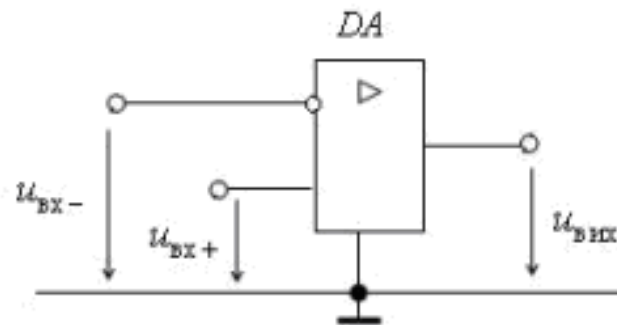
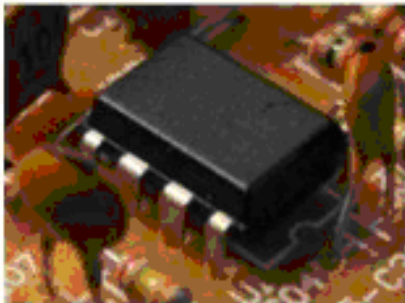


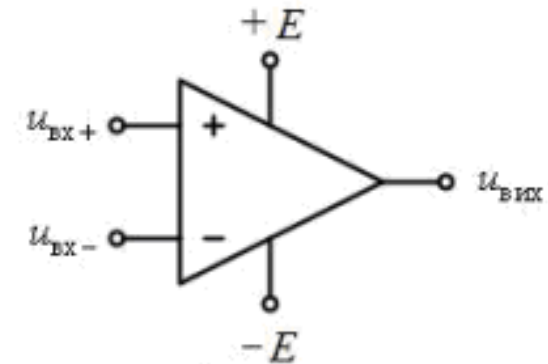
Лекція 9

Операційні підсилювачі. Основи. Параметри і характеристики.

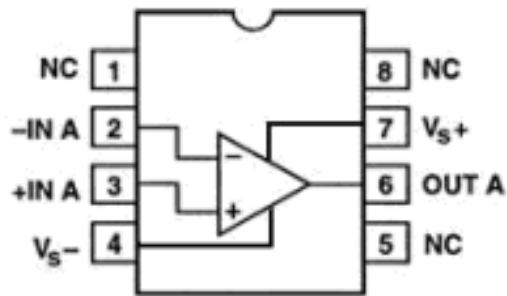
Операційний підсилювач (ОП, англ. operational amplifier - «op amp») - це підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, який має диференціальний вхід і, як правило, один спільний вихід. Назва «операційний підсилювач» історично зв'язана з призначенням перших схем. Операційний підсилювач був спроектований у 30-і роки на лампах для виконання математичних операцій шляхом використання напруги як аналогової величини для моделювання базових математичних операцій (додавання, віднімання, інтегрування, диференціювання та інших). У сучасній електронній техніці операційні підсилювачі застосовують надзвичайно широко як багатоцільові елементи для побудови апаратури різного призначення: підсилювачів, генераторів синусоїдних та імпульсних сигналів, стабілізаторів напруги, активних фільтрів і т.п. Сучасні ОП - це мікросхеми. Принципові схеми реальних операційних підсилювачів інколи наводяться в довідниках, але, як правило, у практичних застосуваннях можна користуватися мікросхемою ОП як окремим напівпровідниковим приладом, не цікавлячись її будовою.



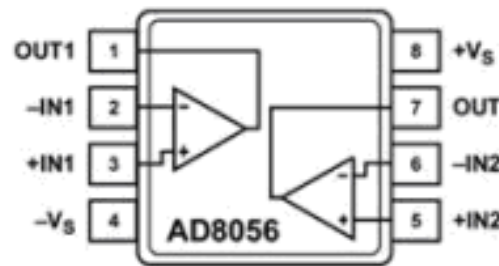
а)



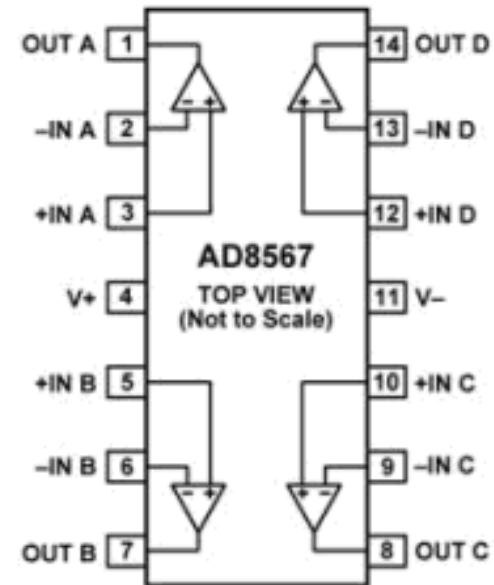
б)



в)



г)



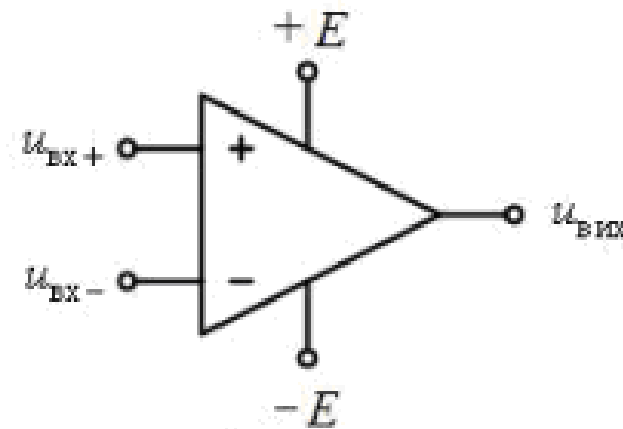
д)

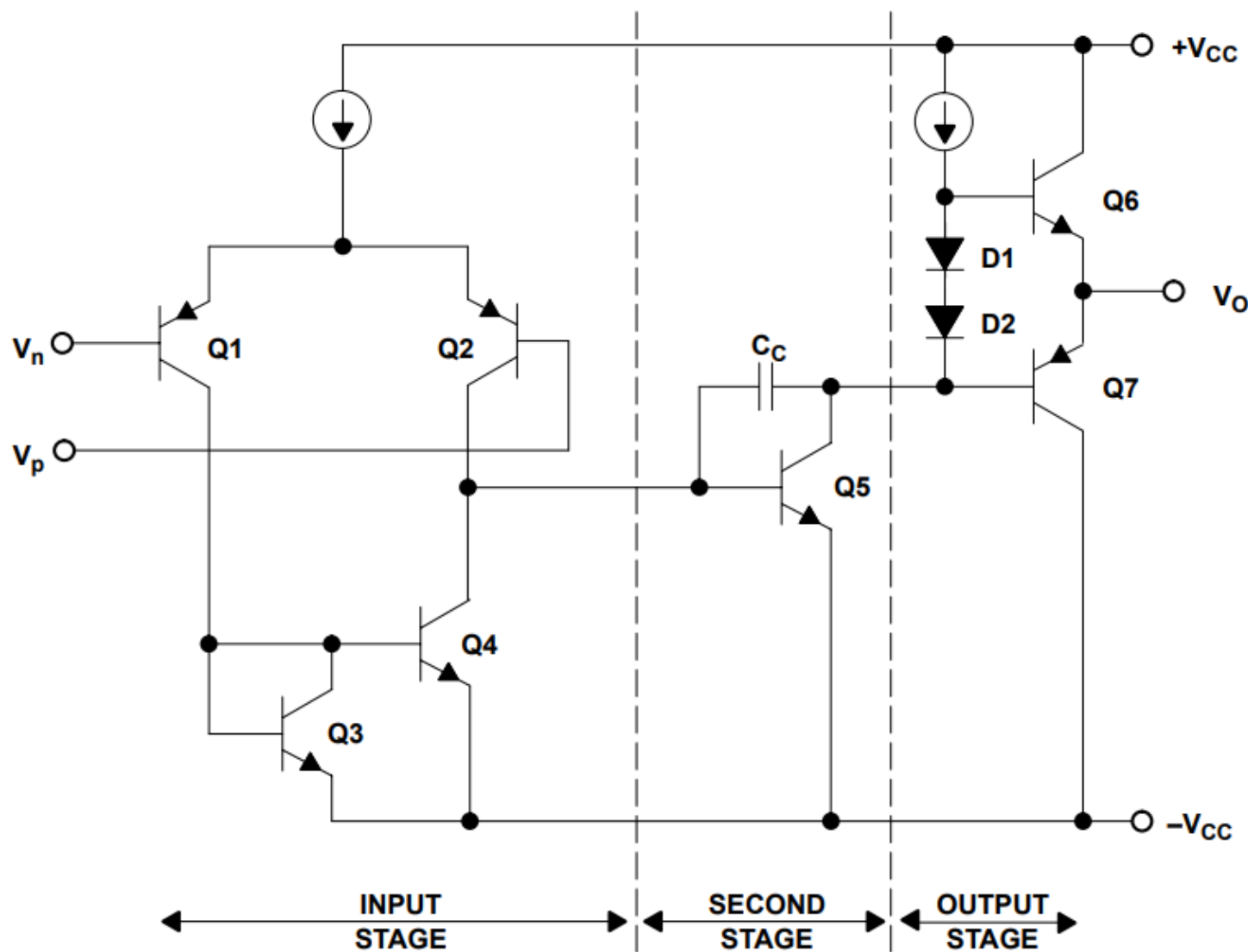
Структури операційних підсилювачів різних марок відрізняються, але основи побудови однакові. Більшість ОП виконують трикаскадними з безпосередніми зв'язками між каскадами. Це три функціональні блоки:

1. Вхідний каскад, який виконується за схемою диференціального підсилювача і забезпечує високий вхідний опір приладу та підсилення на фоні малих шумів. ОП має два входи - прямий (неінвертуючий) і інверсний (інвертуючий) і один вихід.
2. Підсилювач напруги, який має дуже великий коефіцієнт підсилення за напругою.
3. Вихідний підсилювач, який зазвичай виконується за схемою емітерного повторювача, що забезпечує підсилення за потужністю, малий вихідний опір та високу навантажувальну здатність за струмом.

З розвитком інтегральної технології ОП стали виготовляти двокаскадними без підсилювача напруги.

Для полегшення виділення змінного сигналу на виході ОП живлення схеми виконують двополярним як послідовне з'єднання двох джерел з заземленою середньою точкою (розщеплене живлення). ОП здатні працювати у широкому діапазоні напруг джерел живлення з типовими значеннями для загального застосування від $\pm 1,5$ (В) до ± 18 (В).





Ідеальний ОП є фізичною абстракцією, тобто не може реально існувати, проте дає змогу суттєво спростити розгляд роботи схем, до складу яких входять реальні ОП.

1. Нескінченно великий коефіцієнт підсилення за напругою для всього частотного діапазону:

$$K_U(f) = \text{const}$$
$$K_U \rightarrow \infty$$

2. Нескінченно великий вхідний опір обох входів ОП (іншими словами, струм, що протікає через ці входи, дорівнює нулю):

$$R_{IN} \rightarrow \infty$$
$$i_{IN} \rightarrow 0$$

3. Нульовий вихідний опір ОП (тобто для наступного каскаду ОП є ідеальним джерелом напруги):

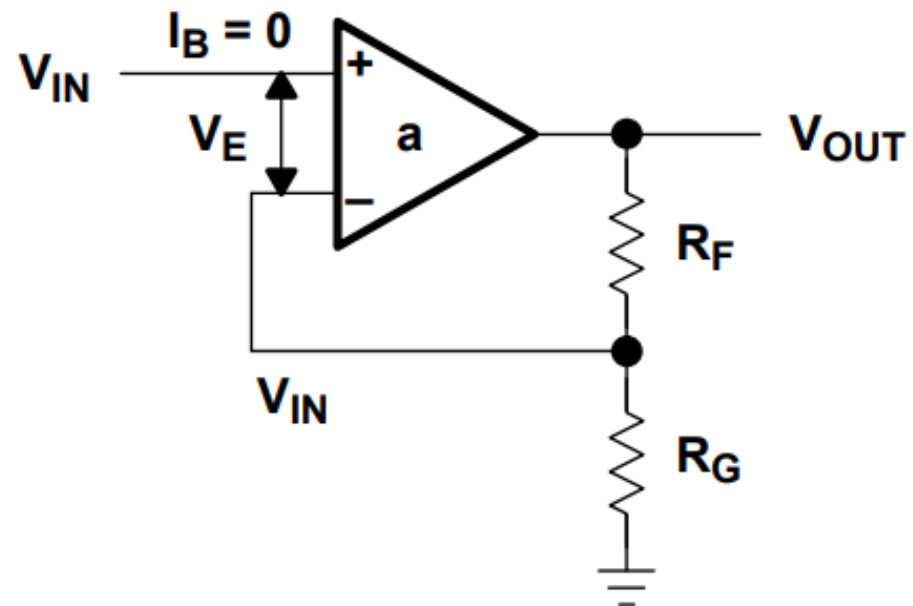
$$R_{OUT} \rightarrow 0$$

4. Нескінченно велика швидкість наростання напруги на виході ОП.
5. Смуга пропускання: від постійного струму до нескінченності.

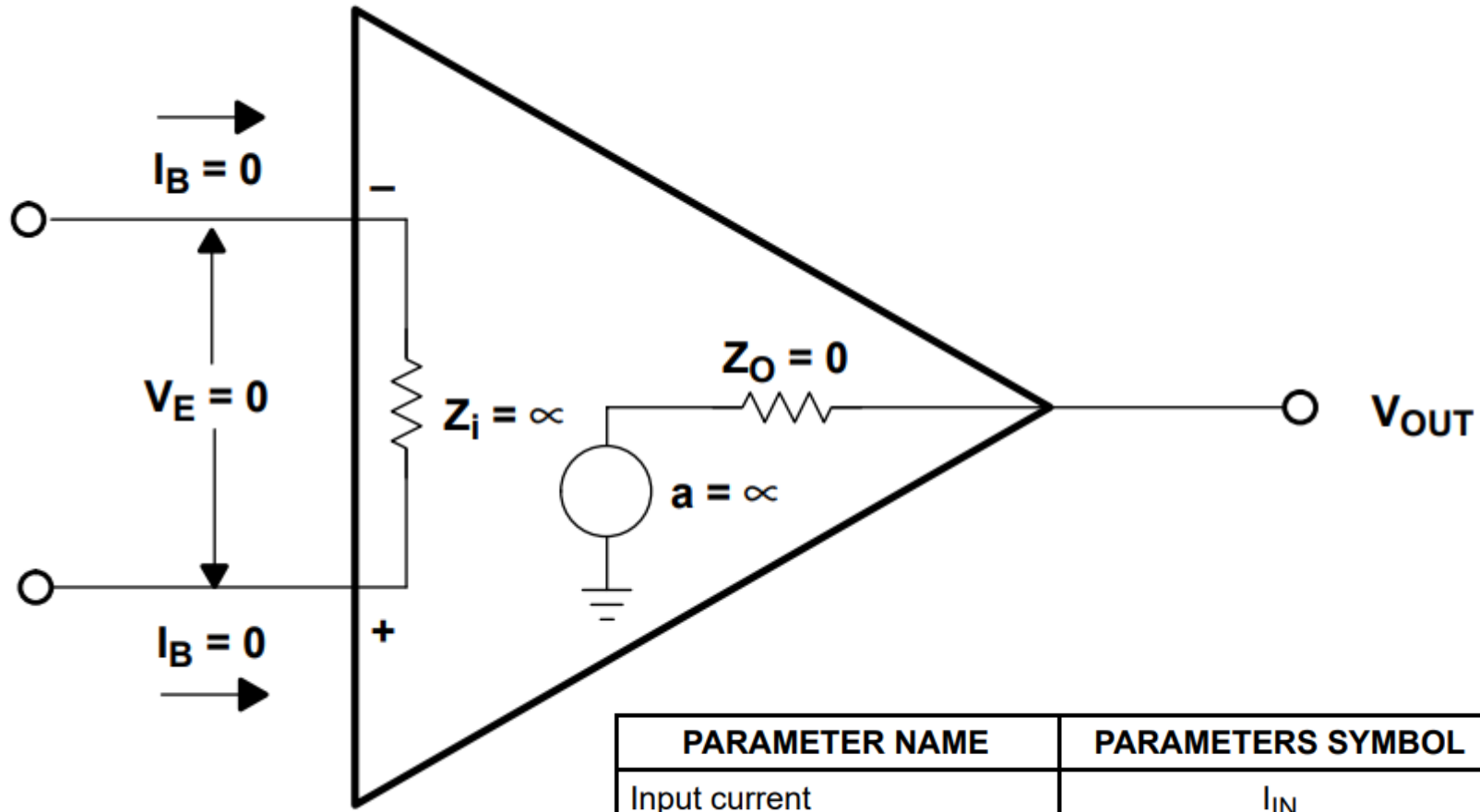
З вищезазначених характеристик ідеального ОП виходить найважливіша властивість ідеального ОП, охопленого ланкою негативного зворотного зв'язку: ідеальний ОП, охоплений негативним зворотним зв'язком, підтримує однакову напругу на своїх входах:

$$u_{IN+} - u_{IN-} = 0$$

У разі порушення цього співвідношення диференціальна напруга підсилюється ОП і передається через ланку НЗЗ, що зменшує існуючу різницю. І так до тих пір, поки рівність не буде виконано.



Еквівалентна схема та параметри ідеального ОП



PARAMETER NAME	PARAMETERS SYMBOL	VALUE
Input current	I_{IN}	0
Input offset voltage	V_{OS}	0
Input impedance	Z_{IN}	∞
Output impedance	Z_{OUT}	0
Gain	a	∞

Взято з книги *Op Amps For Everyone* - Bruce Carter, Ron Mancini (2017)

(<https://web.archive.org/web/20100216070704/http://focus.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf>)

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Bandwidth for 0.1 dB flatness		MHz	The range of frequencies within which the gain is ± 0.1 dB of the nominal value.	
Case temperature for 60 seconds		$^{\circ}\text{C}$	Usually specified as an absolute maximum — it is meant to be used as guide for automated soldering processes.	
Common-mode input capacitance	C_{ic}	pF	Input capacitance a common-mode source would see to ground.	11.3.7.1
Common-mode input impedance	Z_{ic}	Ω	The parallel sum of the small-signal impedance between each input terminal and ground.	
Common-mode input voltage	V_{ic}	V	The average voltage at the input pins.	11.3.3
Common-mode rejection ratio	CMRR or K_{CMR}	dB	The ratio of differential voltage amplification to common-mode voltage amplification. Note: This is measured by determining the ratio of a change in input common-mode voltage to the resulting change in input offset voltage.	11.3.9

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Continuous total dissipation		mW	Usually specified as an absolute maximum. It is the power that can be dissipated by the op amp package, including the load power. This parameter may be broken down by ambient temperature and package style in a table.	
Crosstalk	X_T	dBc	The ratio of the change in output voltage of a driven channel to the resulting change in output voltage from another channel that is not driven.	
Differential gain error	A_D	%	The change in ac gain with change in dc level. The ac signal is 40 IRE (0.28 V _{PK}) and the dc level change is ± 100 IRE (± 0.7 V). Typically tested at 3.58 MHz (NTSC) or 4.43 MHz (PAL) carrier frequencies.	
Differential input capacitance	C_{ic}	pF	(see common mode input capacitance)	11.3.7.1
Differential input resistance	r_{id}	Ω	The small-signal resistance between two ungrounded input terminals.	
Differential input voltage	V_{ID}	V	The voltage at the noninverting input with respect to the inverting input.	
Differential phase error	Φ_D	$^\circ$	The change in ac phase with change in dc level. The ac signal is 40 IRE (0.28 V _{PK}) and the dc level change is ± 100 IRE (± 0.7 V). Typically tested at 3.58 MHz (NTSC) or 4.43 MHz (PAL) carrier frequencies.	

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Differential voltage amplification	A_{VD}	dB	(see open loop voltage gain)	11.3.6
Fall time	t_f	ns	The time required for an output voltage step to change from 90% to 10% of its final value.	
Duration of short-circuit current			Amount of time that the output can be shorted to network ground — usually specified as an absolute maximum.	
Input common-mode voltage range	V_{ICR}	V	The range of common-mode input voltage that, if exceeded, may cause the operational amplifier to cease functioning properly. This is sometimes is taken as the voltage range over which the input offset voltage remains within a set limit	11.3.3
Input current	I_I	mA	The amount of current that can be sourced or sunk by the op amp input — usually specified as an absolute maximum rating.	
Input noise current	I_n	$\frac{\text{pA}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	The internal noise current reflected back to an ideal current source in parallel with the input pins.	11.3.13
Input noise voltage	V_n	$\frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	The internal noise voltage reflected back to an ideal voltage source in parallel with the input pins.	11.3.13

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Gain bandwidth product	GBW	MHz	The product of the open-loop voltage gain and the frequency at which it is measured.	11.3.13
Gain margin	A_m	dB	The reciprocal of the open-loop voltage gain at the frequency where the open-loop phase shift first reaches -180° .	
High-level output voltage	V_{OH}	V	The highest positive op amp output voltage for the bias conditions applied to the power pins.	11.3.5
Input bias current	I_{IB}	μA	The average of the currents into the two input terminals with the output at a specified level.	11.3.2
Input capacitance	C_i	pF	The capacitance between the input terminals with either input grounded.	11.3.7.1
Input offset current	I_{IO}	μA	The difference between the currents into the two input terminals with the output at the specified level.	11.3.2
Input offset voltage	V_{IO}, V_{OS}	mV	The dc voltage that must be applied between the input terminals to cancel dc offsets within the op amp.	11.3.1
Input offset voltage long-term drift		$\frac{\mu V}{\text{month}}$	The ratio of the change in input offset voltage to the change time. It is the average value for the month.	11.3.1
Input resistance	r_i	$M\Omega$	The dc resistance between the input terminals with either input grounded.	11.3.7.1
Input voltage range	V_I	V	The range of input voltages that may be applied to either the $IN+$ or $IN-$ inputs	11.3.15

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Large-signal voltage amplification	A_V	dB	(see open loop voltage gain)	
Lead temperature for 10 or 60 seconds		°C	Usually specified as an absolute maximum. It is meant to be used as guide for automated and hand soldering processes.	
Low-level output current	I_{OL}	mA	The current into an output with input conditions applied that according to the product parameter will establish a low level at the output.	
Low-level output voltage	V_{OL}	V	The smallest positive op amp output voltage for the bias conditions applied to the power pins.	11.3.5
Maximum peak output voltage swing	$V_{OM\pm}$	V	The maximum peak-to-peak output voltage that can be obtained without clipping when the op amp is operated from a bipolar supply.	11.3.5
Maximum peak-to-peak output voltage swing	$V_{O(PP)}$	V	The maximum peak-to-peak voltage that can be obtained without waveform clipping when the dc output voltage is zero.	
Maximum-output-swing bandwidth	B_{OM}	MHz	The range of frequencies within which the maximum output voltage swing is above a specified value or the maximum frequency of an amplifier in which the output amplitude is at the extents of it's linear range. Also called full power bandwidth.	11.3.15
Noise figure	NF	dB	The ratio of the total noise power at the output of an amplifier, referred to the input, to the noise power of the signal source.	

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Open-loop transimpedance	Z_t	$M\Omega$	In a transimpedance or current feedback amplifier, it is the frequency dependent ratio of change in output voltage to the frequency dependent change in current at the inverting input.	
Open-loop transresistance	R_t	$M\Omega$	In a transimpedance or current feedback amplifier, it is the ratio of change in dc output voltage to the change in dc current at the inverting input.	
Open-loop voltage gain	A_{OL}	dB	The ratio of change in output voltage to the change in voltage across the input terminals. Usually the dc value and a graph showing the frequency dependence are shown in the data sheet.	
Operating temperature	T_A	$^{\circ}C$	Temperature over which the op amp may be operated. Some of the other parameters may change with temperature, leading to degraded operation at temperature extremes.	
Output current	I_O	mA	The amount of current that is drawn from the op amp output. Usually specified as an absolute maximum rating — not for long term operation at the specified level.	
Output impedance	Z_o	Ω	The frequency dependent small-signal impedance that is placed in series with an ideal amplifier and the output terminal.	11.3.8
Output resistance	r_o	Ω	The dc resistance that is placed in series with an ideal amplifier and the output terminal.	

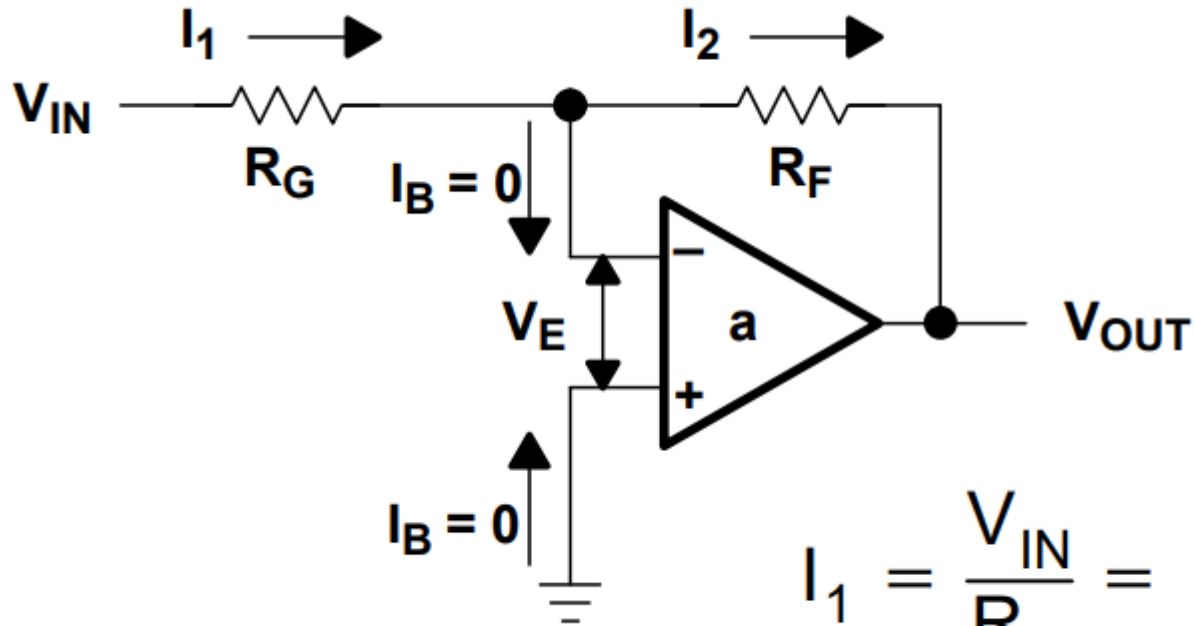
PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Overshoot factor	–	–	The ratio of the largest deviation of the output voltage from its final steady-state value to the absolute value of the step after a step change at the output.	
Phase margin	Φ_m	°	The absolute value of the open-loop phase shift at the frequency where the open-loop amplification first equals one.	11.3.15
Power supply rejection ratio	PSRR	dB	The absolute value of the ratio of the change in supply voltages to the change in input offset voltage. Typically both supply voltages are varied symmetrically. Unless otherwise noted, both supply voltages are varied symmetrically.	11.3.10
Rise time	t_r	nS	The time required for an output voltage step to change from 10% to 90% of its final value.	
Settling time	t_s	nS	With a step change at the input, the time required for the output voltage to settle within the specified error band of the final value. Also known as total response time, t_{tot}	
Short-circuit output current	I_{OS}	mA	The maximum continuous output current available from the amplifier with the output shorted to ground, to either supply, or to a specified point. Sometimes a low value series resistor is specified.	
Slew rate	SR	V/ μ s	The rate of change in the output voltage with respect to time for a step change at the input.	11.3.12
Storage temperature	T_S	°C	Temperature over which the op amp may be stored for long periods of time without damage.	

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Supply current	I_{CC}/I_{DD}	mA	The current into the V_{CC+}/V_{DD+} or V_{CC-}/V_{DD-} terminal of the op amp while it is operating.	
Supply current (shutdown)	$I_{CC-}/I_{DD-SHDN}$	mA	The current into the V_{CC+}/V_{DD+} or V_{CC-}/V_{DD-} terminal of the amplifier while it is turned off.	
Supply rejection ratio	k_{SVR}	dB	(see power supply rejection ratio)	11.3.10
Supply voltage sensitivity	$k_{SVS}, \Delta V_{CC\pm}, \Delta V_{DD\pm},$ or ΔV_{IO}	dB	The absolute value of the ratio of the change in input offset voltage to the change in supply voltages.	11.3.10
Supply voltage	V_{CC}/V_{DD}	V	Bias voltage applied to the op amp power supply pin(s). Usually specified as a \pm value, referenced to network ground.	
Temperature coefficient of input offset current	$\alpha_{I_{IO}}$	$\mu A/^{\circ}C$	The ratio of the change in input offset current to the change in free-air temperature. This is an average value for the specified temperature range.	11.3.2
Temperature coefficient of input offset voltage	$\alpha_{V_{IO}}$	$\mu V/^{\circ}C$	The ratio of the change in input offset voltage to the change in free-air temperature. This is an average value for the specified temperature range.	11.3.1

PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Total current into V_{CC+}/V_{DD+}		mA	Maximum current that can be supplied to the positive power terminal of the op amp — usually specified as an absolute maximum.	
Total current out of V_{DD-}		mA	Maximum current that can be drawn from the negative power terminal of the op amp — usually specified as an absolute maximum.	
Total harmonic distortion	THD	dB	The ratio of the RMS voltage of the first nine harmonics of the fundamental signal to the total RMS voltage at the output.	
Total harmonic distortion plus noise	THD+N	dB	The ratio of the RMS noise voltage and RMS harmonic voltage of the fundamental signal to the total RMS voltage at the output.	11.3.14
Total power dissipation	P_D	mW	The total dc power supplied to the device less any power delivered from the device to a load. Note: At no load: $P_D = V_{CC+} \times I$ or $P_D = V_{DD+} \times I$	

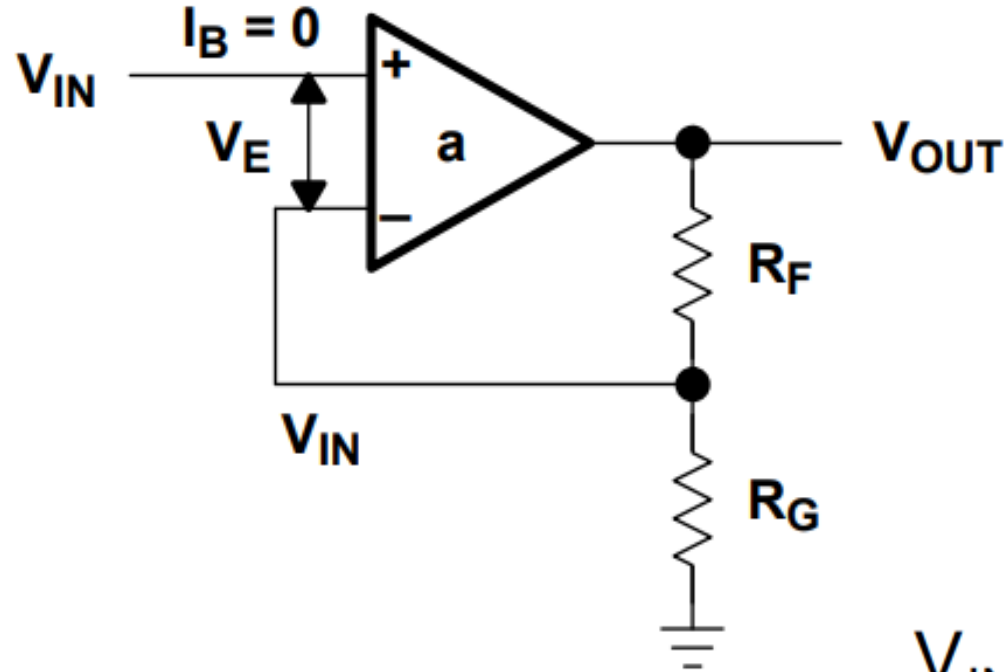
PARAMETER	ABBV	UNITS	DEFINITION	INFO
Turn-on voltage (shutdown)	$V_{IH-SHDN}$	V	The voltage required on the shutdown pin to turn the device on.	
Turn-off voltage (shutdown)	$V_{IL-SHDN}$	V	The voltage required on the shutdown pin to turn the device off.	
Turn-on time (shutdown)	t_{EN}	μs	The time from when the turn-on voltage is applied to the shutdown pin to when the supply current has reached half of its final value.	
Turn-off time (shutdown)	t_{DIS}	μs	The time from when the turn-off voltage is applied to the shutdown pin to when the supply current has reached half of its final value.	
Unity gain bandwidth	B_1	MHz	The range of frequencies within which the open-loop voltage amplification is greater than unity.	11.3.15

Інвертуюча схема включення ОП



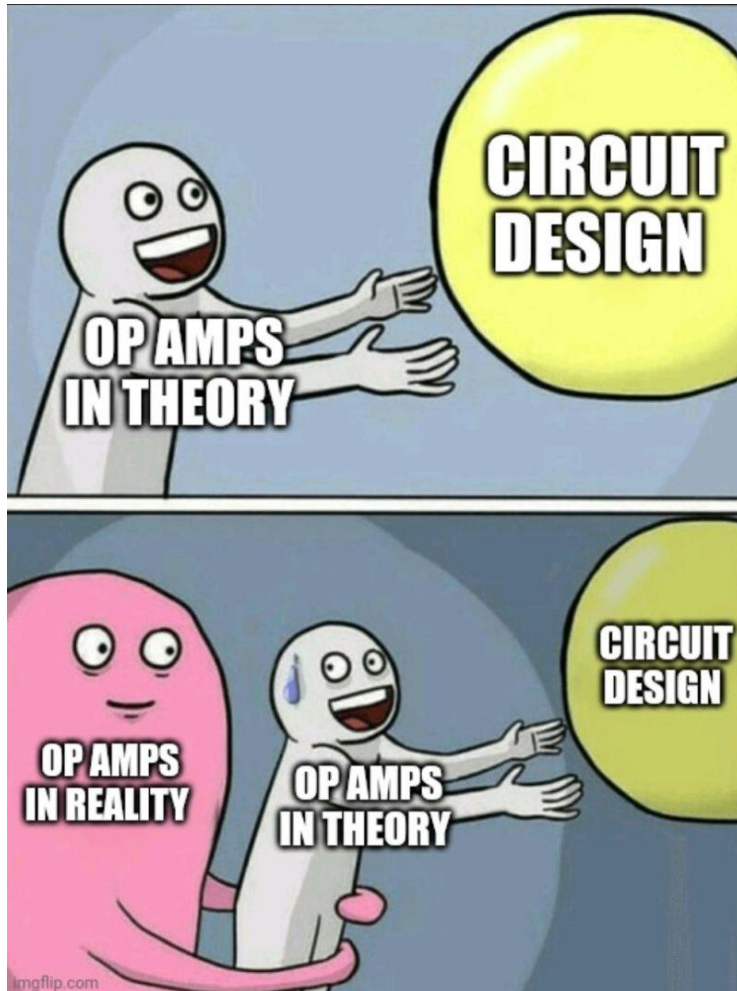
$$I_1 = \frac{V_{IN}}{R_G} = -I_2 = -\frac{V_{OUT}}{R_F}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{R_F}{R_G}$$



$$V_{IN} = V_{OUT} \frac{R_G}{R_G + R_F}$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_G + R_F}{R_G} = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$



Далі буде...

...Операційні підсилювачі
Зворотний зв'язок та базові схеми