



РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Операционные усилители

Лекция №  
Операционные усилители

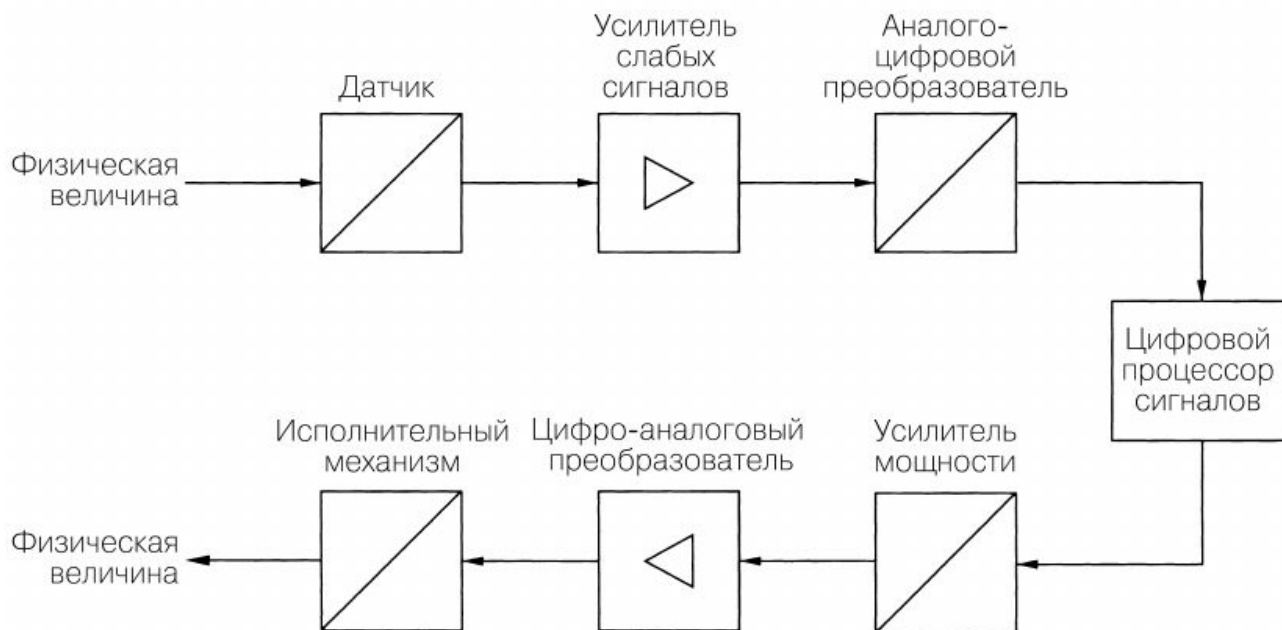


# Усилители. Последовательность устройств для обработки сигнала



Усилители являются важными элементами аналоговых средств обработки сигналов. Они усиливают входной сигнал малой амплитуды настолько, чтобы он обеспечивал функционирование устройства, следующего за усилителем.

В настоящее время для обработки и анализа сложных сигналов все шире применяются цифровые устройства в виде микропроцессоров или цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), цепь обработки сигналов обычно образуют следующие звенья или каскады:



Последовательность устройств для обработки сигнала

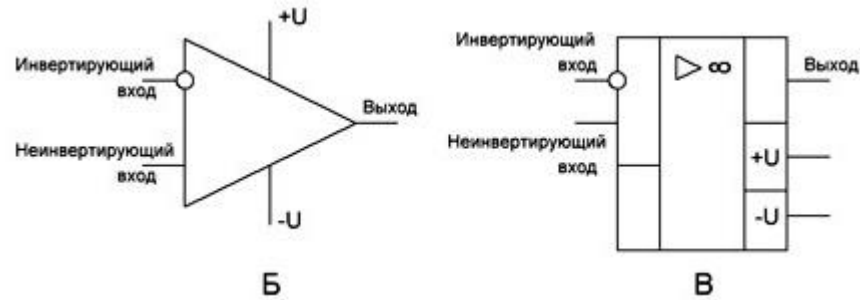
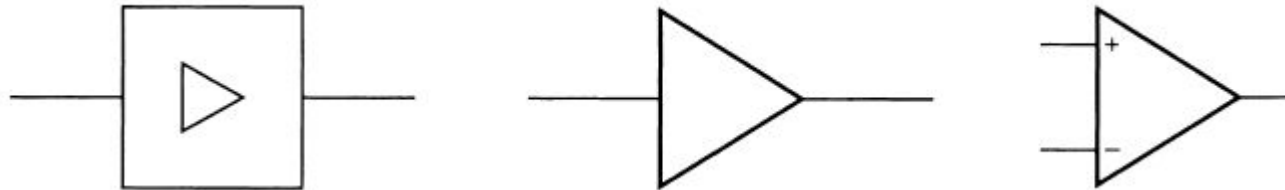


# Усилители. Последовательность устройств для обработки сигнала



1. Датчик, преобразующий физическую величину, например давление воздуха (микрофон), температуру (термоэлемент), свет (фотодиод) или напряженность электромагнитного поля (приемная антенна), в электрический сигнал.
2. Один или несколько каскадов, которые усиливают и фильтруют сигналы.
3. Аналого-цифровой преобразователь для перевода сигнала из аналоговой в цифровую форму.
4. Микропроцессор, ЦСП или другие цифровые устройства, способные обрабатывать оцифрованный сигнал.
5. Цифро-аналоговый преобразователь, на выходе которого формируется аналоговый сигнал.
6. Один или несколько усилителей, которые усиливают и фильтруют сигналы настолько, чтобы их можно было подать на исполнительный элемент.
7. Исполнительный элемент, преобразующий сигнал в физическую величину, например в давление (громкоговоритель), температуру (нагревательный элемент), свет (лампа накаливания) или напряженность электромагнитного поля (передающая антенна).

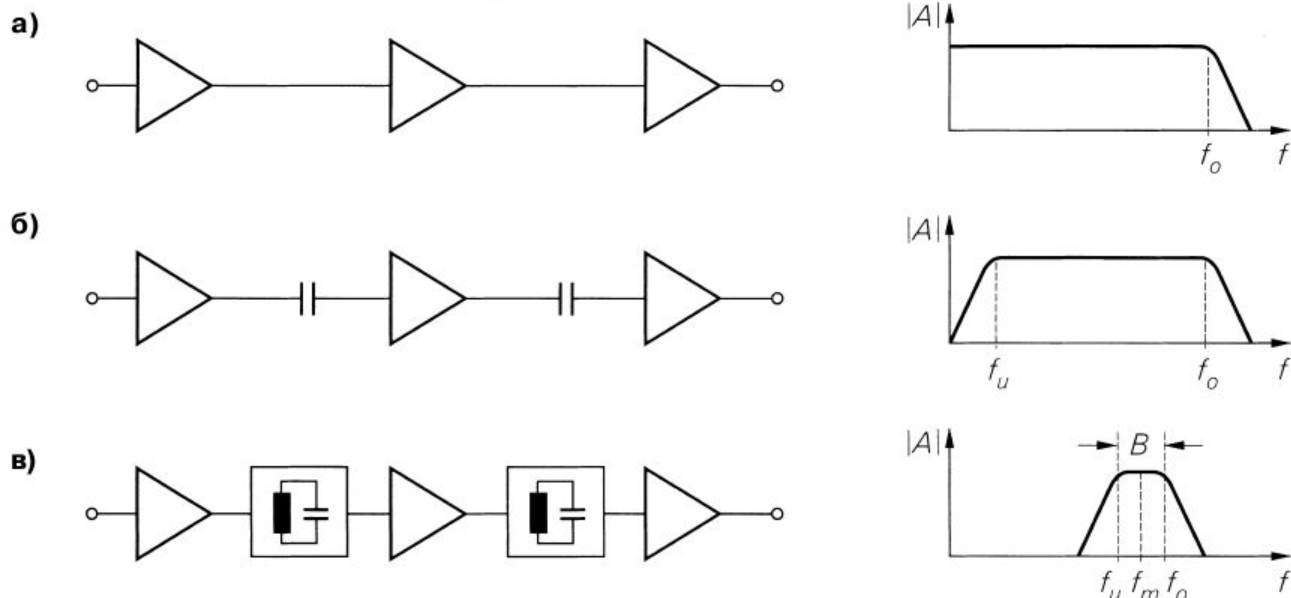
# Графические обозначения усилителей



Условные графические обозначения усилителей



# Способы связи и частотные характеристики усилителей



Способы связи и частотные характеристики усилителей: а – постоянного тока; б – переменного тока; в – узкополосного усилителя

Частотный диапазон служит важнейшей характеристикой усилителя. Нижней граничной частотой  $f_H$  характеризуются усилители переменного тока, верхней граничной частотой  $f_B$  – низкочастотные и высокочастотные усилители, а по значению ширины полосы пропускания  $B = f_B - f_H$  их подразделяют на широко- и узкополосные. От верхней граничной частоты зависит принадлежность устройства к усилителям звуковой частоты (УЗЧ или УНЧ), видеоусилителям, усилителям промежуточной частоты (УПЧ) или радиочастотным (УРЧ). Разделение на усилители постоянного или переменного тока определяется их схемным решением и связью между цепями по постоянному или переменному напряжению. Деление на низко- и высокочастотные устройства неопределенно.

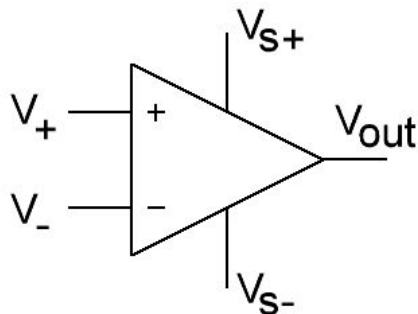
# Операционные усилители - типы

Операционные усилители являются одним из важнейших элементов аналоговой схемотехники.

Использование – в усилителях, измерительных схемах, схемах обратной связи, преобразователях напряжение-ток, ток-напряжение и т.д.

Наиболее часто применяются следующие классы ОУ:

- ОУ общего применения (индустриальные LM324, LM358);
- ОУ с однополярным питанием;
- ОУ с широким диапазоном выходного напряжения – усилители так называемого класса rail-to-rail (R2R).



Условное обозначение  
операционного  
усилителя

$V_+$  - неинвертирующий вход (+);

$V_-$  - инвертирующий вход (-);

$V_{out}$  - ВЫХОД (out);

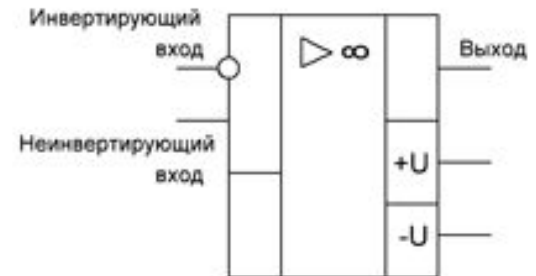
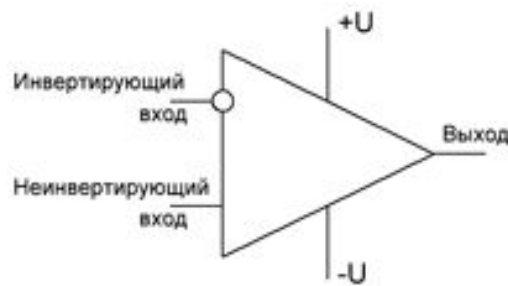
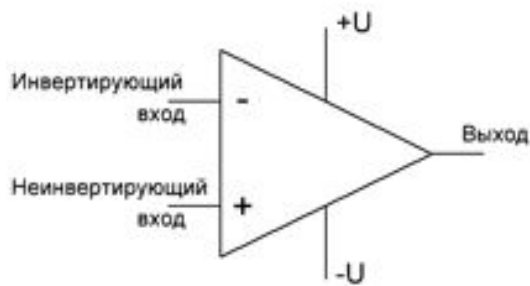
$V_{S+}$ ,  $V_{S-}$  - ВЫВОДЫ ПИТАНИЯ.

# Операционные усилители - типы



Цоколевка микросхемы  
ОУ - пример

Чтобы обеспечить возможность работы операционного усилителя как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, следует использовать двухполярное напряжение питания





# Операционные усилители – отрицательная обратная связь



При отсутствии обратной связи напряжение на выходе  $V_{out}$  в математически идеальном ОУ связано с напряжением на входе следующим образом:

$$V_{out} = (V_+ - V_-) \cdot K_V$$

где:

$V_{out}$  – напряжение на выходе ОУ;

$V_+$  – напряжение на неинвертирующем (+) входе;

$V_-$  – напряжение на инвертирующем (-) входе;

$K_V$  - коэффициент усиления с разомкнутой петлёй обратной связи.

Разность входных напряжений:

$$V_D = (V_+ - V_-)$$

называется дифференциальным входным напряжением.

Полусумма входных  
напряжений

$$V_S = \frac{(V_+ - V_-)}{2}$$

называется синфазным входным напряжением.



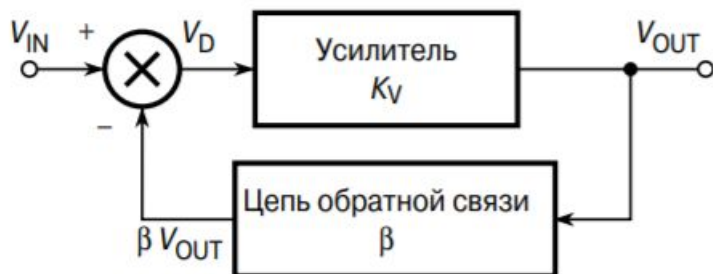


# Операционные усилители – отрицательная обратная связь



Режим без обратной связи практически не используется, а используются схемы с обратной связью, основными из которых являются:

- схема неинвертирующего усилителя;
- схема инвертирующего усилителя;
- схема дифференциального усилителя.



Принцип отрицательной обратной связи

Выход усилителя через цепь обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta$  ( $\beta \leq 1$ ) связан с его входом.

Напряжение, полученное на выходе цепи обратной связи, вычитается из входного напряжения (отрицательная обратная связь):

$$V_{OUT} = K_V V_D = K_V (V_{IN} - \beta V_{OUT})$$

Разрешив это уравнение относительно  $V_{OUT}$ , получим выражение для коэффициента усиления схемы с обратной связью:

$$K = V_{OUT} / V_{IN} = K_V / (1 + \beta K_V)$$

Произведение  $\beta K_V$  носит название петлевого коэффициента усиления.



# Операционные усилители – отрицательная обратная связь



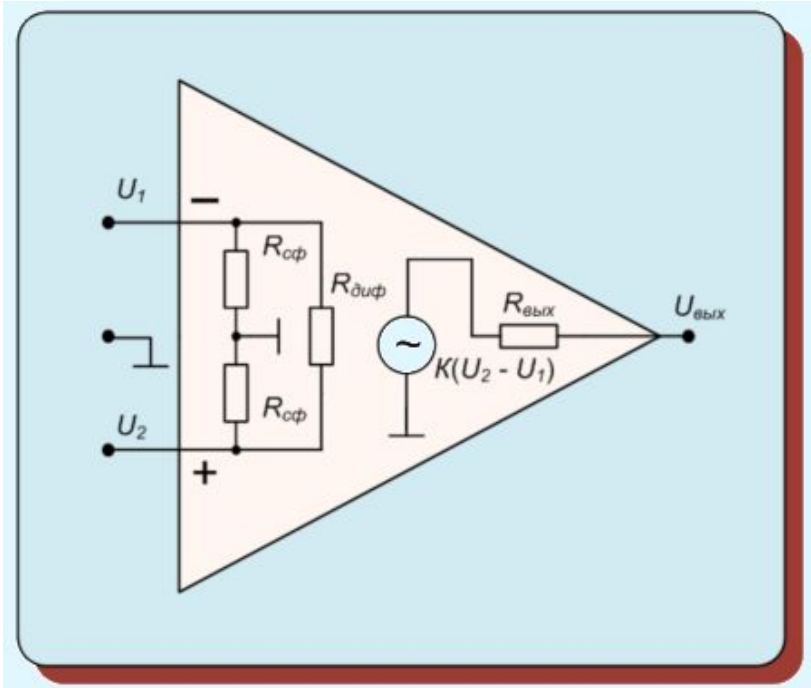
На практике  $K_V \gg 1$  (десятки и сотни тысяч), а значение  $\beta$  лежит в пределах 0.01...1. Тогда  $\beta K_V \gg 1$  и коэффициент усиления ОУ, охваченного обратной связью) составит:

$$K \approx 1/\beta.$$

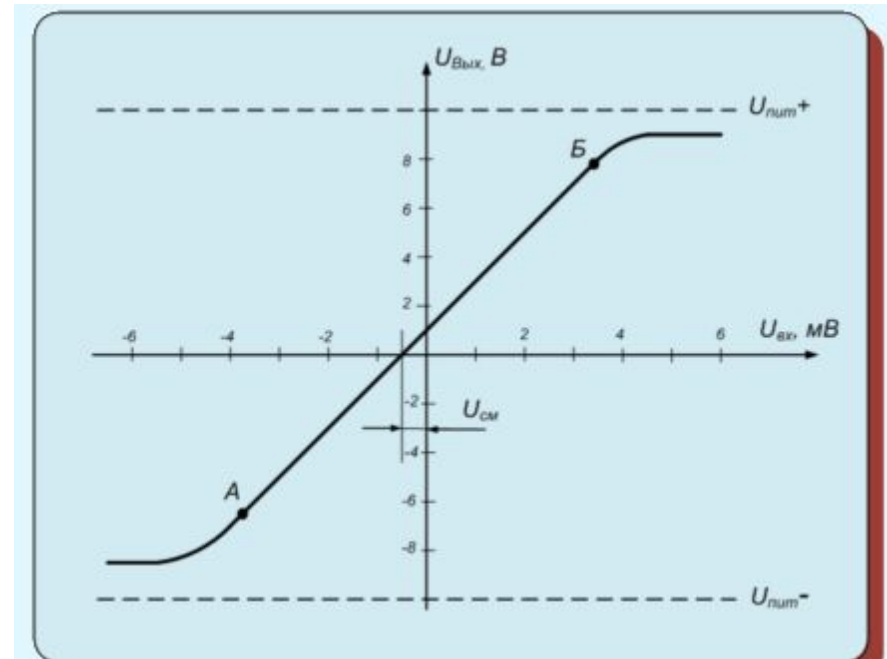
Из этого соотношения следует, что коэффициент усиления схемы с отрицательной обратной связью в основном определяется свойствами внешней цепи обратной связи и практически не зависит от параметров самого усилителя.

В простейшем случае цепь обратной связи представляет собой резистивный делитель напряжения. При этом схема с ОУ работает как линейный усилитель, коэффициент усиления которого определяется только коэффициентом ослабления цепи обратной связи.

# Операционные усилители – Эквивалентная схема

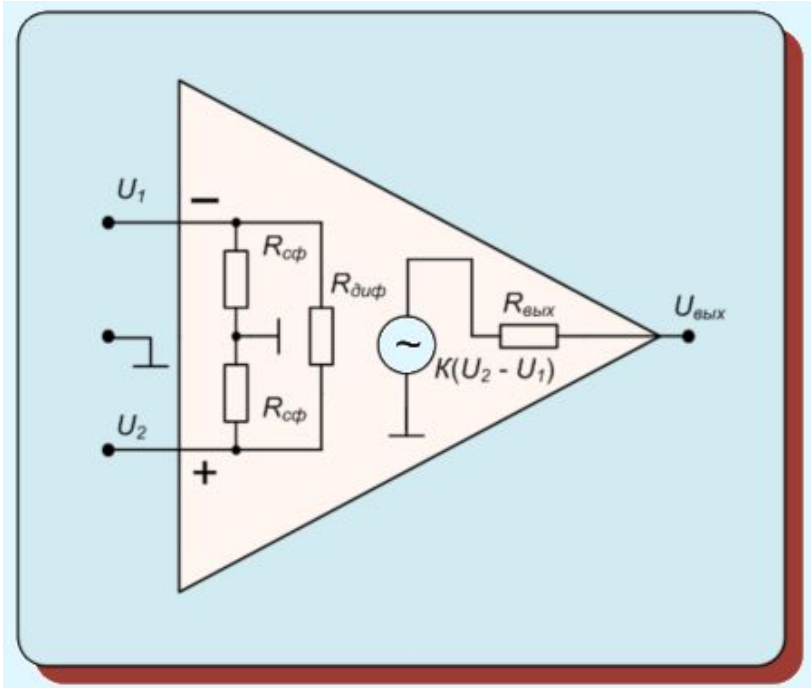


Эквивалентная схема ОУ

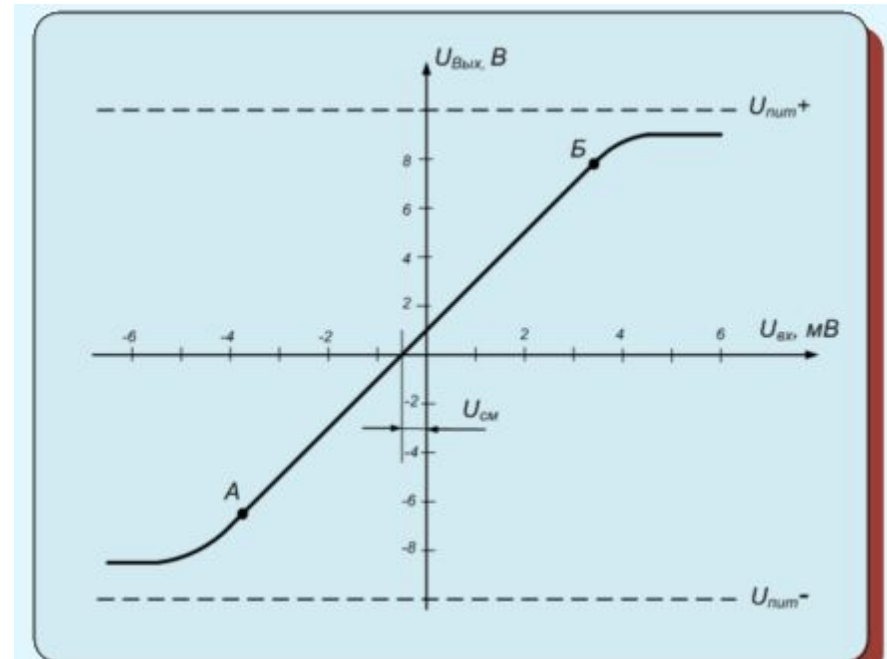


Зависимость выходного  
напряжения ОУ без ОС от  
разности входных  
напряжений

# Операционные усилители – Эквивалентная схема



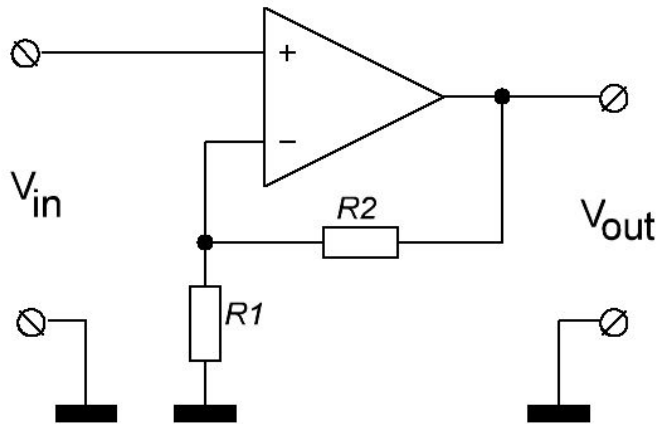
Эквивалентная схема ОУ



Зависимость выходного  
напряжения ОУ без ОС от  
разности входных  
напряжений



# Схема неинвертирующего усилителя

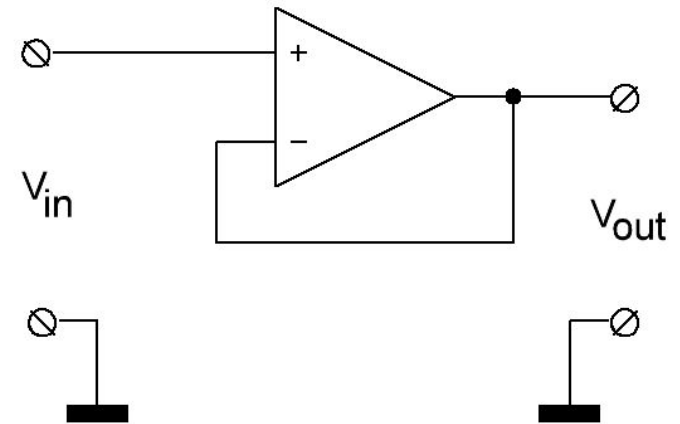


$$V_{out} = V_{in} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

Коэффициент усиления больше единицы

Преимущества схемы неинвертирующего усилителя является :

- высокое входное сопротивление;
- отсутствие инверсии сигнала.

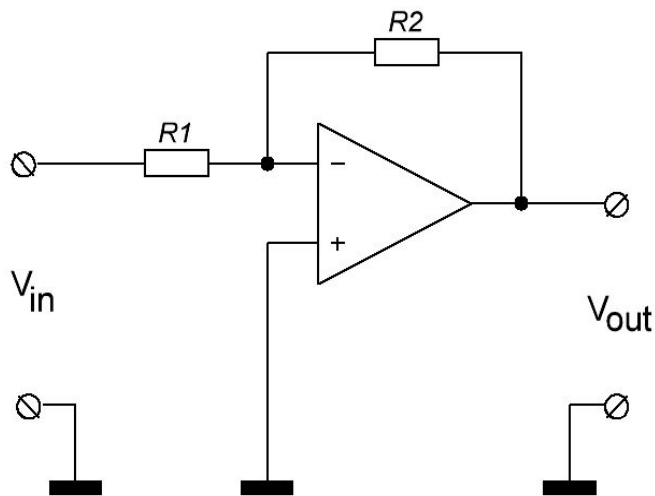


$$V_{out} = V_{in}$$

Коэффициент усиления равен единице

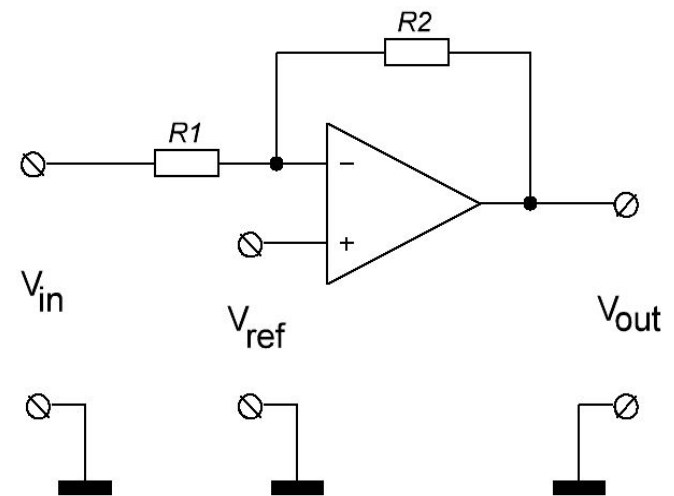


# Схема неинвертирующего усилителя



$$V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R2}{R1} \right)$$

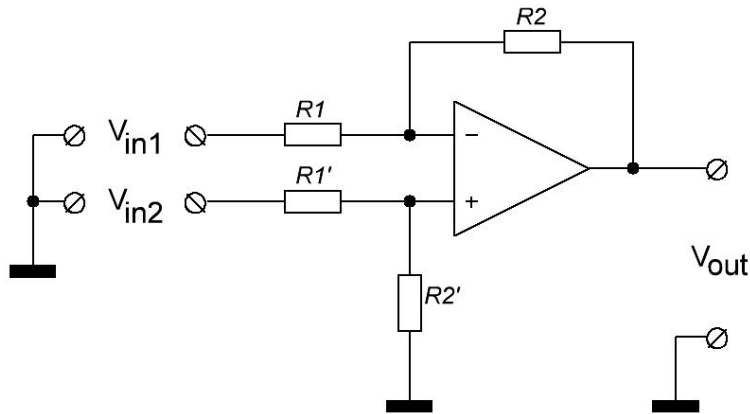
Коэффициент усиления может быть больше единицы, меньше единицы, равен единице



$$V_{out} = V_{ref} \frac{R1+R2}{R1} - V_{in} \frac{R2}{R1}$$

Схема с дополнительным «опорным» напряжением

# Схема дифференциального усилителя



$$V_{out} = V_{in2} \left( \frac{(R2+R1)R2'}{(R2'+R1')R1} \right) - V_{in1} \frac{R2}{R1}$$

Схема  
дифференциального  
усилителя

Схема дифференциального усилителя на ОУ усиливает разность между входными напряжениями. Входное сопротивление схем определяется резистором R1 для входа 1 и суммой сопротивлений R1' и R2' для входа 2. В данной схеме перестановка входных сигналов местами изменяет результат – выходное напряжение. И лишь при равенстве сопротивлений резисторов:

$$R2 = R2'$$
$$R1 = R1'$$

Выходное напряжение  
равно:

$$V_{out} = (V_{in2} - V_{in1}) \frac{R2}{R1}$$



# Базовые свойства операционных усилителей



Для обеспечения достаточной устойчивости и выполнения математических операций над сигналами с высокой точностью реальный операционный усилитель должен обладать следующими свойствами:

- высоким коэффициентом усиления по напряжению, в том числе и в области нулевых частот; малым напряжением смещения нуля;
- малыми входными токами по обоим входам;
- высокими входными сопротивлениями по обоим входам;
- низким выходным сопротивлением;
- малое смещение нуля ОУ;
- амплитудно-частотной характеристикой с наклоном в области высоких частот – 20 дБ/дек вплоть до частоты единичного усиления  $f_T$ .





# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358



**LM158,A-LM258,A  
LM358,A**

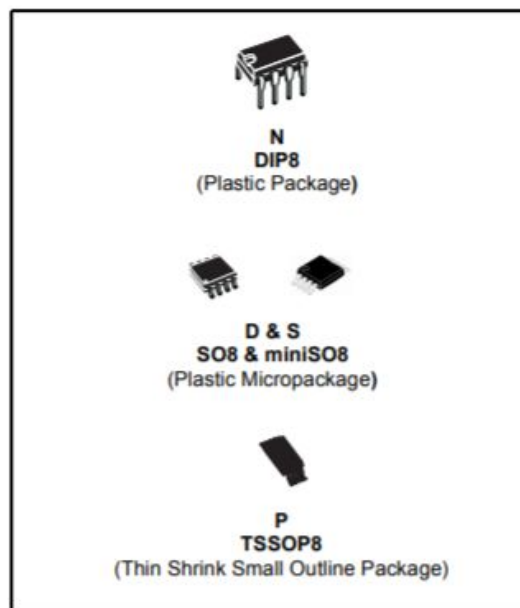
## LOW POWER DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS

- INTERNALLY FREQUENCY COMPENSATED
- LARGE DC VOLTAGE GAIN: 100dB
- WIDE BANDWIDTH (unity gain): 1.1MHz (temperature compensated)
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/OP (500µA) ESSENTIALLY INDEPENDENT OF SUPPLY VOLTAGE
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 20nA (temperature compensated)
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE: 2mV
- LOW INPUT OFFSET CURRENT: 2nA
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- DIFFERENTIAL INPUT VOLTAGE RANGE EQUAL TO THE POWER SUPPLY VOLTAGE
- LARGE OUTPUT VOLTAGE SWING 0V TO (V<sub>cc</sub> - 1.5V)

### DESCRIPTION

These circuits consist of two independent, high gain, internally frequency compensated which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. The low power supply drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op-amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, these circuits can be directly supplied with the standard +5V which is used in logic systems and will easily provide the required interface electronics without requiring any additional power supply. In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.



### ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package			
		N	S	D	P
LM158,A	-55°C, +125°C	•		•	•
LM258,A	-40°C, +105°C	•		•	•
LM358,A	0°C, +70°C	•	•	•	•

**Example : LM258N**

N = Dual in Line Package (DIP)  
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)  
S = Small Outline Package (miniSO) only available in Tape & Reel (DT)  
P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)



## LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers

### 1 Features

- Available in 8-Bump DSBGA Chip-Sized Package, (See AN-1112, [SNVA009](#))
- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain: 100 dB
- Wide Bandwidth (Unity Gain): 1 MHz (Temperature Compensated)
- Wide Power Supply Range:
  - Single Supply: 3V to 32V
  - Or Dual Supplies:  $\pm 1.5V$  to  $\pm 16V$
- Very Low Supply Current Drain (500  $\mu A$ )—Essentially Independent of Supply Voltage
- Low Input Offset Voltage: 2 mV
- Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground
- Differential Input Voltage Range Equal to the Power Supply Voltage
- Large Output Voltage Swing
- Unique Characteristics:
  - In the Linear Mode the Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground and the Output Voltage Can Also Swing to Ground, even though Operated from Only a Single Power Supply Voltage.
  - The Unity Gain Cross Frequency is Temperature Compensated.
  - The Input Bias Current is also Temperature Compensated.
- Advantages:
  - Two Internally Compensated Op Amps
  - Eliminates Need for Dual Supplies
  - Allows Direct Sensing Near GND and  $V_{OUT}$  Also Goes to GND
  - Compatible with All Forms of Logic
  - Power Drain Suitable for Battery Operation

### 3 Description

The LM158 series consists of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op-amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM158 series can be directly operated off of the standard 3.3-V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional  $\pm 15V$  power supplies.

The LM358 and LM2904 are available in a chip sized package (8-Bump DSBGA) using TI's DSBGA package technology.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
LM158-N	TO-CAN (8)	9.08 mm x 9.09 mm
	CDIP (8)	10.16 mm x 6.502 mm
LM258-N	TO-CAN (8)	9.08 mm x 9.09 mm
LM2904-N	DSBGA (8)	1.31 mm x 1.31 mm
	SOIC (8)	4.90 mm x 3.91 mm
	PDIP (8)	9.81 mm x 6.35 mm
LM358-N	TO-CAN (8)	9.08 mm x 9.09 mm
	DSBGA (8)	1.31 mm x 1.31 mm
	SOIC (8)	4.90 mm x 3.91 mm
	PDIP (8)	9.81 mm x 6.35 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the datasheet.

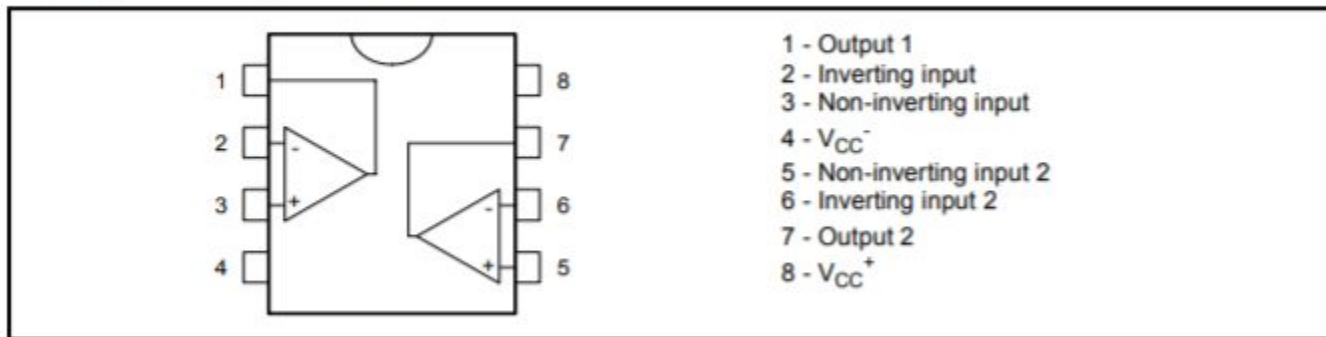
#### Voltage Controlled Oscillator (VCO)

дБ	Отношение тока или напряжения	Отношение мощности
0	1,000	1,000
0,1	1,012	1,023
0,2	1,023	1,047
0,3	1,035	1,072
0,4	1,047	1,096
0,5	1,059	1,122
0,6	1,072	1,148
0,8	1,096	1,202
1,0	1,122	1,259
1,5	1,189	1,413
2,0	1,259	1,585
2,5	1,334	1,778
3,0	1,413	1,995
3,5	1,496	2,239
4,0	1,585	2,512
4,5	1,679	2,818
5,0	1,778	3,162
6,0	1,995	3,981
7,0	2,239	5,012
8,0	2,512	6,310
9,0	2,818	7,943
10	3,162	10,000
11	3,55	12,6
12	3,98	15,9
13	4,47	20,0
14	5,01	25,1
15	5,62	31,6
16	6,31	39,8
18	7,94	63,1
20	10,0	100,0
30	31,6	1000,0
40	100,0	10 <sup>4</sup>
50	316,0	10 <sup>5</sup>
60	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>
70	3160,0	10 <sup>7</sup>
80	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>
90	3,16*10 <sup>4</sup>	10 <sup>9</sup>
100	10 <sup>5</sup>	10 <sup>10</sup>

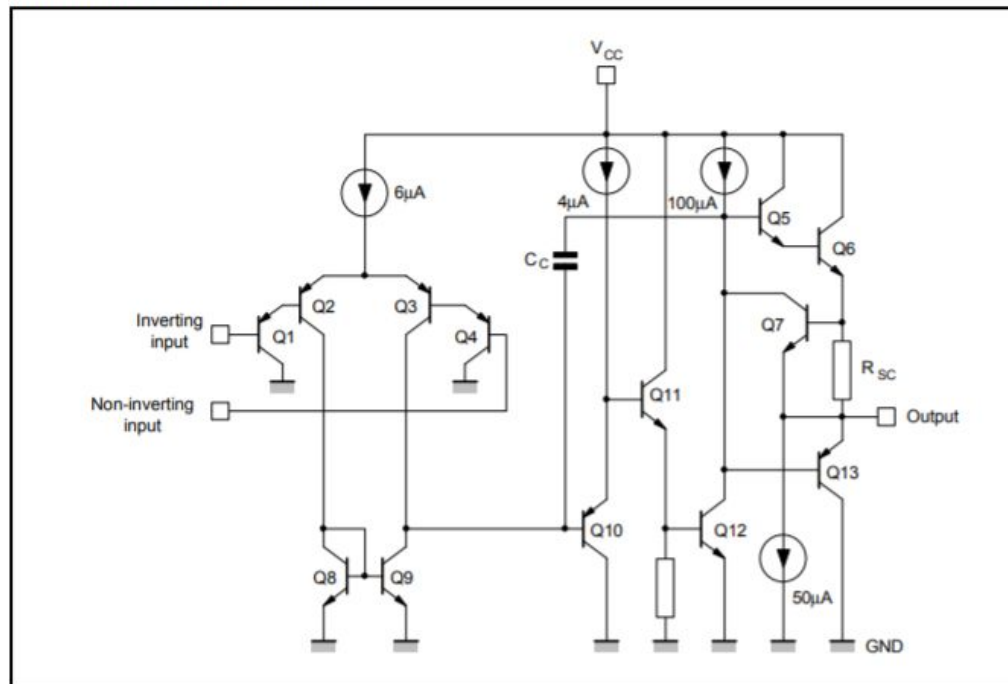


# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358

## PIN CONNECTIONS (top view)



## SCHEMATIC DIAGRAM (1/2 LM158)





# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358



## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	LM158,A	LM258,A	LM358,A	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage	+/-16 or 32			V
$V_i$	Input Voltage	-0.3 to +32			V
$V_{id}$	Differential Input Voltage	+32			V
$P_{tot}$	Power Dissipation <sup>1)</sup>	500			mW
	Output Short-circuit Duration <sup>2)</sup>	Infinite			
$I_{in}$	Input Current <sup>3)</sup>	50			mA
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-65 to +150			°C

1. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature (T<sub>J</sub>) is not exceeded.
2. Short-circuits from the output to  $V_{CC}$  can cause excessive heating if  $V_{CC} > 15V$ . The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of  $V_{CC}$ . Destructive dissipation can result from simultaneous short-circuit on all amplifiers.
3. This input current only exists when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistor becoming forward biased and thereby acting as input diodes clamps. In addition to this diode action, there is also NPN parasitic action on the IC chip. this transistor action can cause the output voltages of the Op-amps to go to the  $V_{CC}$  voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration than an input is driven negative.  
This is not destructive and normal output will set up again for input voltage higher than -0.3V.



# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358



LM158,A-LM258,A-LM358,A

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC}^+ = +5V$ ,  $V_{CC}^- = \text{Ground}$ ,  $V_o = 1.4V$ ,  $T_{amb} = +25^\circ C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	LM158A-LM258A LM358A			LM158-LM258 LM358			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
$V_{io}$	Input Offset Voltage - note <sup>1)</sup> $T_{amb} = +25^\circ C$		1	3		2	7	mV
	LM158, LM258 LM158A			2			5	
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			4			9	
	LM158, LM258						7	
$I_{io}$	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$		2	10		2	30	nA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			30			40	
$I_{ib}$	Input Bias Current - note <sup>2)</sup> $T_{amb} = +25^\circ C$		20	50		20	150	nA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			100			200	
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain $V_{CC} = +15V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = 1.4V$ to $11.4V$ $T_{amb} = +25^\circ C$	50	100		50	100		V/mV
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	25			25			
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $V_{CC}^+ = 5V$ to $30V$ $T_{amb} = +25^\circ C$	65	100		65	100		dB
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	65			65			



# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358

$I_{CC}$	Supply Current, all Amp, no load $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +5V$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +30V$		0.7	1.2		0.7	1.2	mA
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range $V_{CC} = +30V$ - note <sup>3)</sup> $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0 0		$V_{CC}^{+} - 1.5$ $V_{CC}^{+} - 2$	0 0		$V_{CC}^{+} - 1.5$ $V_{CC}^{+} - 2$	V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 60	85		70 60	85		dB
$I_{source}$	Output Current Source $V_{CC} = +15V, V_o = +2V, V_{id} = +1V$	20	40	60	20	40	60	mA
$I_{sink}$	Output Sink Current ( $V_{id} = -1V$ ) $V_{CC} = +15V, V_o = +2V$ $V_{CC} = +15V, V_o = +0.2V$	10 12	20 50		10 12	20 50		mA $\mu A$
$V_{OPP}$	Output Voltage Swing ( $R_L = 2k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0 0		$V_{CC}^{+} - 1.5$ $V_{CC}^{+} - 2$	0 0		$V_{CC}^{+} - 1.5$ $V_{CC}^{+} - 2$	



# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358



## LM158,A-LM258,A-LM358,A

Symbol	Parameter	LM158A-LM258A LM358A			LM158-LM258 LM358			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
$V_{OH}$	High Level Output Voltage ( $V_{CC}^+ = 30V$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $R_L = 2k\Omega$	26	27		26	27		V
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $R_L = 10k\Omega$	26 27 27	28		26 27 27	28		
$V_{OL}$	Low Level Output Voltage ( $R_L = 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	20 20		5	20 20	mV
SR	Slew Rate $V_{CC} = 15V, V_i = 0.5$ to $3V, R_L = 2k\Omega,$ $C_L = 100pF$ , unity Gain	0.3	0.6		0.3	0.6		$V/\mu s$
GBP	Gain Bandwidth Product $V_{CC} = 30V, f = 100kHz, V_{in} = 10mV, R_L = 2k\Omega,$ $C_L = 100pF$	0.7	1.1		0.7	1.1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2k\Omega, V_o = 2V_{pp},$ $C_L = 100pF, V_o = 2V_{pp}$		0.02			0.02		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_s = 100\Omega, V_{CC} = 30V$		55			55		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
$DV_{io}$	Input Offset Voltage Drift		7	15		7	30	$\mu V/^\circ C$
$DI_{io}$	Input Offset Current Drift		10	200		10	300	$pA/^\circ C$
$V_{o1}/V_{o2}$	Channel Separation - note 4) $1kHz \leq f \leq 20kHz$		120			120		dB

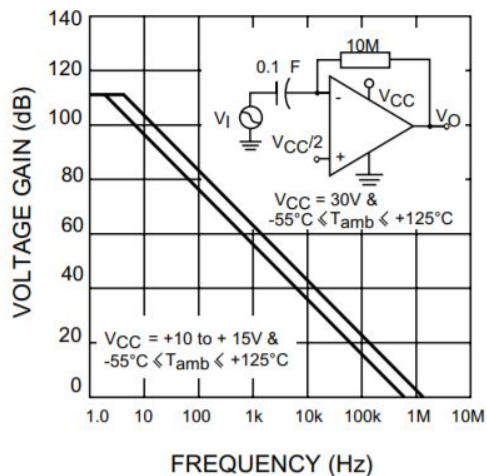
- $V_o = 1.4V, R_s = 0\Omega, 5V < V_{CC}^+ < 30V, 0 < V_{ic} < V_{CC}^+ - 1.5V$
- The direction of the input current is out of the IC. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The upper end of the common-mode voltage range is  $V_{CC}^+ - 1.5V$ , but either or both inputs can go to +32V without damage.
- Due to the proximity of external components insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.



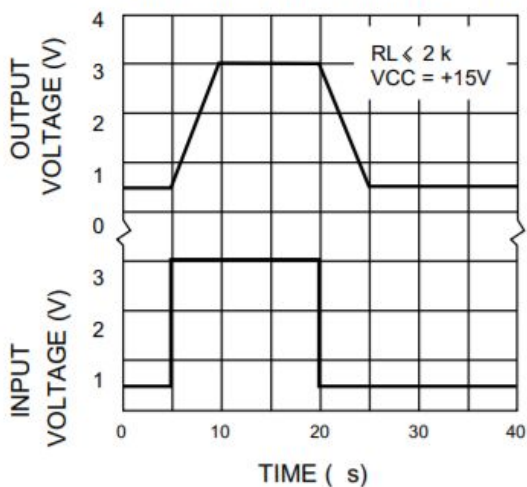
# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358



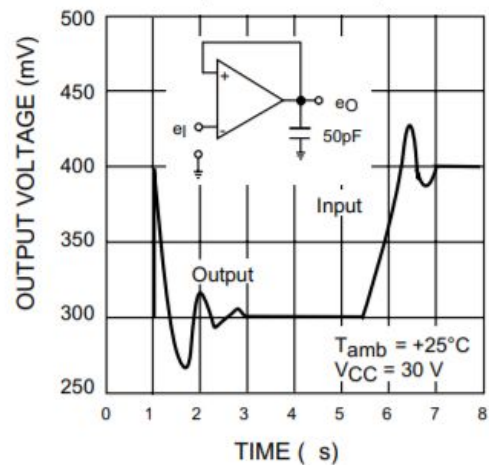
OPEN LOOP FREQUENCY RESPONSE (NOTE 3)



VOLAGE FOLLOWER PULSE RESPONSE



VOLTAGE FOLLOWER PULSSE RESPONSE  
(SMALL SIGNAL)







# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358

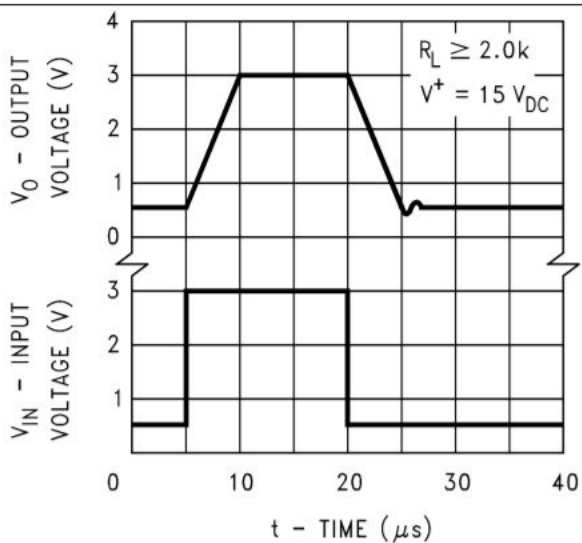


Figure 7. Voltage Follower Pulse Response

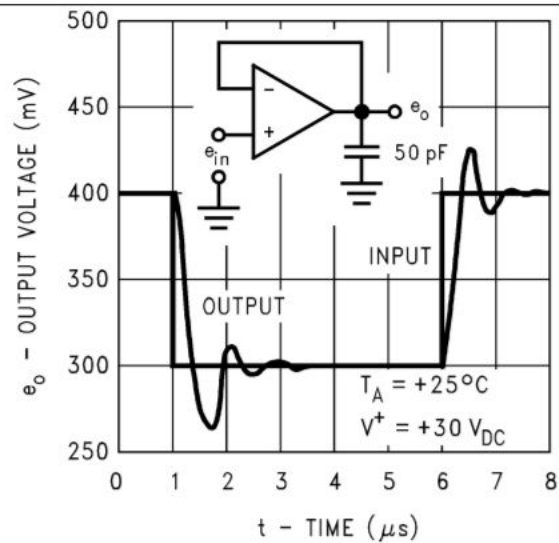


Figure 8. Voltage Follower Pulse Response (Small Signal)

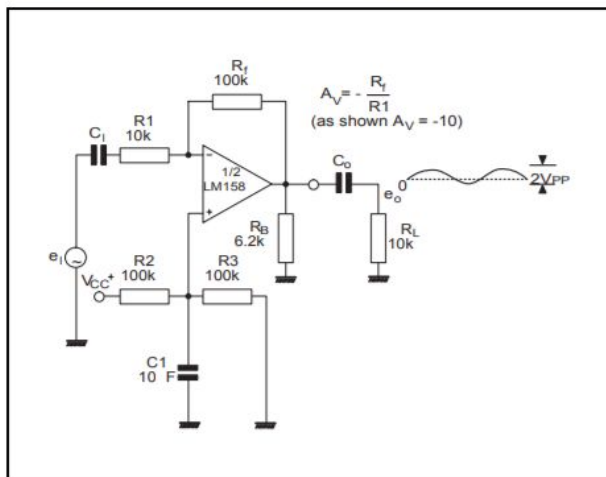


# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358

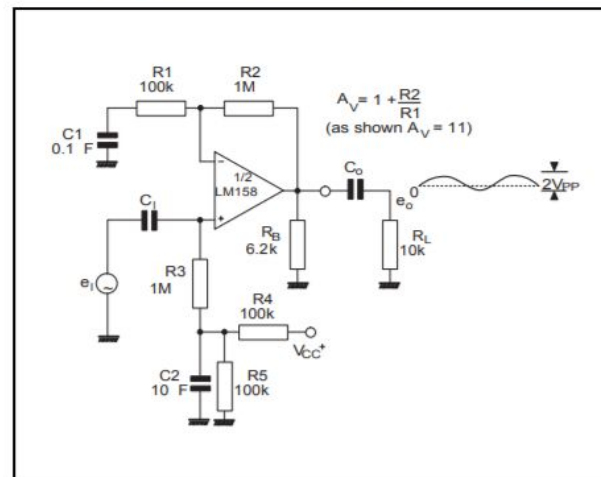


**TYPICAL APPLICATIONS** (single supply voltage)  $V_{CC} = +5V_{dc}$

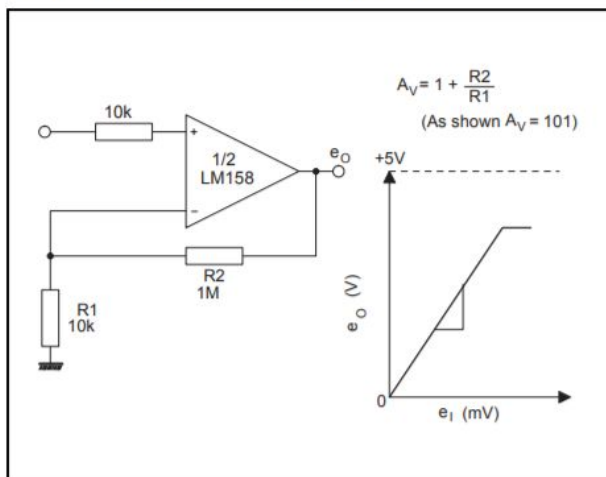
**AC COUPLED INVERTING AMPLIFIER**



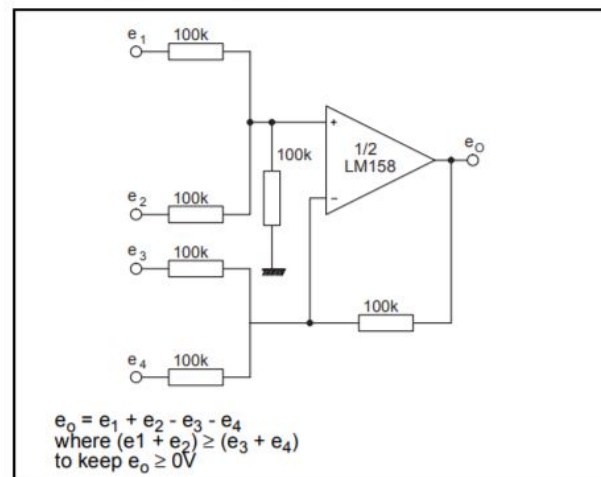
**AC COUPLED NON-INVERTING AMPLIFIER**



**NON-INVERTING DC AMPLIFIER**



**DC SUMMING AMPLIFIER**

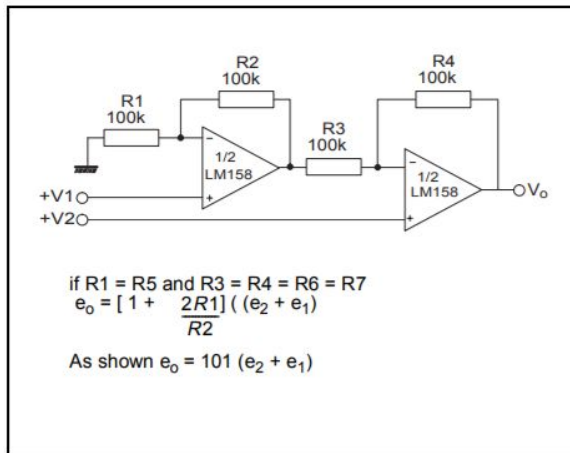




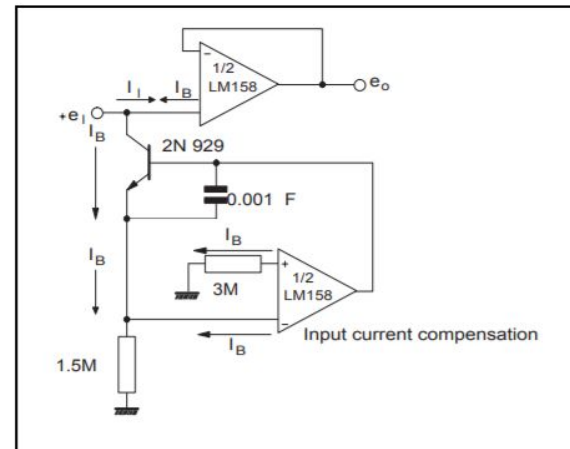
# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358



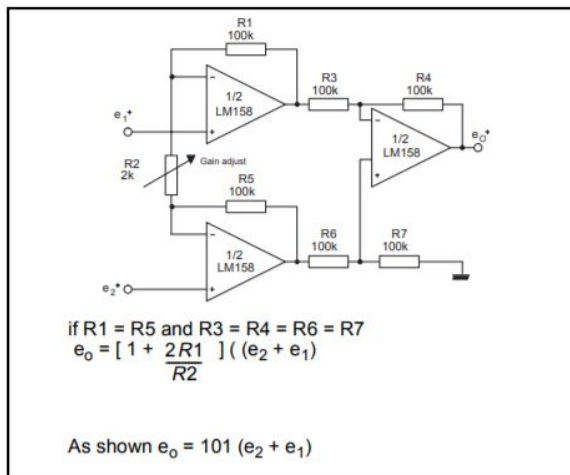
### HIGH INPUT Z, DC DIFFERENTIAL AMPLIFIER



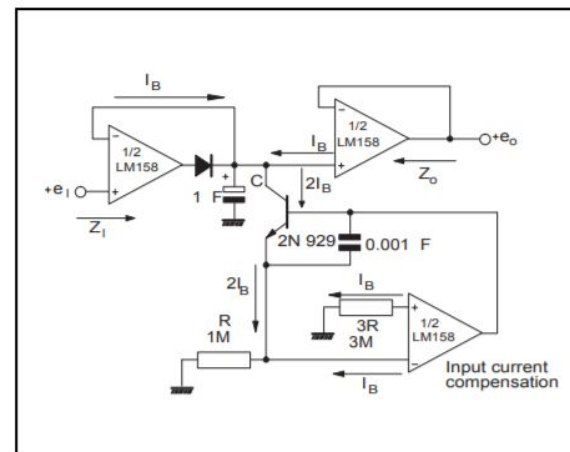
### USING SYMMETRICAL AMPLIFIERS TO REDUCE INPUT CURRENT



### HIGH INPUT Z ADJUSTABLE GAIN DC INSTRUMENTATION AMPLIFIER

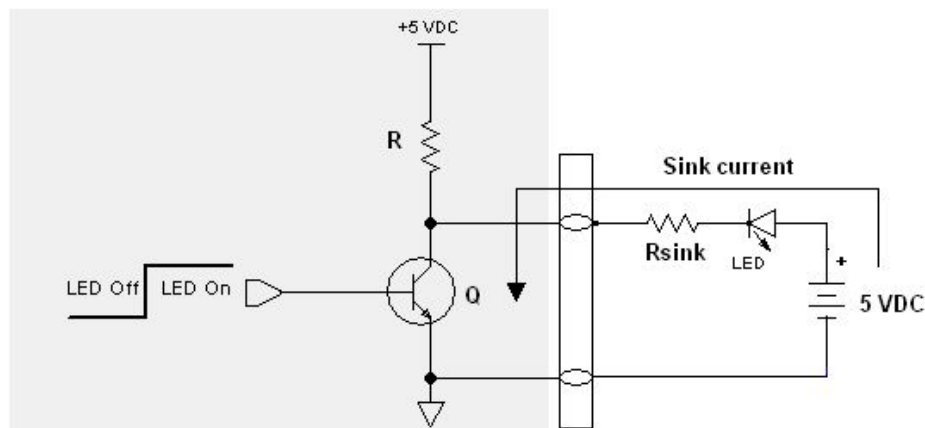
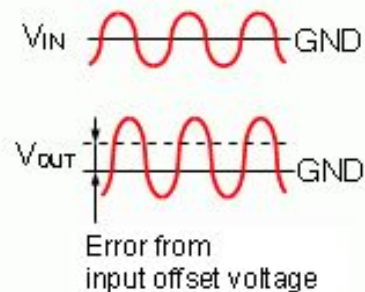
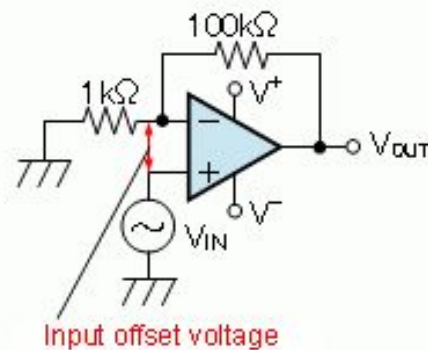
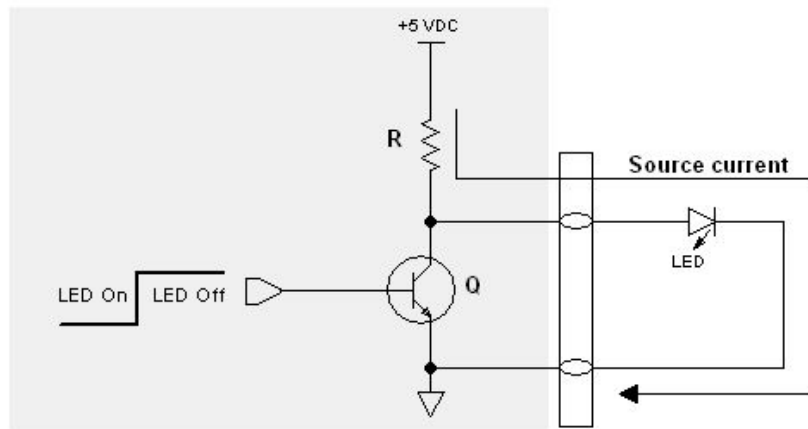


### LOW DRIFT PEAK DETECTOR



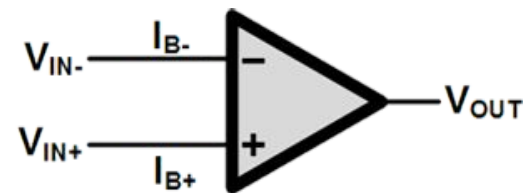


# Пример datasheet-а операционного усилителя – LM358



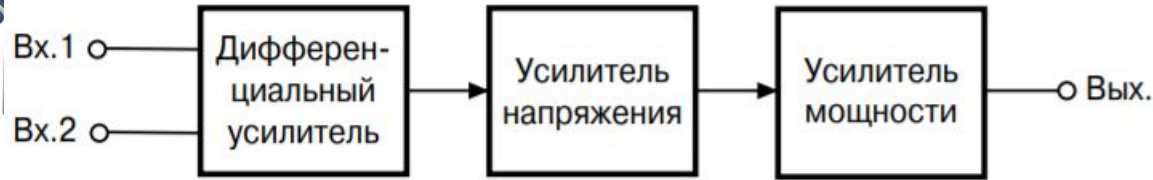
$$I_B = (I_{B+} + I_{B-})/2$$

$$I_{OS} = I_{B+} - I_{B-}$$





# Внутренняя схемотехника операционных усилителей



Блок-схема ОУ

$$K_{\text{диф}} = \frac{\beta R_C \parallel r_c}{2[r_B + (1 + \beta)r_E]} \approx \frac{R_C}{2r_E},$$

$$K_{\text{синф}} \approx -\frac{R_C}{2R_E + r_E}.$$

$$K_{\text{ООС}} = \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{синф}}} \approx \frac{R_E}{r_E}.$$

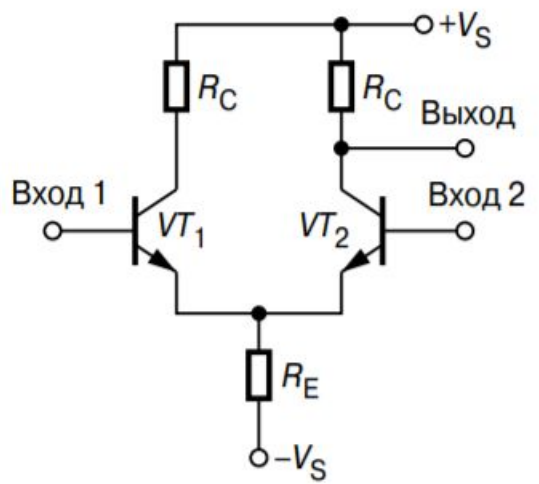
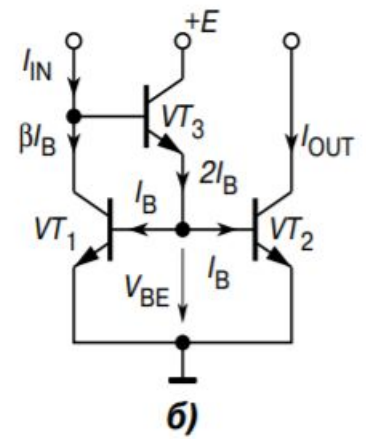
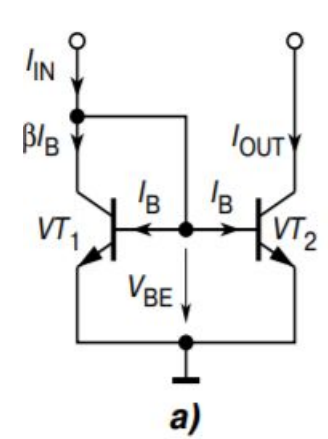


Схема дифференциального усилительного каскада



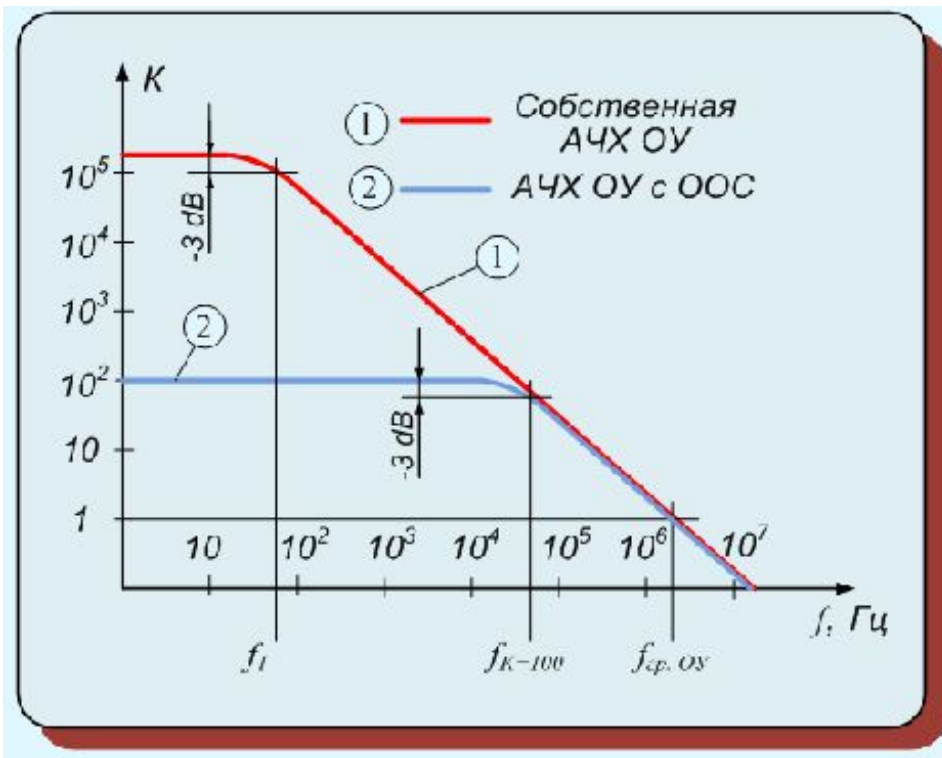
Схемы токовых зеркал



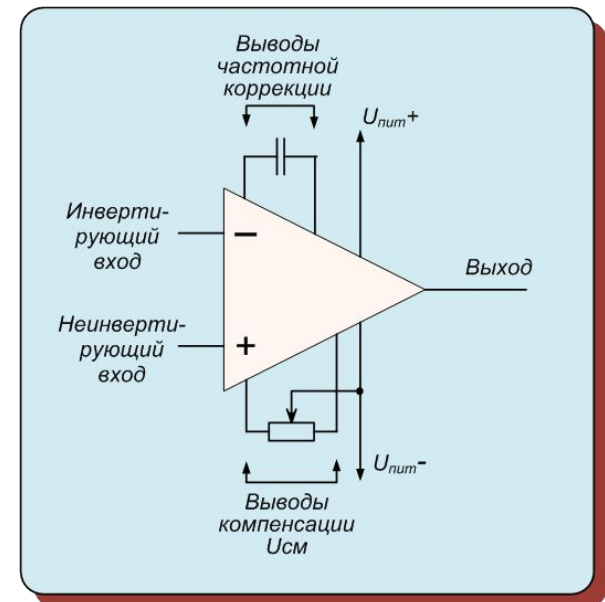
# Внутренняя схемотехника операционных усилителей

$f_T$  - частота единичного усиления ( $K_V = 1$ )

$$K_{\omega} f_{\Pi} = f_T.$$



Типичная ЛАЧХ операционного усилителя без ООС и с ООС



Внешний конденсатор для коррекции АЧХ



# Типы операционных усилителей



Большая часть номенклатуры ОУ относится к усилителям общего назначения.

Это дешевые усилители среднего быстродействия, невысокой точности и малой выходной мощности. Обычные параметры:  $K_V = 20000 \dots 200000$ ;  $V_{OFF} = 0.1 \dots 20$  мВ;  $f_T = 0.1 \dots 10$  МГц. Типичные представители: 140УД6, 140УД8, 153УД6,

LF411.  
Быстродействующие усилители при средних точностных параметрах имеют высокие динамические характеристики ( $f_T = 20 \dots 1000$  МГц,  $\sigma = 10 \dots 1000$  В/мкс).

Прецизионные усилители имеют высокий дифференциальный коэффициент усиления по напряжению, малые напряжения смещения нуля, малые входные токи и, как правило, низкое быстродействие.

Микромощные усилители используются в приборах, получающих питание от гальванических или аккумуляторных батарей. Эти усилители потребляют очень малый ток от источников питания (например, ОУ MAX406 потребляет ток не более 1.2 мкА). Все другие параметры (особенно быстродействие) у них обычно невысокие.

Если источник сигнала — однополярный (например, фотодиод), целесообразно использовать операционный усилитель с однополярным питанием. Это позволит питать усилитель от одной батареи или даже элемента, например от литиевого элемента напряжением 3 В.

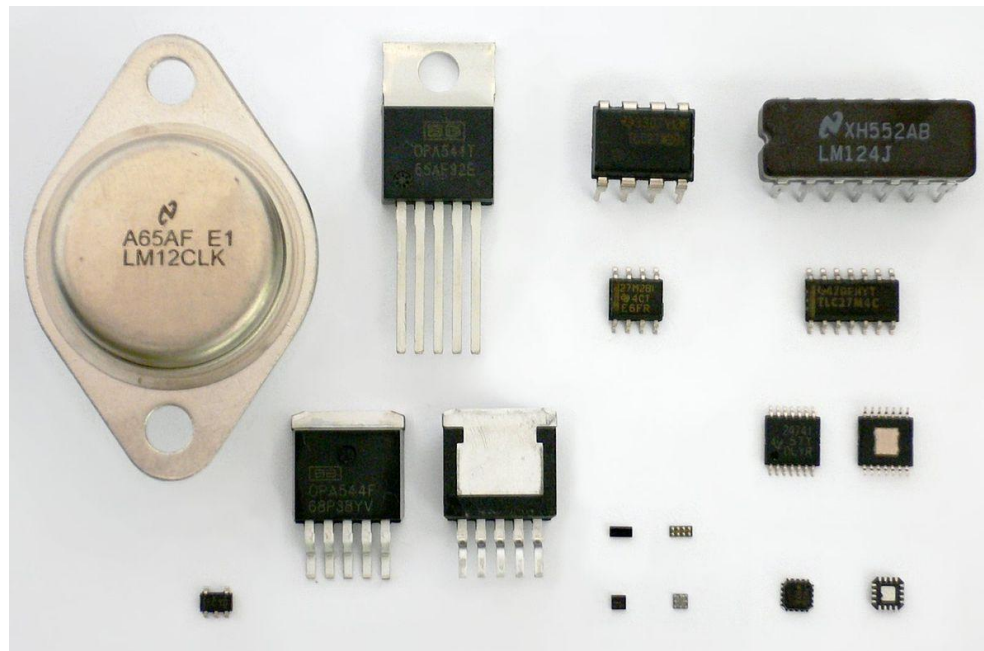




# Типы операционных усилителей



Мощные и высоковольтные операционные усилители. Большинство типов ОУ общего применения рассчитаны на напряжение питания  $\pm 15$  В, некоторые допускают питание от источников вплоть до  $\pm 22$  В. Однако этого совершенно недостаточно для управления, например, пьезоэлектрическими преобразователями, которые применяются в ряде физических и биологических исследований.





# Типы операционных усилителей



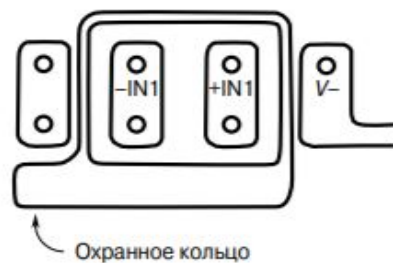
Мощные и высоковольтные операционные усилители. Большинство типов ОУ общего применения рассчитаны на напряжение питания  $\pm 15$  В, некоторые допускают питание от источников вплоть до  $\pm 22$  В. Однако этого совершенно недостаточно для управления, например, пьезоэлектрическими преобразователями, которые применяются в ряде физических и биологических исследований.



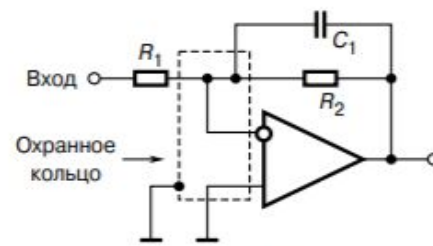
# Снижение токов утечки операционных усилителей



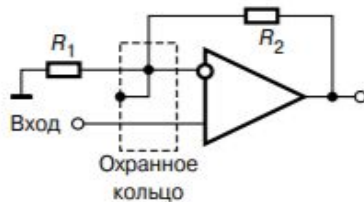
Во многих случаях (в интеграторах, усилителях сигналов пьезодатчиков и др.) требуются усилители с малыми входными токами. Для этого выпускается длинный ряд моделей ОУ с входными каскадами на супербета и полевых транзисторах, входные токи которых составляют доли нА, а для некоторых типов — доли пА. Для успешного применения таких ОУ следует решить проблемы, связанные с утечкой токов по поверхности печатной платы.



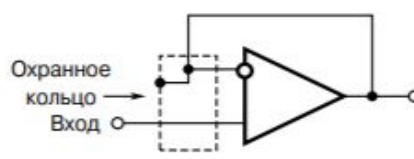
а)



б)



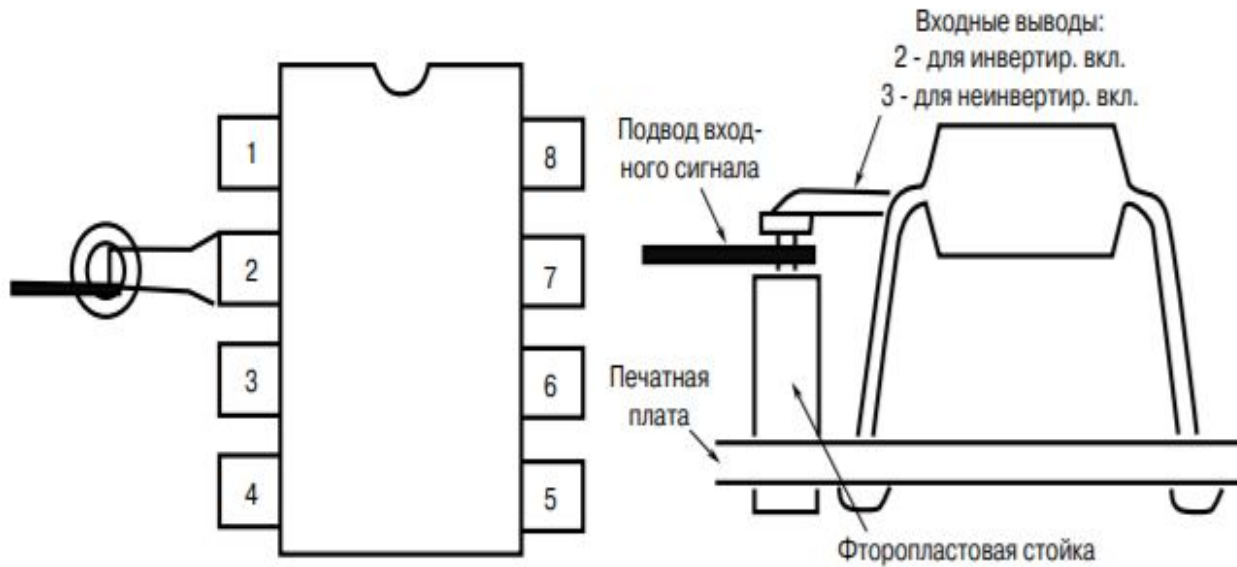
в)



г)

Охранное кольцо: а — топология, б ... г — способы его подключения

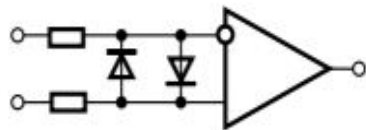
# Снижение токов утечки операционных усилителей



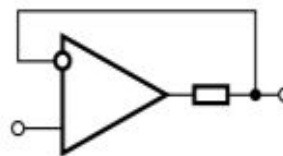
Способ подключения внешних цепей непосредственно к входному выводу ОУ для снижения токов утечки



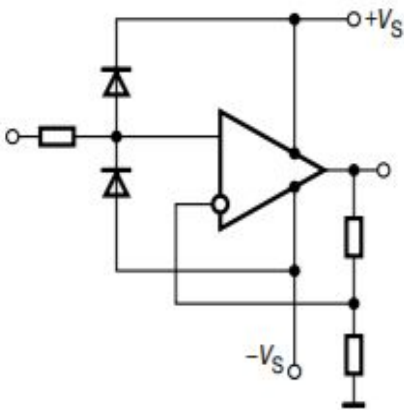
# Способы защиты операционных усилителей



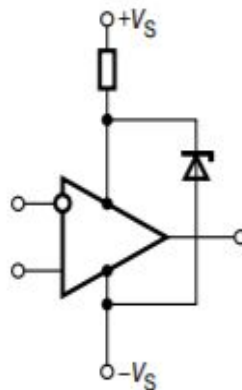
а)



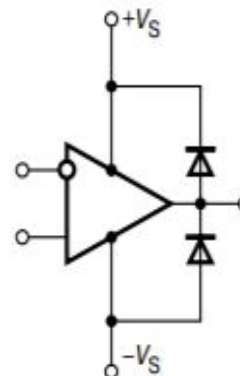
б)



в)



г)



д)

Схемы защиты ОУ:

а — схема диодной сборки BAV99,

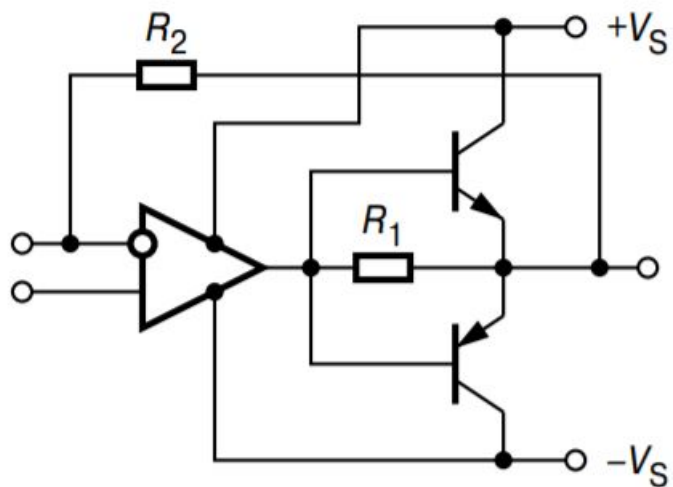
б — защита от КЗ на выходе,

в — защита от синфазного перенапряжения,

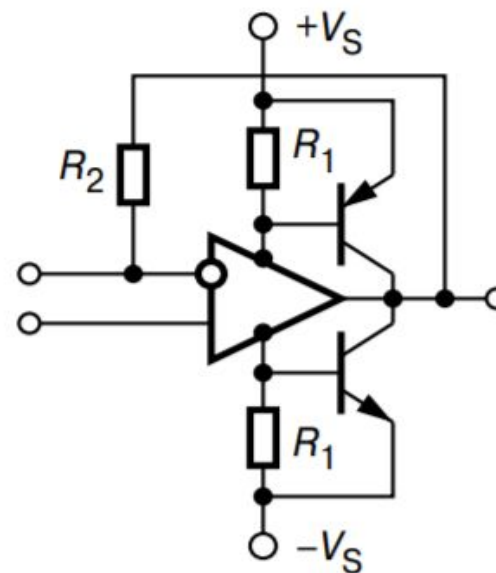
г — защита от перенапряжения питания,

д — защита от перенапряжения на выходе

# Повышение выходного тока ОУ



Увеличение выходного тока ОУ с помощью эмиттерного повторителя на комплементарных транзисторах



Схема, в которой внешние уможняющие транзисторы образуют с транзисторами выходного каскада ОУ комплементарные схемы Дарлингтона

# Схема прецизионного двухполупериодного выпрямителя

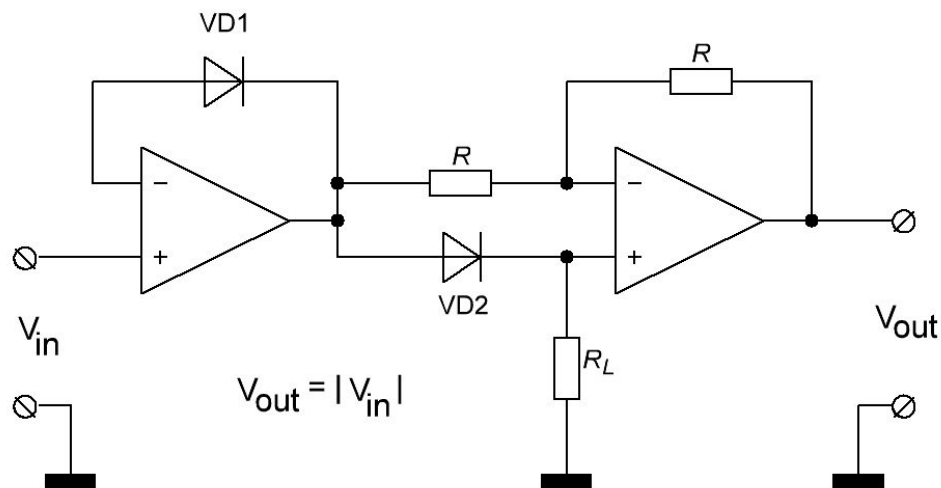
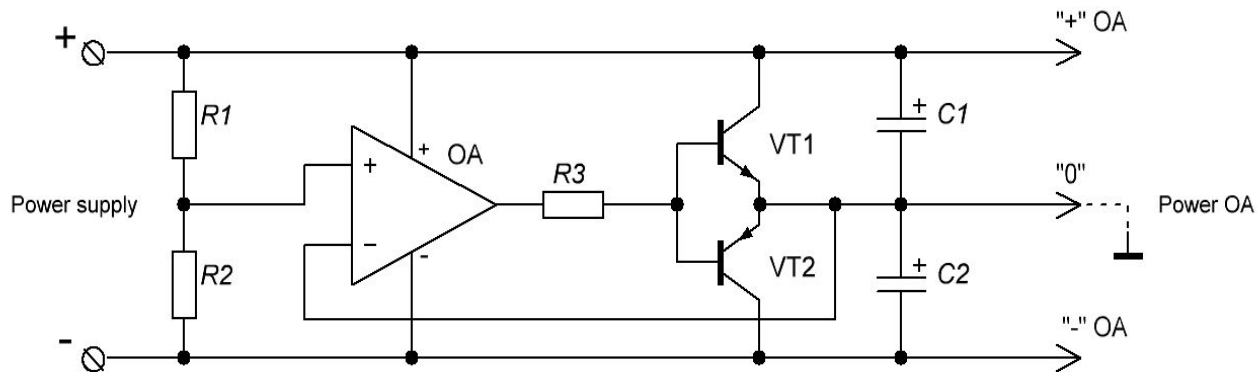
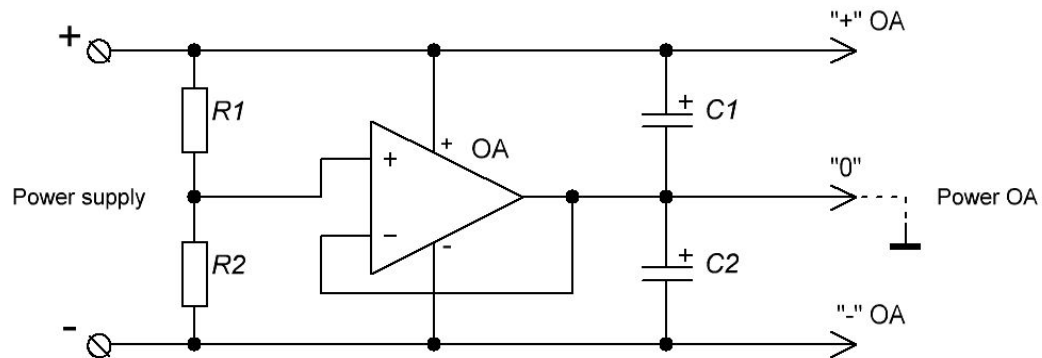
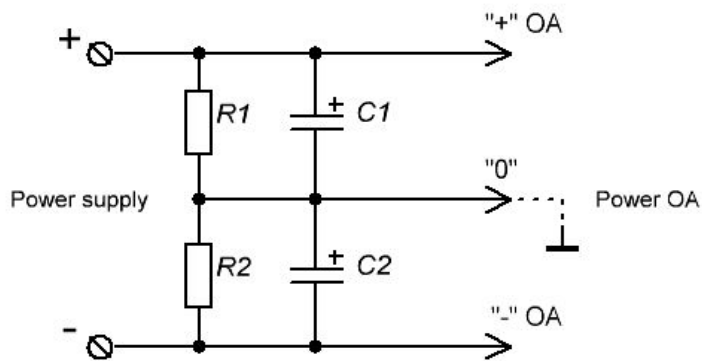


Схема прецизионного двухполупериодного выпрямителя усилителя (единичный коэффициент усиления,  $R_L$  – внутренне нагрузочное сопротивление, выбирается в соответствии с параметрами ОУ)



# Виртуальный ноль для питания операционных усилителей



Схемы формирования виртуального нуля (искусственная средняя точка) для питания операционных усилителей





# Математические функции на операционных усилителях



**ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ**

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

**НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ**

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

**СУММАТОР**

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

**ВЫЧИТАТЕЛЬ**

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

**ИНТЕГРАТОР**

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

**ДИФФЕРЕНЦИАТОР**

$$u_{вых} = -RC \frac{du_{вх}}{dt}$$

**ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**

$$u_{э-ик} = I_{э0} R_{об} e^{-\frac{u_{вх}}{25.5}}$$

$I_{э0}$  - обратный ток эмиттера

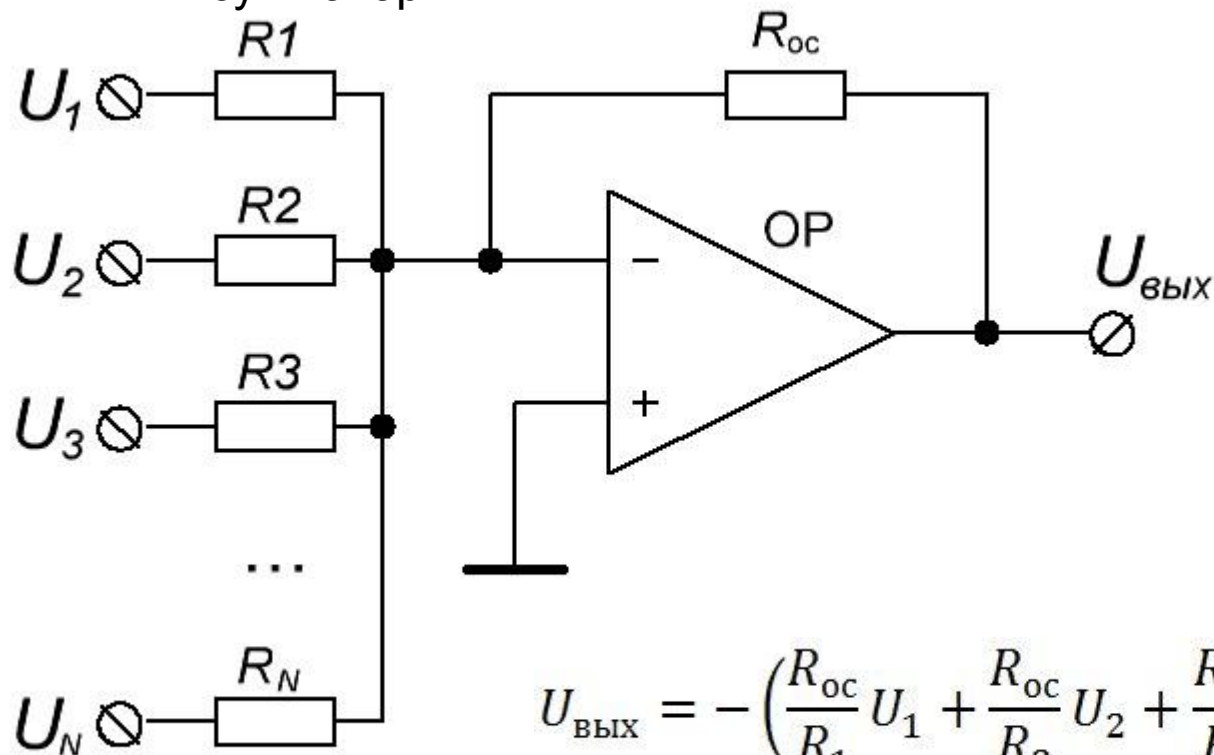
**ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ**

$$\varphi = -2 \arctg(\omega RC)$$

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

# Примеры использования операционных усилителей

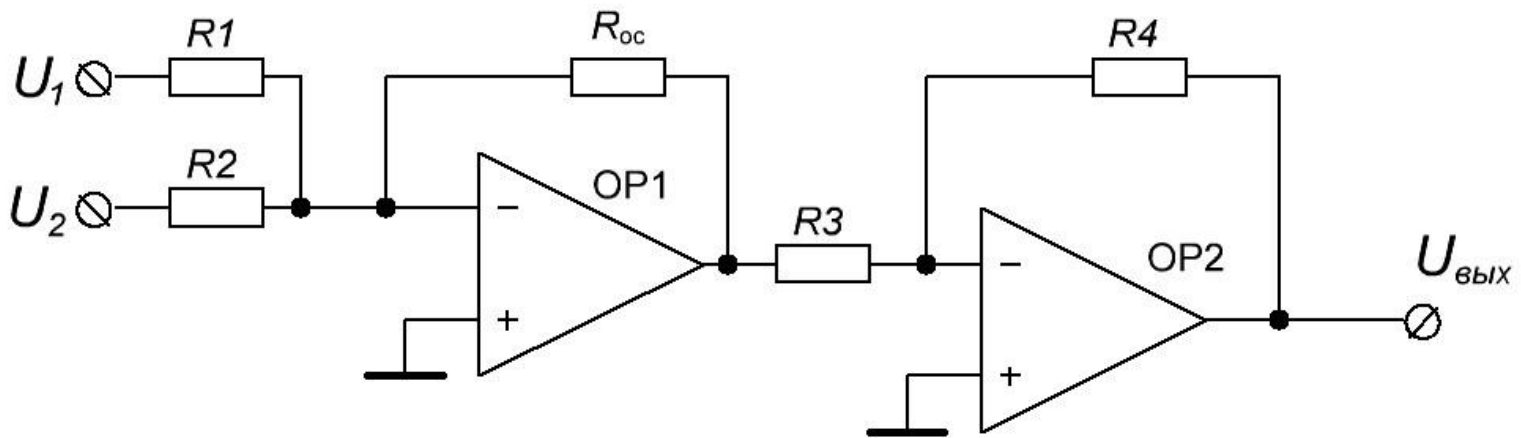
Инвертирующий сумматор



$$U_{\text{ВЫХ}} = - \left( \frac{R_{oc}}{R_1} U_1 + \frac{R_{oc}}{R_2} U_2 + \frac{R_{oc}}{R_3} U_3 + \dots + \frac{R_{oc}}{R_N} U_N \right)$$

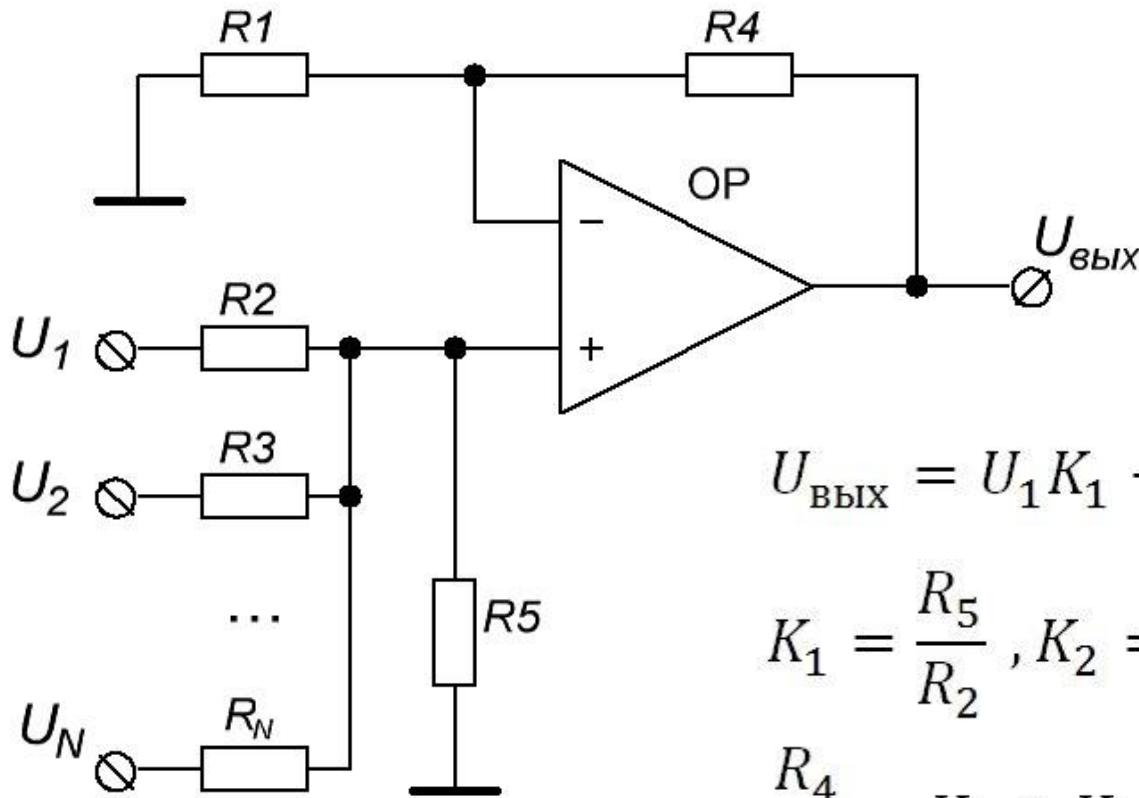
# Примеры использования операционных усилителей

неИнвертирующий сумматор



# Примеры использования операционных усилителей

неИнвертирующий



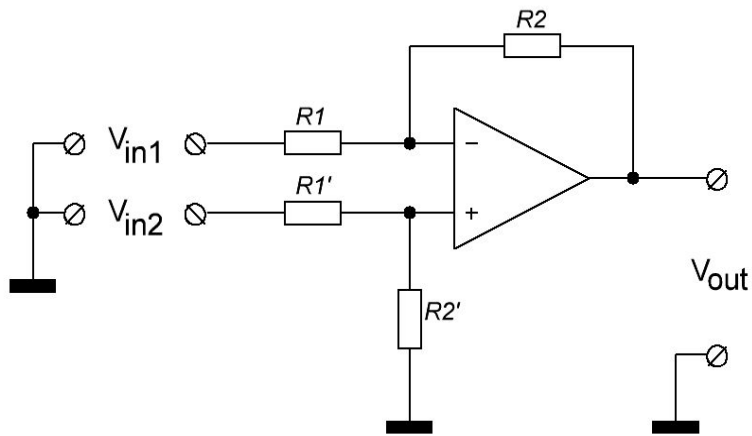
$$U_{\text{ВЫХ}} = U_1 K_1 + U_2 K_2 + \dots + U_N K_N$$

$$K_1 = \frac{R_5}{R_2}, K_2 = \frac{R_5}{R_3}, \dots, K_N = \frac{R_5}{R_N}$$

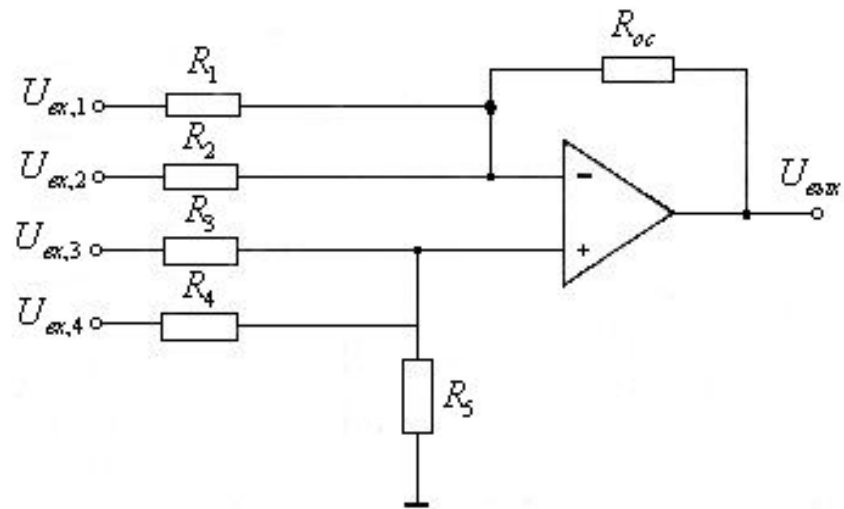
$$\frac{R_4}{R_1} = K_1 + K_2 + \dots + K_N$$

# Примеры использования операционных усилителей

## Вычитатель на операционном усилителе



$$V_{out} = V_{in2} \frac{(R2+R1)R2'}{(R2'+R1')R1} - V_{in1} \frac{R2}{R1}$$



$$U_{ex} = -U_1 \frac{R_{oc}}{R_1} - U_2 \frac{R_{oc}}{R_2} + U_3 \frac{R_5}{R_3 + R_5} \left(1 + \frac{R_{oc}}{R_1}\right) + U_4 \frac{R_5}{R_4 + R_5} \left(1 + \frac{R_{oc}}{R_1}\right) = a_1 U_1 + a_2 U_2 + a_3 U_3 + a_4 U_4,$$



# Примеры использования операционных усилителей



## Интегратор на операционном усилителе

Интегрирующие цепи предназначены для интегрирования во времени электрических входных сигналов. Величина входного сигнала в общем виде описывается уравнением:

$$V_{out}(t) = V_{out}(0) + K \int_0^t V_{IN}(t) dt$$

Для RC-цепочки:

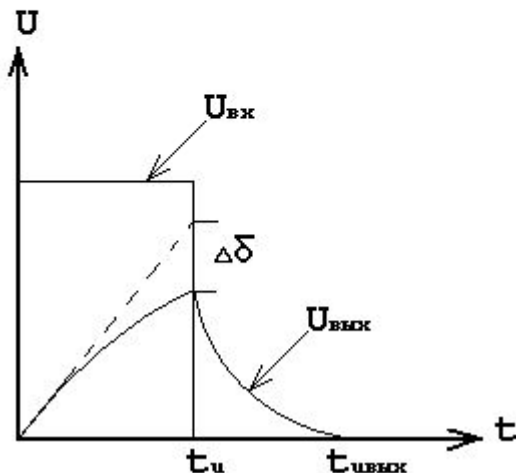
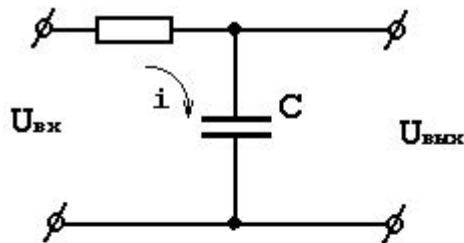
$$V_{out}(t) = V_{IN\_max} (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Ошибка интегрирования имеет

ВИД:

$$\Delta\delta = \frac{V_{IN\_max} t_u^2}{2 \tau^2}$$

Простейшие RC-цепочки мало применяют для точного интегрирования входных сигналов.

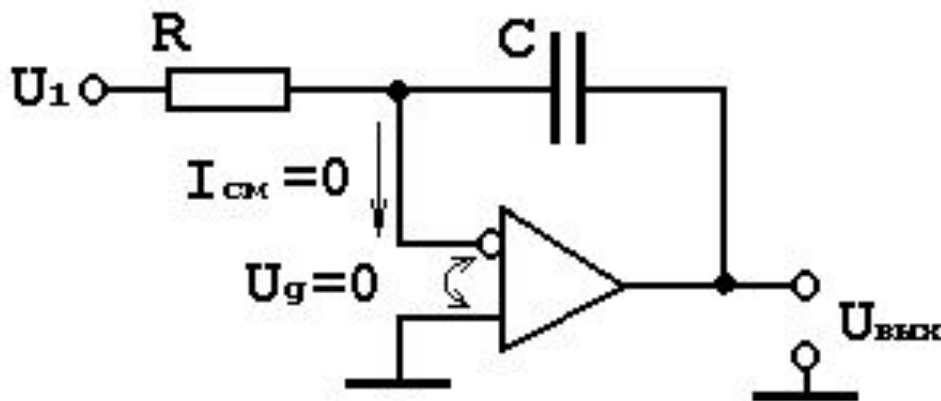




# Примеры использования операционных усилителей



## Интегратор на операционном усилителе



$$I_R = I_C \quad I_R = \frac{U_1}{R}$$

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \frac{CdU_C}{dt}$$

$$-\frac{CdU_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{U_1}{R}$$

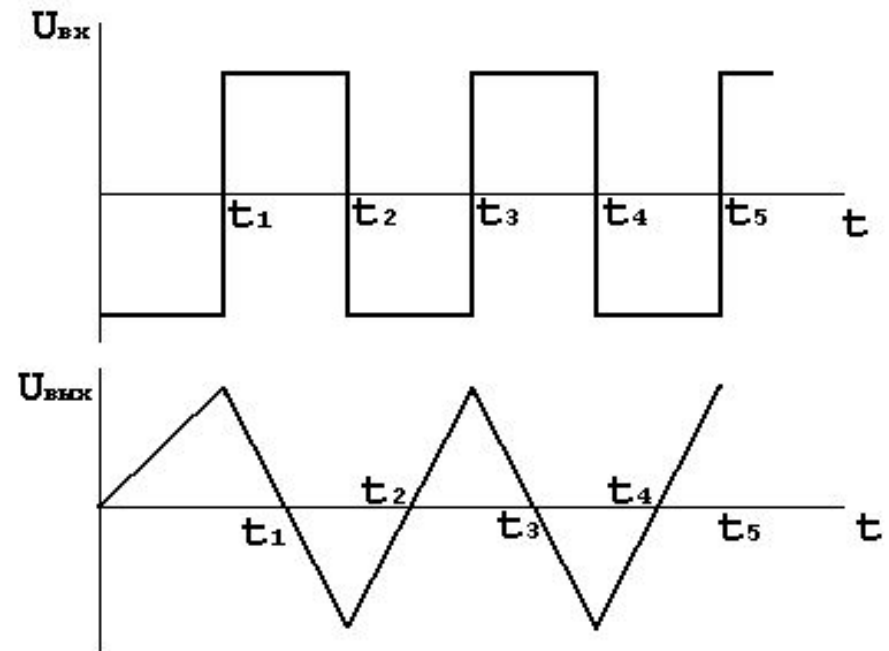
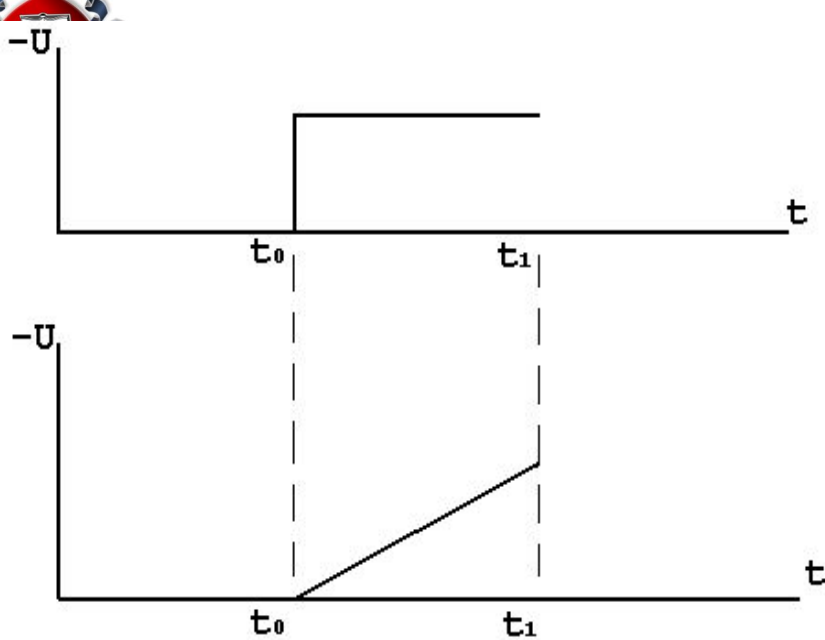
$$dU_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{RC} U_1 dt$$

После интегрирования  
получаем:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt$$



# Примеры использования операционных усилителей

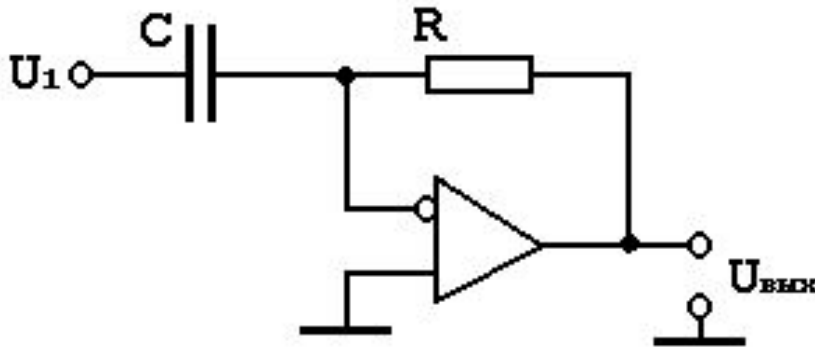


Пример работы интегратора на операционном усилителе



# Примеры использования операционных усилителей

## Дифференциатор на операционном усилителе



$$I_R = I_C \quad I_R = \frac{U_1}{R}$$

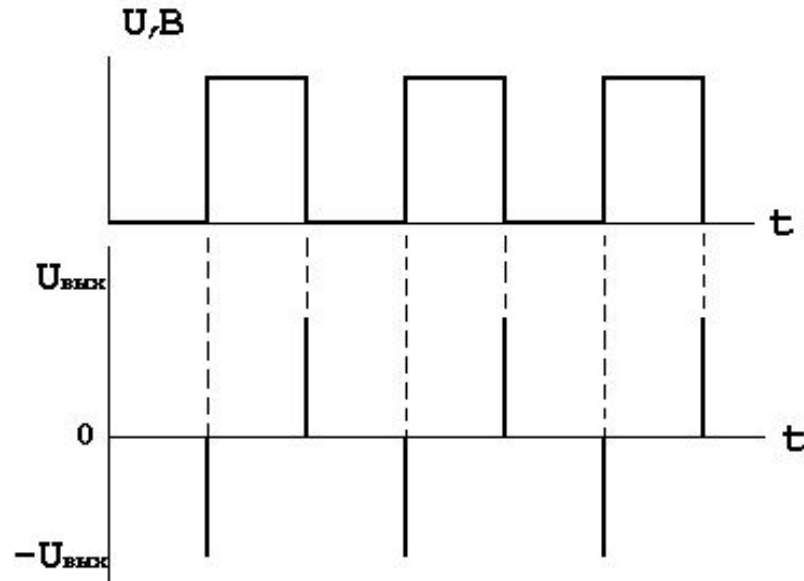
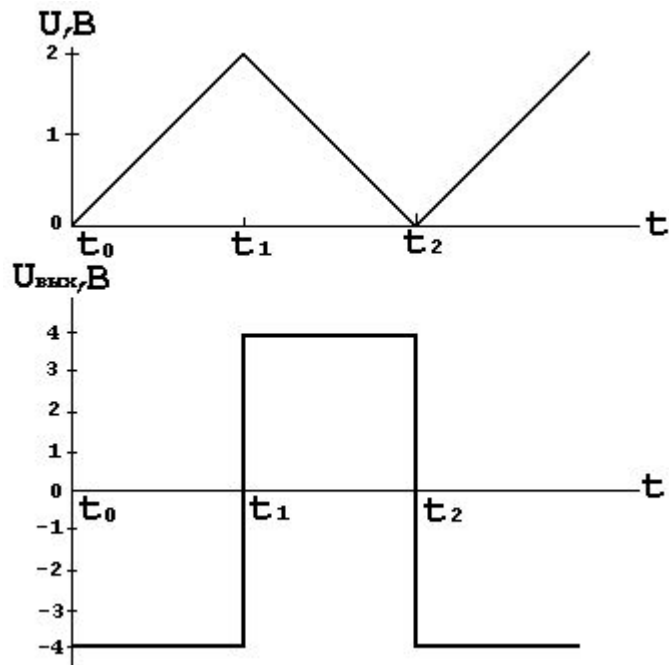
$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \frac{CdU_C}{dt}$$

$$-\frac{CdU_1}{dt} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -RC \frac{dU_1}{dt}$$



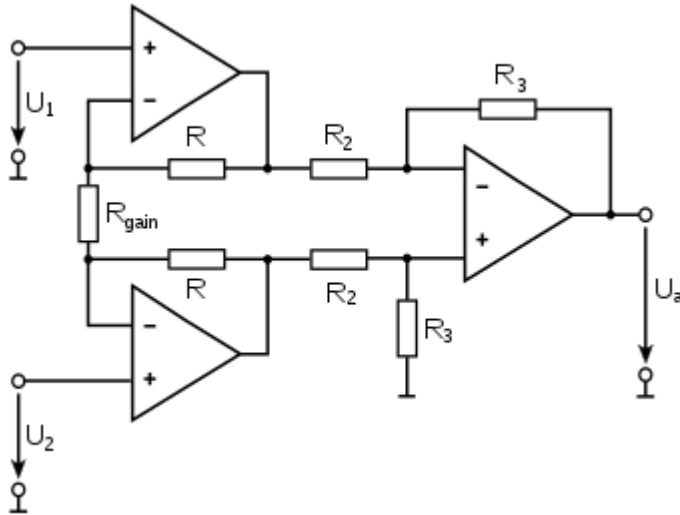
# Примеры использования операционных усилителей



Пример работы дифференциатора на операционном усилителе

# Примеры использования операционных усилителей

## Инструментальный усилитель на операционном усилителе



$$K_U = \left( 1 + \frac{2R_1}{R_{gain}} \right) \frac{R_3}{R_4}$$

Преимущества схемы:

- малое входное смещение;
- малый температурный дрейф;
- малый собственный шум;
- высокий коэффициент усиления.;
- регулировка коэффициента усиления одним резистором;
- высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала;
- высокие входные сопротивления (малый входной ток).