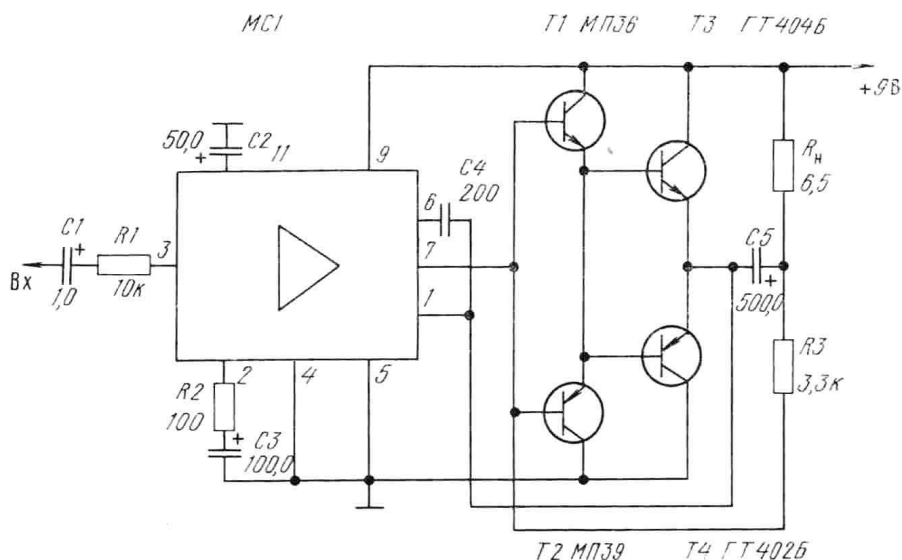


Рис. 1.5

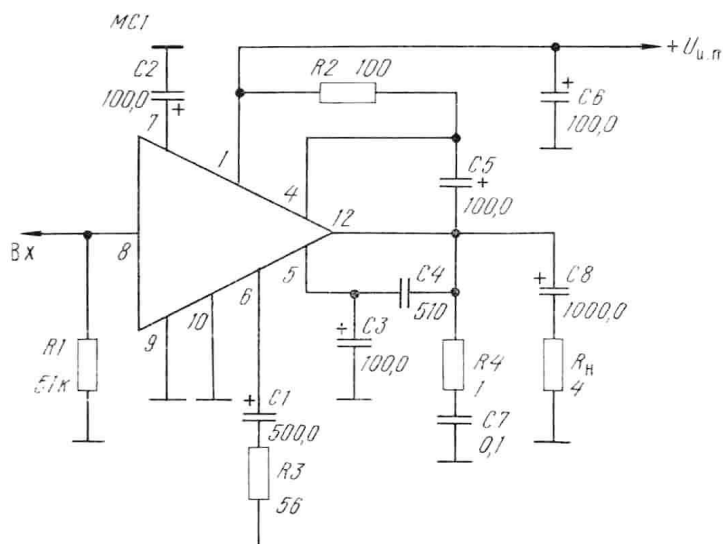


Рис. 1.6

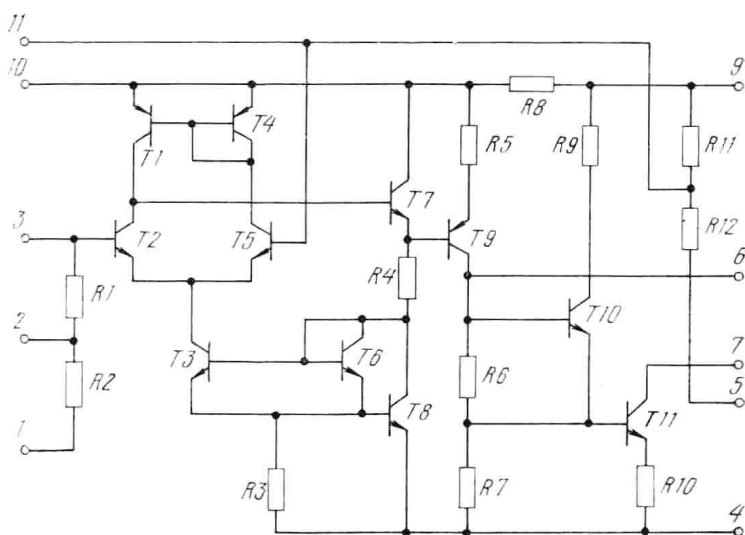


Рис. 1.7

Для ГМС УЗЧ, если указаны номинальные значения элементов (и компонентов) МС, а также основные электрические параметры МС, может быть произведен расчет требуемых внешних компонентов, и в частности расчет элементов цепей обратной связи. Аналогичный расчет произведен, например, для МС К2УС371 [23].

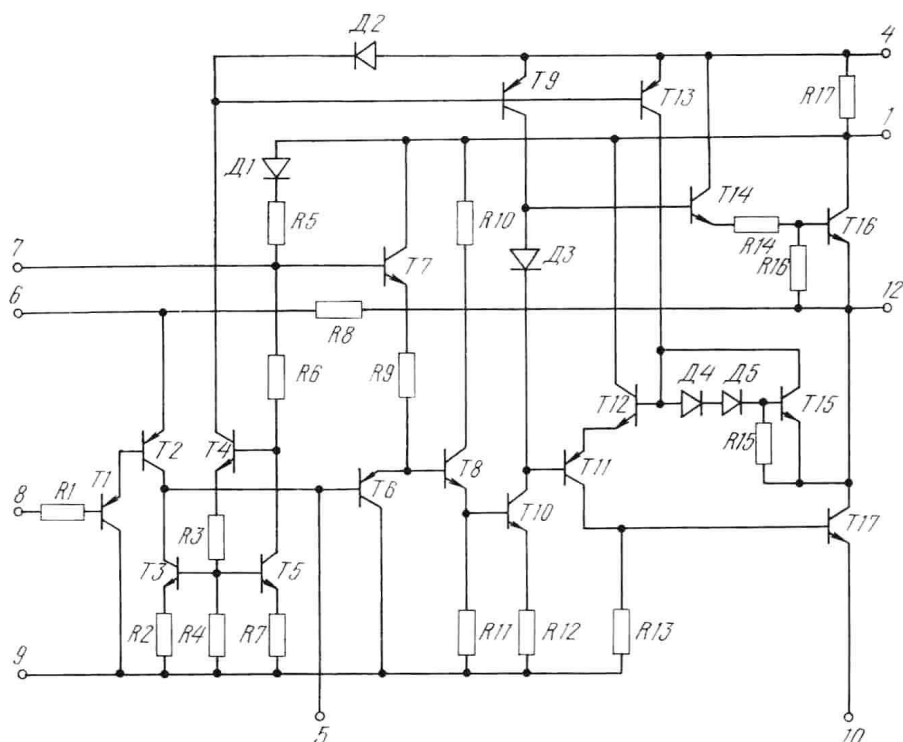


Рис. 1.8

1.4.3. МС ОУ

Универсальные МС ОУ обычно изготавливаются как ПМС. Поэтому для таких ОУ основные схемы включения и соответствующие номинальные значения внешних компонентов приводятся в РТМ. При использовании универсальных ОУ в качестве ЭУ (масштабных усилителей) предусматривается возможность двух основных схем включения: инвертирующей (рис. 1.9, а) и неинвертирующей (рис. 1.9, б).

Приводимые в справочниках параметры ОУ дают возможность произвести электрические расчеты двух видов: расчет элементов цепи внешней ОС и расчет погрешностей, обусловленных неидеальностью параметров ОУ.

Расчет элементов цепи внешней ОС для масштабных усилителей производится, исходя из требуемых значений $K_{u\text{OC}}$ и $R_{x\text{OC}}$. При этом для идеальной инвертирующей схемы (без учета входного и выходного сопротивлений ОУ):

$$K_{u \text{ OC}} = - \frac{R_0}{R_1};$$

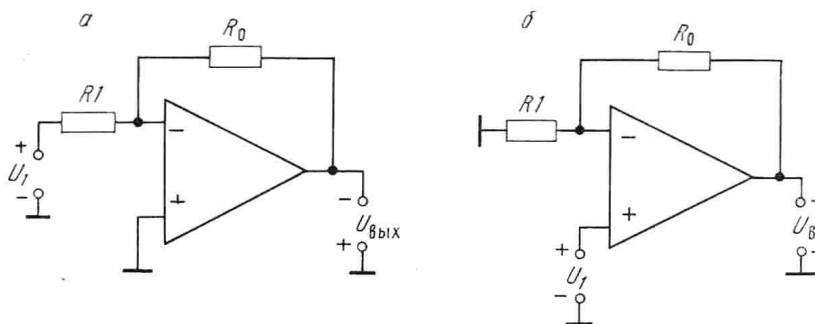
$$R_{\text{BX OC}} = R_1,$$

а для идеальной неинвертирующей схемы:

$$K_{u \text{ OC}} = 1 + \frac{R_0}{R_1};$$

$$R_{\text{BX OC}} = \frac{K_{yu}}{1 + \frac{R_0}{R_1}} R_{\text{BX}},$$

где K_{yu} и R_{BX} — параметры ОУ.



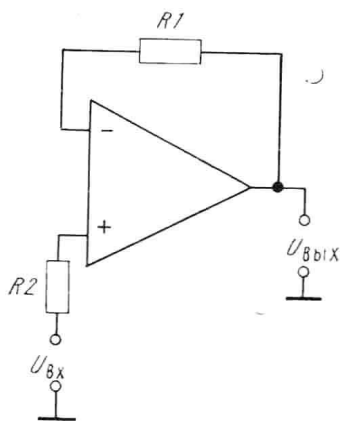
Р и с. 1.9

Расчет погрешностей, обусловленных неидеальностью параметров ОУ, проиллюстрируем на примере неинвертирующего повторителя [34], выполненного по схеме, показанной на рис. 1.10. Для этого примера определим максимальную относительную погрешность для наихудшего случая.

Считаем заданными следующие параметры ОУ: $U_{\text{см}} = 5$ мВ; $\frac{dU_{\text{см}}}{dT} = 6$ мкВ/°С на 1 мВ; $I_{\text{BX}} = 0,5$ мкА; $\Delta I_{\text{BX}} = 0,2$ мкА; $\frac{d\Delta I_{\text{BX}}}{dT} = 2 \cdot 10^{-9}$ /°С; $K_{\text{ос. сф}} = 90$ дБ; $K_{\text{в.т.и.п}} = 150$ мкВ/В; $K_{yu} = 2 \cdot 10^5$.

Погрешность определим для заданных условий: диапазон изменения температуры $\Delta T = 75^\circ\text{C}$, $R_1 = R_2 = R = 100$ кОм (с допуском $\pm 1\%$); $U_{\text{н.п}} = 15$ В (изменяется в пределах $\pm 5\%$); $U_{\text{BX}} = 10$ В.

Расчет погрешности произведем в следующем порядке.



Р и с. 1.10

1. Определяем напряжение смещения на выходе схемы:

$$U_{\text{вых. см}} = U_{\text{см}} \left(1 + \frac{R_0}{R_1}\right) = U_{\text{см}} = 5 \text{ мВ.}$$

2. Находим составляющую погрешности, обусловленную средним температурным дрейфом напряжения смещения:

$$\frac{dU_{\text{см}}}{dT} U_{\text{см}} \Delta T = 6 \cdot 5 \cdot 75 = 2,25 \text{ мВ.}$$

3. Находим составляющую погрешности, обусловленную допуском резисторов:

$$I_{\text{вх}} (R_2 - R_1) = 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^5 = 1 \text{ мВ.}$$

4. Определяем составляющую погрешности, обусловленную разностным входным током:

$$\Delta I_{\text{вх}} \cdot R = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^5 = 20 \text{ мВ.}$$

5. Находим составляющую погрешности, обусловленную средним температурным дрейфом:

$$\frac{d\Delta I_{\text{вх}}}{dT} \Delta T \cdot R = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 75 \cdot 1 \cdot 10^5 = 15 \text{ мВ.}$$

6. Находим составляющую погрешности, обусловленную синфазным входным напряжением:

$$\frac{U_{\text{вх}}}{K_{\text{ос. сф}}} = \frac{10}{3,16 \cdot 10^4} = 0,3 \text{ мВ.}$$

7. Определяем составляющую погрешности, обусловленную влиянием напряжения питания:

$$\Delta U_{\text{п. п}} \cdot U_{\text{п. п}} K_{\text{вкл. п. п}} = 0,05 \cdot 15 \cdot 150 \cdot 10^{-6} = 0,1 \text{ мВ.}$$

8. Находим погрешность коэффициента передачи:

$$\frac{U_{\text{вх}}}{K_{\text{уи}}} = \frac{10}{2 \cdot 10^5} = 0,05 \text{ мВ.}$$

9. Погрешность, обусловленная временным дрейфом, находится экспериментально.

10. Максимальная абсолютная погрешность для наихудшего случая находится как арифметическая сумма всех составляющих погрешностей. Для нашего примера эта погрешность составляет $\Delta U_{\text{вых}} = 44 \text{ мВ.}$

11. Максимальная относительная погрешность

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{44 \cdot 10^{-3}}{10} = 0,44 \%.$$