



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий**

**В. Г. ВАЖЕНИН
Ю. В. МАРКОВ
Л. Л. ЛЕСНАЯ**

АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. Г. Важенин, Ю. В. Марков,
Л. Л. Лесная

АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Под общей редакцией В. Г. Важенина

Рекомендовано методическим советом УрФУ
в качестве **учебного пособия** для студентов,
обучающихся по направлению подготовки
210400 «Радиотехника»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2014

УДК 621.375:621.382 (075.8)

ББК 32.846я73+32.85я73

О-23

Рецензенты:

кафедра общепрофессиональных дисциплин технических специальностей Уральского технического института связи и информатики (зам. завкафедрой доц., канд. техн. наук **Н. В. Будылдина**);

канд. физ.-мат. наук, доц. **В. Б. Костоусов** (начальник отдела Института математики и механики УрО РАН).

Важенин, В. Г.

О-23 Аналоговые устройства на операционных усилителях : учебное пособие / В. Г. Важенин, Ю. В. Марков, Л. Л. Лесная ; под общ. ред. В. Г. Важенина. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 107, [1] с.

ISBN 978-5-7996-1314-3

Представлен материал, необходимый для изучения операционных усилителей: структура, элементы схемотехники, основные характеристики и параметры. Рассмотрены вопросы построения аналоговых устройств на операционных усилителях с резистивной и комплексной обратной связью. Приводятся справочные данные по параметрам отечественных и зарубежных ОУ (прил. 1–4).

Может быть полезно для студентов, обучающихся по специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы», по направлениям «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Конструирование и технология электронных средств».

УДК 621.375:621.382 (075.8)

ББК 32.846я73+32.85я73

ISBN 978-5-7996-1314-3

© Уральский федеральный университет, 2014

Список основных сокращений

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
БТ — биполярный транзистор
ДК — дифференциальный усилительный каскад
ДУ — дифференциальный усилитель
ИС — интегральная схема
ИСН — источник стабильного напряжения
ИСТ — источник стабильного тока
КПД — коэффициент полезного действия
ЛАЧХ — логарифмическая АЧХ
МДМ — модулятор-демодулятор
ОБ — общая база
ОК — общий коллектор
ООС — отрицательная обратная связь
ОС — обратная связь
ОУ — операционный усилитель
ОЭ — общий эмиттер
ПТ — полевой транзистор
УА — усилитель амплитуды
УН — усилитель напряжения
УПТ — усилитель постоянного тока
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ЭП — эмиттерный повторитель

1. Операционные усилители

1.1. Общие сведения об операционных усилителях

1.1.1. Общие вопросы

Согласно ГОСТ 18421–73 *операционный усилитель (ОУ)* — это высококачественный усилитель постоянного тока, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами при работе в схеме с отрицательной обратной связью (ООС). При этом под аналоговой величиной подразумевается непрерывно изменяющееся напряжение или ток.

Приведенное определение относится к устройствам, появившимся в конце 1940-х годов, когда начали моделировать математические операции с помощью ламповых усилителей постоянного тока с отрицательной ОС.

В начале 1960-х годов ОУ стали серийно выпускаться в виде интегральных микросхем (ИС), область их применения к настоящему времени необычайно расширилась. Функциональные возможности ОУ возросли, и, несмотря на то, что они в большинстве случаев не выполняют математических операций, старое название за ними сохранилось.

В настоящее время ОУ — усилитель постоянного тока с полосой пропускания в несколько мегагерц с непосредственной связью между каскадами (т. е. без разделительных конденсаторов), с большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями, а также с низким уровнем шума при хорошей температурной стабильности, способный устойчиво работать при замкнутой цепи ОС.

Входной каскад устройства выполняется в виде дифференциального усилителя, поэтому он имеет два входа и реагирует на разность приложенных к ним напряжений, т. е. на дифференциальный сигнал.

Современный ОУ содержит значительное число компонентов, в частности несколько десятков транзисторов, находящихся в миниатюрном кремниевом кристалле. Все соединения между компонентами осуществляются с помощью литографической техники в процессе производства, что резко снижает вероятность повреждения внутренних соединений по сравнению с выполненными пайкой.

По габаритным размерам и стоимости ОУ мало отличаются от отдельно взятого транзистора. Реализация различных устройств с применением ОУ значительно проще, чем на отдельных транзисторах, одновременно получается выигрыш в габаритных размерах и массе. Благодаря своим многосторонним возможностям ОУ вытесняет устройства на дискретных транзисторах и становится базовым (унифицированным) узлом в аналоговой схемотехнике.

1.1.2. Классификация ОУ

Технология производства ОУ (как и вообще ИС) делится на *полупроводниковую* (монокристалльную) и *гибридную*. Большинство ОУ изготавливается по полупроводниковой технологии, при которой все активные и пассивные компоненты схемы нескольких сотен усилителей выполняются на одной кремниевой пластине с помощью литографической техники с последующим делением тиража на отдельные кристаллы (чипы).

При гибридной технологии все резисторы и соединения изготавливаются на керамической подложке, затем на ней же монтируются бескорпусные биполярные или полевые транзисторы. Здесь могут размещаться конденсаторы и другие компоненты (диоды, стабилитроны и др.). Полученная таким образом композиция заключается в корпус с выводами. Эта технология используется для производства схем специального назначения, которые не удается реализовать в монокристалльной форме.

По схемотехническому исполнению ОУ подразделяются на устройства прямого усиления и с преобразованием спектра частот усиливаемого сигнала, основанного на преобразовании медленно изменяющегося напряжения в переменное напряжение определенной (основной) частоты с помощью прерывания сигнала.

По использованию ОУ подразделяются на усилители общего и специального применения. ОУ общего применения изготавливаются исключительно по полупроводниковой технологии, имеют типовые основные параметры и характеристики, широкий диапазон напряжения питания, защищенные от перегрузки вход и выход, небольшое число навесных (т. е. внешних) компонентов, иногда отсутствующих. Операционные усилители специального применения обычно превосходят первый вид по какому-либо параметру.

1.1.3. Система обозначений ОУ

Наименование ИС начинается с номера серии, причем первая цифра характеризует ее конструктивно-технологическую особенность. Цифры 1, 5, 7 обозначают, что ИС полупроводниковая (7 присвоена бескорпусным по-

лупроводниковым ИС), а 2, 4, 6, 8 — гибридная. Другие две (или три) цифры — порядковый номер разработки серии. О функции, которую выполняет ИС, судят по двухбуквенному шифру, стоящему после номера серии. Затем указывается порядковый номер ИС в данной серии. В конце условного обозначения типа ИС может быть буквенный индекс, характеризующий разброс параметров ИС данного типа по численному значению одного или нескольких параметров. Перед наименованием ИС, предназначенных для бытовой и промышленной аппаратуры, ставится буква К.

Пример условного обозначения интегрального ОУ приведена на рис. 1.1. По двухбуквенному шифру (УД) заключаем, что перед нами ОУ. Цифры свидетельствуют о том, что ОУ полупроводниковый серии 153 с номером разработки в данной серии 1. Буква в конце условного обозначения предупреждает о различиях в численных значениях, по меньшей мере, одного из параметров ОУ данного типа. Однако информации о том, каков это параметр, в указанном индексе не содержится. Лишь по справочным данным можно узнать, например, что ОУ 153УД1 и 153УД1 А различаются значением коэффициента усиления.

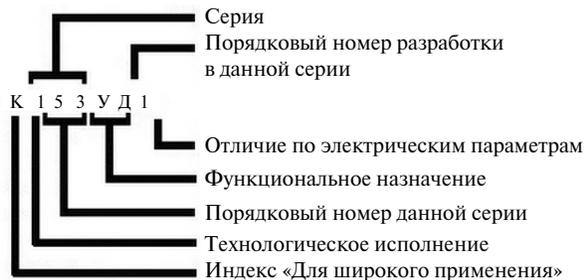


Рис. 1.1. Пример условного обозначения ОУ

Микросхемам, различающимся только конструктивным исполнением, присваивают, как правило, единое цифровое обозначение серии. Для характеристики материала и типа корпуса перед цифровым обозначением серии могут быть добавлены следующие буквы: А — для пластмассового планарного корпуса; Е — для металлополимерного корпуса второго типа; И — для стеклокерамического планарного корпуса; Р — для пластмассового и стеклокерамического корпуса второго типа.

1.1.4. Условные графические обозначения ОУ

Согласно ГОСТ 2.759–82 (СТ СЭВ 3336–81) обозначения элементов аналоговой техники, к числу которых относится и ОУ, выполняют на основе прямоугольника. Он может содержать основное и одно или

два дополнительных поля, расположенных по обе стороны от основного (рис. 1.2, *a*).

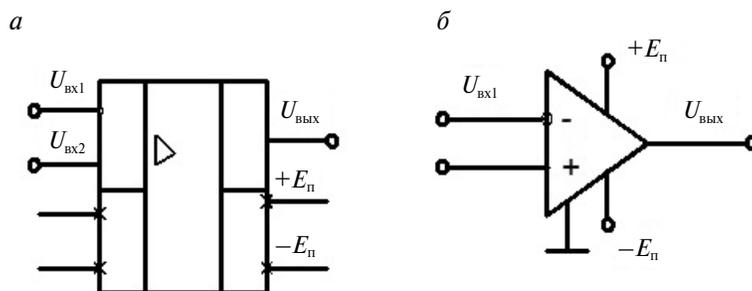


Рис. 1.2. Условное графическое изображение ОУ на схемах:

a — обозначение ОУ согласно ГОСТ 2.759–82;

б — обозначение ОУ, широко распространенное в технической литературе

На схемах усилитель обозначается треугольником на основном поле. Справа от него указывают коэффициент усиления. Если конкретное значение коэффициента усиления несущественно, его допускается не указывать (можно также вписать знак бесконечности ∞).

Выводы ОУ делятся на входные, выходные и выводы, не несущие функциональной нагрузки, к которым подключаются цепи напряжения питания и элементы, обеспечивающие нормальную работу ОУ. Входы показывают слева, выходы — справа.

Большинство ОУ имеют один несимметричный выход и два входа, симметричных по отношению к общему проводу. Прямые входы и выходы обозначают линиями, присоединяемыми к контуру графического изображения ОУ без каких-либо знаков, а с кружками в месте присоединения — инверсные входы и выходы. Прямой вход еще называют неинвертирующим, так как фаза выходного сигнала совпадает с фазой сигнала, поданного на этот вход. Другой вход называют инвертирующим, так как фаза выходного сигнала сдвинута на 180° относительно входного сигнала. Поэтому входы оказывают на выходное напряжение равное в количественном отношении, но противоположное по знаку влияние. Если к входам приложены синфазные сигналы, действующие одновременно, одинаковые по величине и фазе относительно общего провода, то их влияние будет взаимно скомпенсировано. На входе и выходе будет нулевой потенциал, благодаря чему параметры ОУ мало чувствительны к изменениям напряжения питания, температуры и других внешних факторов. Напряжение на выходе ОУ должно быть лишь в том случае, когда на его входах действуют различные по уровню и фазе сигналы. Выходное напряжение пропорционально разности уровней сигналов, называемой дифференциальным сигналом. Выходное напряжение ОУ измеряется относительно общего провода.

Выходной вывод ОУ в большинстве случаев присоединяется к нагрузке, которая, как правило, соединяется с корпусом, но это условие соблюдается не всегда.

Для того чтобы обеспечить возможность работы ОУ как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, требуется двухполярное питающее напряжение. Для этого необходимо предусмотреть два источника постоянного напряжения, которые подключаются к соответствующим выводам ОУ. Если питающих напряжений несколько, их условно нумеруют ($E_{П1}$, $E_{П2}$) и указывают каждое у своего вывода в дополнительном поле. Вместо буквы можно указывать номинальное значение напряжения и его полярность (выводы с метками +15 В и –15 В, рис. 1.2, а).

При двухполярном питании постоянное напряжение на несимметричном выходе отсутствует при условии, что постоянных напряжений на входе ОУ нет. Значения напряжений источника питания согласно ГОСТ 17230–71 ± 15 , ± 12 и ± 6 В. Известны ОУ, рассчитанные на работу от источника с напряжением питания ± 27 В. Некоторые типы ОУ сохраняют работоспособность при снижении напряжения питания до ± 3 В. Реже встречается несимметричное (+12 и –6 В) и однополярное напряжение питания.

Наличие рассмотренных выводов необходимо для функционирования ОУ. К вспомогательным относятся выводы с метками *FC* — для подсоединения цепи, корректирующей АЧХ ОУ; выводы *NC* — для подключения элементов балансировки по постоянному току (установки нуля на выходе); а также вывод металлического корпуса (\perp) для соединения с общим проводом устройства, в которое входит ОУ.

Для лучшего понимания и большей наглядности принципиальных схем в технической литературе широко используется упрощенное обозначение ОУ в виде равностороннего треугольника, который будет использоваться в настоящем учебном пособии (рис. 1.2, б). Общий провод, играющий роль сигнального вывода, также может быть не показан.

1.1.5. Конструктивное оформление интегральных ОУ

Для увеличения прочности, защиты от внешних воздействий и механических повреждений каждый интегральный ОУ, как и любая ИС, покрывается лаком и монтируется в защитном корпусе.

Наибольшее распространение находят четыре вида конструкций корпусов ИС. Металлостеклянный корпус имеет металлическую крышку и стеклянное (или металлическое) основание с изоляцией и креплением выводов стеклом. Крышка присоединяется к основанию сваркой или пайкой.

Металлокерамический корпус имеет металлическую крышку и керамическое основание. Крышка соединяется с основанием заливкой влагостойким

компаундом. Керамический корпус имеет керамическую крышку и основание. Пластмассовый корпус (наиболее дешевый) выполняется опрессовкой кристалла и рамки выводов.

Корпуса ИС имеют цифровые обозначения согласно ГОСТ 17467–79: первая цифра (1, 2, 3, 4) указывает вид корпуса; следующие две цифры обозначают номер типоразмера корпуса; две цифры после точки — число выводов; последняя цифра — номер модификации данного корпуса.

Общий вид корпусов ОУ показан на рис. 1.3: круглые металлостеклянные корпуса 301.8–1 и 301.12–1, отличающиеся числом выводов (рис. 1.3, а); прямоугольный металлостеклянный корпус 151.15–4, используемый для гибридных ОУ (рис. 1.3, б); прямоугольный пластмассовый корпус 201.14–1 (рис. 1.3, в); прямоугольный керамический корпус 201.14–8 (рис. 1.3, г).

Выводы микросхем нумеруются против часовой стрелки, если смотреть со стороны крышки (так же как у транзисторов или электронных ламп). Для определения начала отсчета (вывод 1) существует ключ: у круглого металлического корпуса — ушко, у пластмассового корпуса — круглая метка, у керамического — вырез на корпусе. На рис. 1.4 показаны цоколёвки операционных усилителей К140УД7 (в круглом корпусе) и К553УД2 (в плоском корпусе). Для наглядности в корпусе прибора изображен символ ОУ, пять основных выводов указаны сплошными линиями, дополнительные (для установки нуля и обеспечения устойчивости) — штриховыми.

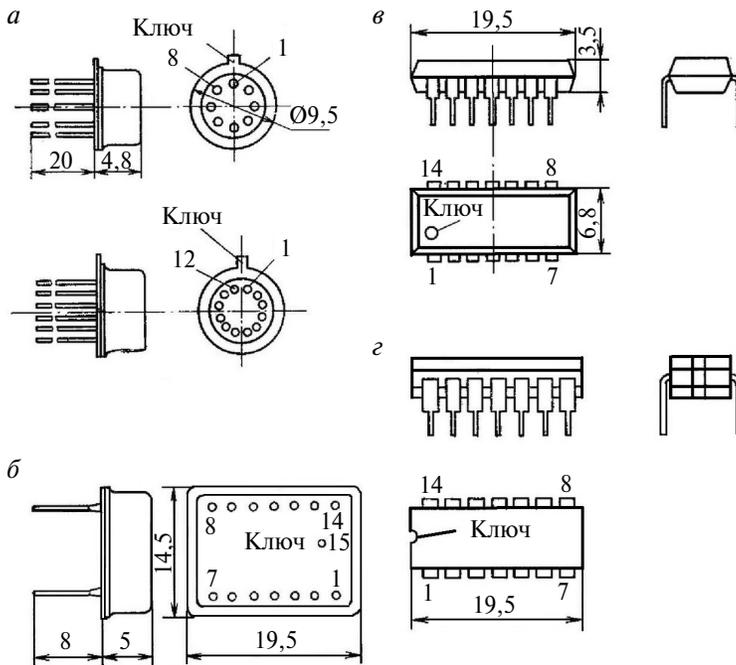


Рис. 1.3. Типы корпусов ОУ