

Кривин Николай Николаевич

(старший преподаватель КИПР, канд. техн. наук)

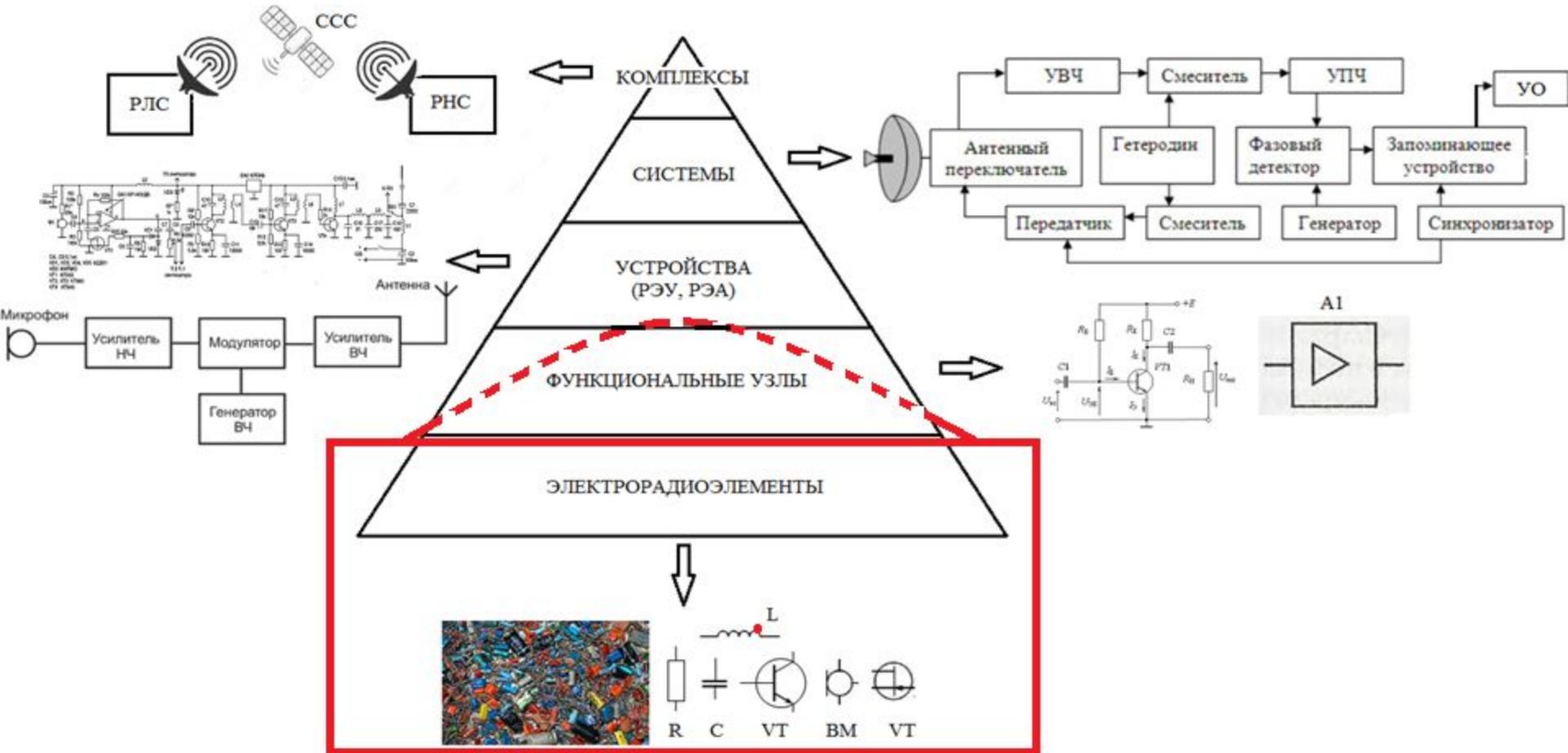
СХЕМО- И СИСТЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

1. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СЭС.

Операционные усилители



ИЕРАРХИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ



АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ НОВОГО ДЛЯ ВАС ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТА

Определение

Классификация

Назначение (функция) и области применения

Основные параметры и их расчетные формулы

Принцип работы (ФЭ)

Отличительные особенности работы в экстремальных режимах эксплуатации

Внешний вид

Условно-графическое и позиционное обозначения

Маркировка и кодировка номиналов

Эквивалентные схемы и схемы замещения

Типовая схема включения, примеры использования в схемах различных ФУ

ИСТОЧНИКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТАМ

**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО
ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРАМ**

**ГОСТ, ОСТ, ТУ, ФОРМУЛЯР, ПАСПОРТ, ЭТИКЕТКА,
ИНСТРУКЦИИ ПО МОНТАЖУ, НАЛАДКЕ,
РЕГУЛИРОВКЕ...**

**РУКОВОДСТВА ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ (ПРИМЕНЕНИЮ) ОТ
ЗАВОДА-ПРОИЗВОДИТЕЛЯ (DATASHEET)**

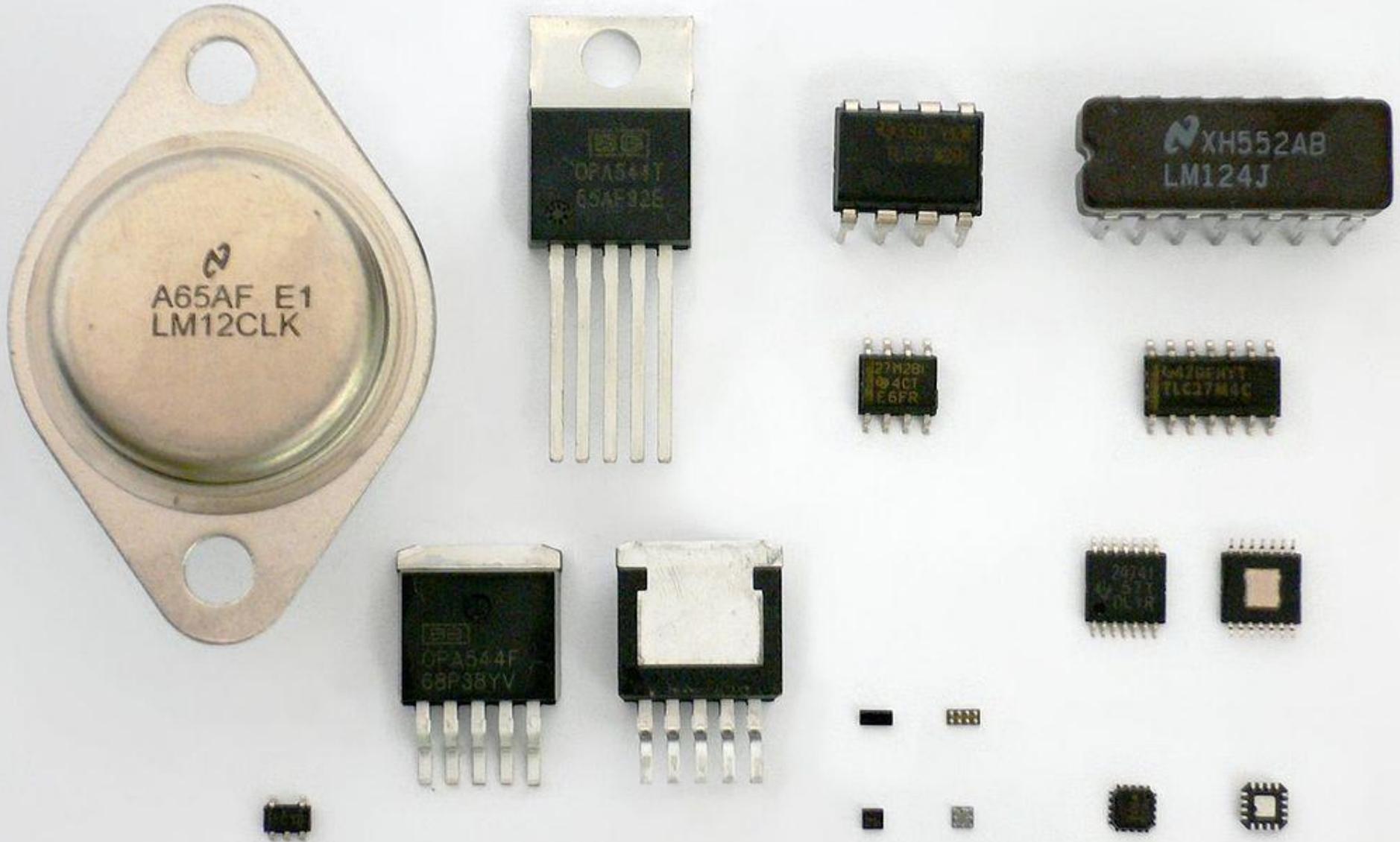
**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПРАВОЧНИКИ ПО НОМЕНКЛАТУРЕ
ЭРЭ**

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПРАВОЧНИКИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭРЭ**

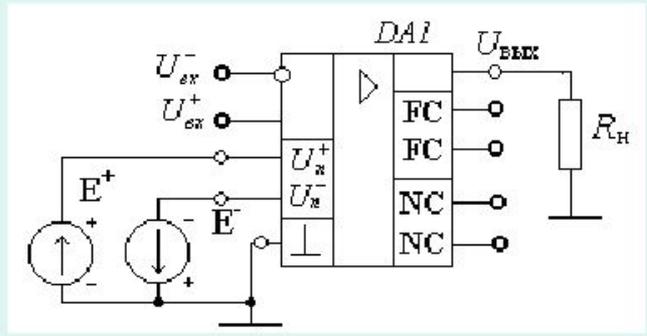
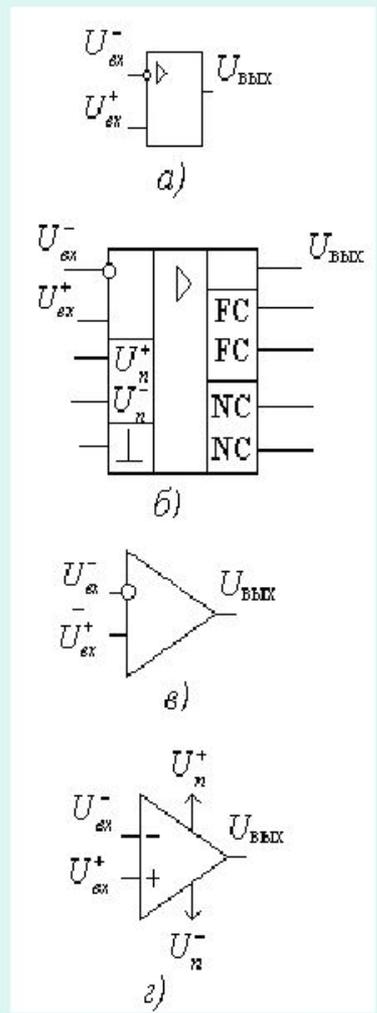
ОТРАСЛЕВЫЕ ЖУРНАЛЫ

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОДПИСНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ
ИЗДАНИЯ**

Внешний вид ОУ

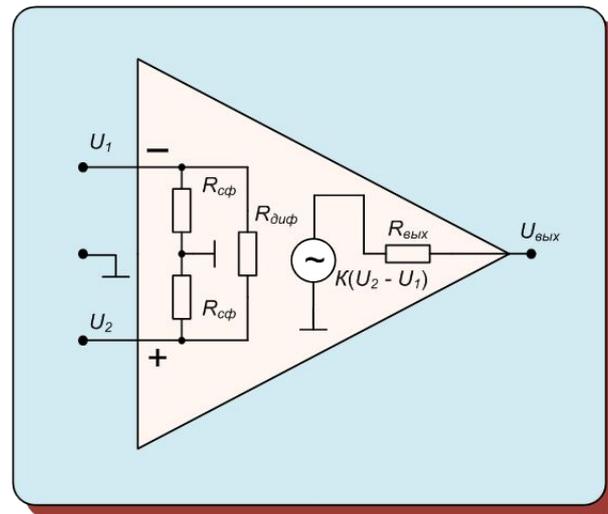
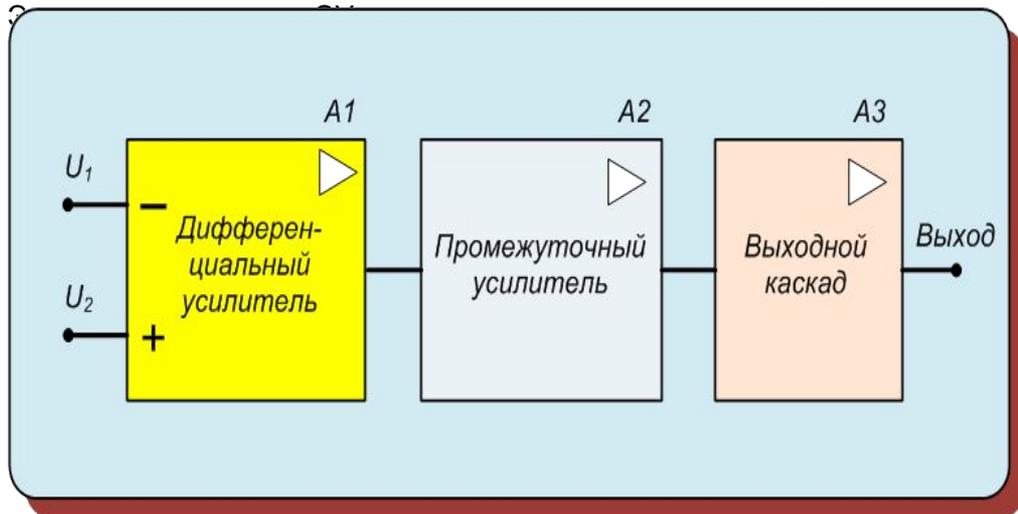


Операционные усилители



Операционные усилители

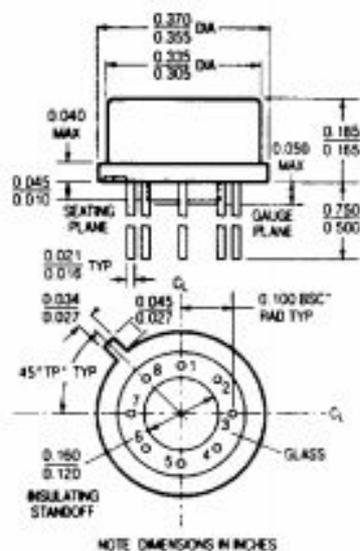
- **Операционный усилитель (ОУ)** - это многокаскадный усилитель с дифференциальным входом, предназначенный для усиления сигналов переменного или постоянного тока. Термин «операционный» происходит от использования этого типа усилителя в аналоговых вычислительных машинах (АВМ), где он выполнял различные математические операции (сложение, вычитание и т.д.) Изготавливались ОУ для первых АВМ на лампах или позднее на дискретных транзисторах, но их сложная настройка, большие габариты и стоимость делало их сложными приборами для решения специфических задач.
- ДУ имеет большой коэффициент усиления для разностных сигналов ($U_2 - U_1$) и низкий коэффициент усиления для синфазных сигналов. Синфазным называются подаваемые одновременно на оба входа сигналы с одинаковой амплитудой и фазой. Кроме того, ДУ имеет высокое входное сопротивление.
- Входной каскад ДУ это наиболее ответственный узел ОУ, т.к. он определяет входное сопротивление, напряжение смещения, подавление синфазного сигнала и шумы всего ОУ. Входные каскады ДУ могут быть выполнены на биполярных транзисторах или полевых транзисторах. Для уменьшения входных токов во входных каскадах ДУ используются биполярные транзисторы со сверхбольшими величинами коэффициента усиления $\beta \approx 4000 \div 10000$ - (супербета транзисторы). В этом случае ток базы будет равным $I_B = I_K / \beta \approx 0.1 \div 1 \text{ нА}$, где I_K – ток коллектора входных транзисторов (для входных каскадов работающих в режиме микротоков он составляет величины нескольких микроампер). Достоинством ДУ на биполярных транзисторах является малое напряжение смещения и малая зависимость этого напряжения и входного тока ОУ от температуры.
- Входные каскады, выполненные на полевых транзисторах, имеют очень малые входные токи и очень большое входное сопротивление, но напряжение смещения у них, как правило, на порядок больше чем у каскадов на биполярных транзисторах. Но для схем, где требования к напряжению смещения небольшие, а важно большое входное сопротивление, ОУ со входами на полевых транзисторах находят широкое применение.
- За входным каскадом ОУ следует один или несколько промежуточных каскадов, которые обеспечивают основное усиление сигнала по напряжению A_2 . Этот каскад также обеспечивает нулевое напряжение на выходе ОУ в состоянии покоя, т.е. при отсутствии входных сигналов. Промежуточный каскад A_2 также в основном определяет полосу пропускания и быстродействие ОУ.
- В современных ОУ за счёт большого усиления каскадов A_1 и A_2 общий коэффициент усиления достигает величин более 1 000 000.
- Выходной каскад ОУ A_3 обеспечивает низкое выходное сопротивление
- ?



Габариты ОУ LM108/LM308 в соответствии с даташитом

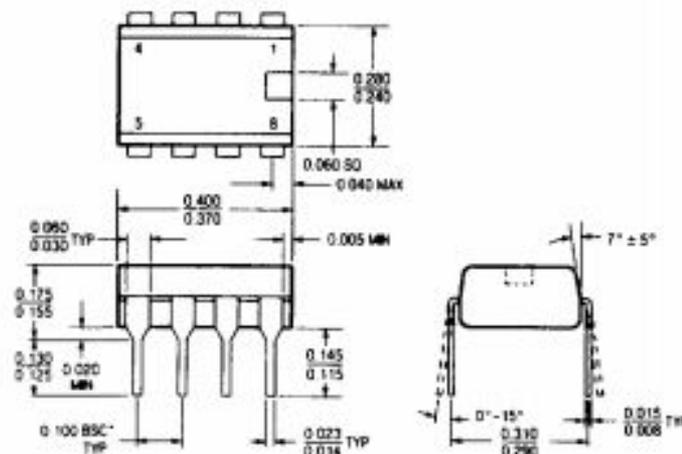
PACKAGE DESCRIPTION

**H Package
Metal Can**



T_{jmax}	θ_{ja}	θ_{jc}
150°C	150°C/W	45°C/W

**N8 Package
8 Lead Plastic**



NOTE: DIMENSIONS IN INCHES UNLESS OTHERWISE NOTED.
*LEADS WITHIN 0.007 OF TRUE POSITION (TP) AT GAUGE PLANE.

T_{jmax}	θ_{ja}
100°C	130°C/W

Предельные значения основных электрических параметров и маркировка выводов ОУ LM108/LM308 в соответствии с даташитом

LM108A/LM308A
LM108/LM308

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	
LM108A/LM108	$\pm 20V$
LM308A/LM308	$\pm 18V$
Differential Input Current (Note 1).....	$\pm 10mA$
Input Voltage (Note 2).....	$\pm 15V$
Output Short Circuit Duration.....	Indefinite
Operating Temperature Range	
LM108A/LM108	$-55^{\circ}C$ to $125^{\circ}C$
LM308A/LM308	$0^{\circ}C$ to $70^{\circ}C$
Storage Temperature Range	
All Devices.....	$-65^{\circ}C$ to $150^{\circ}C$
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.).....	$300^{\circ}C$

PACKAGE/ORDER INFORMATION

	ORDER PART NO.
<p>TOP VIEW</p> <p>METAL CAN H PACKAGE</p>	<p>LM108AH LM108H LM308AH LM308H</p>
<p>TOP VIEW</p> <p>PLASTIC DIP N8 PACKAGE</p>	<p>LM308AN8 LM308N8</p>

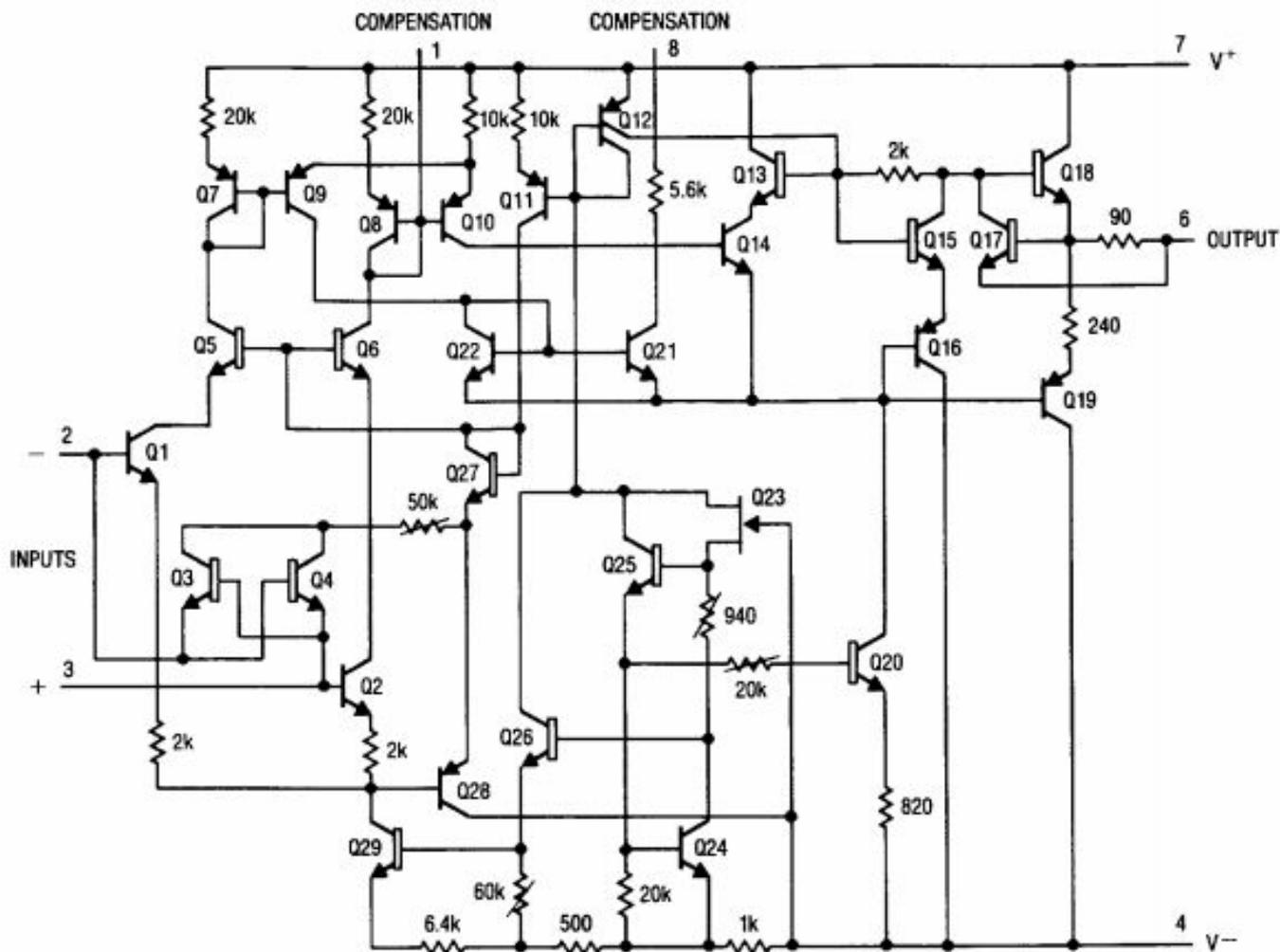
Внутреннее устройство ОУ на примере микросхемы

LM108/LM308 в соответствии с даташитом

LM108A/LM308A

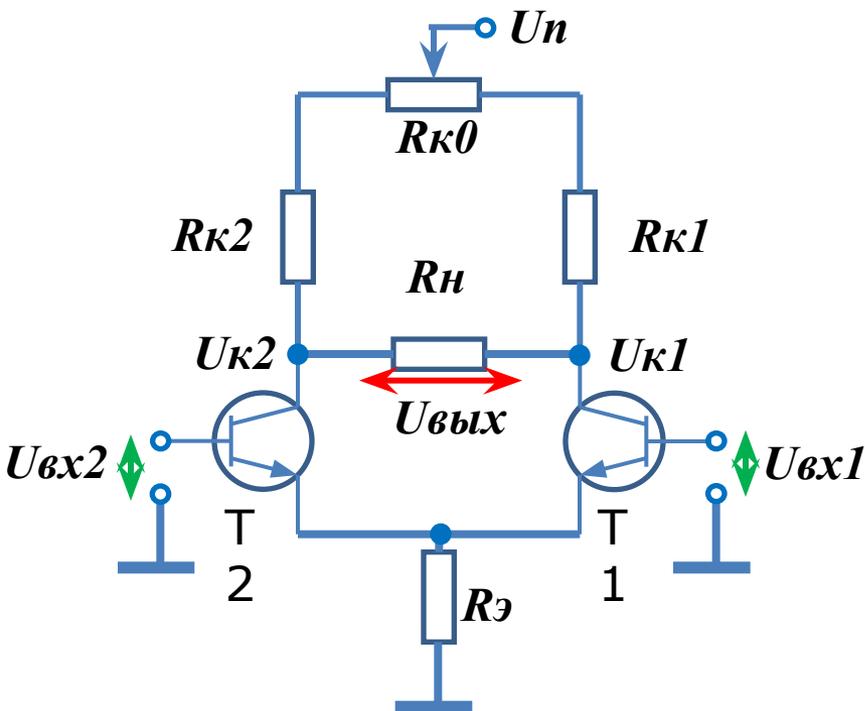
LM108/LM308

SCHEMATIC DIAGRAM

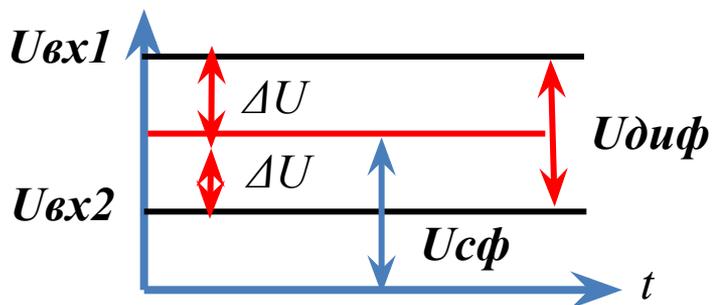


Дифференциальный усилитель (ДУ)

Мостовая схема включения транзисторов с ОЭ.
Симметричные плечи



К пояснению понятия «дифференциальный сигнал»



В основе ДУ лежит идеальная симметрия обоих плеч моста, т. е. идентичность параметров транзисторов $T1, T2$ и равенство сопротивлений R_{k1}, R_{k2} .

1. $U_{вх1}=U_{вх2}=0$

$U_{вых}=0$ при одновременном и одинаковом изменении токов в обоих плечах. В идеальном ДУ дрейф выходного напряжения отсутствует, однако возможен дрейф РТ в каждом $T1, T2$.

2. $U_{вх1}=U_{вх2}=U_{сф}$ – синфазные напряжения
 $I_{к1}=I_{к2}, U_{к1}=U_{к2}, U_{вых}=0$

3. $U_{вх1} = -U_{вх2} = U_{диф}$ – противофазные (дифференциальные) напряжения
 $I_{к1} = -I_{к2}, U_{к1} = -U_{к2}, U_{вых} = U_{к1} - U_{к2}$

$$R_{вх} \approx 2h_{11} \quad R_{вых} \approx 2(R_{k1} + R_{k2})$$

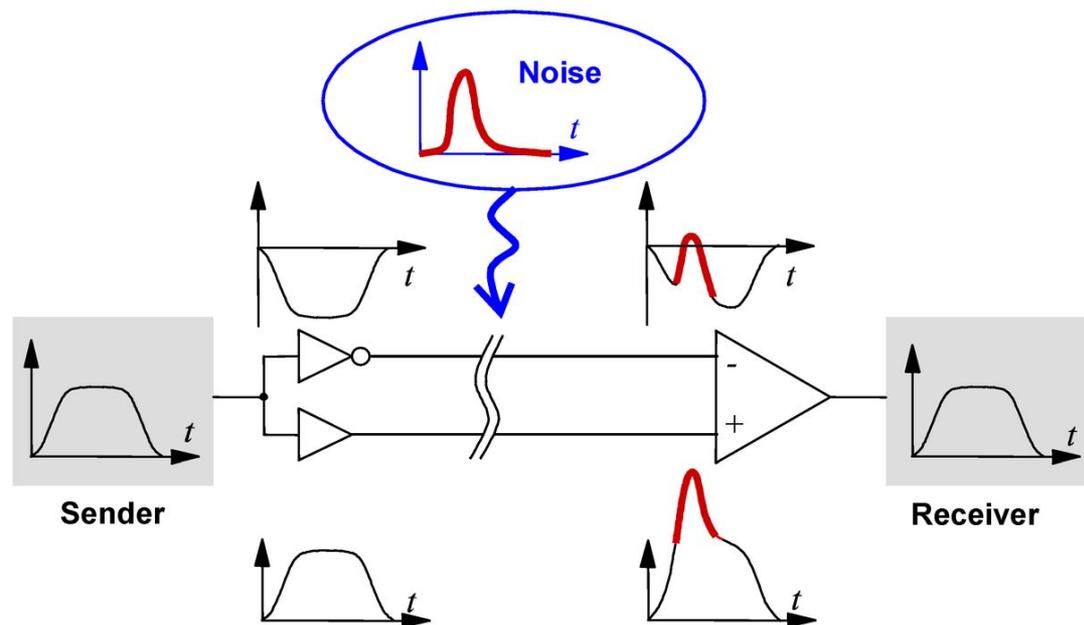
$$K_U = \frac{h_{21}}{h_{11}} R_k$$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ = РАЗНОСТНЫЙ СИГНАЛ»

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ = РАЗНОСТНЫЙ

Дифференциальный сигнал — способ электрической передачи информации с помощью двух противофазных сигналов.

В данном методе один электрический сигнал передается в виде дифференциальной пары сигналов, каждый по своему проводнику, но один представляет инвертированный сигнал другого, противоположный по знаку. Пара проводников может представлять собой витую пару, твинаксиальный кабель или разводиться по печатной плате. Приемник дифференциального сигнала реагирует на разницу между двумя сигналами, а не на различие между одним проводом и потенциалом земли (такой принцип используется в другом методе передачи — называется асимметричная сигнализация).



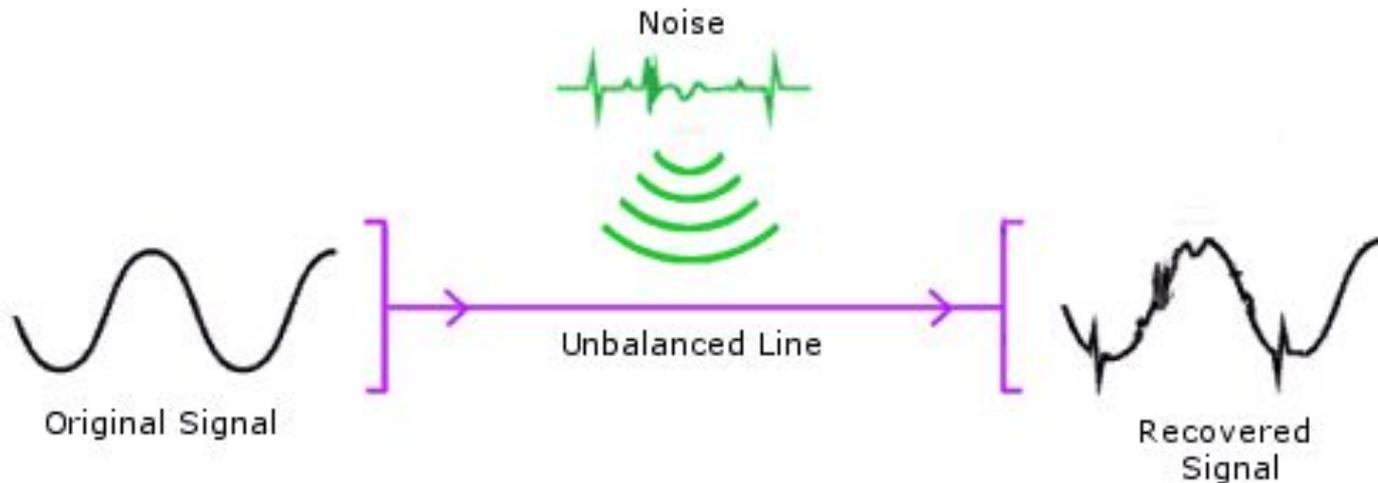
Преимущества. При условии, что импеданс источника и приемника в дифференциальной цепи равен, внешние электромагнитные помехи, как правило, будут затрагивать оба проводника одинаково. Так как приемная схема определяет разницу уровней между проводами, *дифференциальные сигналы становятся более устойчивы к воздействию электромагнитных помех по сравнению с обычными - распространяющимися через одиночные проводники - сигналами, уровень которых измеряется относительно земли.*

Использование. Метод передачи дифференциальных сигналов используется как для аналоговых сигналов (например, в сбалансированных аудиоподключениях), так и для цифровых сигналов, особенно высокоскоростных: RS-422, RS-485, Ethernet по витой паре, PCI Express, DisplayPort, HDMI и USB. Один из стандартов передачи дифференциальных сигналов — LVDS (TIA/EIA-644).

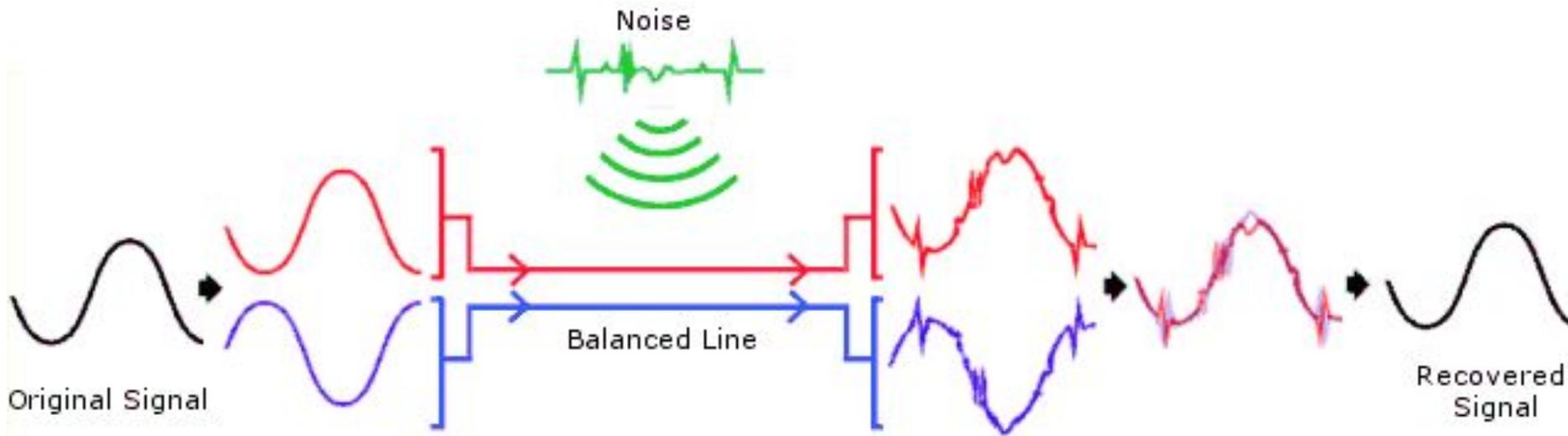
К ПОЯСНЕНИЮ ПОНЯТИЯ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ»

СИММЕТРИЧНОЕ ПОДКЛЮЧЕНИЕ (АУДИО)

Визуальное представление несимметричного соединения



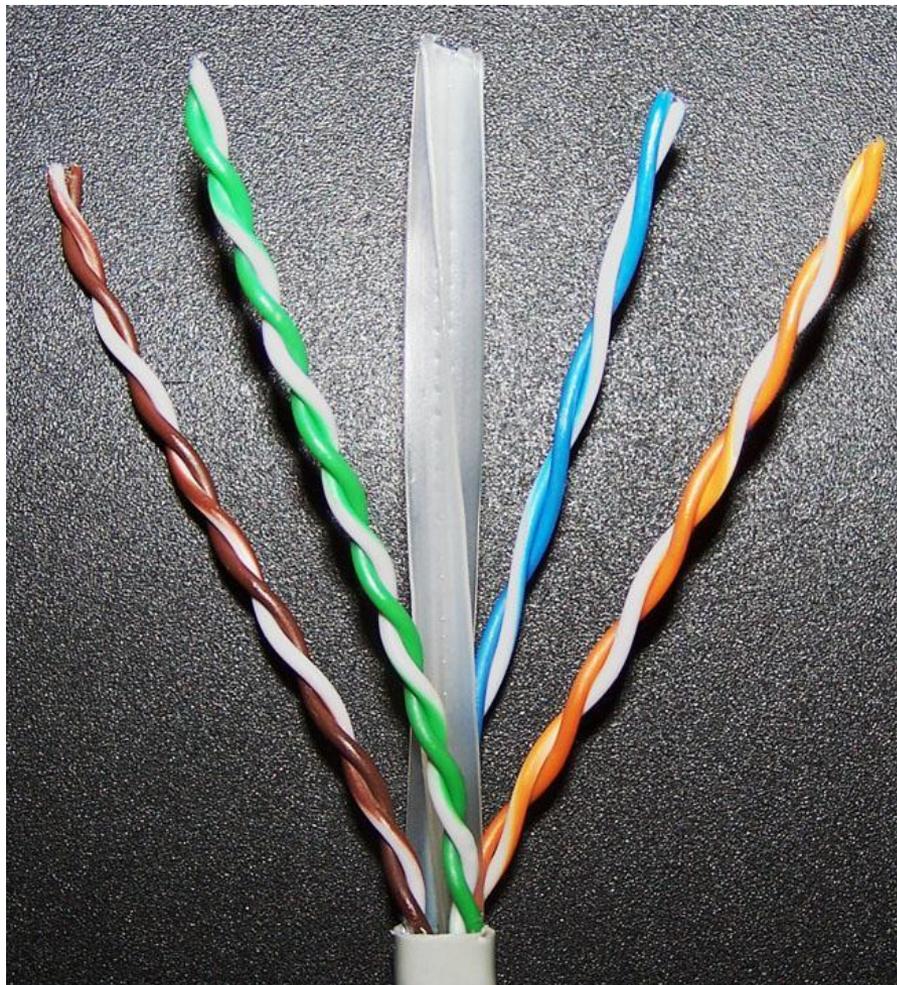
Визуальное представление симметричного соединения



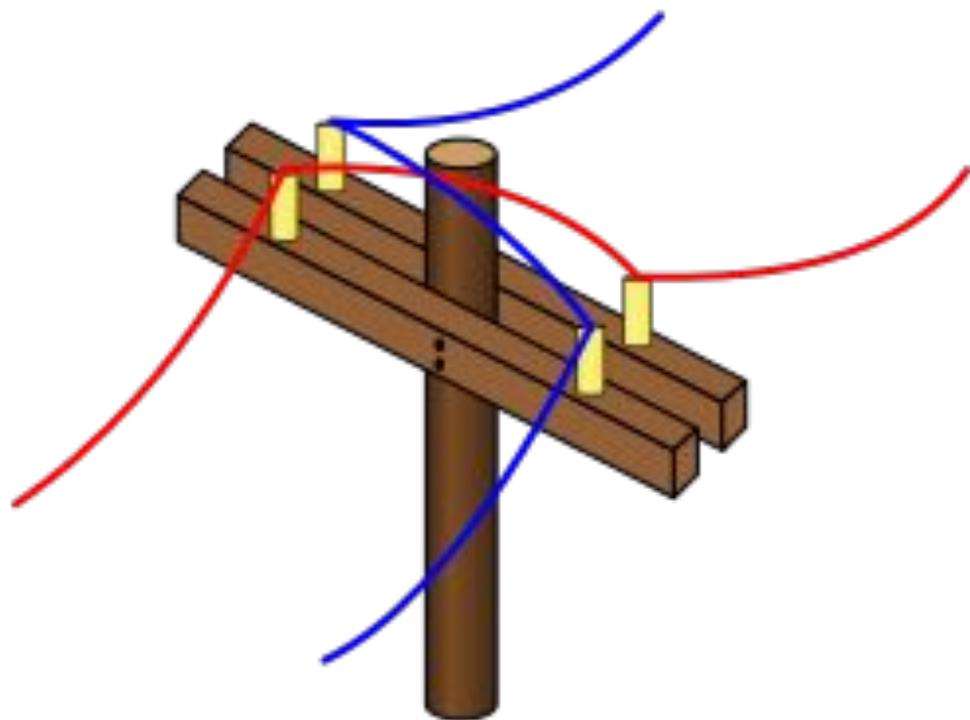
К ПОЯСНЕНИЮ ПОНЯТИЯ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ»

ВИТАЯ ПАРА

Витая пара «категории 6» (между парами виден разделительный корд, провода скручены в пары, каждая со своим шагом скрутки, пары скручены вокруг общей оси)



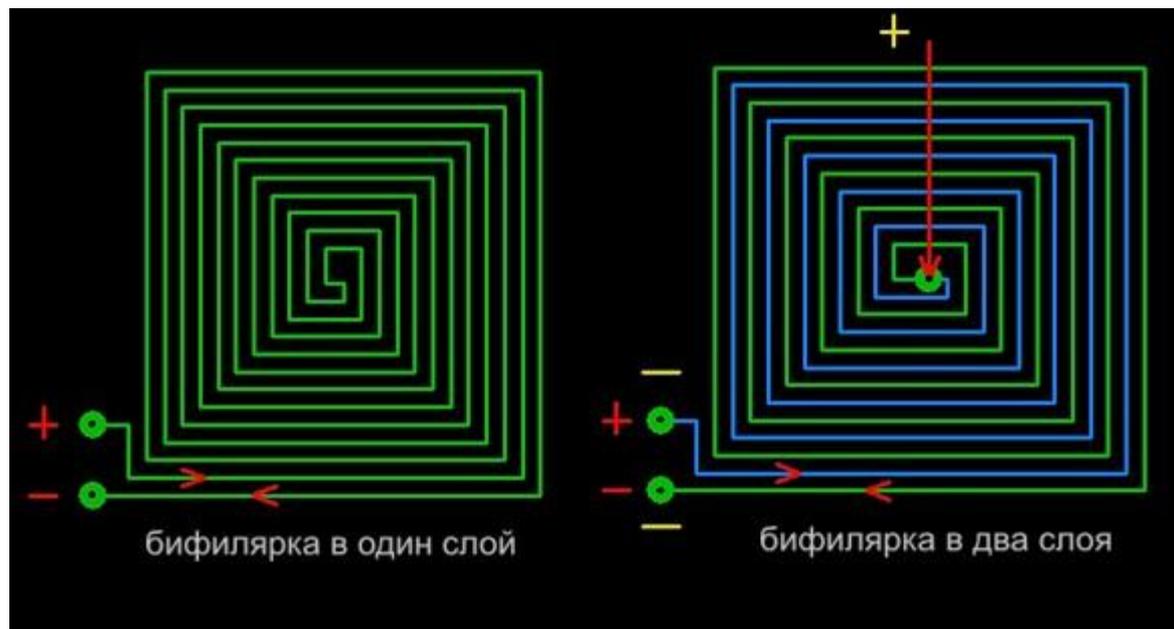
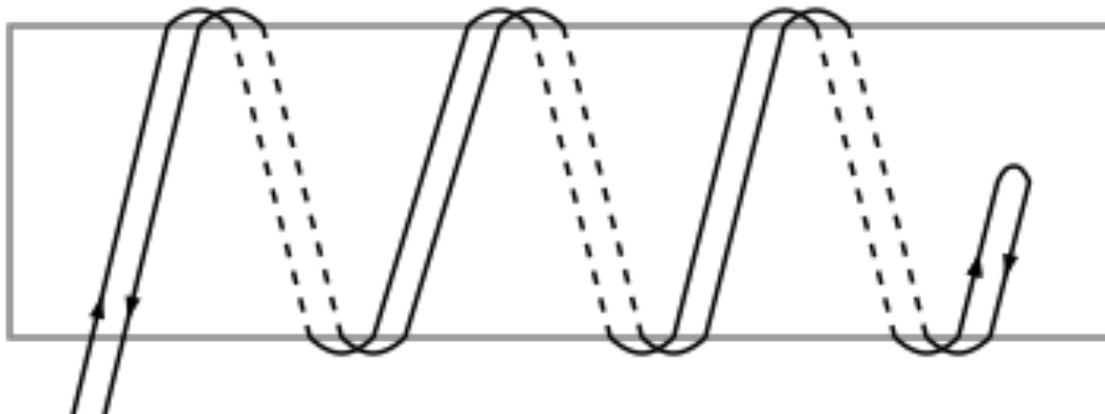
Перекрещивание проводов на телеграфном столбе



К ПОЯСНЕНИЮ ПОНЯТИЯ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ»

БИФИЛЯРНАЯ КАТУШКА

Бифилярная катушка - электромагнитная катушка, у которой нет индуктивности и которая содержит две близко расположенных параллельных обмотки. Если используются три изолированных провода, используется термин «трифилярная катушка».



К ПОЯСНЕНИЮ ПОНЯТИЯ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ»

USB

Назначение контактов в разъеме USB 3.0 Powered-B

1	VBUS	+5V Питание
2	USB D-	USB 2.0 данные
3	USB D+	
4	GND	Земля
8	StdA_SSRX-	SuperSpeed-приём
9	StdA_SSRX+	SuperSpeed-приём
7	GND_DRAIN	Земля
5	StdA_SSTX-	SuperSpeed-передача
6	StdA_SSTX+	SuperSpeed-передача
10	DPWR	Дополнительное питание на устройство
11	GND_D	Земля питания устройства

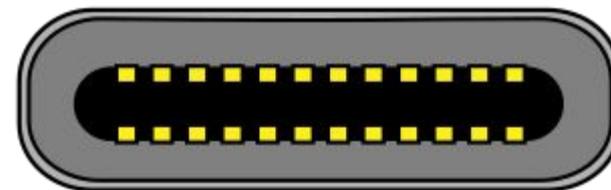
SUPER SPEED

CERTIFIED

USB

К ПОЯСНЕНИЮ ПОНЯТИЯ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ»

USB



Type-C

Назначение контактов в разъеме USB Type-C

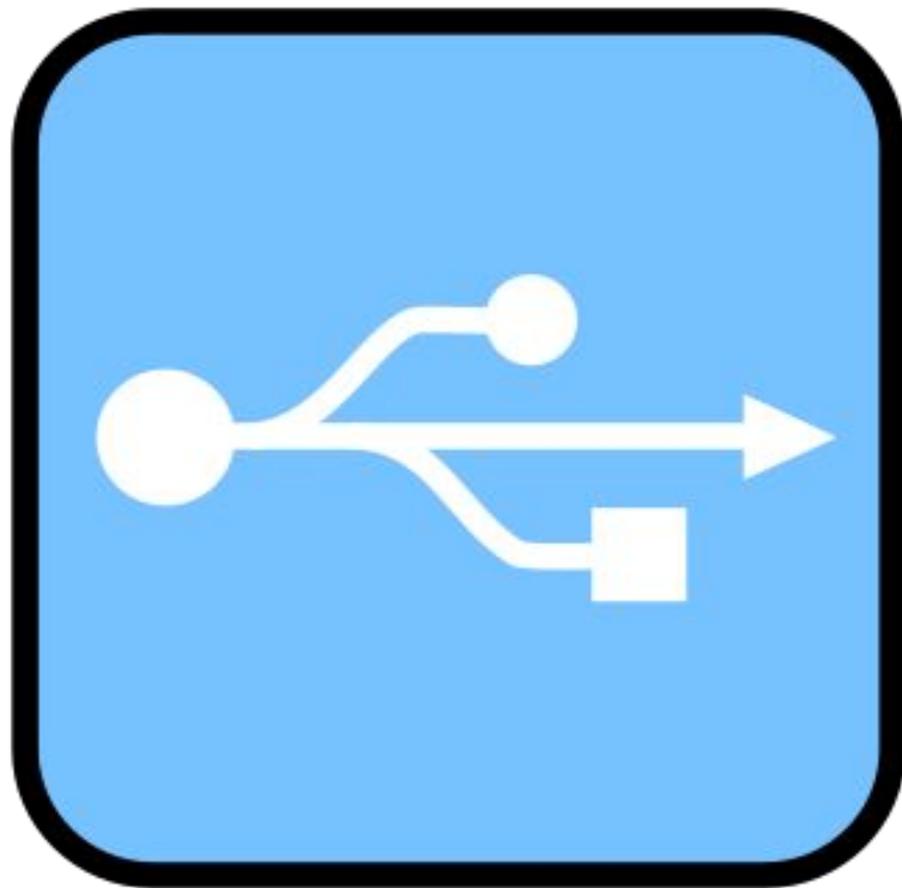
Контакт	Название	Описание	Контакт	Название	Описание
A1	GND	Общая земля	B12	GND	Общая земля
A2	SSTXp1	SuperSpeed дифференциальная пара #1, TX, positive	B11	SSRXp1	SuperSpeed дифференциальная пара #1, RX, positive
A3	SSTXn1	SuperSpeed дифференциальная пара #1, TX, negative	B10	SSRXn1	SuperSpeed дифференциальная пара #1, RX, negative
A4	V _{bus}	Линия питания	B9	V _{bus}	Линия питания
A5	CC1	Конфигурационный канал	B8	SBU2	Полоса пропускания данных (SBU)
A6	Dp1	USB 2.0 дифференциальная пара, position 1, positive	B7	Dn2	USB 2.0 дифференциальная пара, position 2, negative
A7	Dn1	USB 2.0 дифференциальная пара, position 1, negative	B6	Dp2	USB 2.0 дифференциальная пара, position 2, positive
A8	SBU1	Полоса пропускания данных (SBU)	B5	CC2	Конфигурационный канал
A9	V _{bus}	Bus power	B4	V _{bus}	Bus power
A10	SSRXn2	SuperSpeed дифференциальная пара #2, RX, negative	B3	SSTXn2	SuperSpeed дифференциальная пара #2, TX, negative
A11	SSRXp2	SuperSpeed дифференциальная пара #2, RX, positive	B2	SSTXp2	SuperSpeed дифференциальная пара #2, TX, positive
A12	GND	Общая земля	B1	GND	Общая земля

В разъёме USB 2.0 дифференциальная пара подключается только в одном положении; положение 2 физически не присутствует в разъёме

К ПОЯСНЕНИЮ ПОНЯТИЯ «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ»

USB

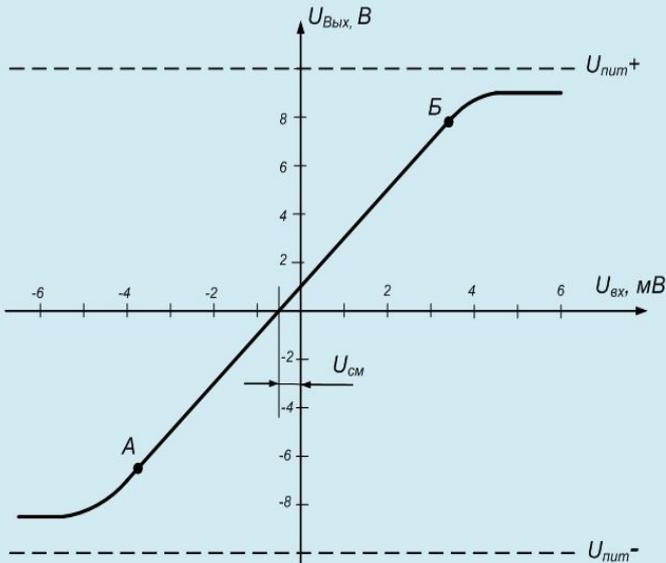
Последователям одного из евангельских культов Бразилии запретили пользоваться USB-портами. Так, лидер этой секты, Уэлдер Салданья (Welder Saldanha), усмотрел в эмблеме USB символ Сатаны, а именно трезубец, которым пытаются души грешников в аду. В связи с этим он заявил, что все, кто использует USB, поклоняются Сатане



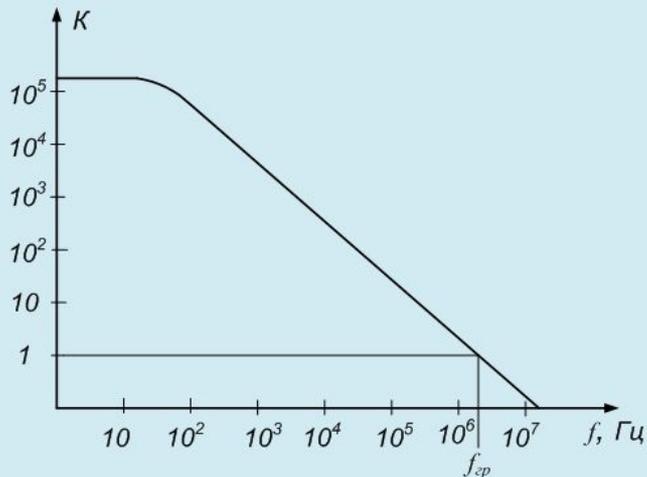
Логотип USB

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОУ

Передаточная характеристика ОУ



АЧХ ОУ без обратных связей



1. **Коэффициент усиления K** - это коэффициент усиления ОУ без обратных связей. Для современных ОУ коэффициент усиления $K \approx 1000 \div 1000000$. На верх. рис. представлена передаточная характеристика ОУ – зависимость $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{вх}}$. Как правило, используется линейный участок этой характеристики (отрезок АБ). Угол наклона этого участка пропорционален коэффициенту усиления ОУ. Сверху и снизу передаточная характеристика ограничена напряжением питания ОУ.

2. **Напряжение смещения $U_{\text{см}}$** - это напряжение, которое надо подать на вход ОУ, чтобы скомпенсировать напряжение, возникающее внутри самого ОУ из-за разброса параметров усилительных каскадов (главным образом ДУ) и получить на выходе нулевое напряжение.

3. **Частота единичного усиления $f_{\text{гр}}$** – значение частоты сигнала, при которой коэффициент усиления становится равным единице (рис. снизу)

4. **Скорость нарастания** – отношение изменения $U_{\text{вых}}$ от 10% до 90% от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение.

5. **Входные токи $I_{\text{вх}}$** токи, протекающие через входные контакты ОУ – зависят от типа транзисторов входных каскадов ДУ.

6. **Разность входных токов $\Delta I_{\text{вх}}$** , протекающих через входы ОУ.

7. **Температурный дрейф $\Delta U_{\text{см}}$** .

8. **Температурный дрейф $\Delta I_{\text{вх}}$** .

9. **Коэффициент ослабления синфазного сигнала.**

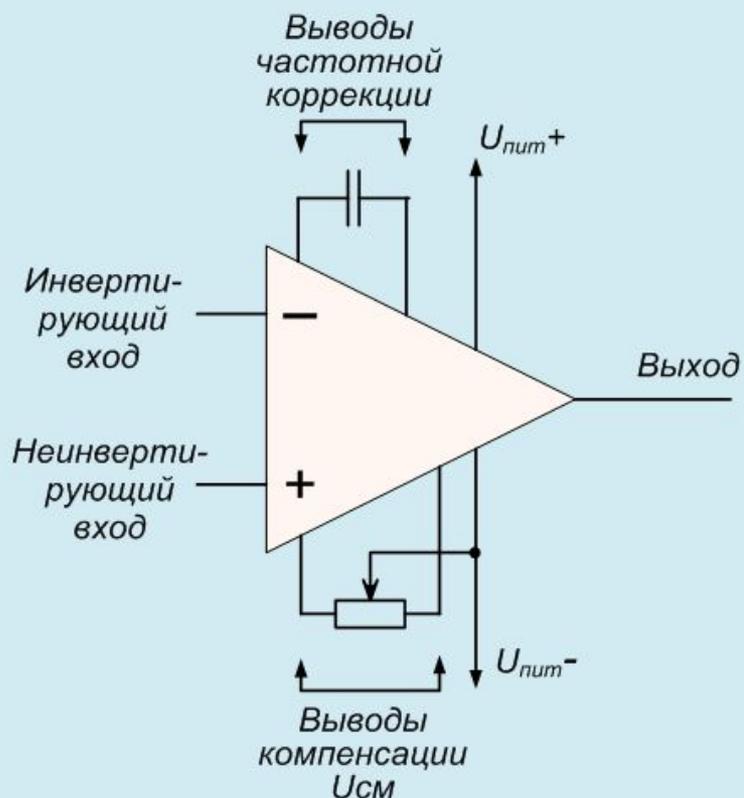
Предельные параметры ОУ:

1. **Максимальное выходное напряжение $U_{\text{вых.макс}}$** - максимальное напряжение на выходе ОУ, при котором искажения не превышают заданного значения. В некоторых современных ОУ оно может быть почти равным напряжению питания ОУ.

2. **Максимальное входное дифференциальное напряжение и максимальное синфазное напряжение** - это напряжение, подаваемое на входы ОУ, превышение которого приведёт к выходу параметров за установленные границы или к разрушению прибора.

3. **Максимальный выходной ток $I_{\text{вых.макс}}$** - ток через выход ОУ, при котором гарантирована работоспособность ОУ.

Назначение основных выводов ОУ



Инертирующий вход служит для подачи входного сигнала, при этом на выходе ОУ будет усиленный сигнал, сдвинутый по фазе на 180° , т. е. сигнал инвертирован.

Выводы частотной коррекции предназначены для подключения корректирующих RC цепей, с помощью которых подавляется генерация ОУ. Некоторые типы ОУ имеют внутреннюю частотную коррекцию, поэтому выводы для подключения внешних корректирующих цепей у них отсутствуют.

Выводы компенсации напряжения смещения предназначены для подключения балансирующих элементов, с помощью которых устанавливают нулевое выходное напряжение (при отсутствии сигнала на входе ОУ). Схемы подключения элементов балансировки для разных типов ОУ могут отличаться от показанных на рис. В некоторых типах ОУ для уменьшения стоимости выводы компенсации отсутствуют.

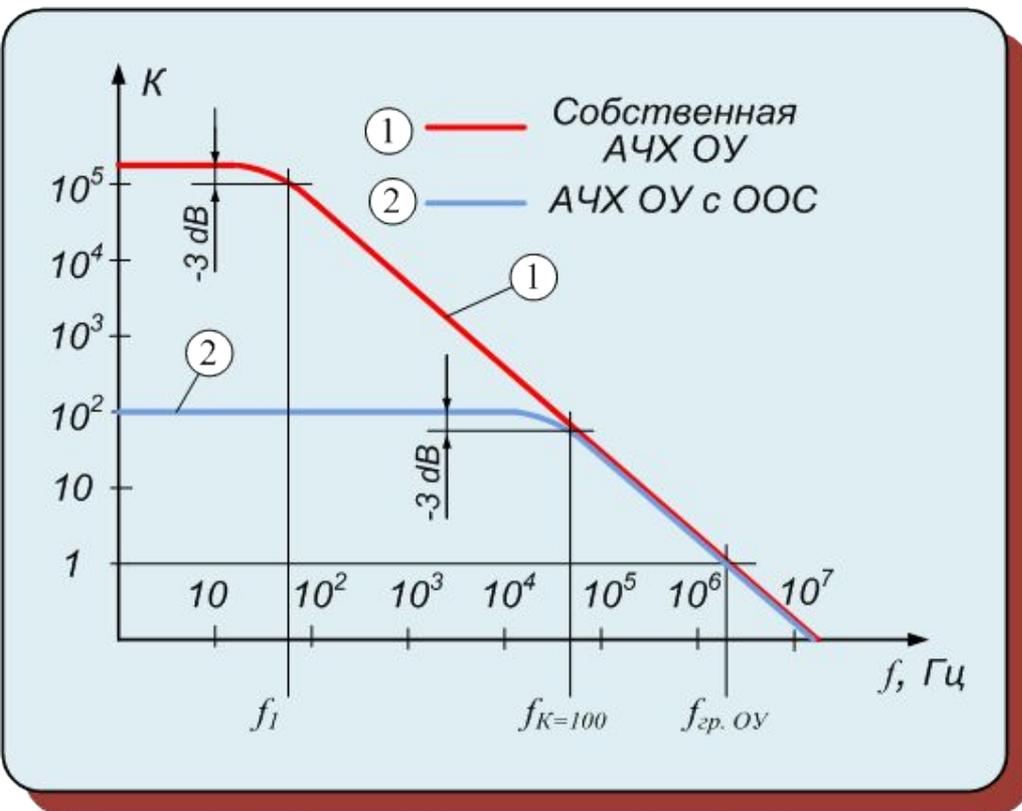
Через **вывод $U_{пит+}$** на ОУ подаётся положительное питание, а через **вывод $U_{пит-}$** подаётся отрицательное питание. Для большинства ОУ напряжение питания составляет $3 \div 15$ В.

Классификация ОУ

- 1. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ОУ** – самый распространённый тип операционных усилителей. Для этого класса ОУ характерно применение внутренней частотной коррекции и малая стоимость. Универсальные ОУ могут быть выполнены одиночными, по 2 или по 4 в одном корпусе ИС. Параметры современных универсальных ОУ вполне удовлетворительны для решения большинства схемотехнических задач.
- 2. МИКРОМОЩНЫЕ ОУ.** Для аппаратуры с питанием от батарей гальванических элементов или аккумуляторов необходимо использовать электронную технику с малым потреблением энергии. Для этих целей разработаны микромощные ОУ с малым потребляемым током, а некоторые из них могут работать при низких питающих напряжениях. Кроме того, у некоторых ОУ этого класса предусмотрена возможность регулировки потребляемого тока, что можно использовать в схемах, в которых есть режим ожидания с малым расходом энергии источника питания.
- 3. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ОУ.** Для усиления сигналов малого уровня постоянного или низкочастотного переменного напряжения и там, где необходимо иметь очень стабильный коэффициент усиления (например, в измерительной аппаратуре) разработаны прецизионные ОУ. Они характеризуются очень малыми (до единиц и десятков микровольт) напряжением смещения, большим коэффициентом усиления и малым дрейфом основных параметров. Такие усилители используются для усиления сигналов от термодатчиков, тензодатчиков и в других измерительных приборах. Стоимость прецизионных ОУ, как правило, выше, чем универсальных ОУ, но и параметры их намного лучше.
- 4. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ОУ.** Для скоростных ОУ характерна широкая полоса рабочих частот. В современных ОУ частота единичного усиления $f_{гp}$ достигает величин более 1ГГц. Эти ОУ имеют высокую скорость нарастания достигающую 6000 В/мкс.
- 5. МОЩНЫЕ ОУ.** Для управления электромеханическими устройствами, осветительными приборами и в генераторах сигналов используются ОУ с мощными выходными каскадами, выдающими ток до единиц ампер. Такие ОУ, как правило, рассеивают большую мощность и изготавливаются в корпусах, которые можно крепить на радиатор охлаждения. Такие ОУ имеют небольшой частотный диапазон (10...200 кГц) и другие параметры сравнимые с универсальными ОУ. В мощных ОУ используется защита от короткого замыкания и защита от перегрева.
- 6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОУ.** Для решения различных задач были разработаны специализированные ОУ:
 - БУФЕРЫ** – имеющие фиксированный единичный коэффициент передачи, большое входное и малое выходное сопротивление, высокую скорость нарастания. Они применяются в основном для согласования высокоомного выходного сопротивления источника сигнала с малым входным сопротивлением нагрузки.
 - МАЛОШУМЯЩИЕ ОУ** – имеющие нормированные шумовые характеристики, используются в схемах, работающих с сигналами малых уровней (датчики, микрофоны и т.д.)
 - ОУ С МАЛЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ** – применяются для аудиоаппаратуры, в анализаторах спектра, в генераторах сигналов с малыми нелинейными искажениями.

Номенклатура современных ОУ более широкая, чем представленная выше, и многие фирмы успешно разрабатывают новые операционные усилители. Параметры современных ОУ намного превосходят параметры первого интегрального ОУ $\mu A702$, разработанного в 1964г. Конкретные параметры ОУ можно найти в многочисленных справочниках и в интернете на сайтах фирм производителей.

Основные схемы включения ОУ



На рисунке представлены **АЧХ ОУ без обратной связи** (кривая 1) и **АЧХ с ООС с коэффициентом усиления $K = 100$** (кривая 2).

Из рисунка следует, что **полоса частот усилителя с ООС** намного больше, чем для ОУ без ООС $f_{K=100} \gg f_1$, где $f_{K=100}$ — частота среза (по уровню -3dB) усилителя с ООС, f_1 — частота среза ОУ без ООС. Максимальная частота для каскада усиления на ОУ при $K = 1$ может достигать частоты единичного усиления $f_{гр. ОУ}$.

Как правило, ОУ используются с применением обратных связей.

При отрицательной обратной связи (ООС) часть сигнала с выхода ОУ подаётся на его вход в противофазе с входным сигналом. При этом уменьшатся усиление каскада, увеличивается полоса пропускания, уменьшается дрейф и уменьшается выходное сопротивление каскада.

При положительной обратной связи (ПОС) часть сигнала с выхода ОУ подаётся на вход ОУ в фазе с входным сигналом. Это приводит к увеличению усиления каскада, ускоренному переключению ОУ и даже к генерации. Положительная обратная связь используется в компараторах и различных генераторах на основе ОУ.

Основные схемы включения ОУ

СХЕМА ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ НА ОУ

В этой схеме сигнал ООС с выхода ОУ через резистор R_{oc} подаётся на инвертирующий вход (-) ОУ. Сюда же подаётся через резистор $R_{вх}$ входной сигнал $U_{вх}$. Неинвертирующий вход (+) ОУ заземлён. Коэффициент усиления в данной схеме

$$K = -R_{oc}/R_{вх}$$

Знак минус означает, что сигнал на выходе имеет сдвиг по фазе на 180° , т.е. сигнал инвертирован.

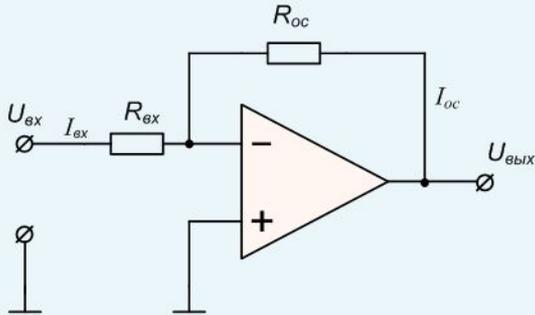


СХЕМА НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ НА ОУ

В этой схеме сигнал подаётся на неинвертирующий вход ОУ, а сигнал ООС поступает через резистор R_{oc} с выхода на инвертирующий вход ОУ. Коэффициент усиления в данной схеме

$$K = 1 + R_{oc}/R_1$$

Особенностью данной схемы усилителя является большое входное сопротивление. Если в этой схеме убрать резистор ($R_1 = \infty$), а R_{oc} замкнуть ($R_{oc} = 0$), то получится схема рис 8.11, в которой коэффициент усиления будет равный единице.

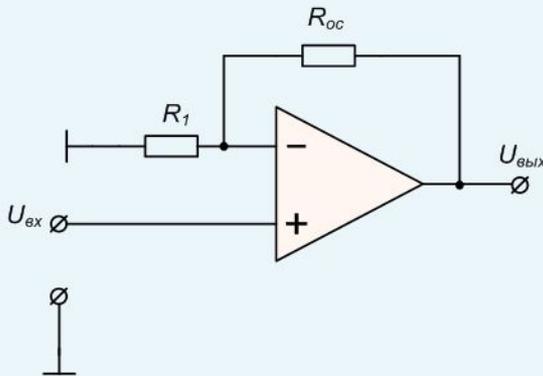
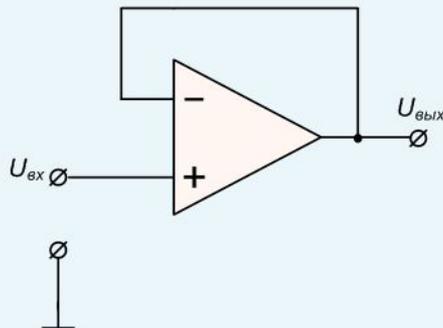


СХЕМА ПОВТОРИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОУ

Если в предыдущей схеме убрать резистор ($R_1 = \infty$), а R_{oc} замкнуть ($R_{oc} = 0$), то получится схема, в которой коэффициент усиления будет равный единице. Из-за единичного коэффициента усиления эта схема называется повторителем напряжения. Её достоинством является очень большое входное сопротивление и малое выходное сопротивление. Используется как буфер при согласовании выходного сопротивления источника сигнала с сопротивлением нагрузки.

Приведённые схемы включения ОУ лишь малая часть, разработанных на сегодняшний день схем применения ОУ. Наряду с постоянным совершенствованием технологии изготовления ОУ и их схемотехники, происходит разработка новых схем на основе ОУ. Операционные усилители являются одним из самых распространённых элементов современной аналоговой электронной техники.



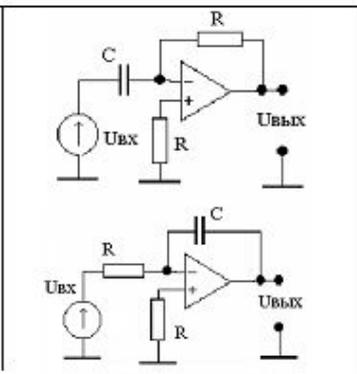
Основные схемы включения ОУ

Устройства на ОУ

Название	Схема устройства	Уравнение
Инвертирующий усилитель Рис.1.5		$U_{\text{вых}} = -K U_{\text{вх}}, \text{ где } K > 1$ $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1}$
Неинвертирующий усилитель		$U_{\text{вых}} = K U_{\text{вх}}, \text{ где } K > 1$ $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} + 1$
Усилитель разности или дифференциальный усилитель		$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} \cdot (U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}})$
Инвертирующий сумматор		$U_{\text{вых}} = \left(U_{\text{вх1}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} + U_{\text{вх2}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} + \dots + U_{\text{вхn}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_n} \right)$ $\Rightarrow - \sum_{k=1}^n \left(U_{\text{вхk}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_k} \right)$

Дифференцирующий усилитель

Интегрирующий усилитель



$$U_{\text{вых}} = -R_{\text{oc}} C dU_{\text{вх}}/dt,$$

$$U_{\text{вых}} = -(1/RC) \int_0^t U_{\text{вх}} dt$$

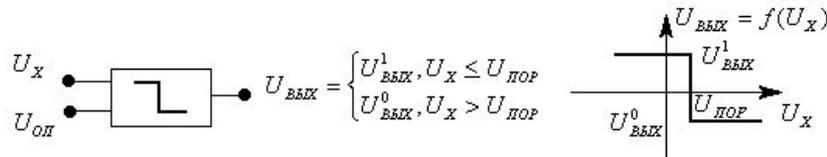
Компараторы напряжений

Компараторы напряжения. Таблица 1.2

- Компараторы напряжений это устройства, которые предназначены для сравнения двух сигналов.
- Они имеют два входа. Один из входов предназначен для подачи исследуемого сигнала U_x , а другой для подачи опорного напряжения $U_{оп}$.
- В момент времени, когда исследуемый сигнал U_x сравнивается с пороговым напряжением $U_{пор}$, который зависит от величины опорного напряжения $U_{пор}=F(U_{оп})$, компаратор изменяет свое состояние.
- Состояние компаратора определяется величиной выходного напряжения, которое может принимать два значения: $U_{вых}=U^0_{вых}$ или $U^1_{вых}$.
- Разновидности компараторов:
- **Неинвертирующий компаратор**



- **Инвертирующий компаратор**

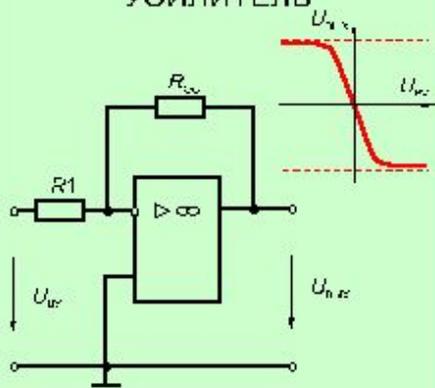


В качестве компараторов обычно используют операционные усилители. Входные ($U_{вх+}$, $U_{вх-}$) и выходное ($U_{вых}$) напряжения ОУ связаны соотношением: $U_{вых} = K_{ou}(U_{вх+} - U_{вх-})$, (1) где K_{ou} - коэффициент усиления операционного усилителя.

Схема и название	Амплитудная хар-ка	Временные диаграммы
<p>Одновходовой инвертирующий компаратор</p> <p>$U_{пор} = -U_{оп} \frac{R1}{R2}$</p>	<p>$U_{пор} = -U_{оп} \frac{R1}{R2}$</p>	
<p>Двух входовой инвертирующий компаратор</p> <p>$U_{пор} = U_{оп}$</p>	<p>$U_{пор} = U_{оп}$</p>	
<p>Одновходовой неинвертирующий компаратор</p> <p>$U_{пор} = -U_{оп} \frac{R1}{R2}$</p>	<p>$U_{пор} = -U_{оп} \frac{R1}{R2}$</p>	
<p>Двух входовой инвертирующий компаратор</p> <p>$U_{пор} = U_{оп}$</p>	<p>$U_{пор} = U_{оп}$</p>	
<p>Инвертирующий компаратор с положительной ОС</p> <p>$U_{пн} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_{п+}; U_{пв} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_{п-}$</p>	<p>$U_{пн} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_{п+}; U_{пв} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_{п-}$</p>	

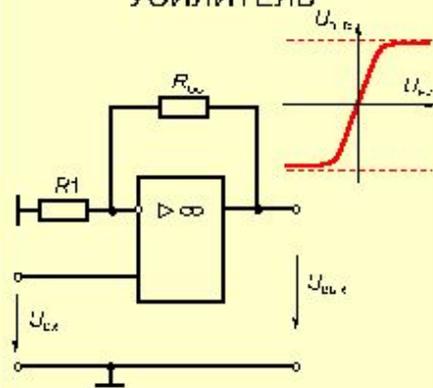
ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ОУ)

ИНВЕРТИРУЮЩИЙ
УСИЛИТЕЛЬ



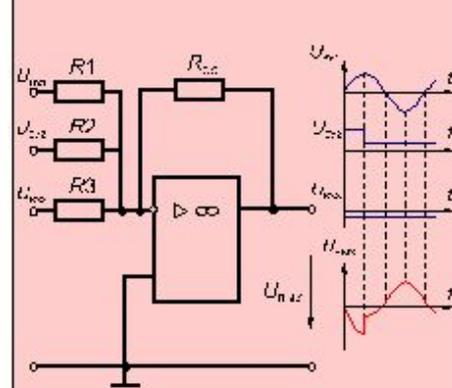
$$K_{\text{ин}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_{\text{об}}}{R_1}$$

НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ
УСИЛИТЕЛЬ



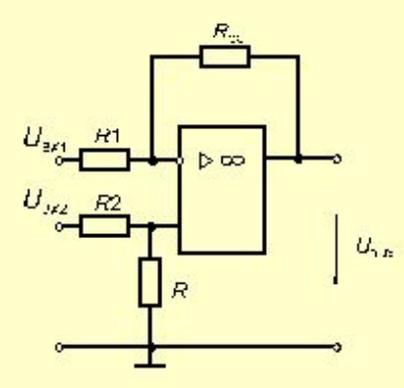
$$K_{\text{нн}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_{\text{об}}}{R_1}$$

СУММАТОР



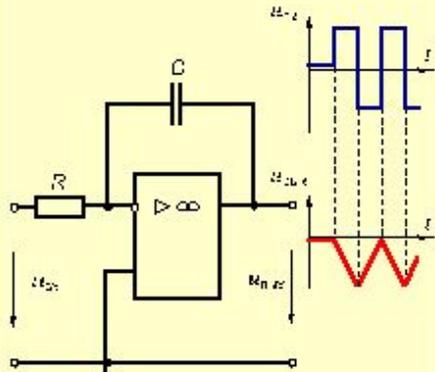
$$U_{\text{вых}} = -\left(\frac{R_{\text{об}}}{R_1}U_{\text{вх1}} + \frac{R_{\text{об}}}{R_2}U_{\text{вх2}} + \frac{R_{\text{об}}}{R_3}U_{\text{вх3}}\right)$$

ВЫЧИТАТЕЛЬ



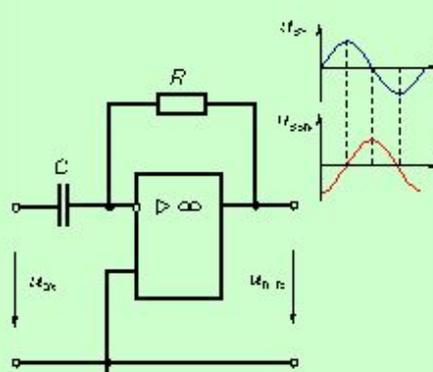
$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх2}} \frac{R}{R_2 + R} \left(1 + \frac{R_{\text{об}}}{R_1}\right) - U_{\text{вх1}} \frac{R_{\text{об}}}{R_1}$$

ИНТЕГРАТОР



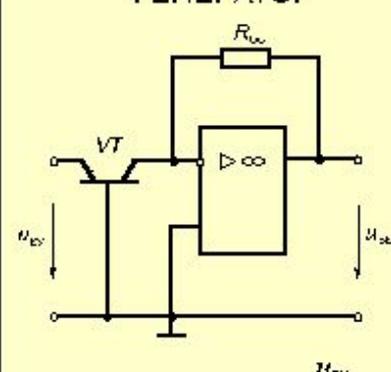
$$u_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int u_{\text{вх}} dt$$

ДИФФЕРЕНЦИАТОР



$$u_{\text{вых}} = -RC \frac{du_{\text{вх}}}{dt}$$

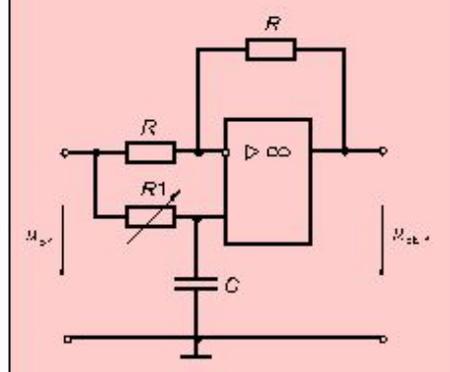
ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ
ГЕНЕРАТОР



$$u_{\text{э-ик}} = I_{\text{эо}} R_{\text{об}} e^{-\frac{u_{\text{вх}}}{25.5}}$$

$I_{\text{эо}}$ - обратный ток эмиттера

ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ



$$\varphi = -2 \arctg(\omega R_1 C)$$

$$\varphi = 0^\circ \div 180^\circ$$

Индивидуальное задание на ноябрь-декабрь

Обзорные рефераты на темы

- ▶ «САПР для СиСПЭС» (включая СВЧ-схемотехнику и этап проектирования печатного узла) (к 1 ноября)
- ▶ «Современные методы инженерного творчества» (к 4 декабря)
- ▶ «Современные отрасли человеческой деятельности, требующие специалистов со знанием СиСПЭС» (к 11 декабря)
- ▶ «Отечественные предприятия – разработчики и производители современной ЭКБ» (к 4 декабря)

Домашнее задание

СТАРОЕ до 25 октября

-) Раздел «Транзисторы» по [МРБ 1190 А.И.Аксенов, А.В.Нефедов. **Элементы схем БРА. Диоды. Транзисторы 1992**]
-) Разделы 2.2 и 2.3 по [Опадчий, Глудкин...]
-) Изучить Главу 1. [Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах Ровдо А.А.]
-) Изучить Главу 9, изучить разделы учебника, соответствующие ТЗ на курсовой проект [Перепёлкин Д.А. - Схемотехника усилительных устройств (Специальность) - 2014]
-) Изучить параграф 4.4 «Схемотехника усилительных устройств» [Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи 2009]

НОВОЕ до 30 октября

-) Глава 1 и Глава 2 на подробный разбор. Тезисный конспект. [Перепёлкин Д.А. - Схемотехника усилительных устройств (Специальность) - 2014]
-) Изучить полностью, основные вопросы на конспект, примеры схемотехнического моделирования усилительных каскадов повторить в MicroCAP. [Шарыгина Л.И. Элементы аналоговой схемотехники. Учебное пособие 2015.]

Домашнее задание

НОВОЕ до 8 ноября

-) Параграф 4.6 изучить до пункта «Импульсные и избирательные усилители» [Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи, 2009]
-) Главы 6, 7 на конспект [Перепёлкин Д.А. - Схемотехника усилительных устройств, 2014]
-) Главы 7, 8, 9 изучить [Опадчий, Глудкин. Аналоговая и цифровая электроника]
-) Главы 1, 3, 4, 5, 6, 13 изучить [Б.Картер, Р. Манчини. Операционные усилители для всех, 2011]
-) Глава 4, пункт 4.1 на конспект [И. Достал. Операционные усилители, 1982]
-) В качестве дополнительной справочной литературы использовать остальные книги из папки «Схемы на операционных усилителях»!