



POLITECNICO  
DI TORINO

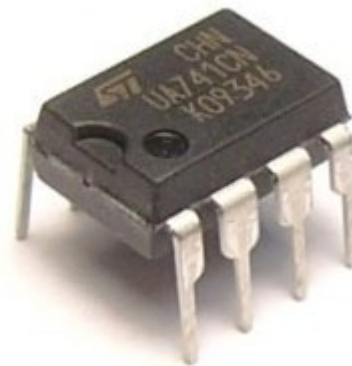
DET

Department of Electronics and Telecommunications

# Limitazioni degli Amplificatori Operazionali Reali

# Amplificatori Operazionali Reali

- Con gli amplificatori operazionali, grazie al principio della retroazione negativa, è possibile realizzare amplificatori e blocchi analogici con caratteristiche che si avvicinano all'idealità.
- Gli amplificatori operazionali reali (circuiti integrati basati su transistori) presentano però delle limitazioni (indicate nei datasheet), che si ripercuotono sui circuiti in cui sono inseriti.
  - Limitazioni nel comportamento in linearità (in particolare:  $A_d$  finita, ampl. di modo comune,...)
  - Limitazioni di banda
  - Limitazioni di dinamica
  - Errori statici e dinamici: offset, rumore e distorsione



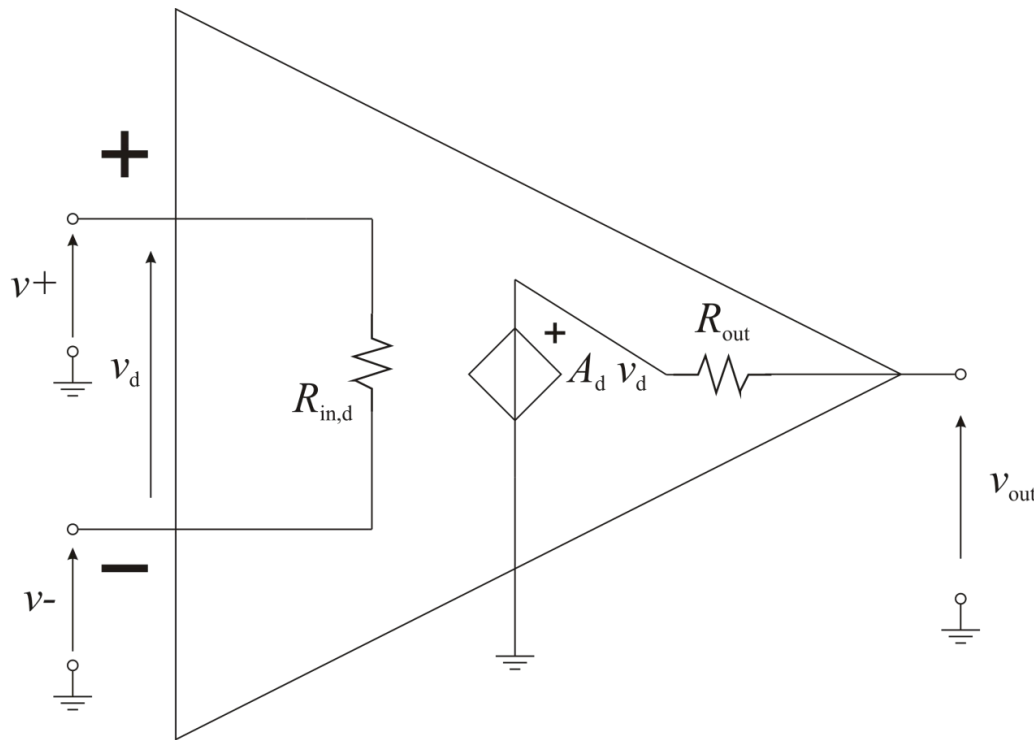
## Approccio di analisi/progetto (ed esercizi):

- si considerano inizialmente gli amplificatori operazionali come ideali
- si valutano gli effetti delle non-idealità (una alla volta) e/o sotto quali condizioni l'approssimazione di operazionale ideale è accettabile.



# Circuito Equivalente in Linearità - $A_d$ finita

- L'amplificatore operazionale reale, per il piccolo segnale, può essere descritto come un amplificatore di tensione con amplificazione differenziale  $A_d$ , resistenza d'ingresso (differenziale)  $R_{in,d}$  e resistenza d'uscita  $R_{out}$ .
- Per  $A_d \rightarrow \infty$ ,  $R_{in,d}$  ed  $R_{out}$  diventano influenti.
- Rispetto all'operazionale ideale, l'amplificazione  $A_d$  **non è infinita** (dell'ordine di 80dB-120dB a bassa frequenza e, come vedremo, si riduce al crescere della frequenza)



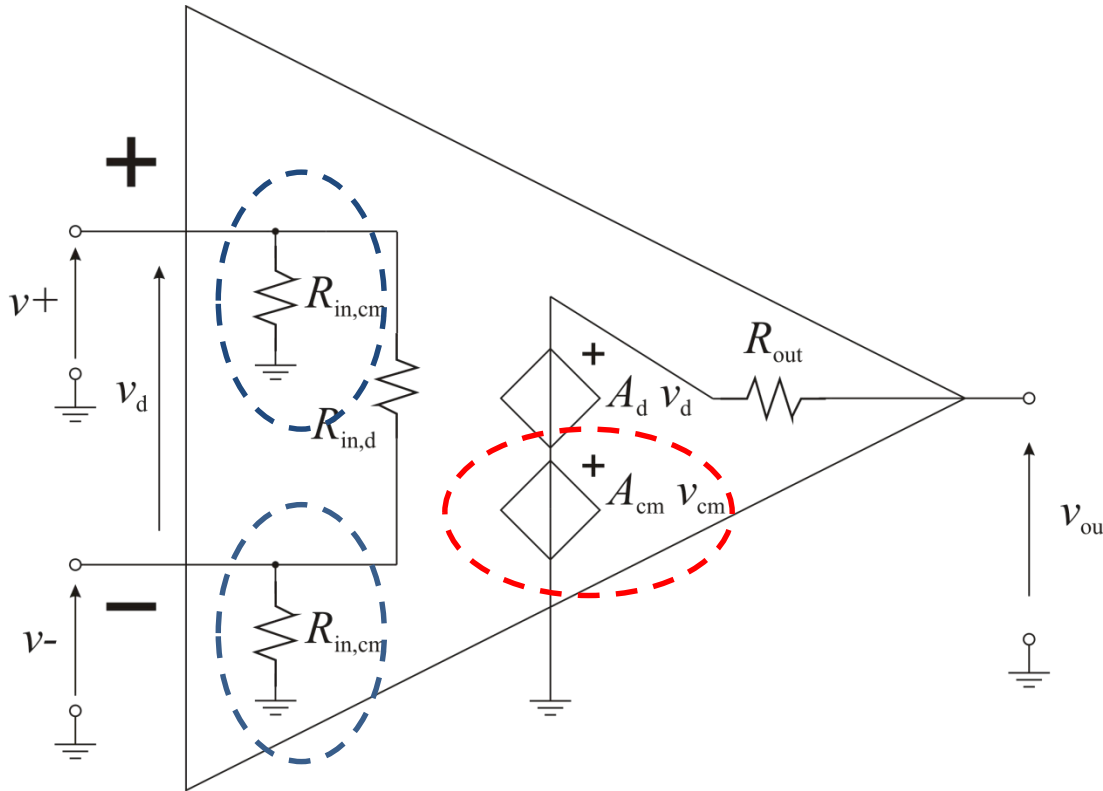
$$v_d = v^+ - v^-$$

$$v_{out} = A_d v_d$$



# Circuito Equivalente in Linearità – Modo Comune

- Rispetto ad un amplificatore di tensione single-ended (single-ended = con ingresso riferito a 0V)
  - La porta d'ingresso differenziale non è riferita a 0V e il circuito equivalente include anche due **resistenze d'ingresso di modo comune**  $R_{in,cm}$  (nominalmente uguali) tra ciascun ingresso e 0V.
  - L'operazionale è progettato per amplificare solo l'ingresso differenziale  $v_d$  ma si ha anche una (piccola) **amplificazione di modo comune**  $A_{cm}$  non voluta  $\rightarrow$  generatore di tensione controllato da  $v_{cm} = \frac{v^+ + v^-}{2}$



$$v_d = v^+ - v^-$$

$$v_{cm} = \frac{v^+ + v^-}{2}$$

$$v_{out} = A_d v_d + A_{cm} v_{cm}$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}}$$

**Common-Mode Rejection Ratio**

Rapporto di reiezione  
del modo comune



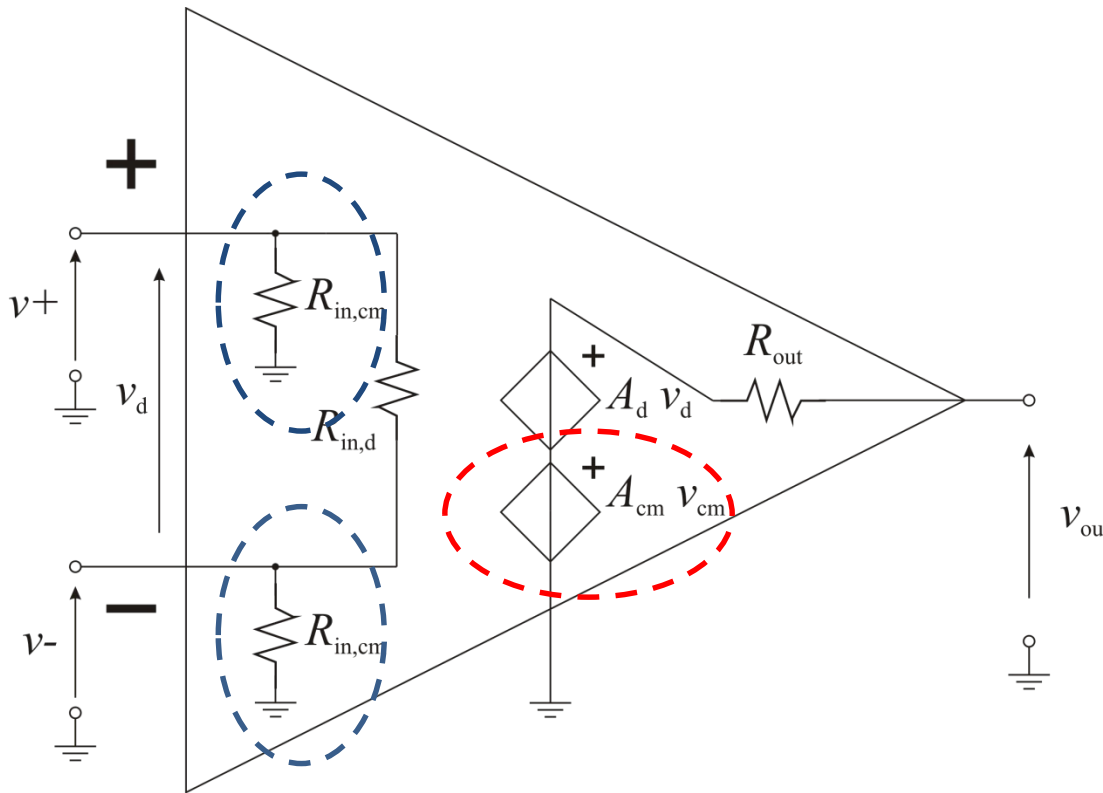
POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Circuito Equivalente in Linearità – Modo Comune

## ■ Commenti:

- Per  $A_d \rightarrow \infty$ ,  $R_{in,d}$  ed  $R_{out}$  diventano influenti.  $R_{in,cm}$  non risente della retroazione negativa e può dare effetto di carico, ma normalmente è molto alta ( $>1G\Omega$ ) e trascurabile.



$$v_d = v^+ - v^-$$

$$v_{cm} = \frac{v^+ + v^-}{2}$$

$$v_{out} = A_d v_d + A_{cm} v_{cm}$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}}$$

**Common-Mode Rejection Ratio**

Rapporto di reiezione  
del modo comune

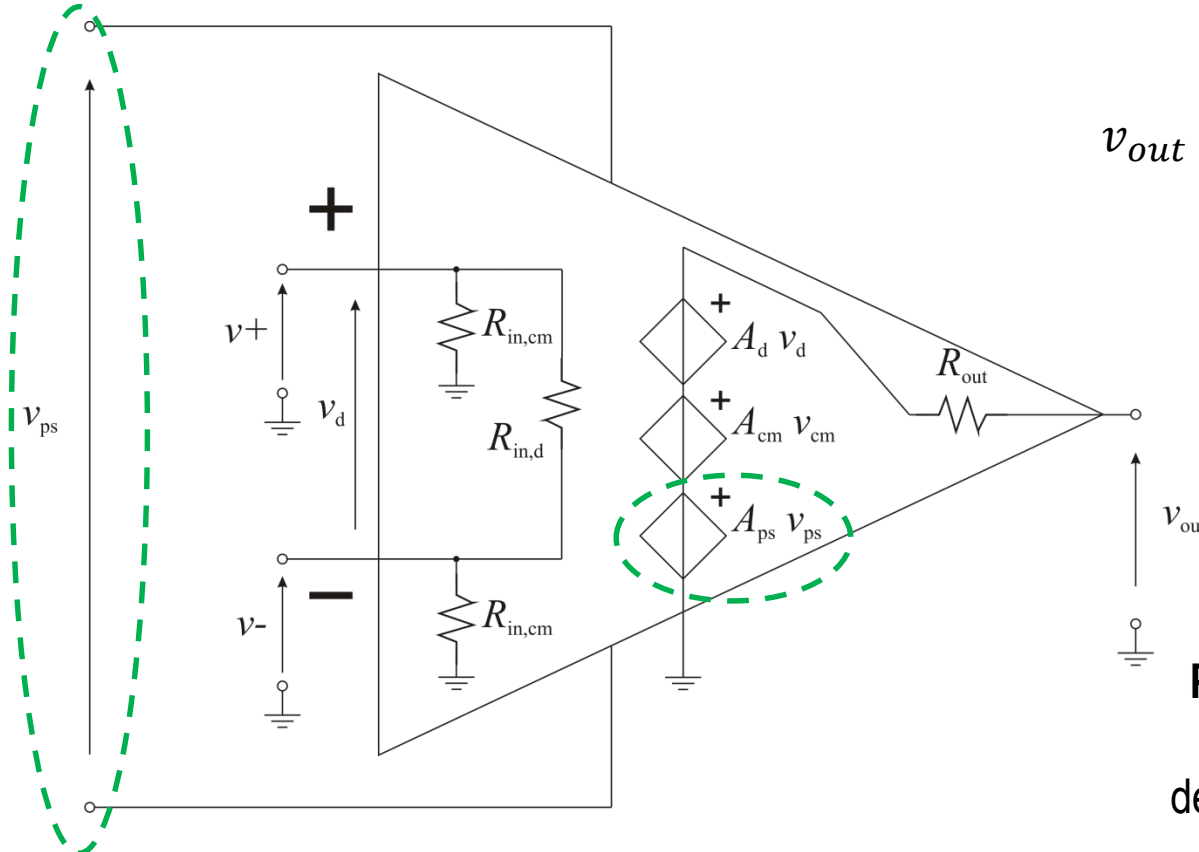


POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Circuito Equivalente in Linearità

- La tensione di alimentazione è nominalmente costante, ma può presentare variazioni  $v_{ps}$  dovute a disturbi.
- L'operazionale dovrebbe essere insensibile alle **variazioni dell'alimentazione**  $v_{ps}$ : in pratica, però, influenzano  $v_{out}$ .
- Ciò è descritto da un **generatore di tensione sull'uscita controllato da  $v_{ps}$**  e con amplificazione  $A_{ps}$ .
- Nei datasheet è specificato il rapporto tra  $A_d$  e  $A_{ps}$ : rapporto di reiezione delle variazioni dell'alimentazione, **PSRR**



$$v_{out} = A_d v_d + A_{cm} v_{cm} + A_{ps} v_{ps}$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}}$$

$$PSRR = \frac{A_d}{A_{ps}}$$

**Power Supply Rejection Ratio**  
Rapporto di reiezione  
delle variazioni dell'alimentazione



## SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_S = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.

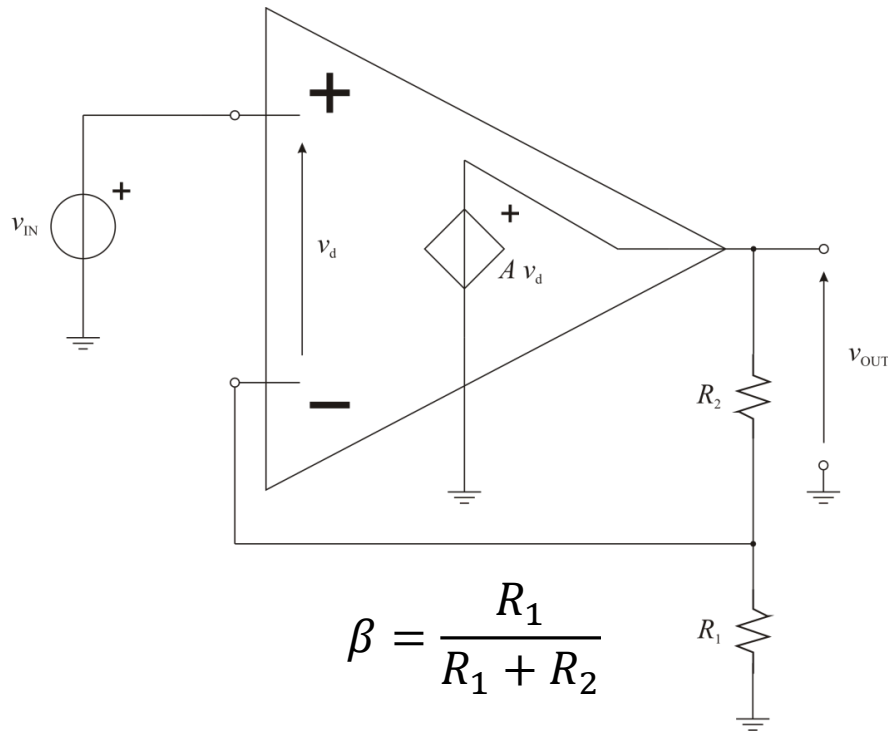
Table 1.

| Parameter   | Symbol               | Test Conditions  | OP27A/OP27E |            |     | OP27G      |            |     | Unit                         |
|---|----------------------|--|-------------|------------|-----|------------|------------|-----|------------------------------|
|   |                      |  | Min         | Typ        | Max | Min        | Typ        | Max |                              |
| INPUT OFFSET VOLTAGE <sup>1</sup>                                 | $V_{OS}$             |  | 10          | 25         |     | 30         | 100        |     | $\mu\text{V}$                |
| LONG-TERM $V_{OS}$ STABILITY <sup>2,3</sup>                       | $V_{OS}/\text{Time}$ |  | 0.2         | 1.0        |     | 0.4        | 2.0        |     | $\mu\text{V}/\text{M}_0$     |
| INPUT OFFSET CURRENT  | $I_{OS}$             |  | 7           | 35         |     | 12         | 75         |     | nA                           |
| INPUT BIAS CURRENT  | $I_B$                |  | $\pm 10$    | $\pm 40$   |     | $\pm 15$   | $\pm 80$   |     | nA                           |
| INPUT NOISE VOLTAGE <sup>3,4</sup>                                | $e_{n\text{ p-p}}$   | 0.1 Hz to 10 Hz  | 0.08        | 0.18       |     | 0.09       | 0.25       |     | $\mu\text{V p-p}$            |
| INPUT NOISE<br>Voltage Density <sup>3</sup>                       | $e_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   | 3.5         | 5.5        |     | 3.8        | 8.0        |     | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   | 3.1         | 4.5        |     | 3.3        | 5.6        |     | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 | 3.0         | 3.8        |     | 3.2        | 4.5        |     | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT NOISE<br>Current Density <sup>3</sup>                       | $i_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   | 1.7         | 4.0        |     | 1.7        |            |     | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   | 1.0         | 2.3        |     | 1.0        |            |     | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 | 0.4         | 0.6        |     | 0.4        | 0.6        |     | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT RESISTANCE<br>Differential Mode <sup>5</sup><br>Common Mode | $R_{IN}$             |  | 1.3         | 6          |     | 0.7        | 4          |     | $\text{M}\Omega$             |
|   | $R_{INCM}$           |  |             | 3          |     |            | 2          |     | $\text{G}\Omega$             |
| INPUT VOLTAGE RANGE   | IVR                  |  | $\pm 11.0$  | $\pm 12.3$ |     | $\pm 11.0$ | $\pm 12.3$ |     | V                            |
| COMMON-MODE REJECTION RATIO                                       | CMRR                 | $V_{CM} = \pm 11\text{ V}$                             | 114         | 126        |     | 100        | 120        |     | dB                           |
| POWER SUPPLY REJECTION RATIO                                      | PSRR                 | $V_S = \pm 4\text{ V to } \pm 18\text{ V}$             | 1           | 10         |     | 2          | 20         |     | $\mu\text{V}/\text{V}$       |
| LARGE SIGNAL VOLTAGE GAIN   | $A_{VO}$             | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$  | 1000        | 1800       |     | 700        | 1500       |     | $\text{V}/\text{mV}$         |
|   |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$ | 800         | 1500       |     | 600        | 1500       |     | $\text{V}/\text{mV}$         |
| OUTPUT VOLTAGE SWING  | $V_O$                | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | $\pm 12.0$  | $\pm 13.8$ |     | $\pm 11.5$ | $\pm 13.5$ |     | V                            |
|   |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$                           | $\pm 10.0$  | $\pm 11.5$ |     | $\pm 10.0$ | $\pm 11.5$ |     | V                            |
| SLEW RATE <sup>6</sup>  | SR                   | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | 1.7         | 2.8        |     | 1.7        | 2.8        |     | $\text{V}/\mu\text{s}$       |
| GAIN BANDWIDTH PRODUCT <sup>6</sup>                               | GBW                  |  | 5.0         | 8.0        |     | 5.0        | 8.0        |     | MHz                          |
| OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE                                       | $R_O$                | $V_O = 0$ , $I_O = 0$                                  |             | 70         |     |            | 70         |     | $\Omega$                     |
| POWER CONSUMPTION   | $P_d$                | $V_O$  |             | 90         | 140 |            | 100        | 170 | mW                           |
| OFFSET ADJUSTMENT RANGE   |                      | $R_P = 10\text{ k}\Omega$                              |             | $\pm 4.0$  |     |            | $\pm 4.0$  |     | mV                           |



# Amplificazione Differenziale Finita (I)

- Effetto di  $A_d$  finita sull'amplificazione  $A_v$  di un amplificatore di tensione consideriamo per semplicità  $R_{in} \rightarrow \infty$ ,  $R_{out} = 0$ .



$$v_{out} = A_d(v_{in} - \beta v_{out})$$

Ideale:

$$A_{v\infty} = \frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Con  $A_d$  finita:

$$A_v = \frac{\beta A_d}{1 + \beta A_d} \frac{1}{\beta}$$

$$\frac{\beta A_d}{1 + \beta A_d} \simeq 1 - \frac{1}{\beta A_d}$$

Errore relativo rispetto al caso ideale

L'errore decresce all'aumentare del guadagno d'anello  $\beta A_d$ , in cui  $A_d$  è moltiplicata per  $\beta = 1/A_{v\infty}$

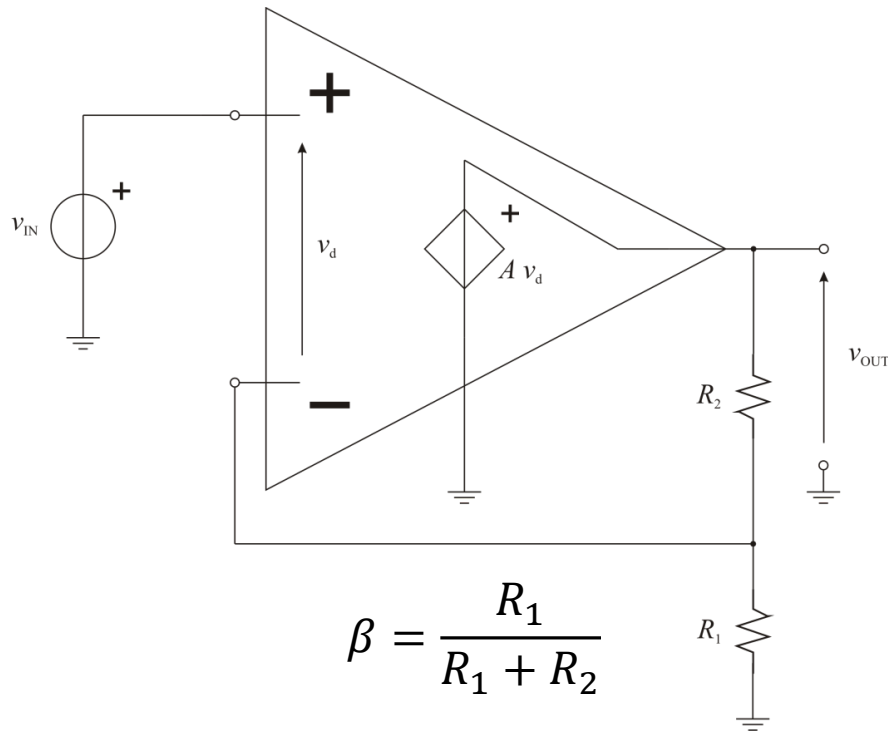
- L'errore relativo dovuto ad  $A_d$  finita è legato al rapporto tra  $\frac{A_v}{A_d}$ , dove  $A_v$  è l'amplificazione voluta ( $\simeq A_{v\infty}$ )
- L'amplificazione  $A_v$  effettiva non potrà mai essere maggiore di  $A_d$ !





# Amplificazione Differenziale Finita (II)

- Effetto di  $A_d$  finita sull'amplificazione  $A_v$  di un amplificatore di tensione



Ideale:

$$A_{v\infty} = \frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Con  $A_d$  finita:

$$A_v = \frac{\beta A_d}{1 + \beta A_d} \frac{1}{\beta}$$

Esempi numerici:

$$A_{v\infty} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 10: \text{ caso ideale}$$

con un operazionale con  $A_d = 10^4$  (80dB)

$$\beta A_d = 10^3 \rightarrow A_v = 9.99 \text{ (errore } 10^{-3})$$

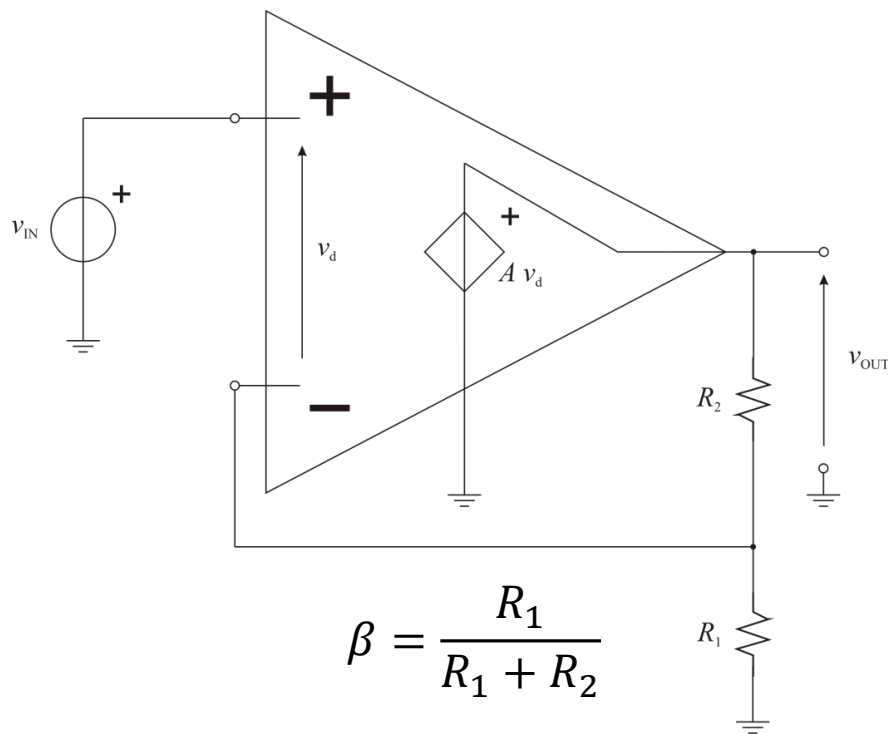
con un operazionale con  $A_d = 10^3$  (60dB)

$$\beta A_d = 10^2 \rightarrow A_v = 9.9 \text{ (errore 1\%)}$$



# Amplificazione Differenziale Finita (III)

- Effetto di  $A_d$  finita sull'amplificazione  $A_v$  di un amplificatore di tensione



Ideale:

$$A_{v\infty} = \frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Con  $A_d$  finita:

$$A_v = \frac{\beta A_d}{1 + \beta A_d} \frac{1}{\beta}$$

Esempi numerici:

$$A_{v\infty} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 100: \text{caso ideale}$$

con un operazionale con  $A_d = 10^4$  (80dB)

$$\beta A_d = 10^2 \rightarrow A_v = 99 \text{ (errore 1\%)}$$

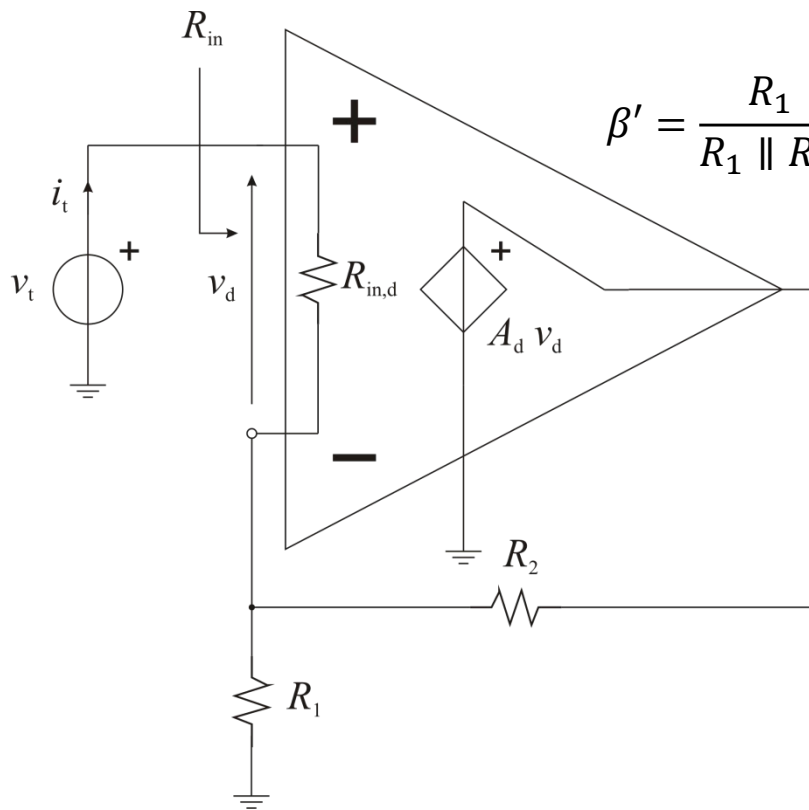
con un operazionale con  $A_d = 10^3$  (60dB)

$$\beta A_d = 10^1 \rightarrow A_v = 91 \text{ (errore 9\%)}$$



# Amplificazione Differenziale Finita (IV)

- Effetto di  $A_d$  finita sulla resistenza d'ingresso  $R_{in}$  di un amplificatore di tensione consideriamo per semplicità  $R_{out} = 0$ .



$$\beta' = \frac{R_1 \parallel R_{in,d}}{R_1 \parallel R_{in,d} + R_2}$$

$$v_d = \left( \frac{R_{in,d}}{R_{in0}} v_t - A_d \beta' v_d \right)$$

$$v_d = \frac{R_{in,d}}{R_{in0}} \frac{v_t}{1 + A_d \beta'} \quad i_t = \frac{1}{R_{in,0}} \frac{v_t}{1 + A_d \beta'}$$

$$R_{in0} = R_{in,d} + R_1 \parallel R_2 \quad (\text{con } A_d = 0)$$

Ideale:  $R_{in} \rightarrow \infty$

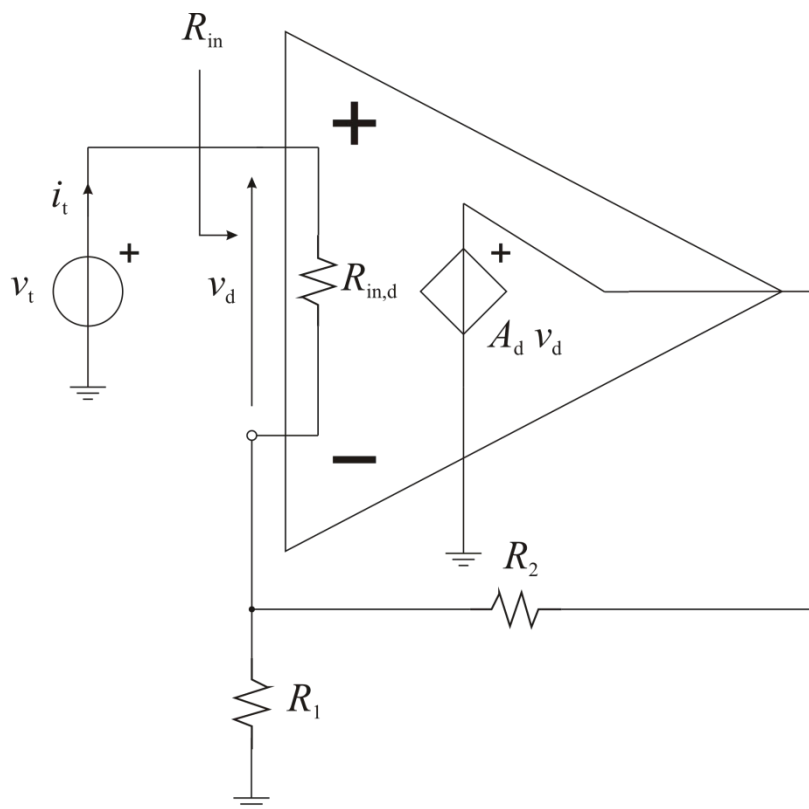
Con  $A_d$  finita:  $R_{in} = R_{in,0} (1 + A_d \beta')$

$R_{in}$  è pari alla resistenza in ingresso che si avrebbe con  $A_d = 0$  moltiplicata per  $(1 + A_d \beta')$



# Amplificazione Differenziale Finita (V)

- Effetto di  $A_d$  finita sulla resistenza d'ingresso di un amplificatore di tensione consideriamo per semplicità  $R_{out} = 0$ .



Ideale:  $R_{in} \rightarrow \infty$

Con  $A_d$  finita:  $R_{in} = R_{in,0} (1 + A_d \beta')$

Esempi numerici:  $R_{in,d} = 10\text{M}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ,  
 $R_2 = 99\text{k}\Omega$ ,  $A_{v\infty} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 100$ .

$$R_{in,0} = 10\text{M}\Omega + 0.99\text{k}\Omega \simeq 10\text{M}\Omega$$

$$\beta' = \frac{R_1 \parallel R_{in,d}}{R_1 \parallel R_{in,d} + R_2} = 0.0099 \simeq 0.01$$

con un operazionale con  $A_d = 10^4$  (80dB)

$$R_{in} = (1 + 100) \cdot 10\text{M}\Omega = 1.01\text{G}\Omega$$

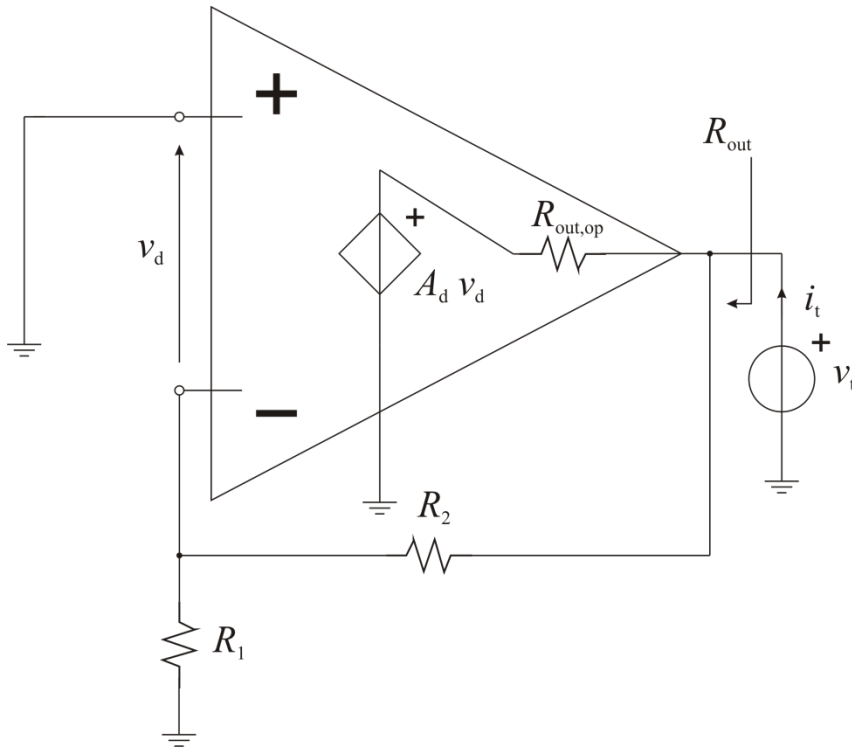
con un operazionale con  $A_d = 10^3$  (60dB)

$$R_{in} = (1 + 10) = 110\text{M}\Omega$$



# Amplificazione Differenziale Finita (VI)

- Effetto di  $A_d$  finita sulla resistenza d'uscita di un amplificatore di tensione



$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad v_d = -\beta v_t$$

$$i_t = \frac{(\beta A_d + 1)v_t}{R_{out,op}} + \frac{v_t}{R_1 + R_2}$$

$$R_{out} = \frac{R_{out,op}}{1 + A_d \beta} \parallel (R_1 + R_2) \simeq \frac{R_{out,op}}{1 + A_d \beta}$$

Ideale:

$$R_{out} = 0$$

con  $A_d$  finita:

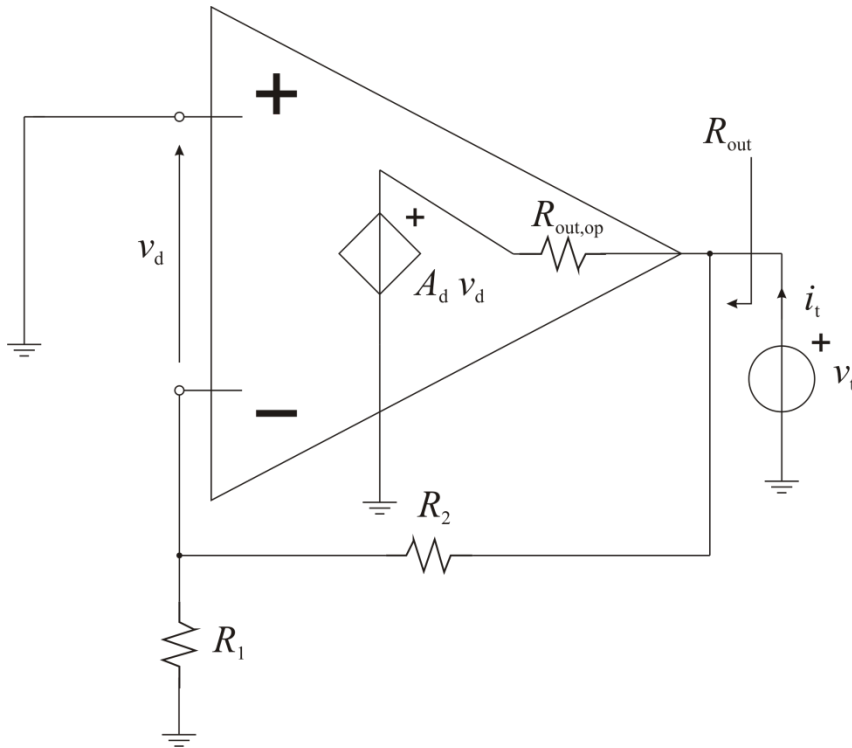
$$R_{out} \simeq \frac{R_{out,op}}{1 + A_d \beta}$$

La resistenza d'uscita  $R_{out}$  è pari alla resistenza d'uscita dell'operazionale  $R_{out,op}$  divisa per  $(1 + A_d \beta)$ . La resistenza della rete di retroazione, in parallelo è normalmente trascurabile.



# Amplificazione Differenziale Finita (VI)

- Effetto di  $A_d$  finita sulla resistenza d'uscita di un amplificatore di tensione



Ideale:

$$R_{out} = 0$$

con  $A_d$  finita:

$$R_{out} \approx \frac{R_{out,op}}{1 + A_d \beta}$$

Esempi numerici:

per  $R_{out,op} = 1k\Omega$  e  $A_{v\infty} = \frac{1}{\beta} = 10$

con  $A_d = 10^4$  (80dB):  $R_{out} = 0.999\Omega$

con  $A_d = 10^3$  (60dB):  $R_{out} = 9.9\Omega$

per  $R_{out,op} = 1k\Omega$  e  $A_{v\infty} = \frac{1}{\beta} = 100$

con  $A_d = 10^4$  (80dB):  $R_{out} = 9.9\Omega$

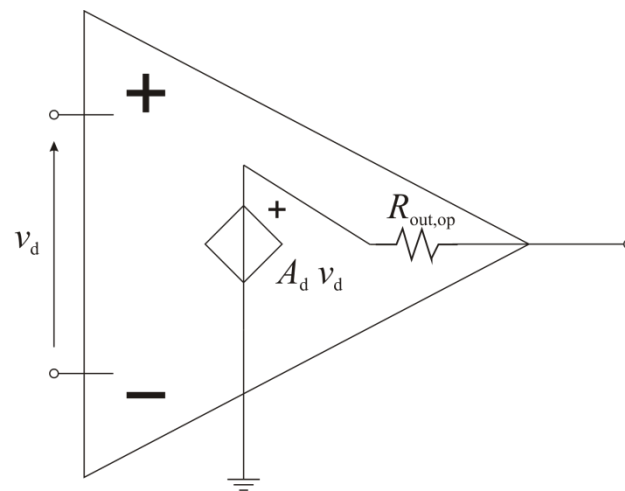
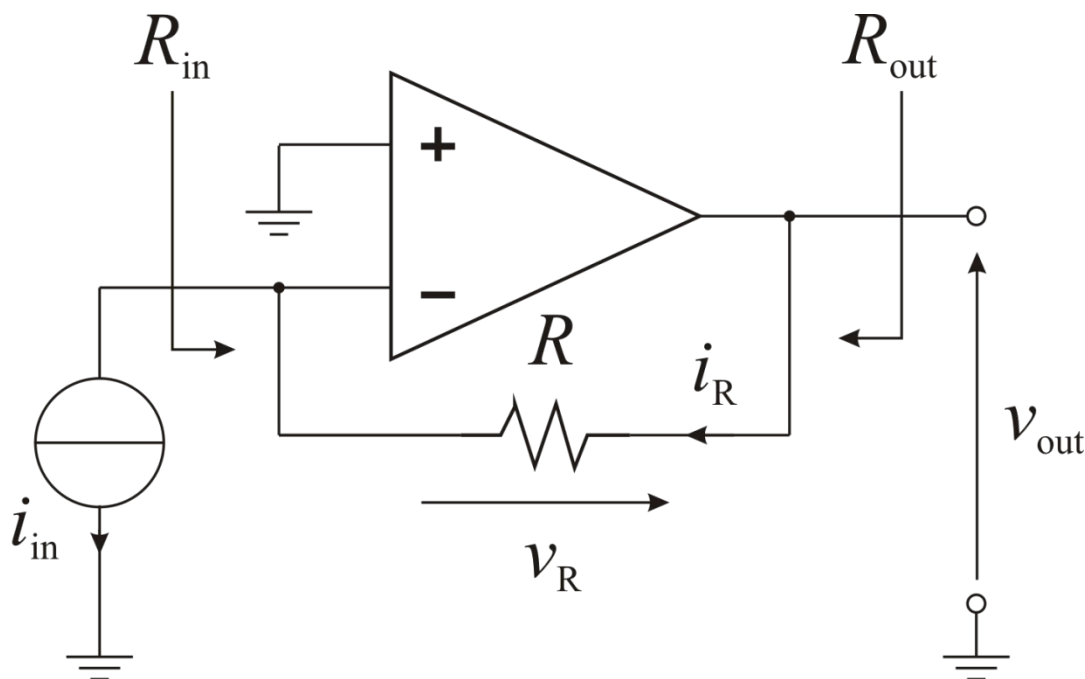
con  $A_d = 10^3$  (60dB):  $R_{out} = 90.9\Omega$



# Esercizio

Con riferimento al circuito in figura a sinistra, in cui  $R = 100\text{k}\Omega$ , si determini l'amplificazione di transresistenza  $\frac{v_{out}}{i_{in}}$ , la resistenza d'ingresso  $R_{in}$  e la resistenza d'uscita  $R_{out}$ :

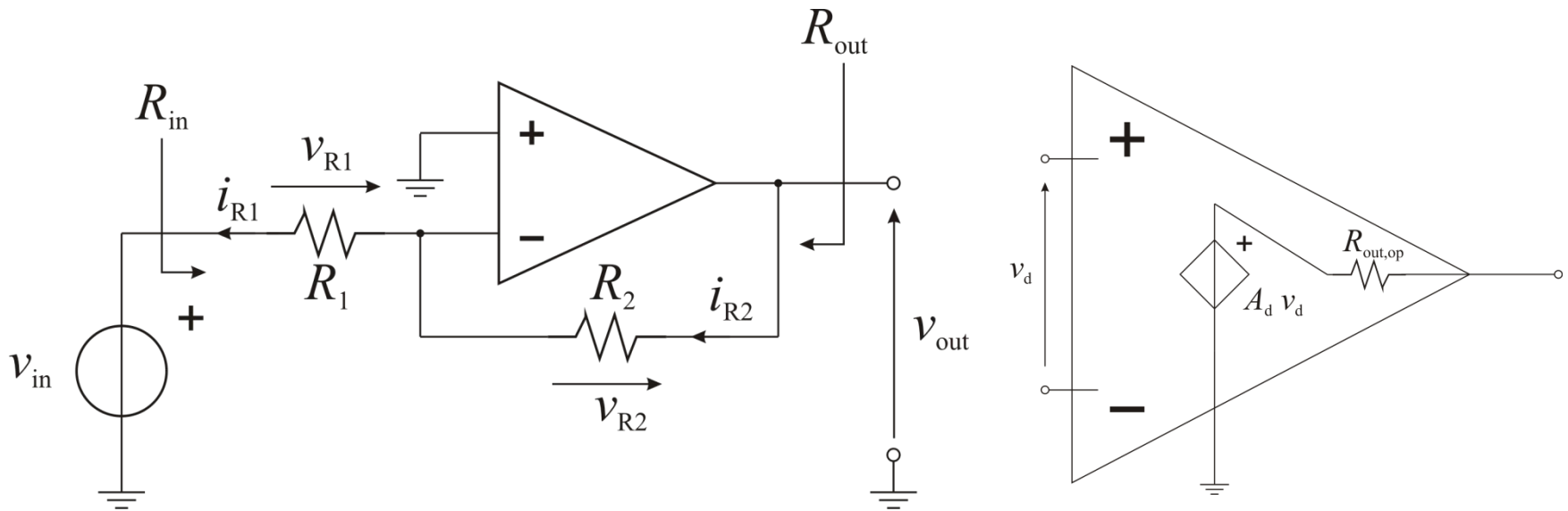
- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia ideale ( $A_d \rightarrow \infty$ )
- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale presenti  $A_d = 10^4$  (80dB) resistenze d'ingresso trascurabili e resistenza d'uscita  $R_{out,op} = 100\Omega$  (figura a destra)



# Esercizio

Con riferimento al circuito in figura a sinistra, in cui  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{k}\Omega$ , si determini l'amplificazione di tensione  $\frac{v_{out}}{v_{in}}$ , la resistenza d'ingresso  $R_{in}$  e la resistenza d'uscita  $R_{out}$ :

- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia ideale ( $A_d \rightarrow \infty$ )
- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale presenti  $A_d = 10^4$  (80dB) resistenze d'ingresso trascurabili e resistenza d'uscita  $R_{out,op} = 100\Omega$  (figura a destra)

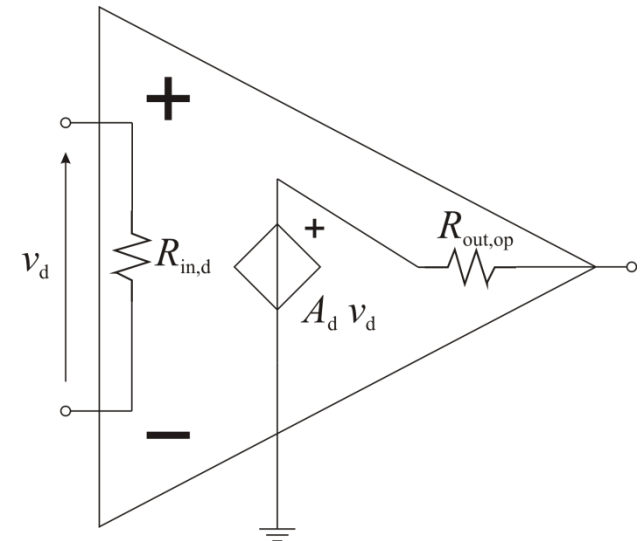
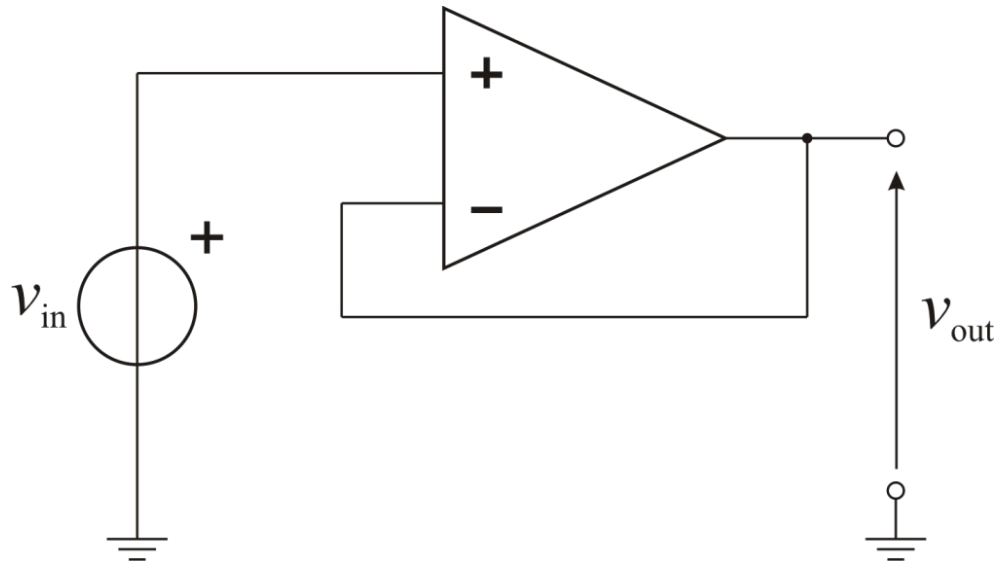




# Esercizio

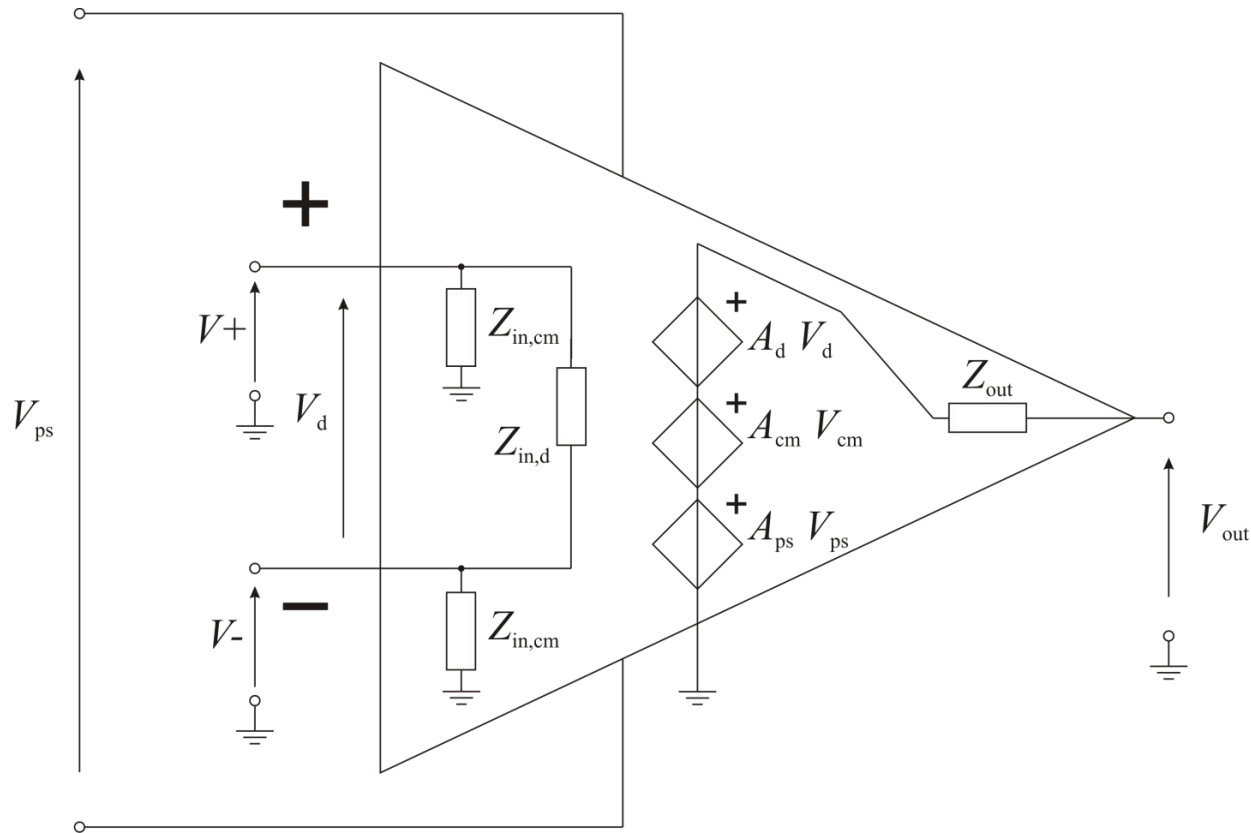
Con riferimento all'amplificatore in configurazione voltage follower in figura, determinare:  
l'amplificazione di tensione  $\frac{v_{out}}{v_{in}}$ , la resistenza d'ingresso  $R_{in}$  e la resistenza d'uscita  $R_{out}$ :

- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia ideale ( $A_d \rightarrow \infty$ )
- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale presenti  $A_d = 10^4$  (80dB) resistenza d'ingresso differenziale  $R_{in} = 1\text{M}\Omega$  e resistenza d'uscita  $R_{out,op} = 100\Omega$  (figura a destra)



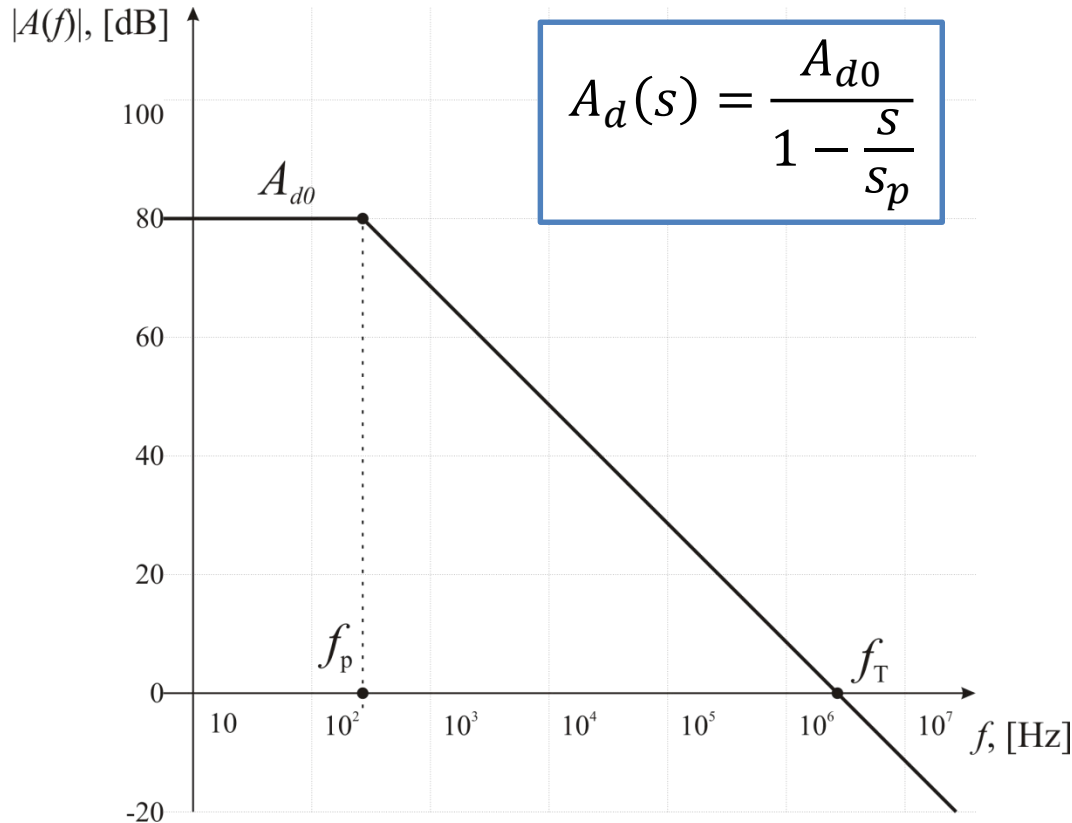
# Limitazione di Banda (I)

Il circuito equivalente dell'operazionale in linearità, si può generalizzare in modo naturale alle condizioni dinamiche, sostituendo le resistenze con impedenze e considerando  $A_d(s)$ ,  $A_{cm}(s)$  e  $A_{ps}(s)$  come funzioni di trasferimento nel dominio della frequenza.



# Limitazione di Banda (II)

In un operazionale reale, l'amplificazione differenziale ha una risposta in frequenza a singolo polo:



$A_{d0}$  guadagno in continua

$f_p = -\frac{s_p}{2\pi}$  frequenza di taglio del polo

$f_T = f_p A_{d0}$  frequenza di taglio a 0dB, detto anche prodotto banda-guadagno (ingl.: GBW, *gain-bandwidth product*)

Valori tipici per un operazionale:

$A_{d0}$  : 60dB - 120dB

$f_p = 1\text{Hz} - 100\text{Hz}$

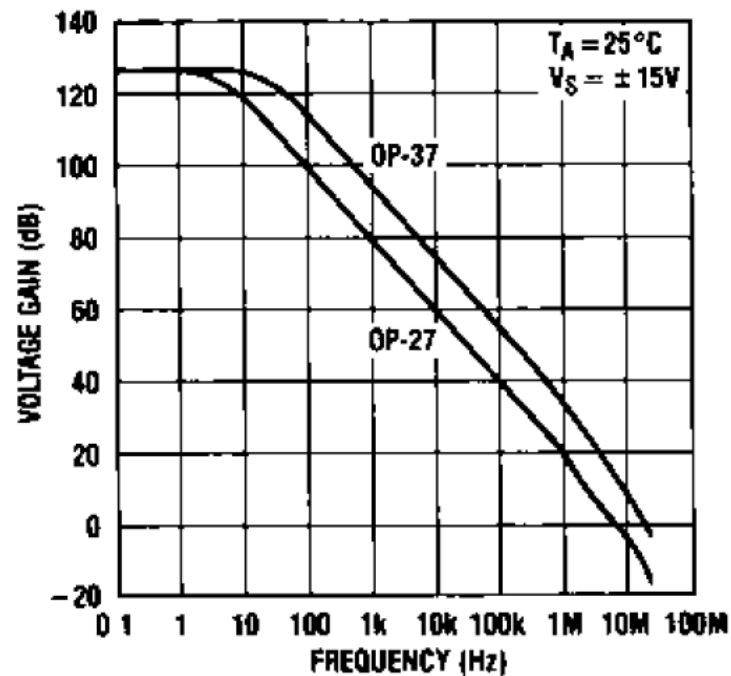
$f_T = A_{d0}f_p = 100\text{kHz} - 10\text{MHz}$

Nei datasheet normalmente sono riportati  $A_{d0}$  ed il prodotto banda-guadagno  $f_T$



|                                     |       |                              |            |            |            |            |            |
|-------------------------------------|-------|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| OUTPUT VOLTAGE SWING                | $V_O$ | $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$ | $\pm 12.0$ | $\pm 13.8$ | $\pm 11.5$ | $\pm 13.5$ | V          |
|                                     |       | $R_L \geq 600 \Omega$        | $\pm 10.0$ | $\pm 11.5$ | $\pm 10.0$ | $\pm 11.5$ | V          |
| SLEW RATE <sup>6</sup>              | SR    | $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$ | 1.7        | 2.8        | 1.7        | 2.8        | V/ $\mu$ s |
| GAIN BANDWIDTH PRODUCT <sup>6</sup> | GBW   |                              | 5.0        | 8.0        | 5.0        | 8.0        | MHz        |
| OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE         | $R_O$ | $V_O = 0, I_O = 0$           | 70         |            | 70         |            | $\Omega$   |
| POWER CONSUMPTION                   | $P_d$ | $V_O$                        | 90         | 140        | 100        | 170        | mW         |
| OFFSET ADJUSTMENT RANGE             |       | $R_P = 10 \text{ k}\Omega$   | $\pm 4.0$  |            | $\pm 4.0$  |            | mV         |

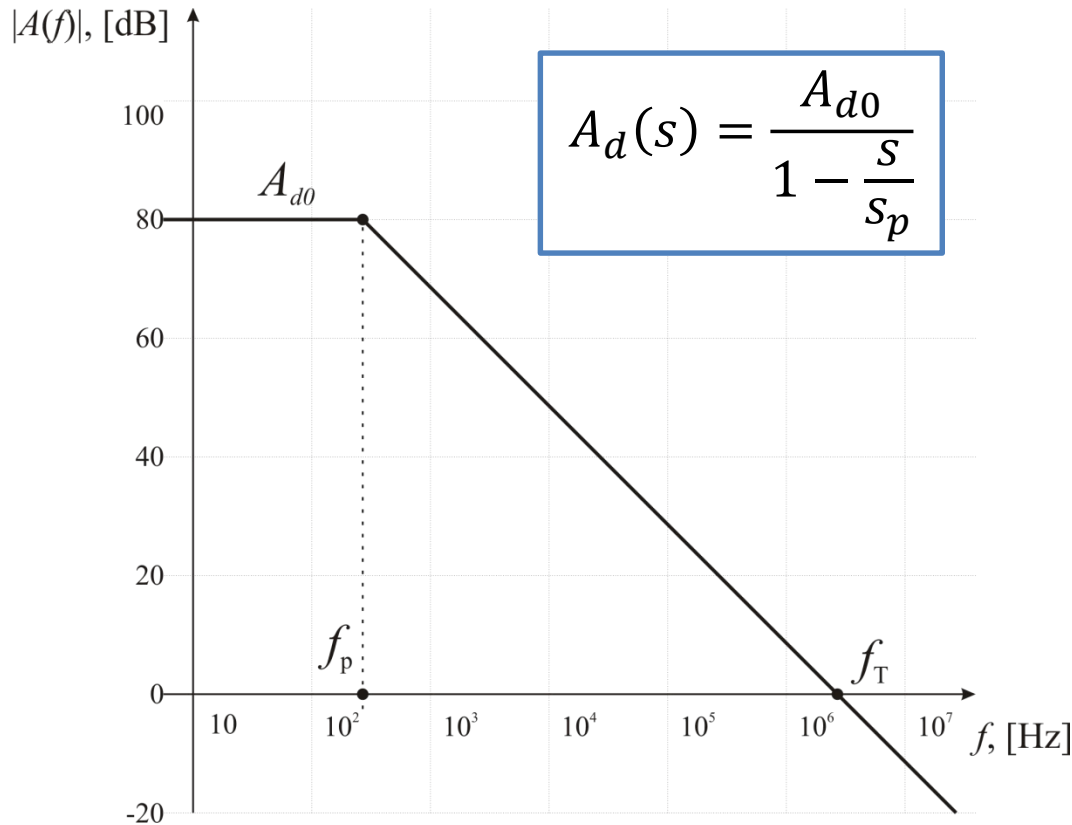
### Voltage Gain vs Frequency



# Limitazione di Banda (III)

All'aumentare della frequenza, l'amplificazione differenziale diminuisce in modulo con impatto sulle prestazioni in frequenza (limitazione di banda) degli amplificatori basati su operazionale.

E' possibile studiare le limitazioni di banda sostituendo  $A_d(s)$  nell'analisi per  $A_d$  finita.



$A_{d0}$  guadagno in continua

$f_p = -\frac{s_p}{2\pi}$  frequenza polo

$f_T = f_p A_{d0}$  frequenza di taglio a 0dB,  
detto anche prodotto banda-guadagno  
(ingl.: GBW, *gain-bandwidth product*)

Valori tipici per un operazionale:

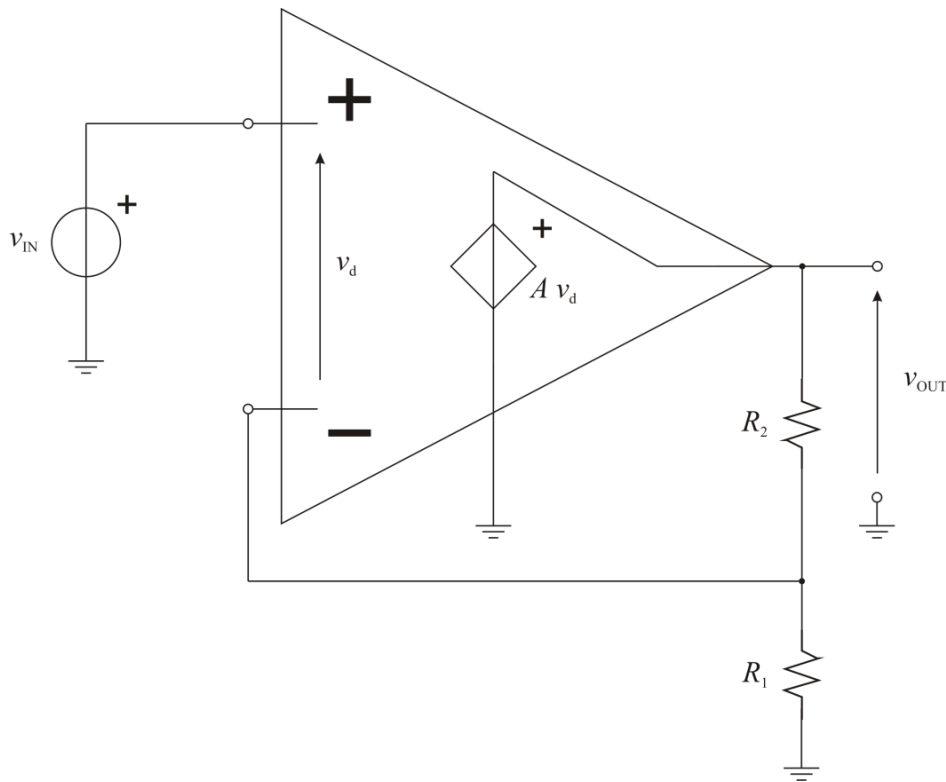
$A_{d0}$  : 60dB - 120dB

$f_p = 1\text{Hz} - 100\text{Hz}$

$f_T = A_{d0}f_p = 100\text{kHz} - 10\text{MHz}$



# Limitazione di Banda – Amplificatore di Tensione (I)



$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad A_d(s) = \frac{A_{d0}}{1 - \frac{s}{s_p}}$$

$$A_v(s) = \frac{\beta A_d(s)}{1 + \beta A_d(s)} \frac{1}{\beta}$$

sostituendo l'espr. di  $A_d(s)$

$$A_v(s) = \frac{\beta A_{d0}}{1 + \beta A_{d0} - \frac{s}{s_p} \beta} \frac{1}{\beta}$$

$$A_v(s) = \frac{1}{1 - \frac{s}{s_p(1 + \beta A_{d0})}} \frac{\beta A_{d0}}{1 + \beta A_{d0}} \frac{1}{\beta}$$

$$A_v(0) = \frac{\beta A_{d0}}{1 + \beta A_{d0}} \frac{1}{\beta}$$

$$\text{Polo di } A_v(s): s_{p,A_v} = s_p(1 + \beta A_{d0})$$

La banda  $B$  dell'amplificatore di tensione è limitata dal polo a frequenza di taglio  $f_{p,A_v}$ , che è  $\beta A_{d0}$  più alta rispetto alla freq. di taglio  $f_p$  del polo dell'operazionale e  $\beta < 1$  volte più bassa di  $f_T$

**Banda dell'Amplificatore di Tensione**

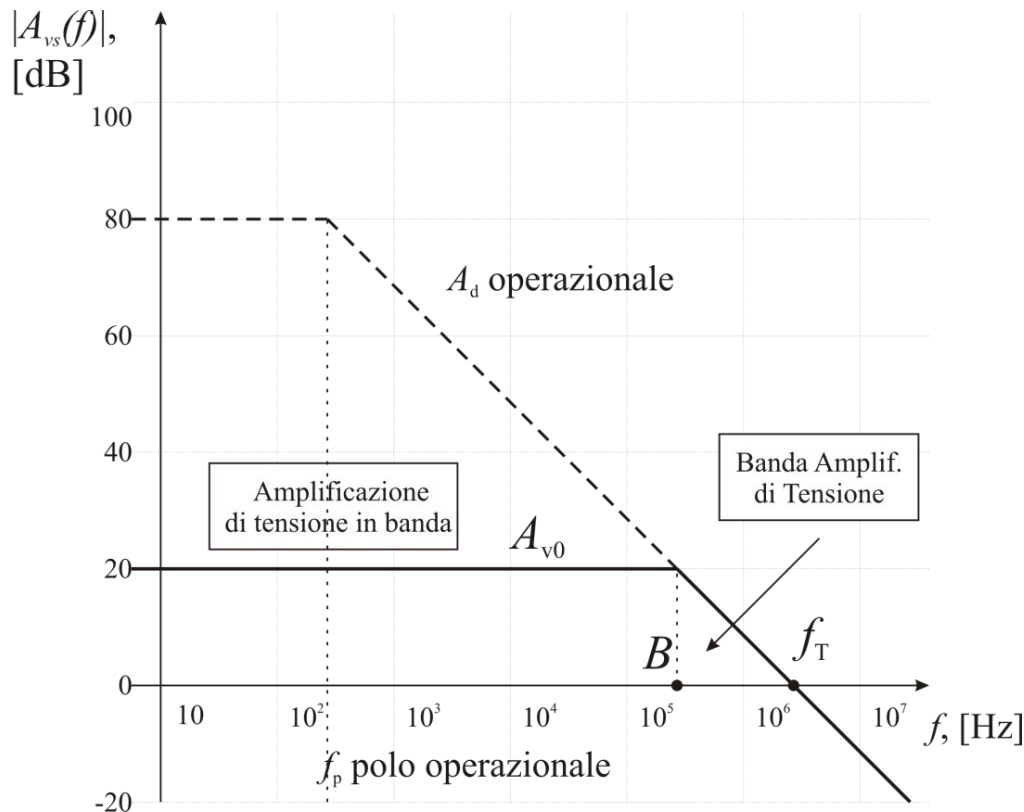
$$B = f_{p,A_v} \simeq f_p A_{d0} \beta = \beta f_T$$



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Limitazione di Banda – Amplificatore di Tensione (II)



La banda  $B$  dell'amplificatore di tensione è limitata dal polo a frequenza di taglio  $f_{p,A_v}$ , che è  $\beta A_{d0}$  più alta rispetto alla freq. di taglio  $f_p$  del polo dell'operazionale e  $\beta < 1$  volte più bassa di  $f_T$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad A_d(s) = \frac{A_{d0}}{1 - \frac{s}{s_p}}$$

$$A_v(s) = \frac{\beta A_d(s)}{1 + \beta A_d(s)} \frac{1}{\beta}$$

sostituendo l'espr. di  $A_d(s)$

$$A_v(s) = \frac{\beta A_{d0}}{1 + \beta A_{d0} - \frac{s}{s_p} \beta}$$

$$A_v(s) = \frac{1}{1 - \frac{s}{s_p(1 + \beta A_{d0})}} \frac{\beta A_{d0}}{1 + \beta A_{d0}} \frac{1}{\beta}$$

$$A_v(0) = \frac{\beta A_{d0}}{1 + \beta A_{d0}} \frac{1}{\beta}$$

$$\text{Polo di } A_v(s): s_{p,A_v} = s_p(1 + \beta A_{d0})$$

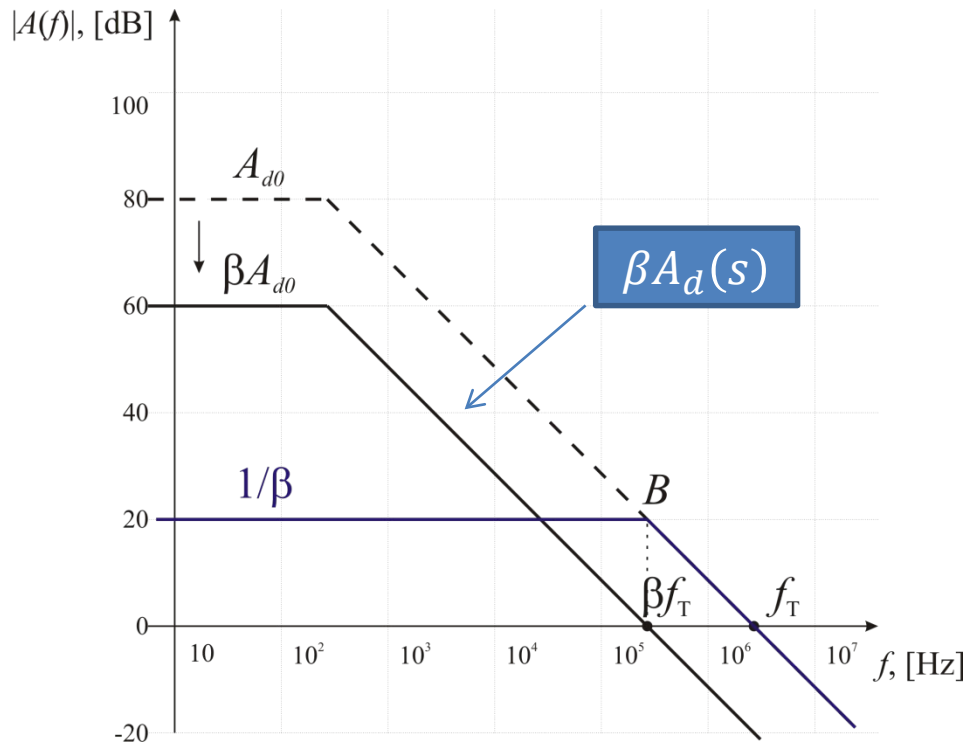
**Banda dell'Amplificatore di Tensione**

$$B = f_{p,A_v} \simeq f_p A_{d0} \beta = \beta f_T$$



# Limitazione di Banda – Amplificatore di Tensione (III)

Approccio alternativo:



$$A_v(s) = \frac{\beta A_d(s)}{1 + \beta A_d(s)} \frac{1}{\beta}$$

$$\beta A_d(s) = \frac{\beta A_{d0}}{1 - \frac{s}{s_p}}$$

Condizione per essere in banda:

$$|\beta A_d(s)| > 1$$

Limite di banda:

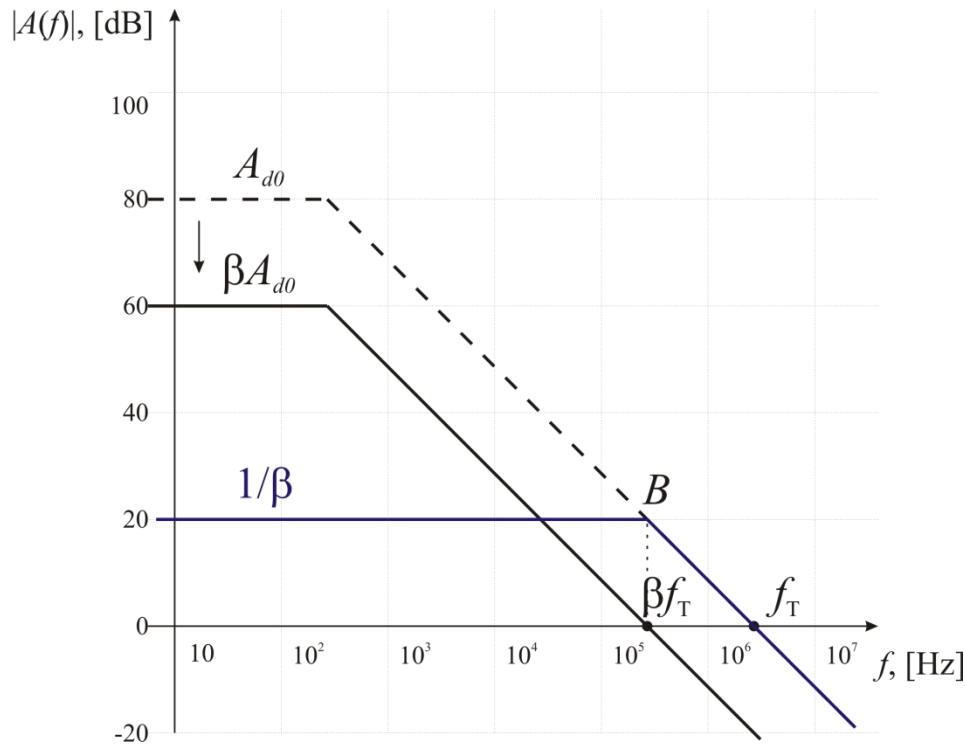
$$B = \beta f_T$$

- La retroazione è efficace solo se  $|T| = |\beta A_d(s)| \gg 1$ .
- Risposta in frequenza del guadagno d'anello  $\beta A_d(s)$ : è la risposta di  $A_d$  traslata in basso di  $\beta$
- L'amplificatore è in banda fintanto che  $|\beta A_d(s)| > 1$ , cioè  $> 0\text{dB}$ : questo avviene a una frequenza  $B = \beta f_T$  più bassa di un fattore  $\beta$  rispetto alla frequenza a guadagno unitario  $f_T$  dell'operazionale.





# Limitazione di Banda – Amplificatore di Tensione (IV)



Valido solo per amplificatori di tensione non invertenti

Limite di Banda

$$B = \beta f_T$$

Guadagno in Banda

$$A_{v\infty} = \frac{1}{\beta}$$

Prodotto banda-guadagno

$$f_T = \frac{B}{\beta} = A_{v\infty} B$$

- In tutti gli *amplificatori di tensione non invertenti* basati sullo stesso operazionale il prodotto banda-guadagno è costante e pari alla frequenza a guadagno unitario  $f_T$  dell'operazionale.
- La massima banda si ha per guadagno di tensione unitario ( $\beta = 1$ , voltage follower) ed è proprio  $f_T$



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Limitazione di Banda

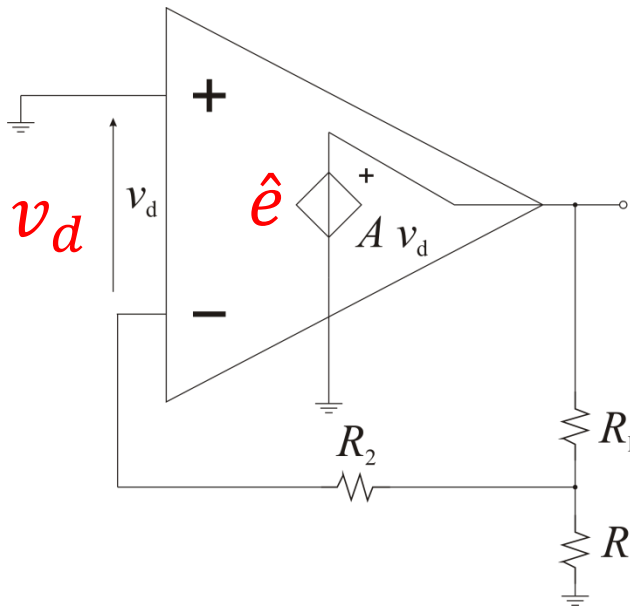
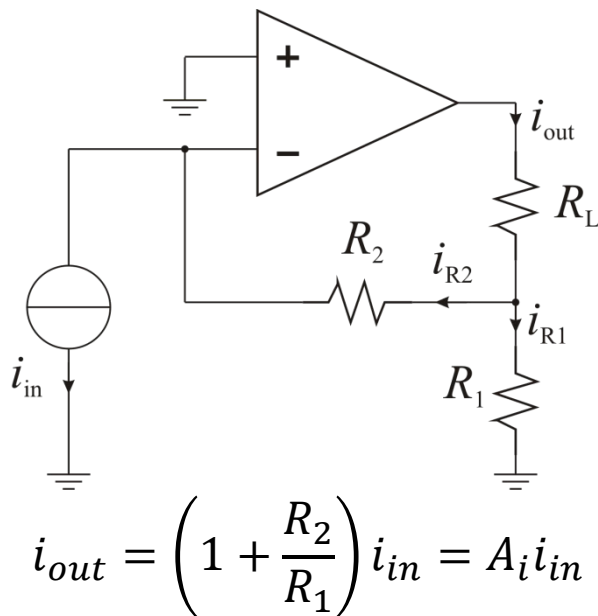
## Osservazione n.1

Il metodo basato sul guadagno d'anello si applica a qualsiasi operazionale con retroazione negativa.

- Il fattore  $\beta$  (positivo) è il contributo del generatore pilotato, considerato come gen. Indipendente  $\hat{e}$ , su  $v_d$ , (come nel metodo del pilota)

- Il guadagno d'anello è  $\beta A_d$ , dove  $A_d$  è l'amplificazione differenziale.

**Esempio: amplificatore di corrente**



$$\beta = -\frac{v_d}{\hat{e}}$$

$$\beta = -\frac{v_d}{\hat{e}} = \frac{R_1}{R_1 + R_L}$$

Limite Banda

$$B = \beta f_T$$

Nota:  $\frac{1}{\beta} \neq A_i$



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Stabilità (cenni)

## Osservazione n.2

Guardando il denominatore dell'amplificazione di tensione ad anello chiuso  $A_v(s)|_{s=j2\pi f}$

$$A_v(j2\pi f) = \frac{\beta A_d(j2\pi f)}{1 + \beta A_d(j2\pi f)} \frac{1}{\beta}$$

si osserva che per  $A_v$  è singolare se  $\beta A_d(j2\pi f) = -1$ , cioè se  $|\beta A_d(j2\pi f)| = 1$  e  $\angle \beta A_d(j2\pi f) = 180^\circ$ . Questo si riscontra in tutti i sistemi dinamici con retroazione.

Se si verifica questa condizione ad una qualche frequenza, l'amplificatore diventa instabile, cioè si innescano oscillazioni spontanee non smorzate (questo fenomeno è sfruttato intenzionalmente negli oscillatori) che rendono l'amplificatore inutilizzabile.

Ogni polo in  $A_d(s)$  e in  $\beta$  porta ad una rotazione di fase di  $-90^\circ$ , per cui la condizione  $|\beta A_d(j2\pi f)| = 1$  e  $\angle \beta A_d(j2\pi f) = 180^\circ$  potrebbe verificarsi. Il progettista deve garantire che  $|\beta A_d(s)| \ll 1$  (cioè l'amplificatore sia già fuori banda) quando  $\angle \beta A_d(s)$  si avvicina a  $180^\circ$ .

In quasi tutti gli operazionali in commercio, la stabilità è garantita **per qualsiasi rete di retroazione negativa resistiva** collegata esternamente.



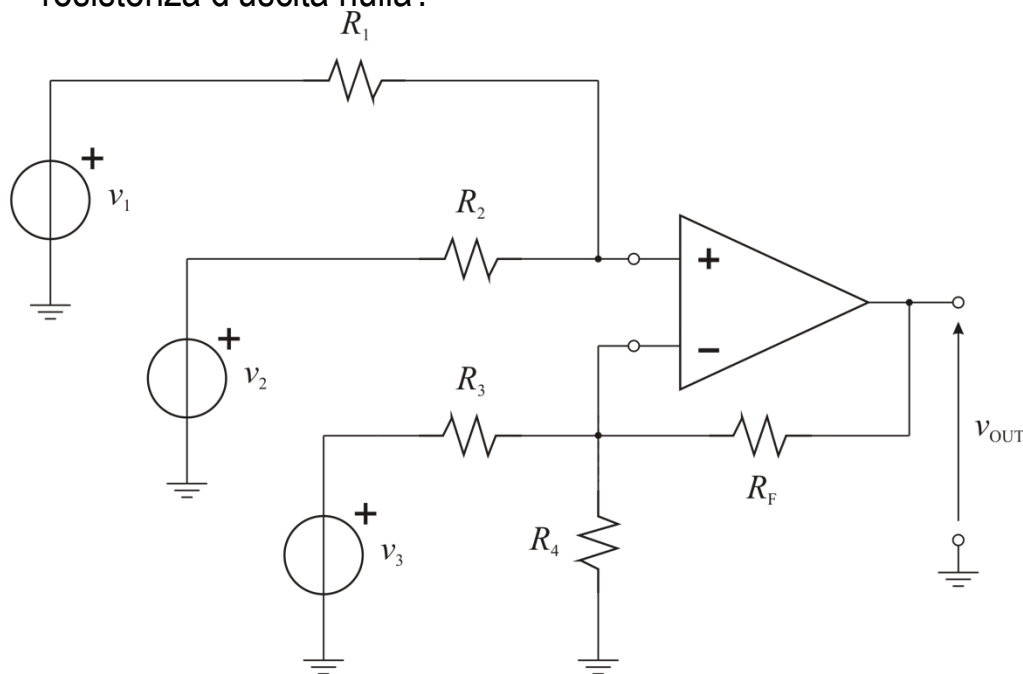
# Esercizio

Utilizzando una resistenza di retroazione  $R_F = 100\text{k}\Omega$  progettare un circuito che generi una tensione  $v_{out} = 3v_1 + 4v_2 - v_3$  a partire da  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  fornite da generatori ideali di tensione.

→ L'esercizio è stato risolto nella lezione sul sommatore generalizzato

Quanto vale la banda passante del circuito progettato?

assumendo che l'operazionale abbia prodotto banda-guadagno  $f_T = 1\text{MHz}$ , resistenza d'ingresso infinita e resistenza d'uscita nulla?



I valori delle resistenze del sommatore erano:

$$R_F = 100\text{k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{R_F}{3} = 33\text{k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_F}{4} = 25\text{k}\Omega$$

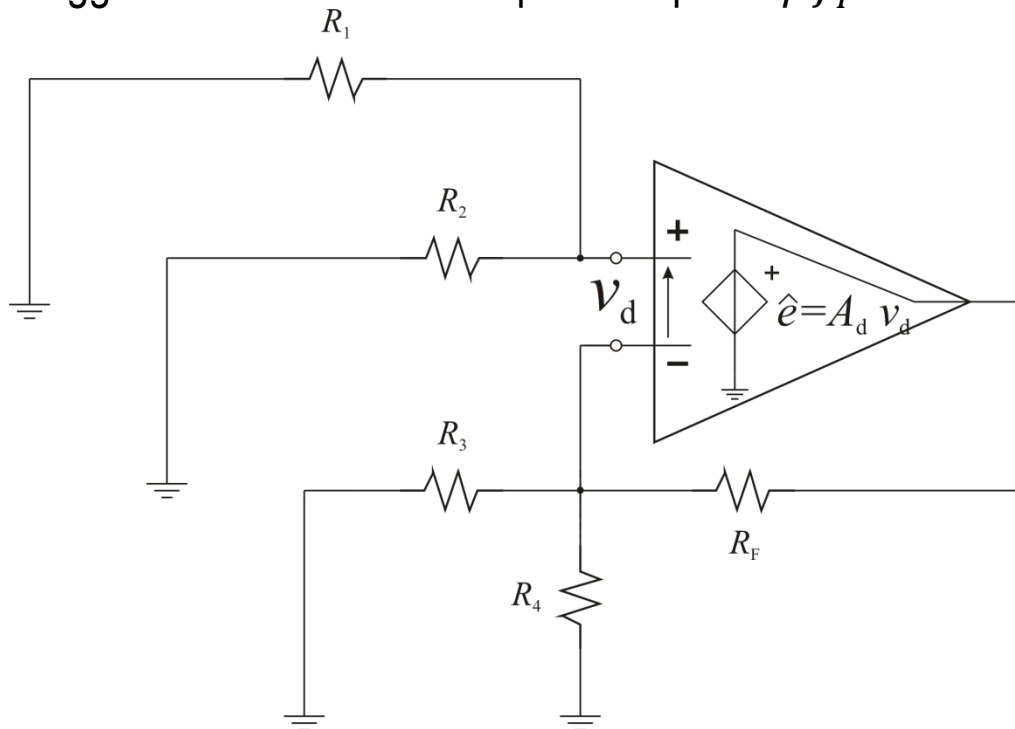
$$R_3 = R_F = 100\text{k}\Omega$$

$$R_4 = \frac{R_F}{5} = 20\text{k}\Omega$$



# Esercizio

La banda passante del circuito è la banda in cui il modulo del guadagno d'anello  $|\beta A_d(f)|$  è maggiore di 1  $\rightarrow$  la banda è pertanto pari a  $\beta f_T$



$$|\beta A_d(f)| \simeq \frac{\beta A_{d0} f_p}{f} = \frac{\beta f_T}{f} > 1$$

per  $f < \beta f_T$

$$R_1 = \frac{R_F}{3} = 33\text{k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{R_F}{4} = 25\text{k}\Omega$$

$$R_3 = R_F = 100\text{k}\Omega$$

$$R_4 = \frac{R_F}{5} = 20\text{k}\Omega$$

calcolo del fattore  $\beta$  (contributo di  $\hat{e}$  alla grandezza pilota  $v_d$ , cambiato di segno)

essendo  $R_{in,d} \rightarrow \infty$   
e  $R_{out} = 0$ :

$$v_d = -\hat{e} \frac{R_3 \parallel R_4}{R_3 \parallel R_4 + R_F} \Rightarrow \beta = -\frac{v_d}{\hat{e}} = \frac{R_3 \parallel R_4}{R_3 \parallel R_4 + R_F} = 0.142$$



# Esercizio

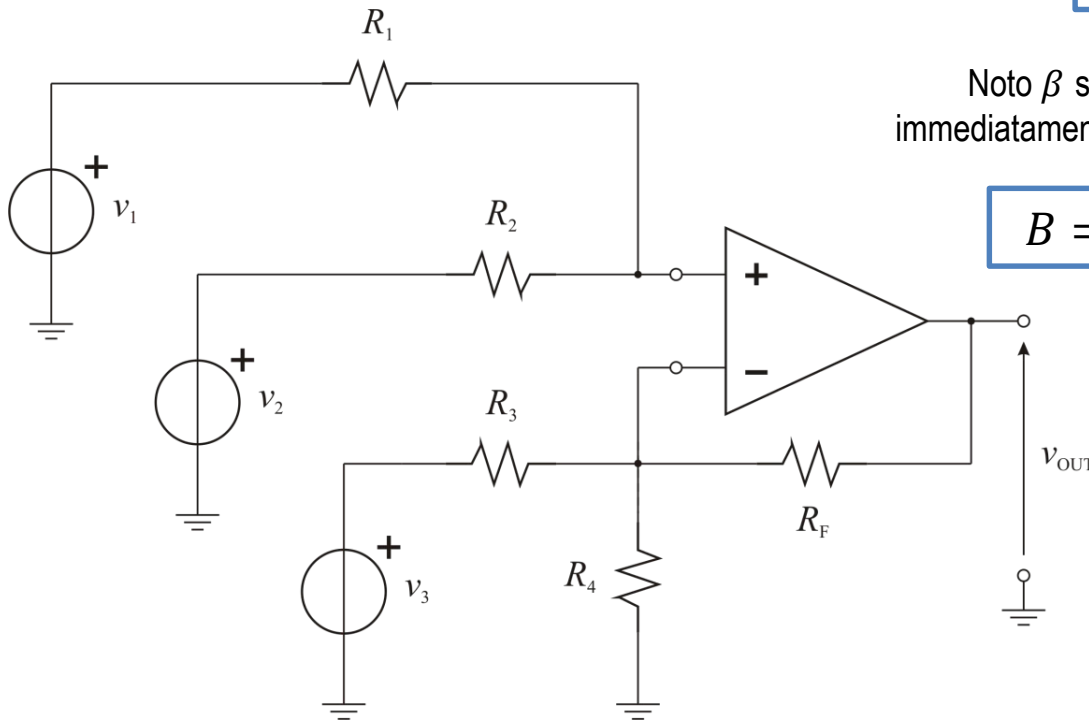
La banda passante del circuito è la banda in cui il modulo del guadagno d'anello  $|\beta A_d|$  è maggiore di 1 ed è pari a  $\beta f_T$

$$\beta = -\frac{v_d}{\hat{e}} = \frac{R_3 \parallel R_4}{R_3 \parallel R_4 + R_F} = 0.142$$

Noto  $\beta$  si ricava  
immediatamente la banda



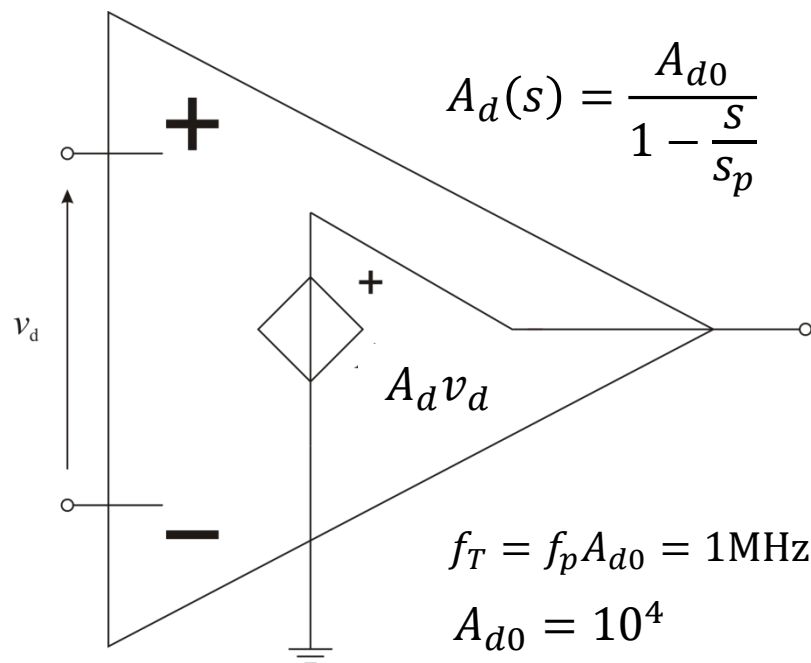
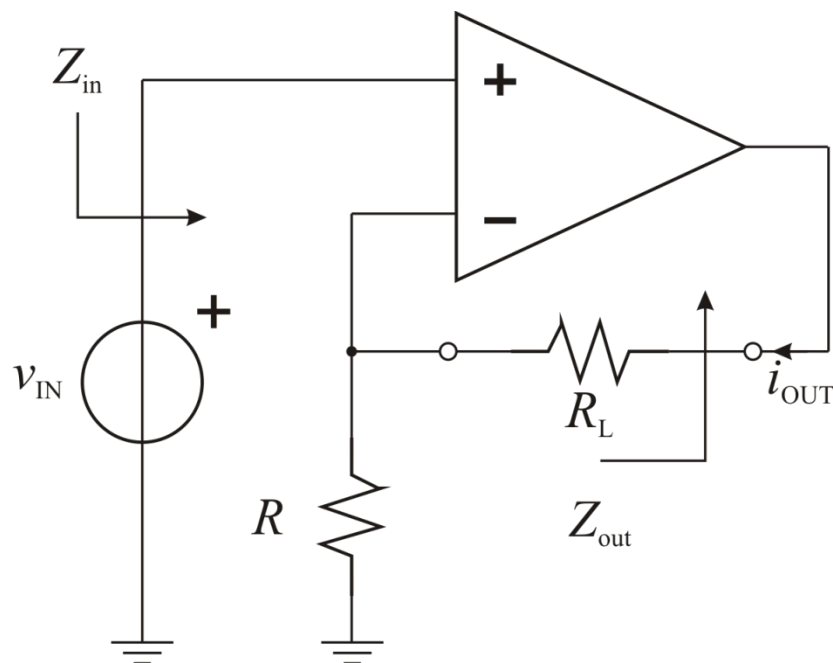
$$B = \beta f_T = 1\text{MHz} \cdot 0.142 = 142\text{kHz}$$



# Esercizio

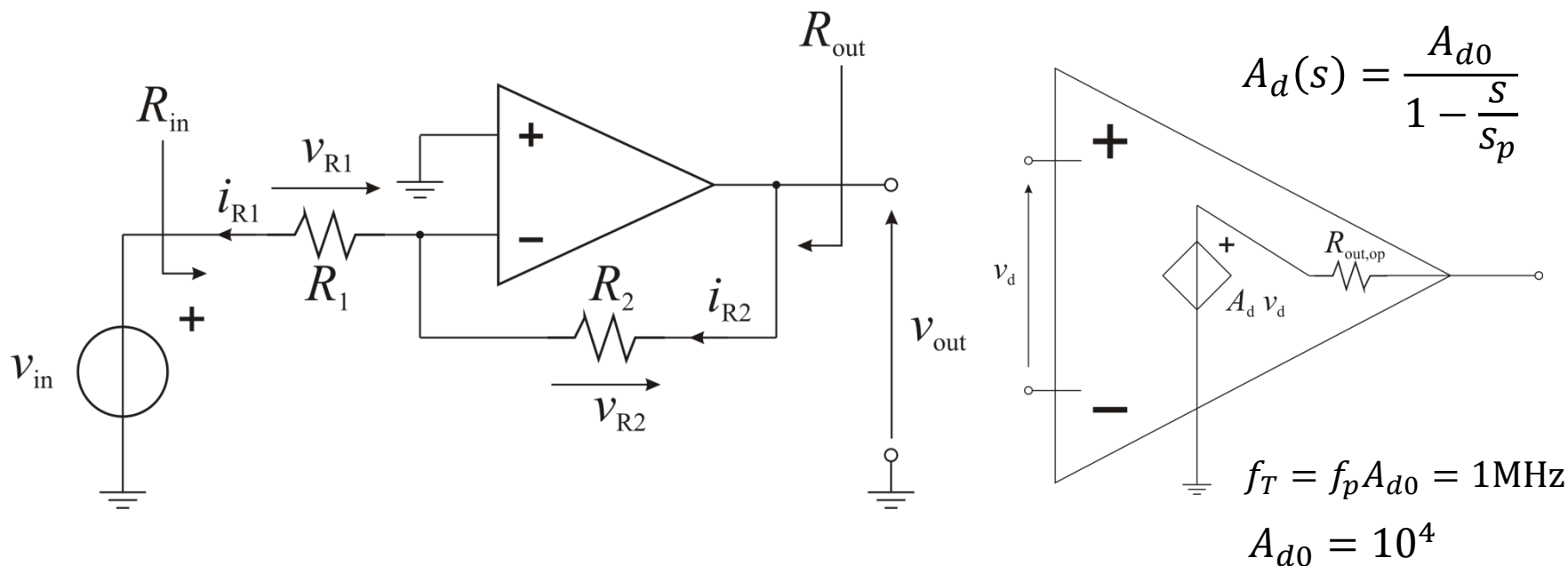
Con riferimento al circuito in figura a sinistra, in cui  $R = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_L = 100\text{k}\Omega$ , si determini la transammettenza  $Y(f) = \frac{I_{out}}{V_{in}}$ , l'impedenza d'ingresso  $Z_{in}$  e l'impedenza d'uscita  $Z_{out}$ :

- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia ideale ( $A_d \rightarrow \infty$ )
- Nel caso in cui l'amplificatore operazionale resistenze d'ingresso e d'uscita trascurabili, amplificazione differenziale a singolo polo con  $A_{d0} = 10^4$  e prodotto banda-guadagno 1MHz.



# Esercizio

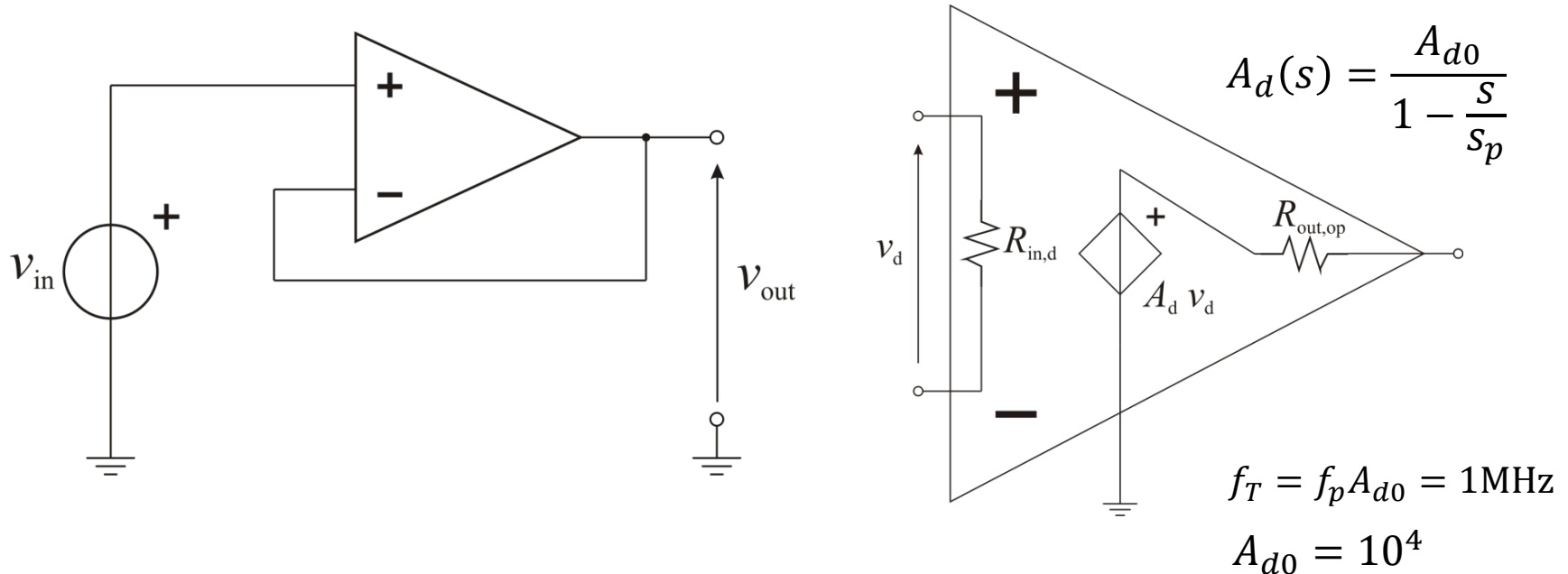
Con riferimento al circuito in figura a sinistra, in cui  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 90\text{k}\Omega$ , si determini l'amplificazione di tensione nel caso in cui l'amplificatore operazionale sia ideale ( $A_d \rightarrow \infty$ ). Si determini poi l'amplificazione di tensione in banda  $A_v(0)$ , e la banda passante del circuito, assumendo che l'operazionale presenti resistenza d'uscita  $R_{out,op} = 1\text{k}\Omega$ , amplificazione differenziale a singolo polo con  $A_{d0} = 10^4$  e prodotto banda-guadagno  $1\text{MHz}$  (figura a destra)





# Esercizio

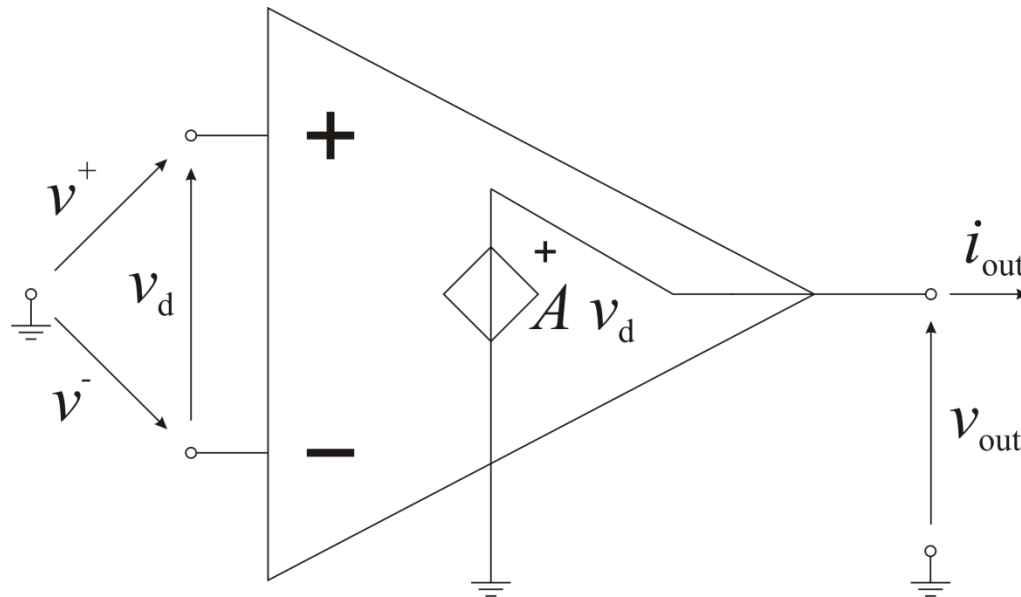
Con riferimento all'amplificatore in configurazione voltage follower in figura, determinare la banda passante del circuito, assumendo che l'operazionale presenti resistenza differenziale d'ingresso  $R_{in,d} = 10\text{k}\Omega$ , resistenza d'uscita  $R_{out,op} = 1\text{k}\Omega$ , amplificazione differenziale a singolo polo con  $A_{d0} = 10^4$  e prodotto banda-guadagno  $1\text{MHz}$  (figura a destra)



# Dinamica d'uscita (tensione e corrente)

Come tutti gli amplificatori, anche gli operazionali presentano limitazioni sulla dinamica della tensione e della corrente alla porta d'uscita, che limitano l'ampiezza dei segnali elaborabili e/o il carico applicabile in condizioni di linearità.

$V_{out,min}$  e  $V_{out,max}$  sono tipicamente prossime alle tensioni di alimentazione.

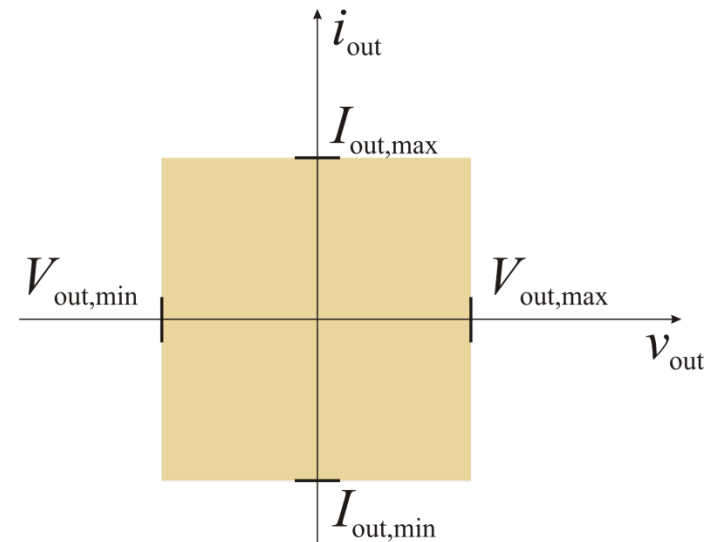


$v_d = v^+ - v^-$  tensione differenziale d'ingresso

$v_{cm} = \frac{v^+ + v^-}{2}$  tensione di modo comune d'ingresso

$$V_{out,min} < v_{out}(t) < V_{out,max}$$

$$I_{out,min} < i_{out}(t) < I_{out,max}$$



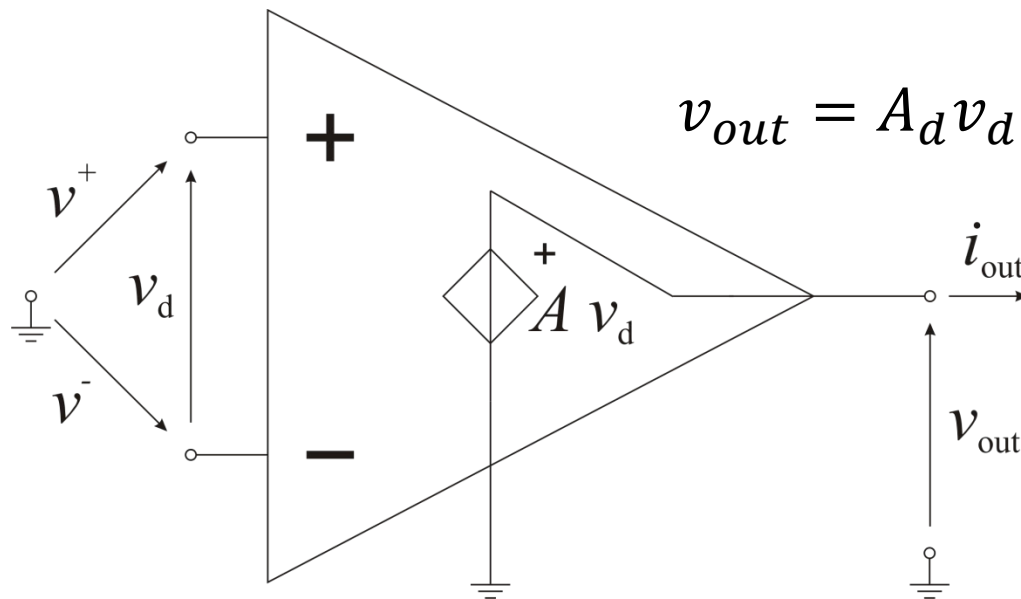
**Caratteristiche d'uscita  $v_{out} - i_{out}$**



# Dinamica d'ingresso – modo differenziale

Come in tutti gli amplificatori, la dinamica del segnale nominale d'ingresso, che è la tensione differenziale  $v_d = v^+ - v^-$ , è limitata.

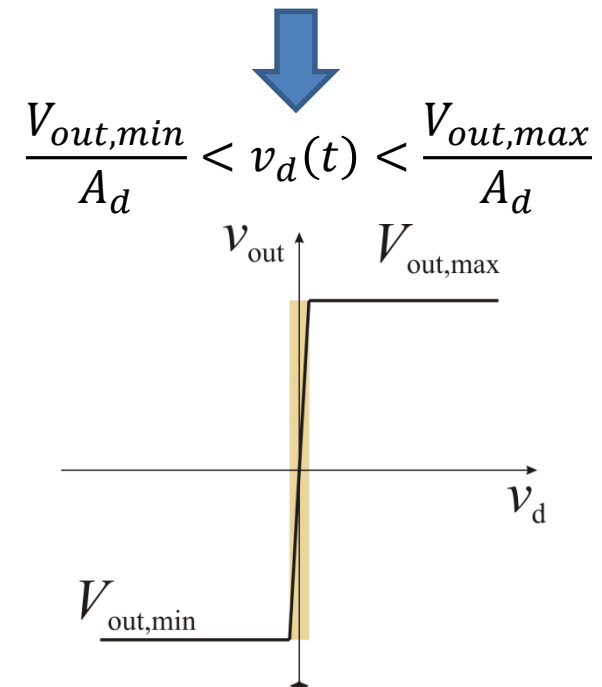
Essendo  $A_d$  molto elevata ( $10^4 - 10^6$ ), la dinamica d'ingresso di modo differenziale è molto ridotta (ordine dei microvolt/decine di microvolt). E' di scarso interesse, in quanto nominalmente  $v_d \simeq 0$ .



$v_d = v^+ - v^-$  tensione differenziale d'ingresso

$v_{cm} = \frac{v^+ + v^-}{2}$  tensione di modo comune d'ingresso

$$V_{out,min} < v_{out}(t) < V_{out,max}$$

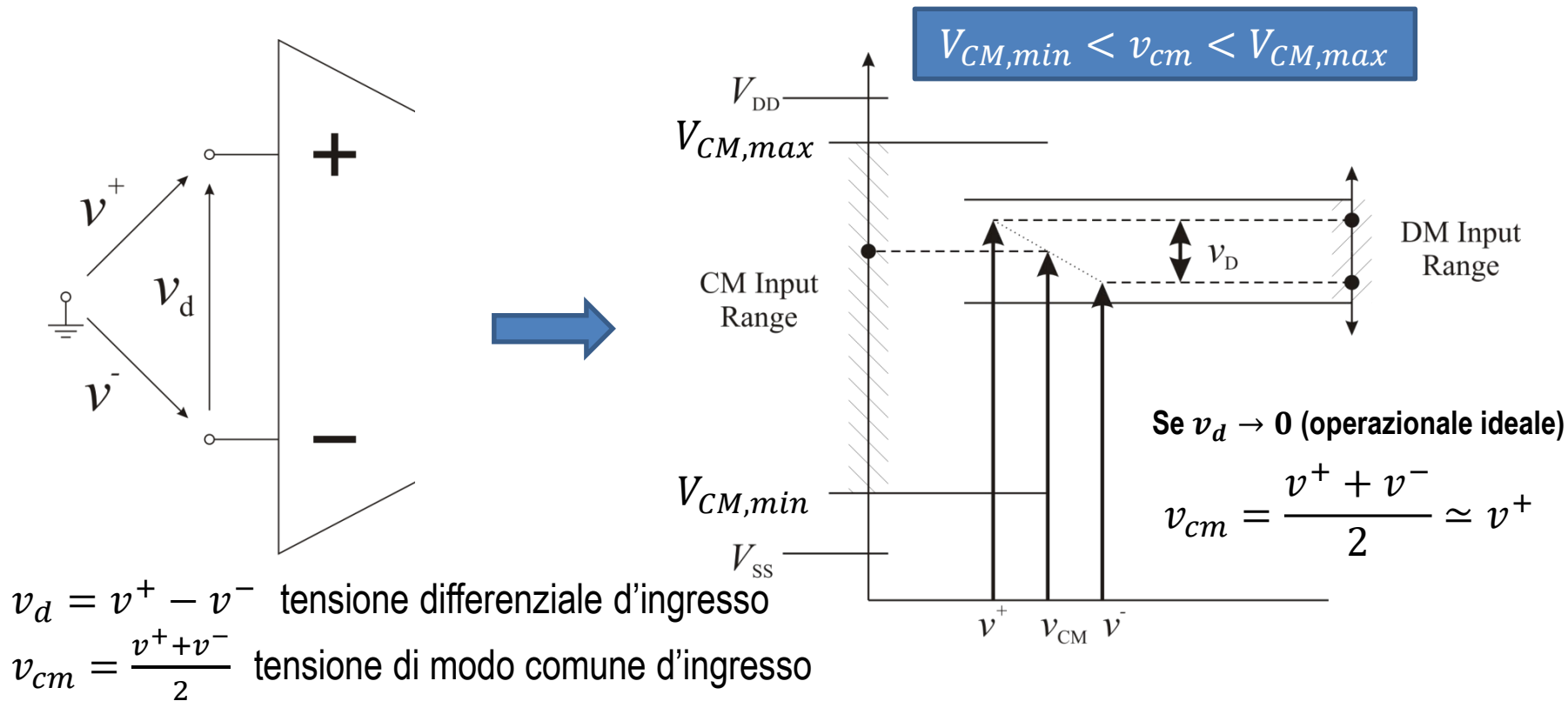


Transcaratteristica  $v_d - v_{out}$



# Dinamica d'ingresso – modo comune

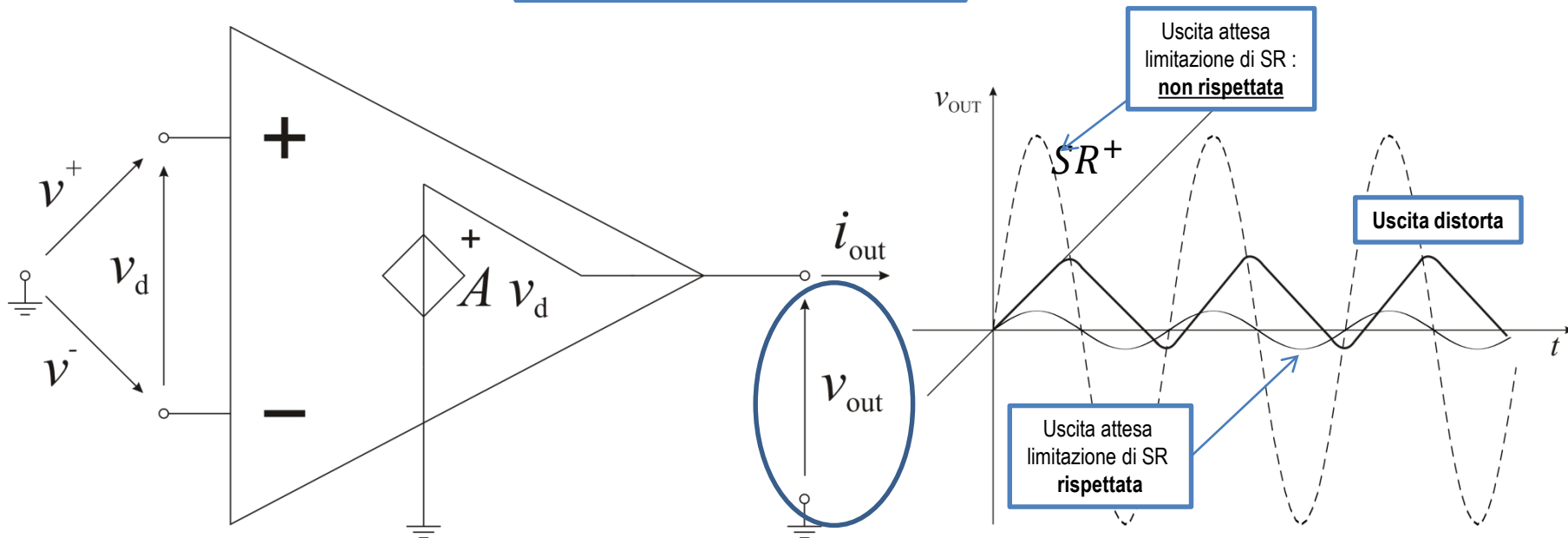
- L'operazionale è idealmente insensibile alla componente di modo comune in ingresso  $v_{cm}$ , ma può funzionare solo se  $V_{CM,min} < v_{cm} < V_{CM,max}$  cioè se  $v_{cm}$  è incluso nella **dinamica di ingresso per il modo comune**. (Common-Mode Input Range, **CMR**)
- Dal momento che  $v^- \simeq v^+$ , la limitazione di CMR implica una limitazione sulla dinamica di  $v^+$



# Limitazione di Slew Rate

- Gli amplificatori operazionali presentano limitazione sulla derivata temporale della tensione d'uscita (*slew rate*) della tensione d'uscita, come discusso in generale.

$$SR^- < \frac{dv_{out}}{dt} < SR^+$$



## SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_S = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.

Table 1.

| Parameter   | Symbol               | Test Conditions  | OP27A/OP27E |            |          | OP27G      |            |          | Unit                         |
|---|----------------------|--|-------------|------------|----------|------------|------------|----------|------------------------------|
|   |                      |  | Min         | Typ        | Max      | Min        | Typ        | Max      |                              |
| INPUT OFFSET VOLTAGE <sup>1</sup>                                 | $V_{OS}$             |  |             | 10         | 25       |            | 30         | 100      | $\mu\text{V}$                |
| LONG-TERM $V_{OS}$ STABILITY <sup>2, 3</sup>                      | $V_{OS}/\text{Time}$ |  |             | 0.2        | 1.0      |            | 0.4        | 2.0      | $\mu\text{V}/\text{M}_0$     |
| INPUT OFFSET CURRENT  | $I_{OS}$             |  |             | 7          | 35       |            | 12         | 75       | nA                           |
| INPUT BIAS CURRENT  | $I_B$                |  |             | $\pm 10$   | $\pm 40$ |            | $\pm 15$   | $\pm 80$ | nA                           |
| INPUT NOISE VOLTAGE <sup>3, 4</sup>                               | $e_{n\text{ p-p}}$   | 0.1 Hz to 10 Hz  |             | 0.08       | 0.18     |            | 0.09       | 0.25     | $\mu\text{V p-p}$            |
| INPUT NOISE<br>Voltage Density <sup>3</sup>                       | $e_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   |             | 3.5        | 5.5      |            | 3.8        | 8.0      | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   |             | 3.1        | 4.5      |            | 3.3        | 5.6      | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 |             | 3.0        | 3.8      |            | 3.2        | 4.5      | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT NOISE<br>Current Density <sup>3</sup>                       | $i_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   |             | 1.7        | 4.0      |            | 1.7        |          | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   |             | 1.0        | 2.3      |            | 1.0        |          | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|   |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 |             | 0.4        | 0.6      |            | 0.4        | 0.6      | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT RESISTANCE<br>Differential Mode <sup>5</sup><br>Common Mode | $R_{IN}$             |  | 1.3         | 6          |          | 0.7        | 4          |          | M $\Omega$                   |
|   | $R_{INCM}$           |  |             | 3          |          |            | 2          |          | G $\Omega$                   |
| INPUT VOLTAGE RANGE   | IVR                  |  | $\pm 11.0$  | $\pm 12.3$ |          | $\pm 11.0$ | $\pm 12.3$ |          | V                            |
| COMMON-MODE REJECTION RATIO                                       | CMRR                 | $V_{CM} = \pm 11\text{ V}$                             | 114         | 126        |          | 100        | 120        |          | dB                           |
| POWER SUPPLY REJECTION RATIO                                      | PSRR                 | $V_S = \pm 4\text{ V to } \pm 18\text{ V}$             |             | 1          | 10       |            | 2          | 20       | $\mu\text{V/V}$              |
| LARGE SIGNAL VOLTAGE GAIN   | $A_{VO}$             | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$  | 1000        | 1800       |          | 700        | 1500       |          | V/mV                         |
|   |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$ | 800         | 1500       |          | 600        | 1500       |          | V/mV                         |
| OUTPUT VOLTAGE SWING  | $V_O$                | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | $\pm 12.0$  | $\pm 13.8$ |          | $\pm 11.5$ | $\pm 13.5$ |          | V                            |
|   |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$                           | $\pm 10.0$  | $\pm 11.5$ |          | $\pm 10.0$ | $\pm 11.5$ |          | V                            |
| SLEW RATE <sup>6</sup>  | SR                   | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | 1.7         | 2.8        |          | 1.7        | 2.8        |          | V/ $\mu\text{s}$             |
| GAIN BANDWIDTH PRODUCT <sup>6</sup>                               | GBW                  |  | 5.0         | 8.0        |          | 5.0        | 8.0        |          | MHz                          |
| OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE                                       | $R_O$                | $V_O = 0$ , $I_O = 0$                                  |             | 70         |          |            | 70         |          | $\Omega$                     |
| POWER CONSUMPTION   | $P_d$                | $V_O$  |             | 90         | 140      |            | 100        | 170      | mW                           |
| OFFSET ADJUSTMENT RANGE   |                      | $R_P = 10\text{ k}\Omega$                              |             | $\pm 4.0$  |          |            | $\pm 4.0$  |          | mV                           |

common mode  
Input range



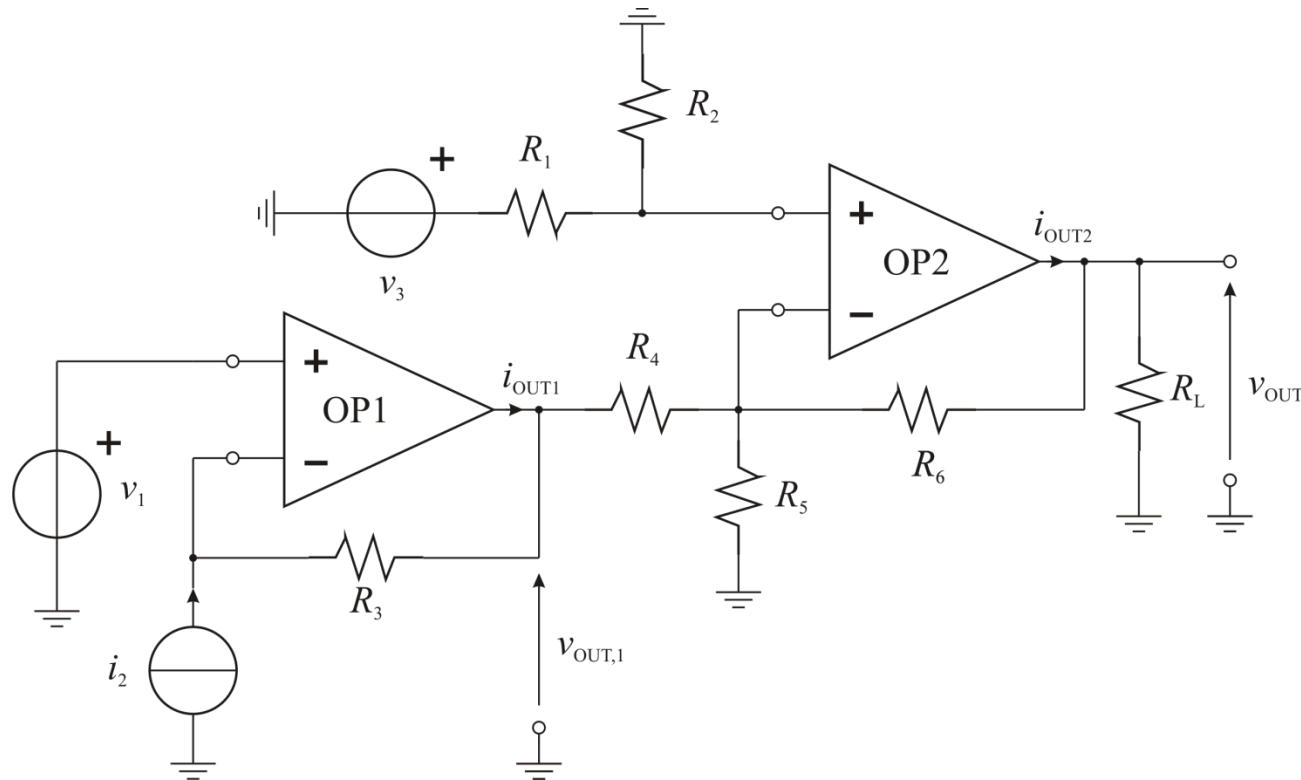
$$V_{OUT,MAX} = R_L I_{MAX}$$

$$\rightarrow I_{MAX} \approx \frac{V_{OUT,MAX}}{R_L} \approx 15\text{mA}$$



# Esercizio

- Con riferimento al circuito in figura,
  - determinare l'uscita  $v_{out}$  in funzione degli ingressi  $v_1$ ,  $i_2$  e  $v_3$  assumendo gli operazionali ideali.
  - volendo implementare OP1 e OP2 con operazionali reali, formulare le specifiche sulla minima dinamica d'uscita in tensione e in corrente e sulla minima dinamica d'ingresso per il modo comune degli operazionali reali da utilizzarsi per OP1 e per OP2.

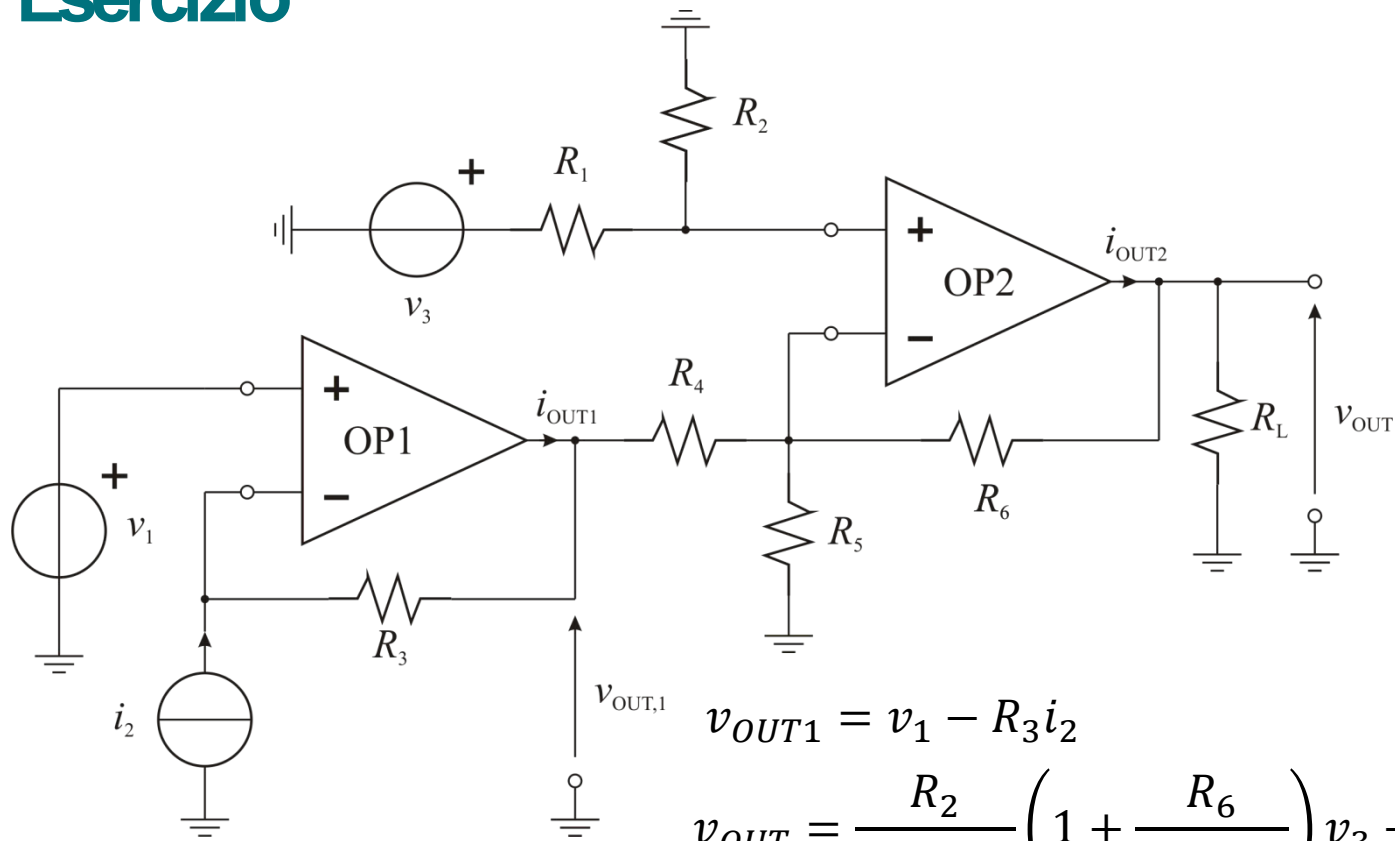


$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_2 = 10\text{k}\Omega \\
 R_3 &= 100\text{k}\Omega \\
 R_4 &= R_5 = 10\text{k}\Omega \\
 R_6 &= 20\text{k}\Omega \\
 R_L &= 250\Omega
 \end{aligned}$$

| Dinamica segnali in ingresso |             |             |
|------------------------------|-------------|-------------|
|                              | Min.        | Max.        |
| $v_1$                        | +0.5V       | +2V         |
| $i_2$                        | -10 $\mu$ A | +10 $\mu$ A |
| $v_3$                        | -1V         | +1V         |



# Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 10\text{k}\Omega \\ R_3 &= 100\text{k}\Omega \\ R_4 &= R_5 = 10\text{k}\Omega \\ R_6 &= 20\text{k}\Omega \\ R_L &= 250\Omega \end{aligned}$$

uscita complessiva:

$$v_{OUT1} = v_1 - R_3 i_2$$

$$v_{OUT} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \left( 1 + \frac{R_6}{R_4 \parallel R_5} \right) v_3 - \frac{R_6}{R_4} v_{OUT1}$$

$$v_{OUT} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \left( 1 + \frac{R_6}{R_4 \parallel R_5} \right) v_3 - \frac{R_6}{R_4} (v_1 - R_3 i_2)$$

$$v_{OUT} = \frac{5}{2} v_3 - 2v_1 + 200\text{k}\Omega \cdot i_2$$

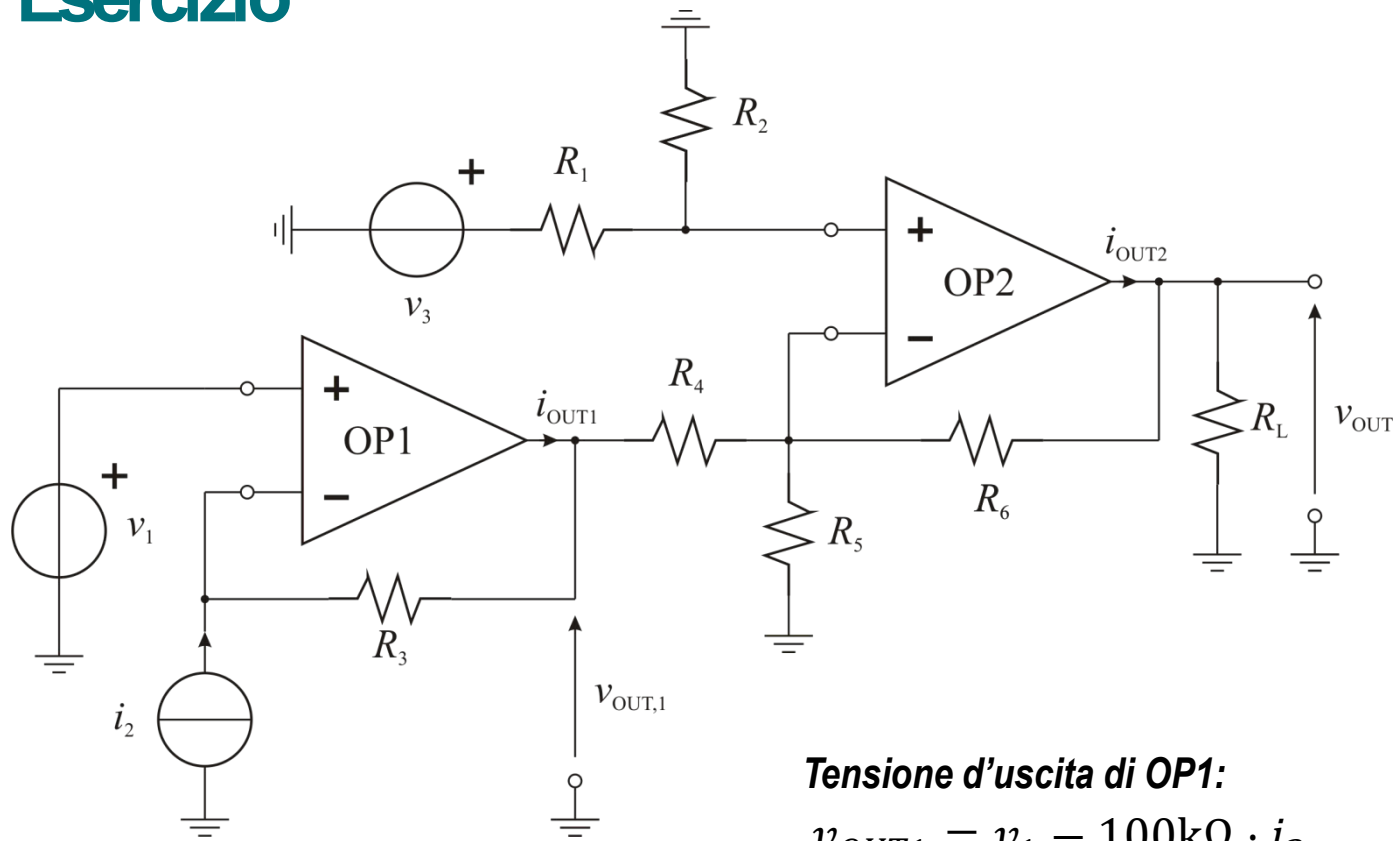


POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications



# Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 10\text{k}\Omega \\ R_3 &= 100\text{k}\Omega \\ R_4 &= R_5 = 10\text{k}\Omega \\ R_6 &= 20\text{k}\Omega \\ R_L &= 250\Omega \end{aligned}$$

Si calcolano tutte le grandezze soggette a limitazioni di dinamica:

Per OP1:  $v_{OUT1}$ ,  $i_{OUT1}$ ,  $v_{cm,in1}$

Per OP2:  $v_{OUT2}$  (coincide con  $v_{OUT}$ )

$i_{OUT2}$ ,  $v_{cm,in2}$

**Tensione d'uscita di OP1:**

$$v_{OUT1} = v_1 - 100\text{k}\Omega \cdot i_2$$

**Tensione d'uscita di OP2:**

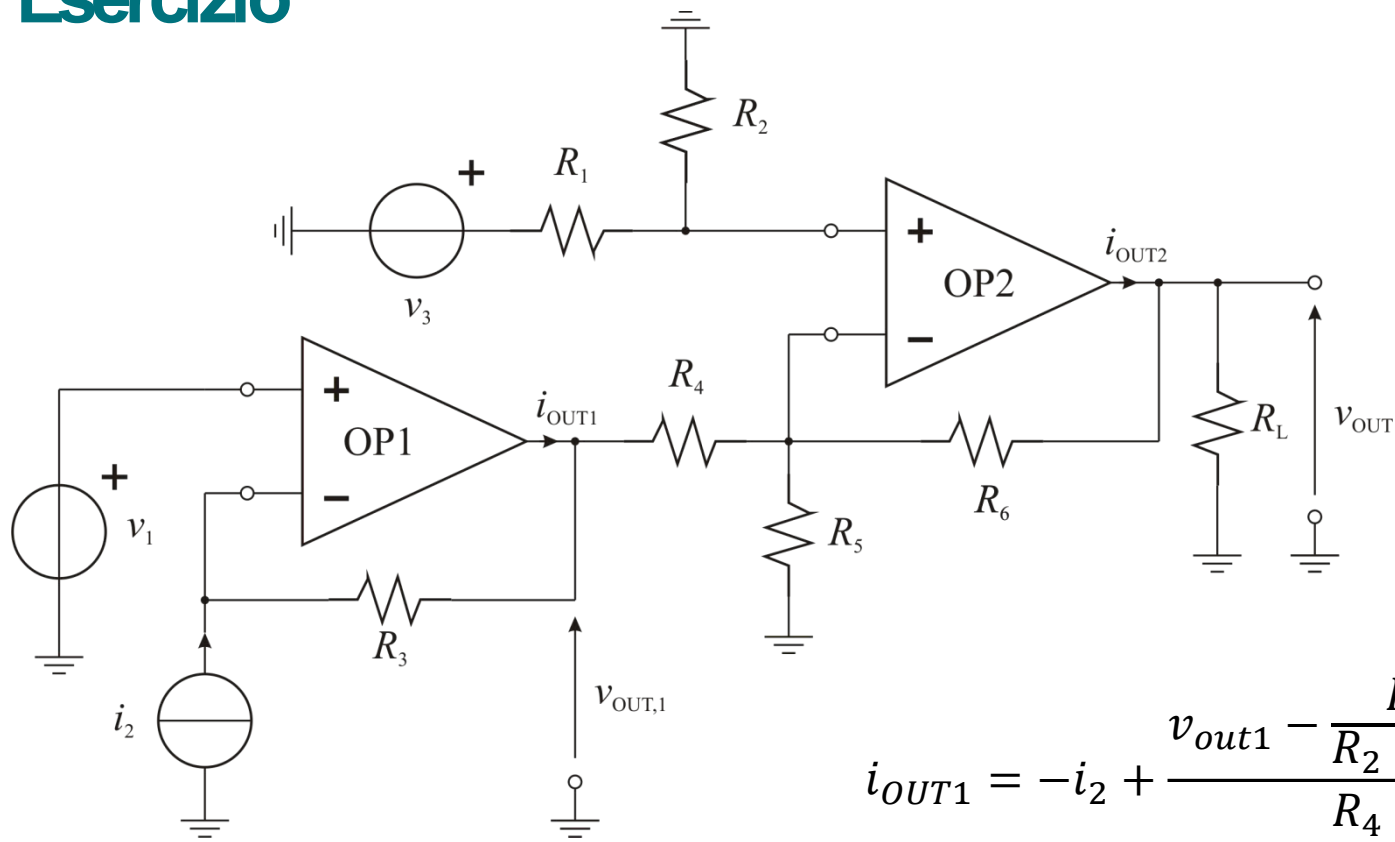
$$v_{OUT2} = v_{OUT} = \frac{5}{2} v_3 - 2v_1 + 200\text{k}\Omega \cdot i_2$$



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 10\text{k}\Omega \\ R_3 &= 100\text{k}\Omega \\ R_4 &= R_5 = 10\text{k}\Omega \\ R_6 &= 20\text{k}\Omega \\ R_L &= 250\Omega \end{aligned}$$

Si calcolano tutte le grandezze soggette a limitazioni di dinamica:

Per OP1:  $v_{OUT1}$ ,  $i_{OUT1}$ ,  $v_{cm,in1}$

Per OP2:  $v_{OUT2}$  (coincide con  $v_{OUT}$ )

$i_{OUT2}$ ,  $v_{cm,in1}$

$$i_{OUT1} = -i_2 + \frac{v_{out1} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} v_3}{R_4} - i_2 + \frac{\left( v_1 - R_3 i_2 - \frac{R_2}{R_2 + R_1} v_3 \right)}{R_4}$$

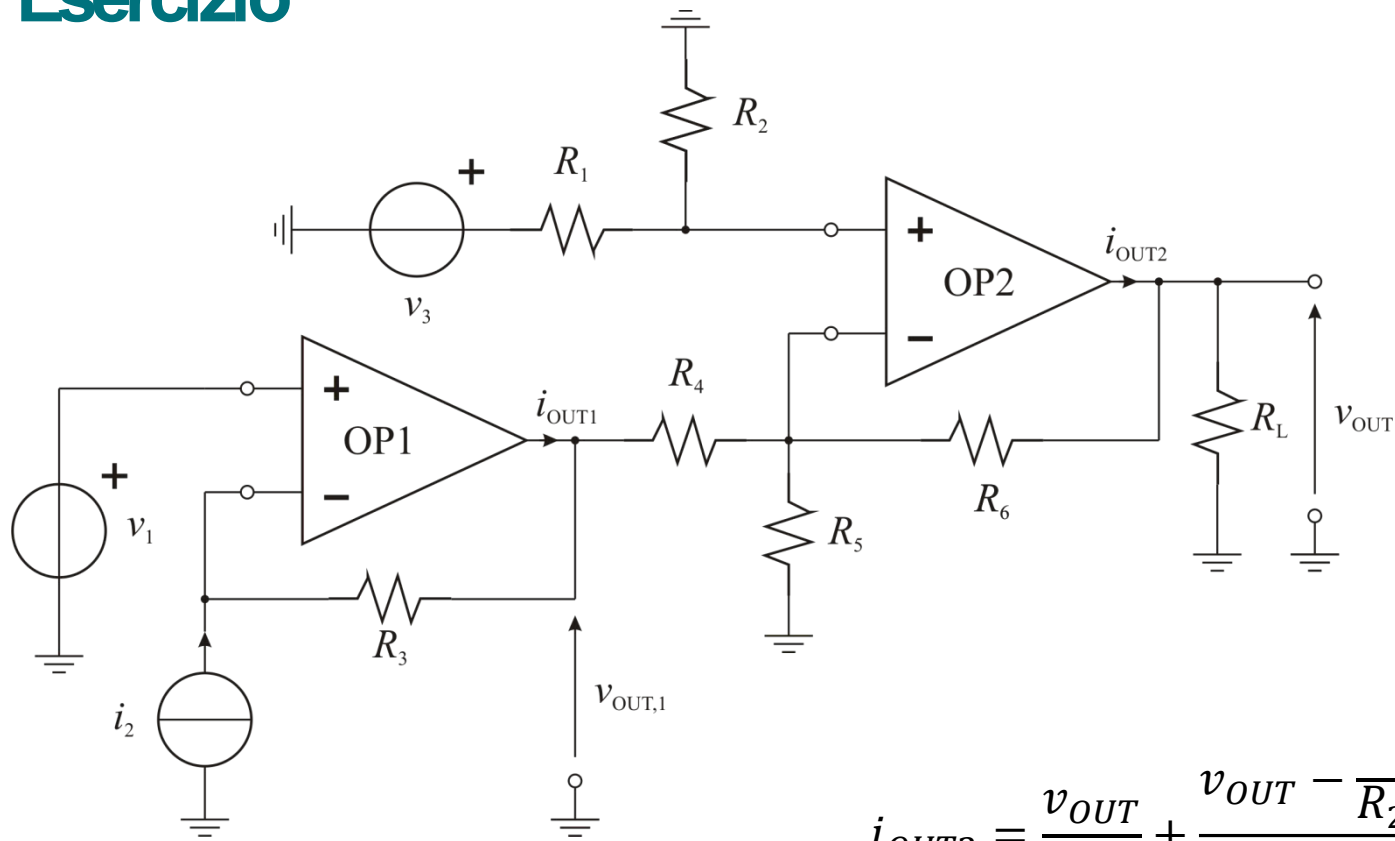
$$i_{OUT1} = v_1 \cdot 100\mu\text{S} - 11 i_2 - v_3 \cdot 50\mu\text{S}$$



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 10\text{k}\Omega \\ R_3 &= 100\text{k}\Omega \\ R_4 &= R_5 = 10\text{k}\Omega \\ R_6 &= 20\text{k}\Omega \\ R_L &= 250\Omega \end{aligned}$$

$$i_{OUT2} = \frac{v_{OUT}}{R_L} + \frac{v_{OUT} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} v_3}{R_6}$$

Si calcolano tutte le grandezze soggette a limitazioni:

Per OP1:  $v_{OUT1}$ ,  $i_{OUT1}$ ,  $v_{cm,in1}$

Per OP2:  $v_{OUT2}$  (coincide con  $v_{OUT}$ )

$i_{OUT2}$ ,  $v_{cm,in2}$

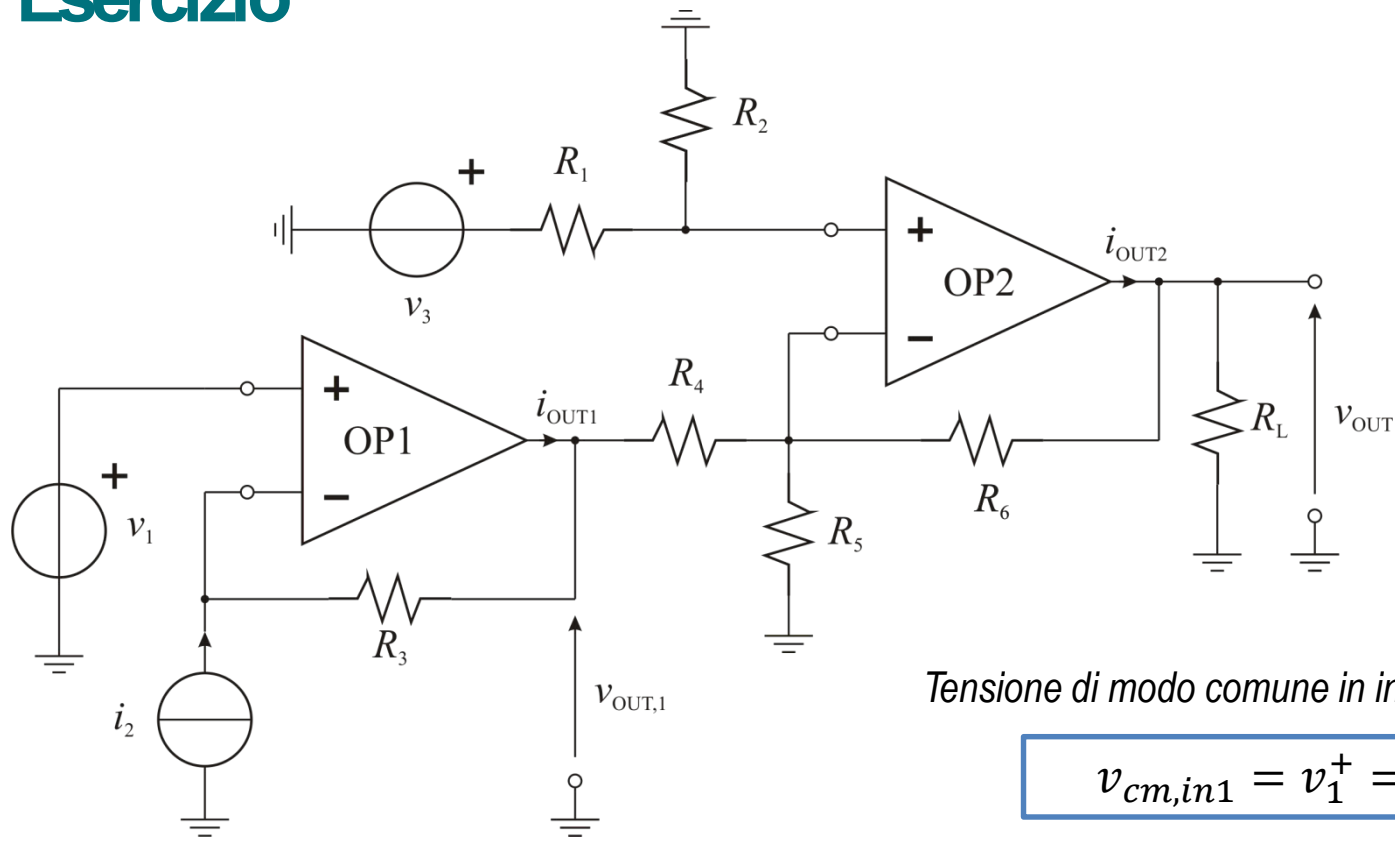
$$i_{OUT2} = 10.1\text{mS} \cdot v_3 - 8.1\text{mS} \cdot v_1 + 810 \cdot i_2$$



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 10\text{k}\Omega \\ R_3 &= 100\text{k}\Omega \\ R_4 &= R_5 = 10\text{k}\Omega \\ R_6 &= 20\text{k}\Omega \\ R_L &= 250\Omega \end{aligned}$$

Tensione di modo comune in ingresso di OP1:

$$v_{cm,in1} = v_1^+ = v_1$$

Tensione di modo comune in ingresso di OP2:

$$v_{cm,in2} = v_2^+ = v_3 \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{v_3}{2}$$

Calcoliamo ora tutte le grandezze soggette a limitazioni di dinamica:

Per OP1:  $v_{OUT1}$ ,  $i_{OUT1}$ ,  $v_{cm,in1}$

Per OP2:  $v_{OUT2}$  (coincide con  $v_{OUT}$ )

$i_{OUT2}$ ,  $v_{cm,in2}$



POLITECNICO  
DI TORINO

DET  
Department of Electronics and Telecommunications

# Esercizio

Affinchè le limitazioni di dinamica siano sempre rispettate, i minimi requisiti in termini di dinamica della tensione d'uscita, della corrente d'uscita e del modo comune in ingresso coincidono con gli estremi inferiori e superiori di  $v_{out}$ ,  $i_{out}$  e  $v_{cm}$  al variare di  $v_1$ ,  $i_2$  e  $v_3$  all'interno della loro dinamica riportata in tabella.

| Dinamica segnali in ingresso |             |             |
|------------------------------|-------------|-------------|
|                              | Min.        | Max.        |
| $v_1$                        | +0.5V       | +2V         |
| $i_2$                        | -10 $\mu$ A | +10 $\mu$ A |
| $v_3$                        | -1V         | +1V         |

## Tensione d'uscita di OP1:

$$v_{OUT1} = v_1 - 100\text{k}\Omega \cdot i_2$$

$$V_{out1,max} > \max_{v_1, i_2} v_{OUT1} = \max v_1 - 100\text{k}\Omega \cdot \min i_2 = 3V$$

$$V_{out1,min} > \min_{v_1, i_2} v_{OUT1} = \min v_1 - 100\text{k}\Omega \cdot \max i_2 = -0.5V$$

## Minima dinamica della tensione d'uscita per OP1:

$$(V_{out1,min}, V_{out1,max}) = (-0.5V, 3V)$$



| Dinamica segnali in ingresso |       |       |
|------------------------------|-------|-------|
|                              | Min.  | Max.  |
| $v_1$                        | +0.5V | +2V   |
| $i_2$                        | -10μA | +10μA |
| $v_3$                        | -1V   | +1V   |

**Tensione d'uscita di OP2:**

$$v_{OUT2} = v_{OUT} = \frac{5}{2} v_3 - 2v_1 + 200\text{k}\Omega \cdot i_2$$

$$V_{out2,max} > \max_{v_1, i_2, v_3} v_{OUT2} = \frac{5}{2} \max v_3 - 2 \min v_1 + 200\text{k}\Omega \cdot \max i_2 = 3.5V$$

$$V_{out2,min} < \min_{v_1, i_2, v_3} v_{OUT2} = \frac{5}{2} \min v_3 - 2 \max v_1 + 200\text{k}\Omega \cdot \min i_2 = -8.5V$$

**Minima dinamica della tensione d'uscita per OP2:**

$$(V_{out2,min}, V_{out2,max}) = (-8.5V, 3.5V)$$



| Dinamica segnali in ingresso |             |             |
|------------------------------|-------------|-------------|
|                              | Min.        | Max.        |
| $v_1$                        | +0.5V       | +2V         |
| $i_2$                        | -10 $\mu$ A | +10 $\mu$ A |
| $v_3$                        | -1V         | +1V         |

**Corrente d'uscita di OP1:**

$$i_{OUT1} = v_1 \cdot 100\mu S - 11 i_2 - v_3 \cdot 50\mu S$$

$$I_{out1,max} > \max_{v_1, i_2, v_3} i_{OUT1} = 100\mu S \max v_1 - 11 \min i_2 - 50\mu S \cdot \min v_3 = 360\mu A$$

$$I_{out1,min} < \min_{v_1, i_2, v_3} i_{OUT1} = 100\mu S \min v_1 - 11 \max i_2 - 50\mu S \cdot \max v_3 = -110\mu A$$

**Minima dinamica della corrente d'uscita per OP1:**

$$(I_{out1,min} , I_{out1,max} ) = (-110\mu A, 360 \mu A)$$



| Dinamica segnali in ingresso |             |             |
|------------------------------|-------------|-------------|
|                              | Min.        | Max.        |
| $v_1$                        | +0.5V       | +2V         |
| $i_2$                        | -10 $\mu$ A | +10 $\mu$ A |
| $v_3$                        | -1V         | +1V         |

**Corrente d'uscita di OP2:**

$$i_{OUT2} = 10.1\text{mS} \cdot v_3 - 8.1\text{mS} \cdot v_1 + 810 \cdot i_2$$

$$I_{out2,max} > \max_{v_1, i_2, v_3} i_{OUT2} = 10.1\text{mS} \max v_3 - 8.1\text{mS} \min v_1 + 810 \cdot \max i_2 = 14.15\text{mA}$$

$$I_{out2,min} < \min_{v_1, i_2, v_3} i_{OUT2} = 10.1\text{mS} \min v_3 - 8.1\text{mS} \max v_1 + 810 \cdot \min i_2 = -34.6\text{mA}$$

**Minima dinamica della corrente d'uscita per OP2:**

$$(I_{out2,min}, I_{out2,max}) = (-34.4\text{mA}, 14.15\text{mA})$$





| Dinamica segnali in ingresso |             |             |
|------------------------------|-------------|-------------|
|                              | Min.        | Max.        |
| $v_1$                        | +0.5V       | +2V         |
| $i_2$                        | -10 $\mu$ A | +10 $\mu$ A |
| $v_3$                        | -1V         | +1V         |

*Tensione di modo comune in ingresso di OP1:*

$$v_{cm,in1} = v_1^+ = v_1$$

*Tensione di modo comune in ingresso di OP2:*

$$v_{cm,in2} = v_2^+ = v_3 \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{v_3}{2}$$

**Minima dinamica d'ingresso per il modo comune di OP1:**

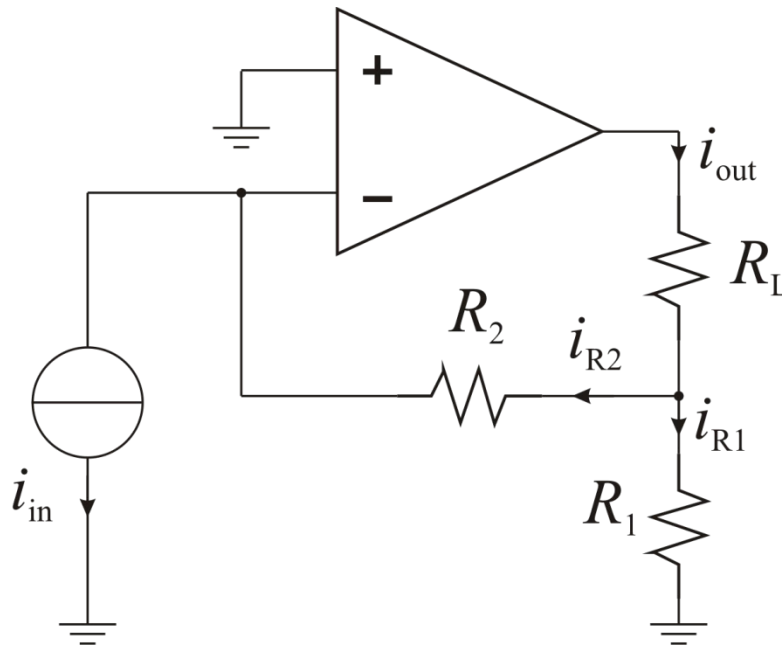
$$(V_{cm,min}, V_{cm,max}) = (0.5V, 2V)$$

**Minima dinamica d'ingresso per il modo comune di OP2:**

$$(V_{cm,min}, V_{cm,max}) = (-0.5V, 0.5V)$$

# Esercizio

- Nel circuito in figura:
  - determinare l'espressione della corrente di uscita  $i_{out}$  in funzione di  $i_{in}$ .
  - la massima dinamica del segnale d'ingresso  $i_{in}$  applicabile, assumendo che l'amplificatore presenti dinamica di tensione in uscita  $(V_{out,min}, V_{out,max}) = (0V, 5V)$ , dinamica di corrente in uscita  $(I_{out,min}, I_{out,max}) = (0mA, 5mA)$ , dinamica d'ingresso per il modo comune  $(V_{CM,min}, V_{CM,max}) = (0V, 3.5V)$ ,



$$R_L = 1k\Omega$$

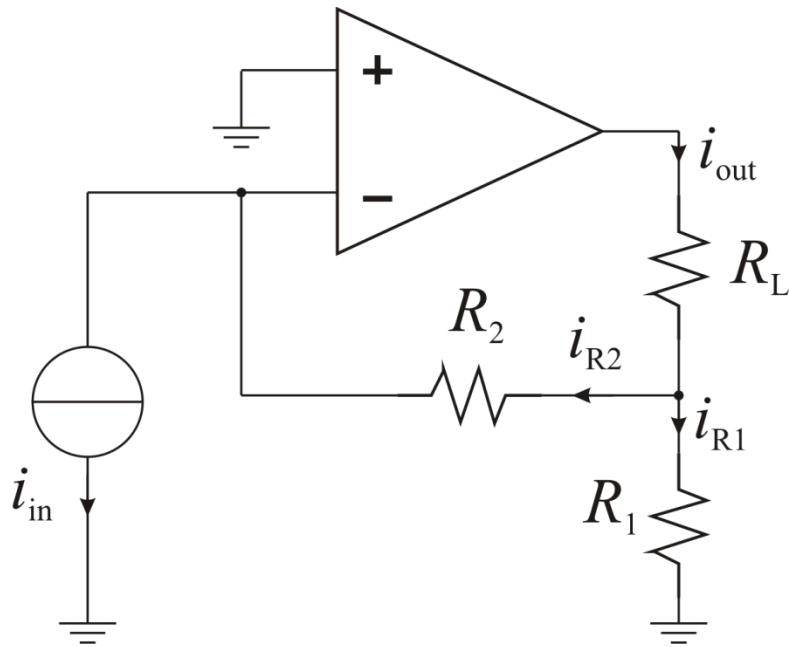
$$R_2 = 9k\Omega$$

$$R_1 = 1k\Omega$$



# Esercizio

- Il circuito è un amplificatore di corrente basato su operazionale:



$$R_L = 1\text{k}\Omega$$

$$R_2 = 9\text{k}\Omega$$

$$R_1 = 1\text{k}\Omega$$

$$i_{out} = i_{R1} + i_{R2}$$

$$= \frac{R_2}{R_1} i_{in} + i_{in}$$

$$i_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) i_{in} = 10 \cdot i_{in}$$

- Calcoliamo anche  $v_{CM}$  e  $v_{out}$  dell'operazionale, per discutere le limitazioni:

$$v_{CM} = v^+ = 0$$

$$v_{out} = R_L i_{out} + R_2 i_{in} = 10R_L \cdot i_{in} + R_2 i_{in} = 19\text{k}\Omega \cdot i_{IN}$$



# Esercizio

- Considerando le limitazioni, deve essere

$$0V \leq v_{cm} \leq 3.5V \quad \text{sempre verificata}$$

$$0 \leq i_{out} \leq 5mA \rightarrow 0 \leq 10 \cdot i_{IN} \leq 5mA \quad \Rightarrow \quad 0 \leq i_{IN} \leq 0.5mA$$

$$0 \leq v_{out} \leq 5V \rightarrow 0 < 19k\Omega \cdot i_{IN} \leq 5V \quad \Rightarrow \quad 0 \leq i_{IN} \leq 0.263mA$$

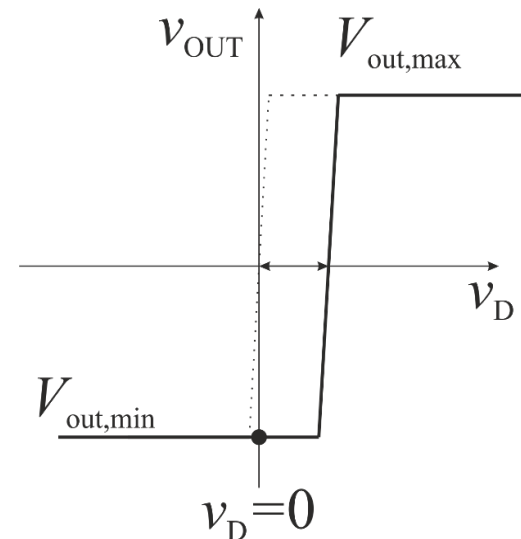
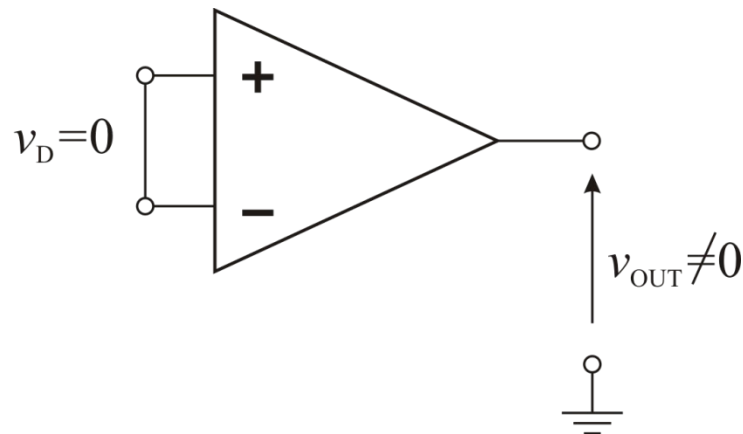
- Considerando che le disequaglianze devono essere verificate simultaneamente, la limitazione sulla dinamica della corrente d'ingresso risulta dalle condizioni più stringenti tra quelle ricavate, cioè:

$$0 \leq i_{IN} \leq 0.263mA$$



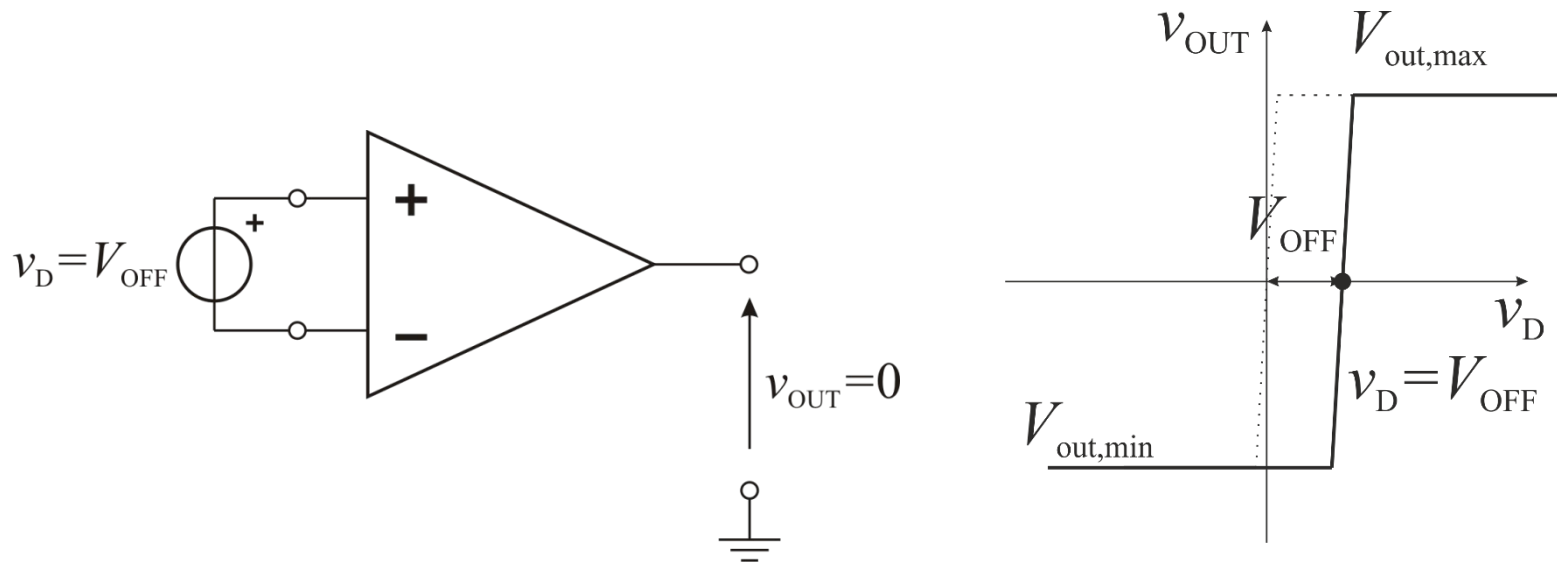
# Errori Statici: Offset

- A seguito delle tolleranze di fabbricazione, il punto di funzionamento a riposo di un operazionale varia rispetto a quanto previsto da progetto: ciò equivale a una traslazione della transcaratteristica ingresso-uscita.
- Per questo motivo, applicando  $v_D = 0$ , normalmente  $v_{OUT} \neq 0$ . Anzi, essendo  $A_d$  elevata, l'uscita quasi certamente satura a  $V_{out,max}$  o a  $V_{out,min}$ .



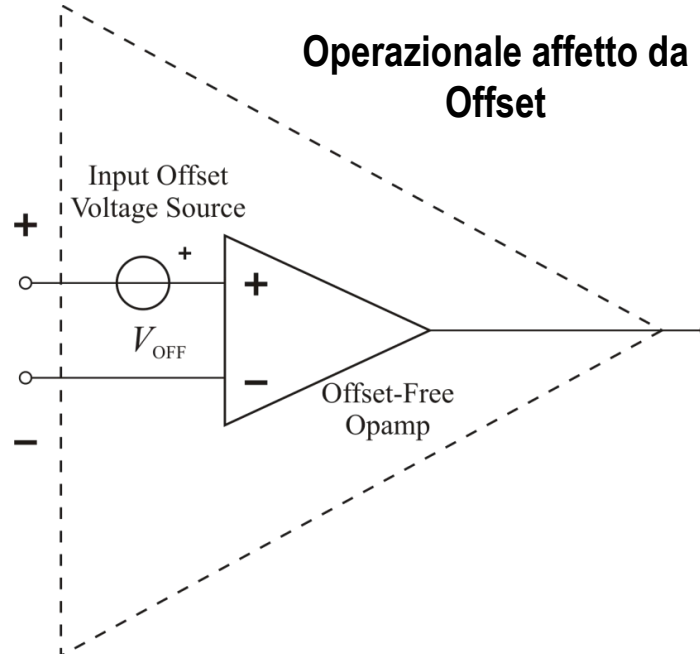
# Errori Statici: Offset

- Per ottenere  $v_{OUT} = 0$ , è necessario applicare una tensione continua in ingresso non nulla.



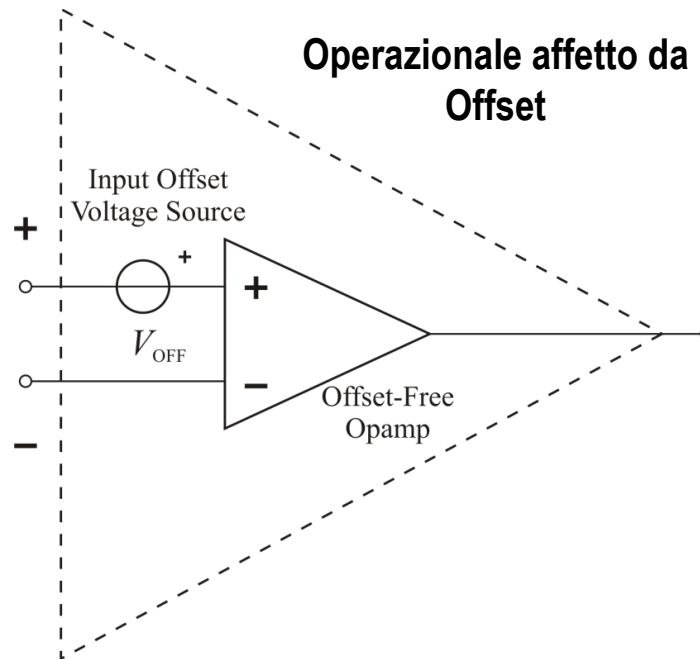
# Errori Statici: Offset

- L'operazionale soggetto ad errore di offset equivale ad un operazionale senza errore di offset con un generatore di tensione  $V_{OFF}$ , *tensione di offset in ingresso*, **input offset voltage**, collegato in serie all'ingresso non invertente.
- E' facile vedere che questo modello si comporta come l'operazionale affetto da offset.
- $V_{OFF}$  varia da esemplare a esemplare e può essere visto come una variabile casuale. Nei datasheet è indicato il valore massimo in modulo (worst case)



# Errori Statici: Offset

- Per studiare l'impatto degli offset su un circuito con operazionali:
  - Si spengono i generatori indipendenti e si sostituiscono gli operazionali con i modelli con offset
  - Si determinano i contributi dei generatori di offset sull'uscita
  - Si valuta l'offset sull'uscita nel caso peggiore e/o se ne studia la statistica



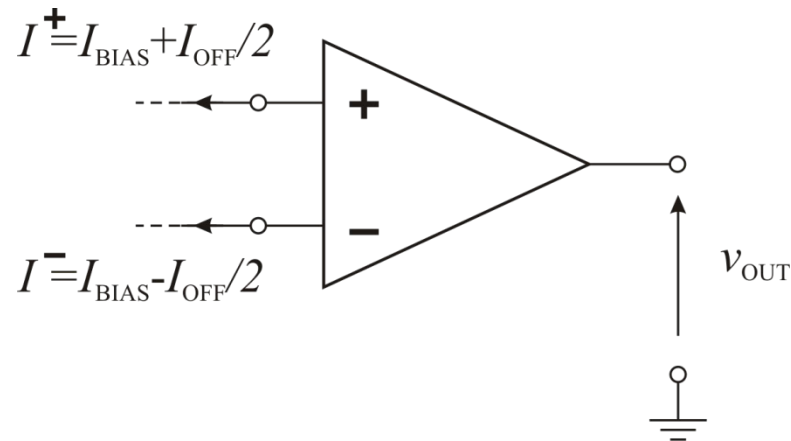


# Errori Statici: correnti di polarizzazione in ingresso

- I terminali d'ingresso di un operazionale reale in tecnologia BJT eroga o assorbe una piccola corrente continua  $I_{BIAS}$  : corrente di polarizzazione in ingresso, **input bias current**, nominalmente uguale ai due terminali.
- A seguito delle tolleranze di fabbricazione, queste due correnti possono differire di una quantità aleatoria indicata con  $I_{OFF} = I^+ - I^-$ , detta **input offset current**.
- Le correnti di polarizzazione possono dare luogo ad errori statici (deterministici, nel caso di  $I_{BIAS}$ , variabili da componente a componente, nel caso di  $I_{OFF}$ ) nel circuito in cui è inserito l'operazionale.
- Negli operazionali MOS, i terminali di ingresso sono collegati a gate di transistori MOS, per cui  $I_{BIAS}$  e  $I_{OFF}$  sono praticamente nulle ( $<1\text{pA}$ ).

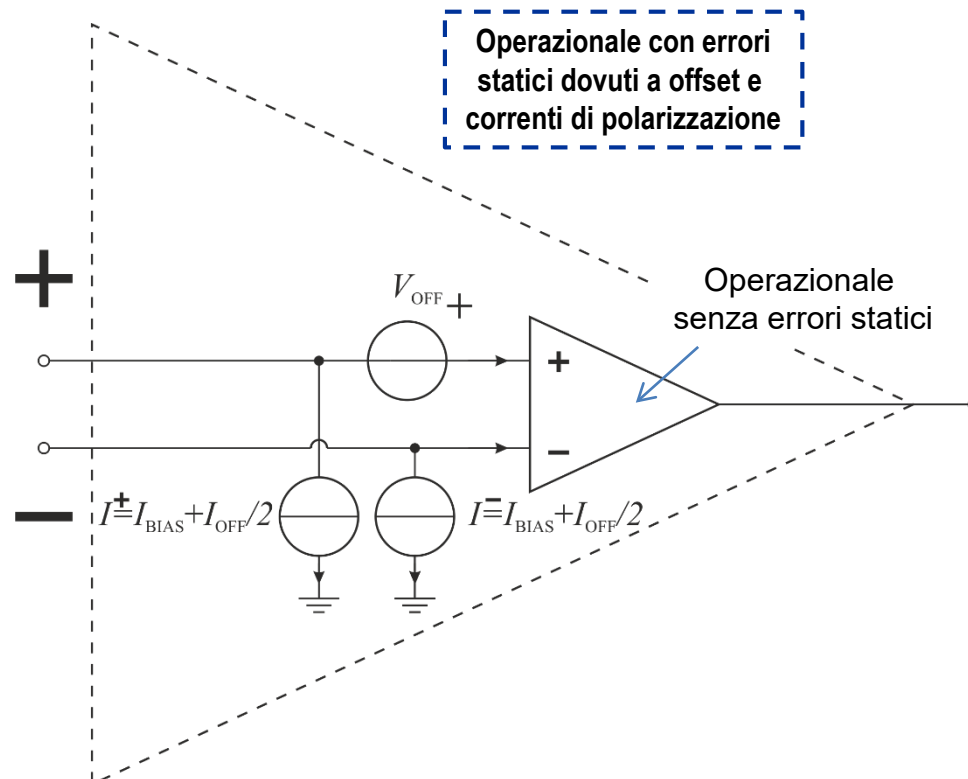
$$I_{BIAS} = \frac{I^+ + I^-}{2}$$

$$I_{OFF} = I^+ - I^-$$



# Errori Statici: correnti di polarizzazione in ingresso

- Se non trascurabili, le correnti di polarizzazione in ingresso si devono includere nel circuito equivalente dell'operazionale per determinare gli errori statici.
- Si nota che
  - $I_{BIAS}$  è una quantità **deterministica**: le diverse  $I_{BIAS}$  si sommano tra loro con segno opportuno ed il loro contributo di errore sulle uscite può essere compensato.
  - $I_{OFF}$ , così come  $V_{OFF}$ , è una quantità **aleatoria**: se ne può studiare l'impatto nel caso peggiore o la statistica.



## SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_S = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.

Table 1.

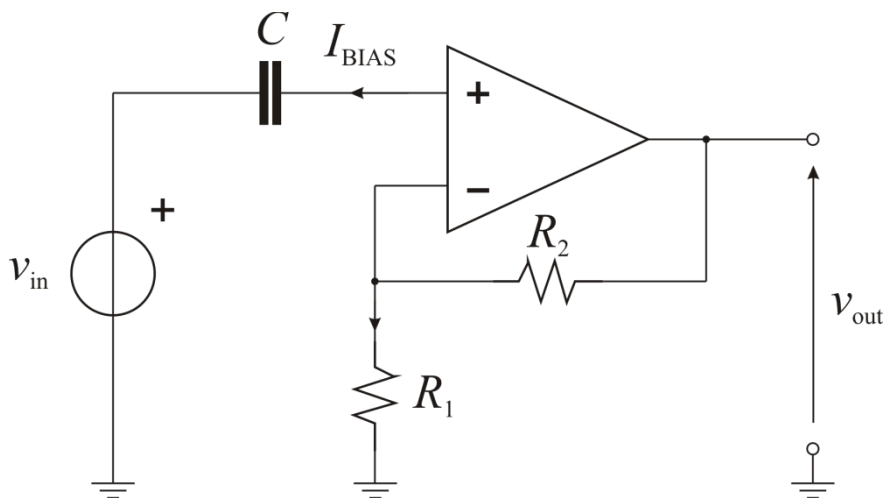
| Parameter  | Symbol               | Test Conditions  | OP27A/OP27E |            |     | OP27G      |            |     | Unit                         |
|--|----------------------|--|-------------|------------|-----|------------|------------|-----|------------------------------|
|  |                      |  | Min         | Typ        | Max | Min        | Typ        | Max |                              |
| INPUT OFFSET VOLTAGE <sup>1</sup>                  | $V_{OS}$             |  | 10          | 25         |     | 30         | 100        |     | $\mu\text{V}$                |
| LONG-TERM $V_{OS}$ STABILITY <sup>2,3</sup>        | $V_{OS}/\text{Time}$ |  | 0.2         | 1.0        |     | 0.4        | 2.0        |     | $\mu\text{V}/\text{M}_0$     |
| INPUT OFFSET CURRENT                               | $I_{OS}$             |  | 7           | 35         |     | 12         | 75         |     | nA                           |
| INPUT BIAS CURRENT                                 | $I_B$                |  | $\pm 10$    | $\pm 40$   |     | $\pm 15$   | $\pm 80$   |     | nA                           |
| INPUT NOISE VOLTAGE <sup>3,4</sup>                 | $e_{n\text{ p-p}}$   | 0.1 Hz to 10 Hz  | 0.08        | 0.18       |     | 0.09       | 0.25       |     | $\mu\text{V p-p}$            |
| INPUT NOISE<br>Voltage Density <sup>3</sup>        | $e_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   | 3.5         | 5.5        |     | 3.8        | 8.0        |     | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   | 3.1         | 4.5        |     | 3.3        | 5.6        |     | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 | 3.0         | 3.8        |     | 3.2        | 4.5        |     | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT NOISE<br>Current Density <sup>3</sup>        | $i_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   | 1.7         | 4.0        |     | 1.7        |            |     | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   | 1.0         | 2.3        |     | 1.0        |            |     | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 | 0.4         | 0.6        |     | 0.4        | 0.6        |     | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT RESISTANCE<br>Differential Mode <sup>5</sup> | $R_{IN}$             |  | 1.3         | 6          |     | 0.7        | 4          |     | M $\Omega$                   |
|  | $R_{INCM}$           |  |             | 3          |     |            | 2          |     | G $\Omega$                   |
| INPUT VOLTAGE RANGE                                | IVR                  |  | $\pm 11.0$  | $\pm 12.3$ |     | $\pm 11.0$ | $\pm 12.3$ |     | V                            |
| COMMON-MODE REJECTION RATIO                        | CMRR                 | $V_{CM} = \pm 11\text{ V}$                             | 114         | 126        |     | 100        | 120        |     | dB                           |
| POWER SUPPLY REJECTION RATIO                       | PSRR                 | $V_S = \pm 4\text{ V to } \pm 18\text{ V}$             | 1           | 10         |     | 2          | 20         |     | $\mu\text{V}/\text{V}$       |
| LARGE SIGNAL VOLTAGE GAIN                          | $A_{VO}$             | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$  | 1000        | 1800       |     | 700        | 1500       |     | V/mV                         |
|  |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$ | 800         | 1500       |     | 600        | 1500       |     | V/mV                         |
| OUTPUT VOLTAGE SWING                               | $V_O$                | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | $\pm 12.0$  | $\pm 13.8$ |     | $\pm 11.5$ | $\pm 13.5$ |     | V                            |
|  |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$                           | $\pm 10.0$  | $\pm 11.5$ |     | $\pm 10.0$ | $\pm 11.5$ |     | V                            |
| SLEW RATE <sup>6</sup>                             | SR                   | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | 1.7         | 2.8        |     | 1.7        | 2.8        |     | V/ $\mu\text{s}$             |
| GAIN BANDWIDTH PRODUCT <sup>6</sup>                | GBW                  |  | 5.0         | 8.0        |     | 5.0        | 8.0        |     | MHz                          |
| OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE                        | $R_O$                | $V_O = 0$ , $I_O = 0$                                  |             | 70         |     |            | 70         |     | $\Omega$                     |
| POWER CONSUMPTION                                  | $P_d$                | $V_O$  |             | 90         | 140 |            | 100        | 170 | mW                           |
| OFFSET ADJUSTMENT RANGE                            |                      | $R_P = 10\text{ k}\Omega$                              |             | $\pm 4.0$  |     |            | $\pm 4.0$  |     | mV                           |



# Errori Statici: correnti di polarizzazione in ingresso

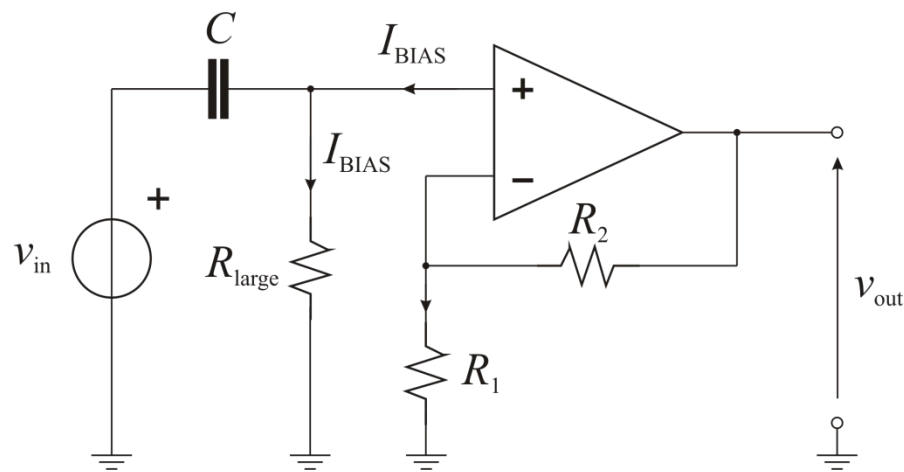
- Anche se le correnti di bias sono piccole, è importante garantire un percorso resistivo per queste correnti verso 0V quando si vuole accoppiare un ingresso in AC.

Senza percorso verso 0V



$I_{BIAS}$ , per quanto piccola, carica il condensatore  $C$ : la tensione continua ai suoi capi (che si somma alla tensione d'ingresso) prima o poi porta l'operazionale fuori dinamica.

Con percorso verso 0V

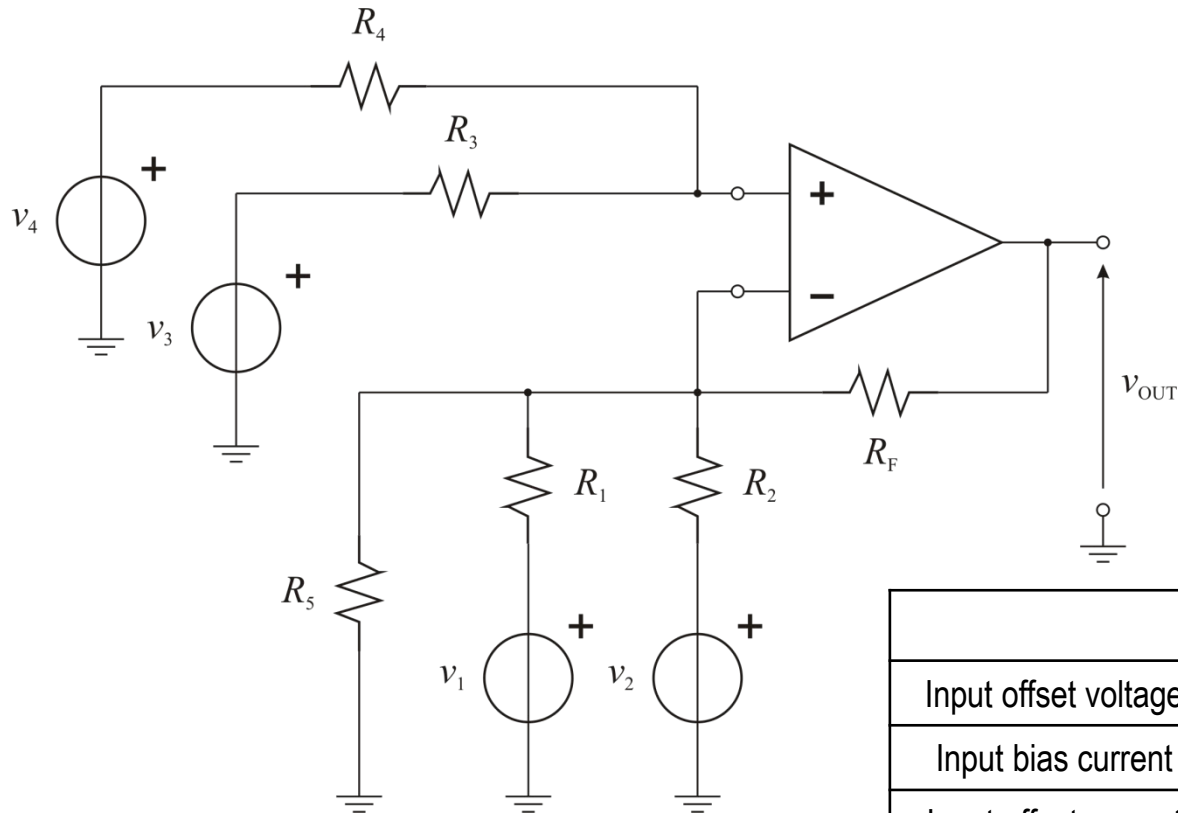


$I_{BIAS}$  fluisce in  $R_{LARGE}$ . Essendo  $I_{BIAS}$  molto piccola (BJT: nA, MOS: pA), la caduta su  $R_{LARGE}$  è trascurabile anche se  $R_{LARGE}$  è dell'ordine di  $100\text{M}\Omega - 1\text{G}\Omega$



# Esercizio

Valutare la tensione in uscita  $v_{OUT}$  in funzione dei generatori indipendenti  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  e  $v_4$  e determinare l'offset sull'uscita nel caso peggiore, considerando i dati sulla tensione di offset in ingresso e sulle correnti di bias (entranti) e di offset in ingresso riportati in tabella e i valori dei resistori indicati.

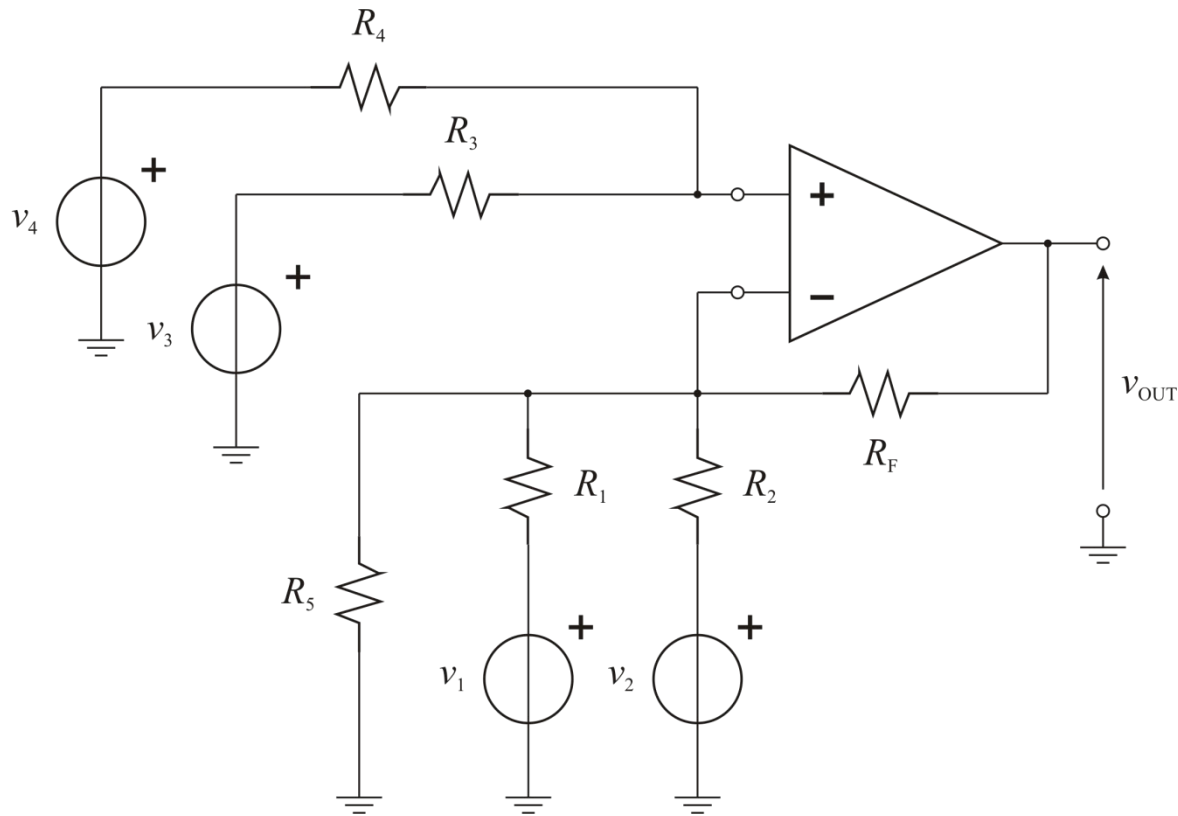


$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 33\text{k}\Omega \\ R_3 &= 100\text{k}\Omega \\ R_4 &= 200\text{k}\Omega \\ R_5 &= 33\text{k}\Omega \\ R_F &= 44\Omega \end{aligned}$$

|                      |             | Min. | Typ. | Max  |
|----------------------|-------------|------|------|------|
| Input offset voltage | $ V_{OFF} $ |      | 2mV  | 5mV  |
| Input bias current   | $I_{BIAS}$  |      |      | 50nA |
| Input offset current | $ I_{OFF} $ |      |      | 1nA  |



# Esercizio



$$R_1 = R_2 = 33\text{k}\Omega$$

$$R_3 = 100\text{k}\Omega$$

$$R_4 = 200\text{k}\Omega$$

$$R_5 = 33\text{k}\Omega$$

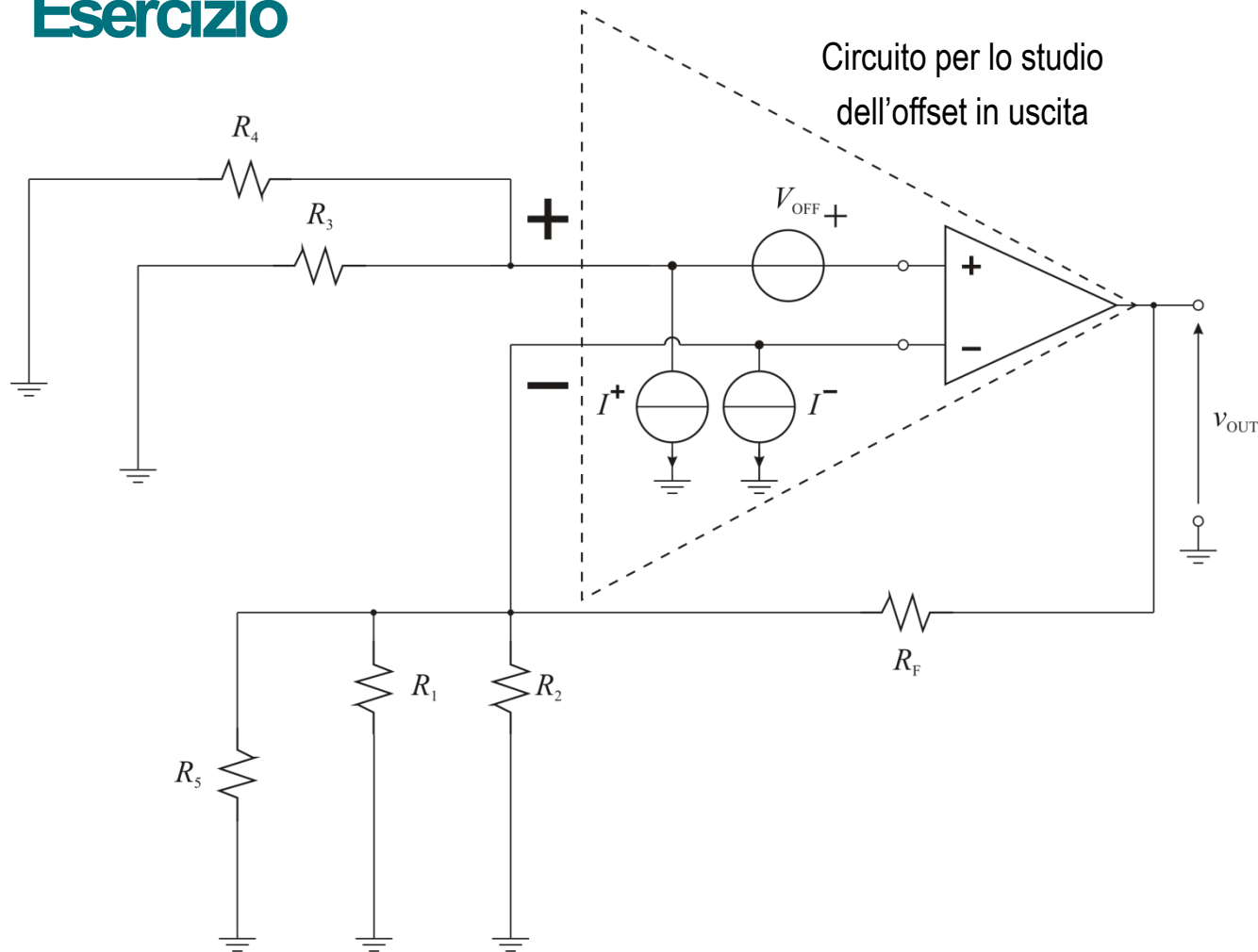
$$R_F = 44\Omega$$

$$v_{OUT} = \left( v_3 \frac{R_4}{R_3 + R_4} + v_4 \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_F}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} \right) - \frac{R_F}{R_1} v_1 - \frac{R_F}{R_2} v_2$$

$$v_{OUT} = \frac{10}{3} v_3 + \frac{5}{3} v_4 - \frac{4}{3} v_1 - \frac{4}{3} v_2$$



# Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 33\text{k}\Omega \\ R_3 &= 100\text{k}\Omega \\ R_4 &= 200\text{k}\Omega \\ R_5 &= 33\text{k}\Omega \\ R_F &= 44\Omega \end{aligned}$$

Le correnti in ingresso sono espresse come:

$$\begin{aligned} I^+ &= I_{BIAS} + \frac{I_{OFF}}{2} \\ I^- &= I_{BIAS} - \frac{I_{OFF}}{2} \end{aligned}$$

$$V_{OUT} = (-I^+ \cdot R_3 \parallel R_4 + V_{OFF}) \left( 1 + \frac{R_F}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} \right) + I^- R_F$$



# Esercizio

$$V_{OUT} = (-I^+ \cdot R_3 \parallel R_4 + V_{OFF}) \left( 1 + \frac{R_F}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} \right) + I^- R_F$$

$$I^+ = I_{BIAS} + \frac{I_{OFF}}{2}$$
$$I^- = I_{BIAS} - \frac{I_{OFF}}{2}$$

Si esplicitano  $I^+$  e  $I^-$  in funzione di  $I_{BIAS}$  (nota) e  $I_{OFF}$  (aleatoria)

$$V_{OUT} = \left[ - \left( I_{BIAS} + \frac{I_{OFF}}{2} \right) \cdot R_3 \parallel R_4 + V_{OFF} \right] \left( 1 + \frac{R_F}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} \right) + \left( I_{BIAS} - \frac{I_{OFF}}{2} \right) R_F$$

$$V_{OUT} = V_{OFF} \left( 1 + \frac{R_F}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} \right) - \frac{I_{OFF}}{2} \left( R_3 \parallel R_4 + \frac{R_F \cdot R_3 \parallel R_4}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} + R_F \right) +$$
$$- I_{BIAS} \left( R_3 \parallel R_4 + \frac{R_F \cdot R_3 \parallel R_4}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} - R_F \right)$$

Errore aleatorio  
(contributi di  $V_{OFF}$ ,  $I_{OFF}$ )

Errore sistematico  
(contributo di  $I_{BIAS}$ )





# Esercizio

$$V_{OUT} = V_{OFF} \left( 1 + \frac{R_F}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} \right) - \frac{I_{OFF}}{2} \left( R_3 \parallel R_4 + \frac{R_F \cdot R_3 \parallel R_4}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} + R_F \right) - I_{BIAS} \left( R_3 \parallel R_4 + \frac{R_F \cdot R_3 \parallel R_4}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} - R_F \right)$$

Errore aleatorio  $V_{OUT,al}$   
(contributi di  $V_{OFF}$ ,  $I_{OFF}$ )

Errore sistematico  $V_{OUT,det}$   
(contributo di  $I_{BIAS}$ )

$$V_{OUT} = \underbrace{5V_{OFF} - \frac{566k\Omega}{3} I_{OFF}}_{\text{Errore aleatorio } V_{OUT,al}} - \underbrace{\frac{868k\Omega}{3} I_{BIAS}}_{\text{Errore sistematico } V_{OUT,sist}}$$

|                      |             | Min. | Typ. | Max  |
|----------------------|-------------|------|------|------|
| Input offset voltage | $ V_{OFF} $ |      | 2mV  | 5mV  |
| Input bias current   | $I_{BIAS}$  |      |      | 50nA |
| Input offset current | $ I_{OFF} $ |      |      | 1nA  |

$$V_{OUT,det} = -14.46\text{mV}$$

$$\max V_{OUT} = 5 \max V_{OFF} - \frac{566k\Omega}{3} \min I_{OFF} + V_{OUT,det} = 25\text{mV} + 188\mu\text{V} - 14.46\text{mV} = 10.7\text{mV}$$

$$\min V_{OUT} = 5 \min V_{OFF} - \frac{566k\Omega}{3} \max I_{OFF} + V_{OUT,det} = -25\text{mV} - 188\mu\text{V} - 14.46\text{mV} = -39.6\text{mV}$$

$$V_{OUT} \in (-39.6\text{mV}, 10.7\text{mV})$$



# Errore sistematico dovuto alle correnti di polarizzazione

$$V_{OUT} = [\dots \text{componente aleatoria} \dots] - I_{BIAS} \left( R_3 \parallel R_4 + \frac{R_F \cdot R_3 \parallel R_4}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} - R_F \right)$$

Nell'esercizio appena svolto si osserva che nell'espressione dell'errore  $V_{OUT,sist}$  dovuto alle correnti di polarizzazione compaiono due termini di segno opposto  $\rightarrow$  per opportuni valori delle resistenze è possibile compensare il termine sistematico.

Quale condizione deve essere verificata?

$$V_{OUT,sist} = -I_{BIAS} \left( R_3 \parallel R_4 + \frac{R_F \cdot R_3 \parallel R_4}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} - R_F \right) = 0$$

$$R_3 \parallel R_4 + \frac{R_F \cdot R_3 \parallel R_4}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} = R_F$$

$$\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_5} = \frac{1}{R_3 \parallel R_4}$$

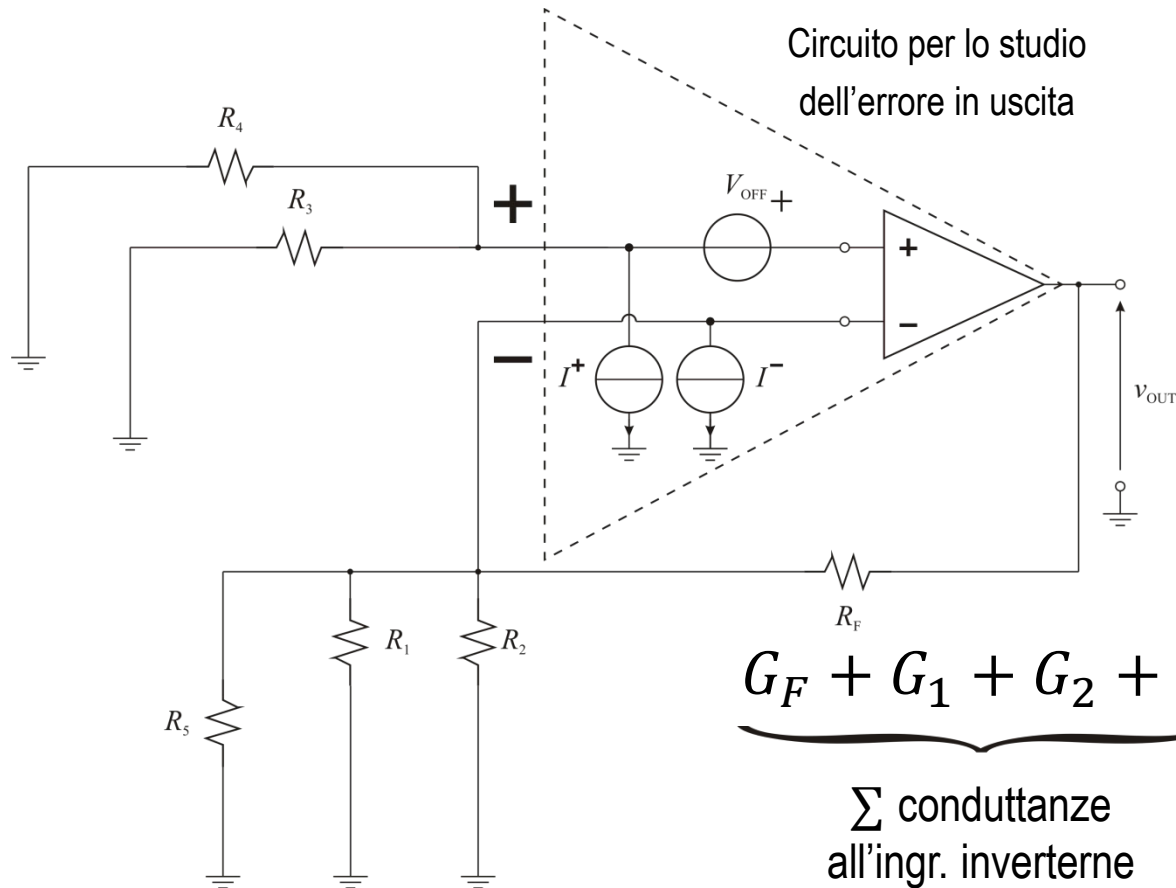
$$\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$



$$G_F + G_1 + G_2 + G_5 = G_3 + G_4$$



# Errore sistematico dovuto alle correnti di polarizzazione



Qual è l'interpretazione circuitale della condizione trovata?

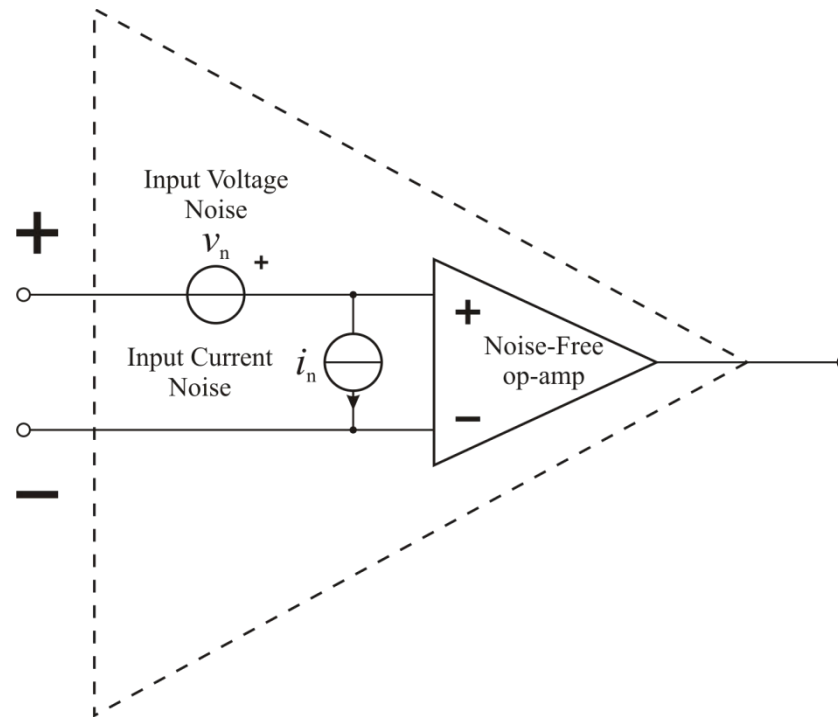
$$\underbrace{G_F + G_1 + G_2 + G_5}_{\Sigma \text{ conduttanze All'ingr. inverterne}} = \underbrace{G_3 + G_4}_{\Sigma \text{ conduttanze All'ingr. non-inverterne}}$$

La condizione per compensare l'errore dovuto alle correnti di polarizzazione è che la somma delle conduttanze collegate all'ingresso invertente deve essere pari alla somma delle conduttanze all'ingresso non invertente. Questo risultato è vero in generale ed è proprio la condizione che avevamo già imposto nel sommatore generalizzato ☺!



# Rumore e Distorsione

- Gli operazionali sono soggetti a rumore e distorsione di non-linearità, a cui si farà soltanto cenno.
- In analogia con gli errori in continua, le prestazioni in termini di rumore possono essere descritte da un generatore equivalente di rumore all'ingresso.
- I termini di rumore sono descritti nei datasheet in termini di densità spettrale di potenza.
- Spesso non si trovano informazioni riguardo alla distorsione: come tutte le non-idealità, è mitigata se il guadagno d'anello è elevato.



## SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_S = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.

Table 1.

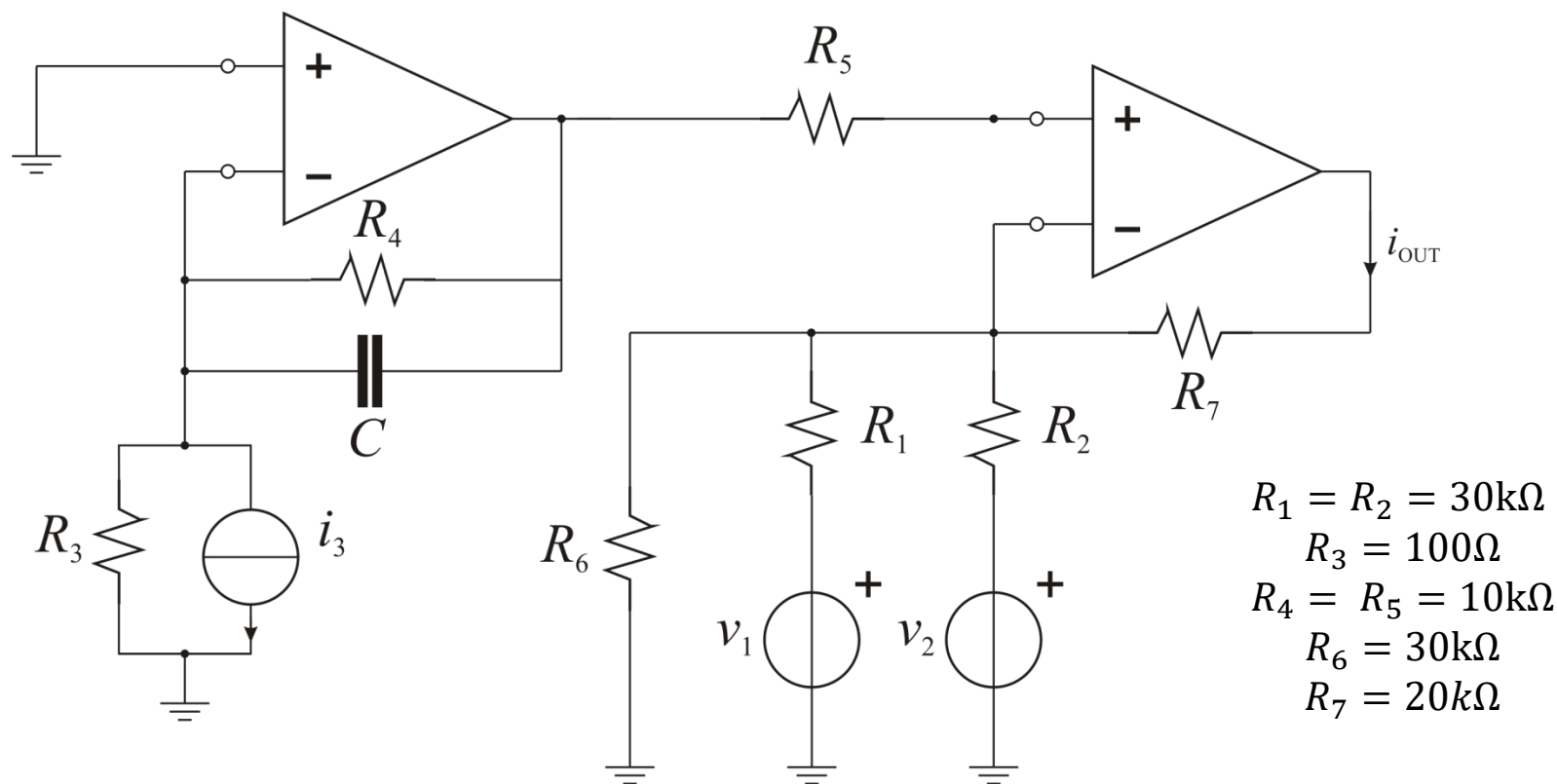
| Parameter  | Symbol               | Test Conditions  | OP27A/OP27E |            |          | OP27G      |            |          | Unit                         |
|--|----------------------|--|-------------|------------|----------|------------|------------|----------|------------------------------|
|  |                      |  | Min         | Typ        | Max      | Min        | Typ        | Max      |                              |
| INPUT OFFSET VOLTAGE <sup>1</sup>                  | $V_{OS}$             |  |             | 10         | 25       |            | 30         | 100      | $\mu\text{V}$                |
| LONG-TERM $V_{OS}$ STABILITY <sup>2, 3</sup>       | $V_{OS}/\text{Time}$ |  |             | 0.2        | 1.0      |            | 0.4        | 2.0      | $\mu\text{V}/\text{M}_0$     |
| INPUT OFFSET CURRENT                               | $I_{OS}$             |  |             | 7          | 35       |            | 12         | 75       | nA                           |
| INPUT BIAS CURRENT                                 | $I_B$                |  |             | $\pm 10$   | $\pm 40$ |            | $\pm 15$   | $\pm 80$ | nA                           |
| INPUT NOISE VOLTAGE <sup>3, 4</sup>                | $e_{n\text{ p-p}}$   | 0.1 Hz to 10 Hz  |             | 0.08       | 0.18     |            | 0.09       | 0.25     | $\mu\text{V p-p}$            |
| INPUT NOISE<br>Voltage Density <sup>3</sup>        | $e_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   |             | 3.5        | 5.5      |            | 3.8        | 8.0      | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   |             | 3.1        | 4.5      |            | 3.3        | 5.6      | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 |             | 3.0        | 3.8      |            | 3.2        | 4.5      | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT NOISE<br>Current Density <sup>3</sup>        | $i_n$                | $f_0 = 10\text{ Hz}$                                   |             | 1.7        | 4.0      |            | 1.7        |          | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 30\text{ Hz}$                                   |             | 1.0        | 2.3      |            | 1.0        |          | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
|  |                      | $f_0 = 1000\text{ Hz}$                                 |             | 0.4        | 0.6      |            | 0.4        | 0.6      | $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| INPUT RESISTANCE<br>Differential Mode <sup>5</sup> | $R_{IN}$             |  | 1.3         | 6          |          | 0.7        | 4          |          | M $\Omega$                   |
|  | $R_{INCM}$           |  |             | 3          |          |            | 2          |          | G $\Omega$                   |
| INPUT VOLTAGE RANGE                                | IVR                  |  | $\pm 11.0$  | $\pm 12.3$ |          | $\pm 11.0$ | $\pm 12.3$ |          | V                            |
| COMMON-MODE REJECTION RATIO                        | CMRR                 | $V_{CM} = \pm 11\text{ V}$                             | 114         | 126        |          | 100        | 120        |          | dB                           |
| POWER SUPPLY REJECTION RATIO                       | PSRR                 | $V_S = \pm 4\text{ V to } \pm 18\text{ V}$             |             | 1          | 10       |            | 2          | 20       | $\mu\text{V}/\text{V}$       |
| LARGE SIGNAL VOLTAGE GAIN                          | $A_{VO}$             | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$  | 1000        | 1800       |          | 700        | 1500       |          | V/mV                         |
|  |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$ , $V_O = \pm 10\text{ V}$ | 800         | 1500       |          | 600        | 1500       |          | V/mV                         |
| OUTPUT VOLTAGE SWING                               | $V_O$                | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | $\pm 12.0$  | $\pm 13.8$ |          | $\pm 11.5$ | $\pm 13.5$ |          | V                            |
|  |                      | $R_L \geq 600\text{ }\Omega$                           | $\pm 10.0$  | $\pm 11.5$ |          | $\pm 10.0$ | $\pm 11.5$ |          | V                            |
| SLEW RATE <sup>6</sup>                             | SR                   | $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$                            | 1.7         | 2.8        |          | 1.7        | 2.8        |          | V/ $\mu\text{s}$             |
| GAIN BANDWIDTH PRODUCT <sup>6</sup>                | GBW                  |  | 5.0         | 8.0        |          | 5.0        | 8.0        |          | MHz                          |
| OPEN-LOOP OUTPUT RESISTANCE                        | $R_O$                | $V_O = 0$ , $I_O = 0$                                  |             | 70         |          |            | 70         |          | $\Omega$                     |
| POWER CONSUMPTION                                  | $P_d$                | $V_O$  |             | 90         | 140      |            | 100        | 170      | mW                           |
| OFFSET ADJUSTMENT RANGE                            |                      | $R_P = 10\text{ k}\Omega$                              |             | $\pm 4.0$  |          |            | $\pm 4.0$  |          | mV                           |



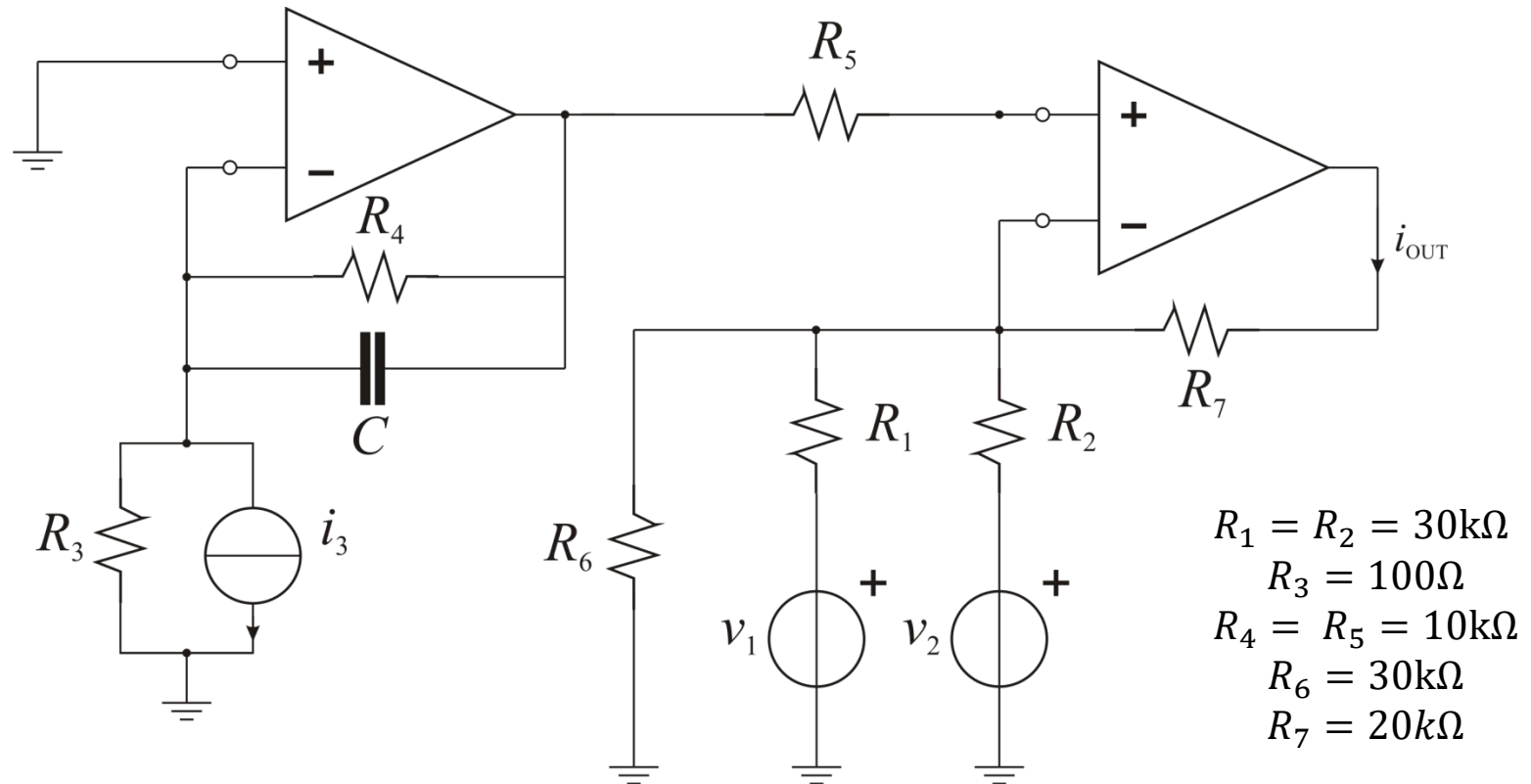
# Esercizio

Con riferimento al circuito in figura:

- 1) valutare  $i_{OUT}$  in funzione di  $v_1$ ,  $v_2$  e  $i_3$  considerando  $C$  come un circuito aperto ed operazionali ideali.
- 2) Valutare l'errore in continua (offset) su  $i_{OUT}$  nei casi peggiori (minimo e massimo), sapendo che la massima (in modulo) tensione di offset in ingresso per gli operazionali è  $V_{OFF} = 5\text{mV}$  e le correnti di bias sono trascurabili.



# Esercizio



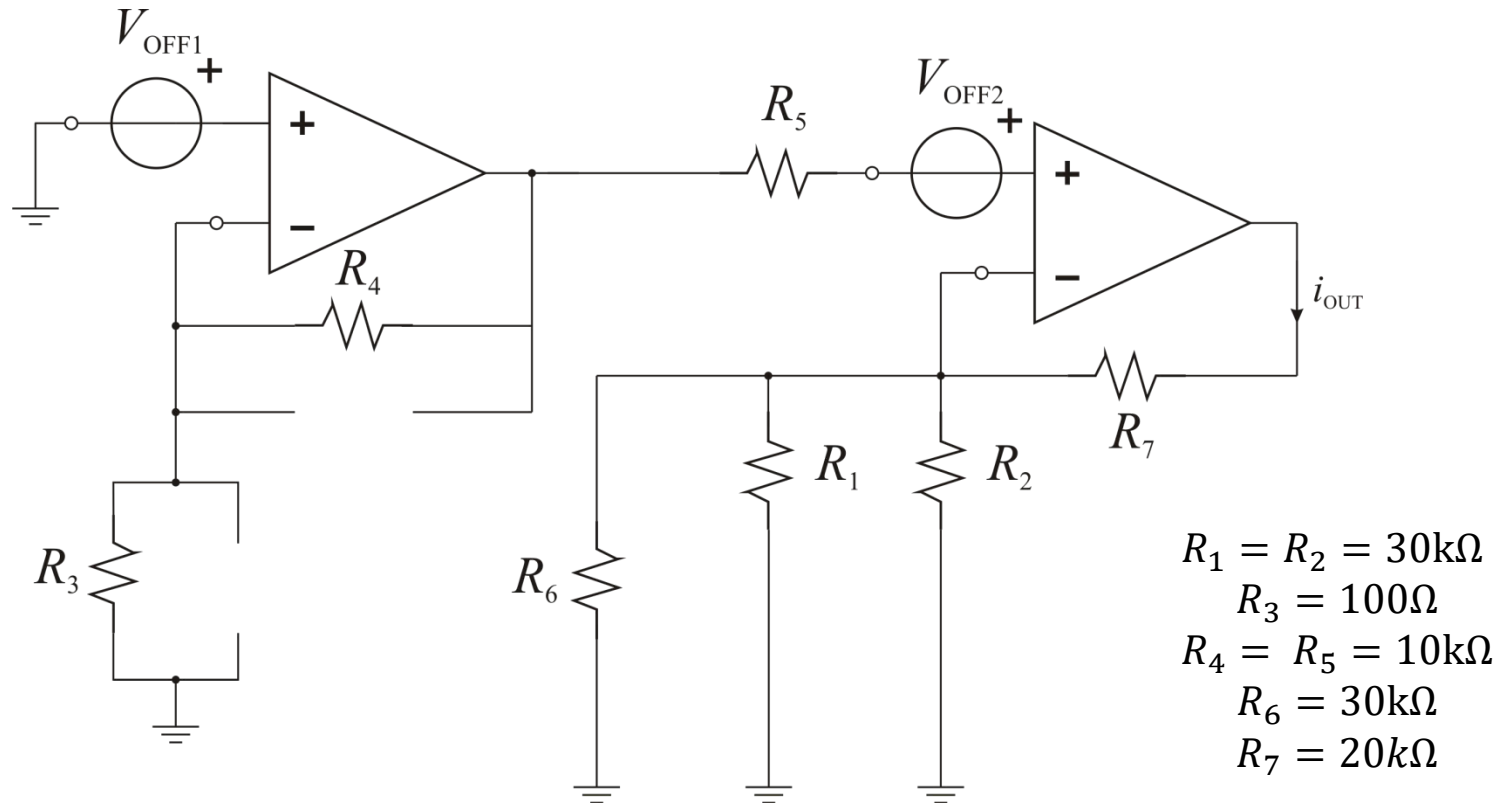
$$v_{OUT1} = R_4 i_3$$

$$i_{OUT} = \frac{v_{OUT1}}{R_6 \parallel R_1 \parallel R_2} - \frac{v_1}{R_1} - \frac{v_2}{R_2}$$

$$i_{OUT} = v_{OUT1} \cdot 100\mu\text{S} - v_1 33\mu\text{S} - v_2 33\mu\text{S}$$



# Esercizio

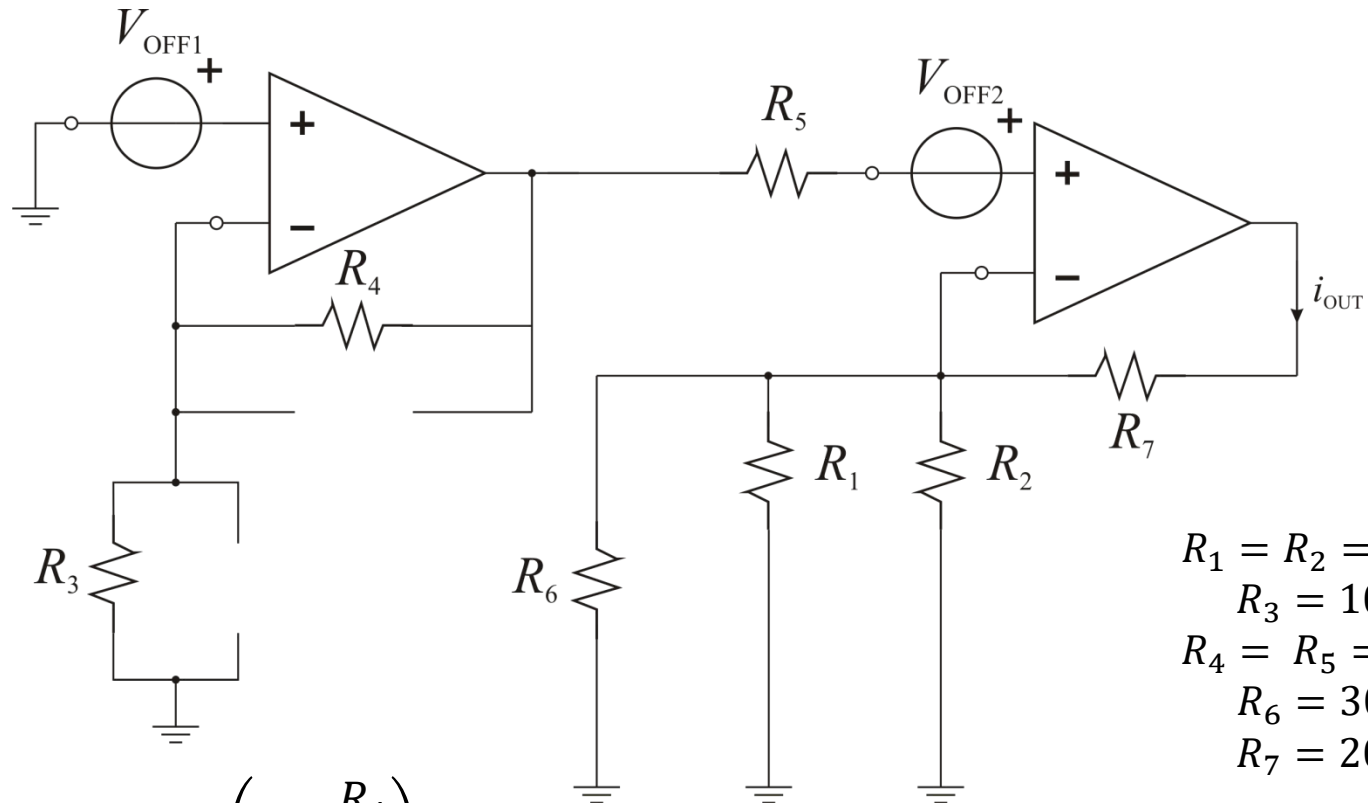


Si spengono i generatori indipendenti, si includono i modelli degli operazionali con offset (in generale diversi per i due dispositivi). Per l'analisi degli offset (=in continua) il condensatore è un circuito aperto.





# Esercizio



$$V_{OUT1} = V_{OFF1} \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$I_{OUT} = \frac{1}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_6} \left[ \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) V_{OFF1} + V_{OFF2} \right] = (101V_{OFF1} + V_{OFF2}) \cdot 100\mu\text{S}$$



# Esercizio

Essendo  $|V_{OFF1}|, |V_{OFF2}| < 5\text{mV} \rightarrow -5\text{mV} < V_{OFF1} < 5\text{mV}$  e  $-5\text{mV} < V_{OFF2} < 5\text{mV}$ .  
Il caso peggiore per l'errore su  $I_{OUT}$  si avrà quindi quando  $V_{OFF1}$  e  $V_{OFF2}$  sono entrambi massimi o entrambi minimi

$$\Delta I_{OUT} = (101V_{OFF1} + V_{OFF2}) \cdot 100\mu\text{S}$$

$$\Delta I_{OUT,max} = (101V_{OFF1,max} + V_{OFF2,max}) \cdot 100\mu\text{S} = 510\text{mV} \cdot 100\mu\text{S} = 51\mu\text{A}$$

$$\Delta I_{OUT,min} = (101V_{OFF1,min} + V_{OFF2,min}) \cdot 100\mu\text{S} = -510\text{mV} \cdot 100\mu\text{S} = -51\mu\text{A}$$

Si conclude quindi che:

$$\Delta I_{OUT} \in (-51\mu\text{A}, 51\mu\text{A})$$

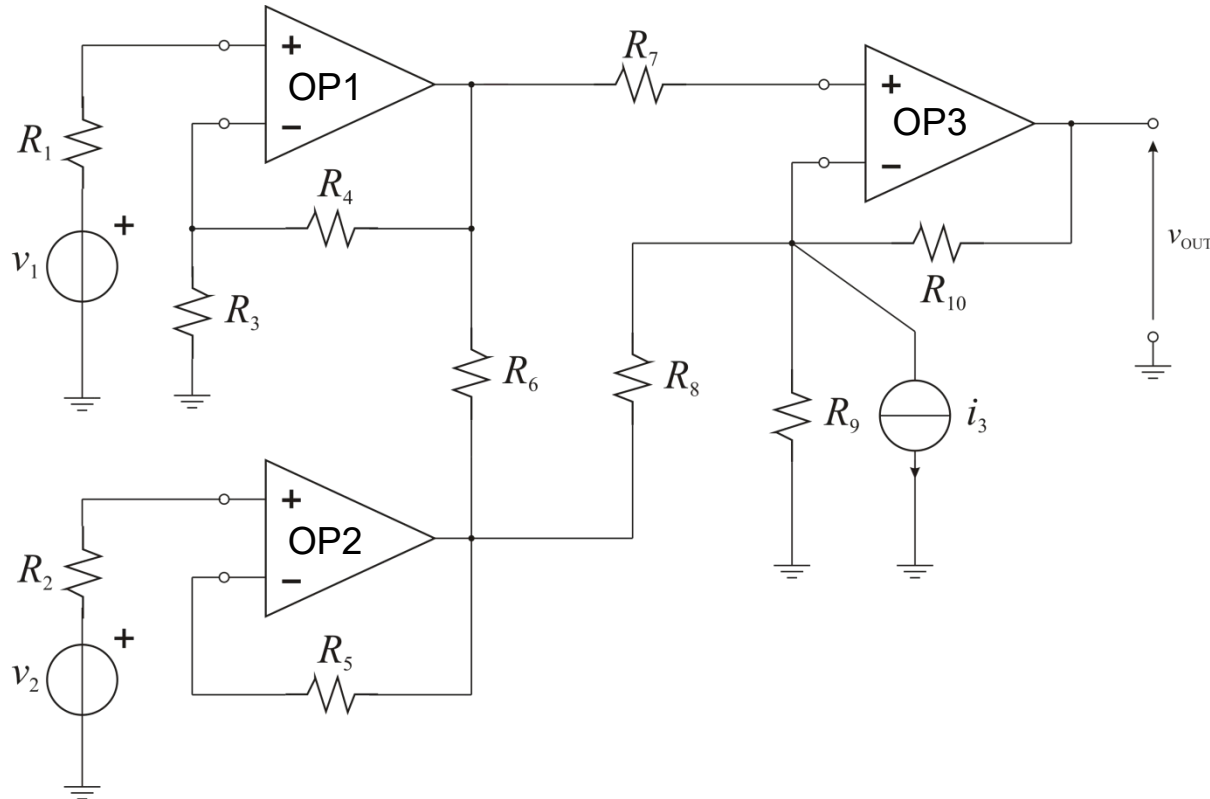
e si osserva come il contributo del primo amplificatore operazionale sia dominante



# Esercizio

Con riferimento al circuito in figura:

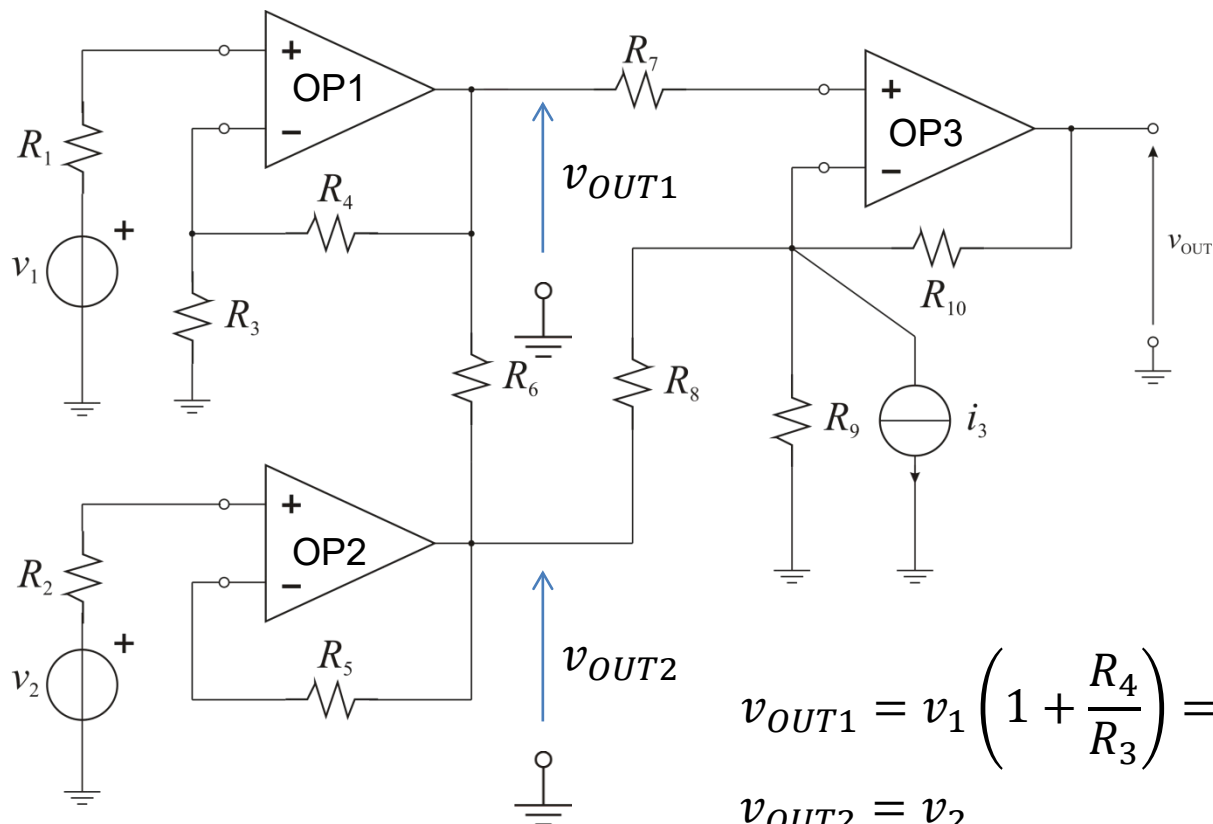
- 1) valutare  $i_{OUT}$  in funzione di  $v_1$ ,  $v_2$  e  $i_3$  considerando gli operazionali ideali.
- 2) Valutare l'errore in continua  $\Delta V_{OUT}$  nel caso peggiore, sapendo che la massima tensione di offset in ingresso è  $V_{OFF} = 10\text{mV}$  per tutti gli operazionali e le correnti di polarizzazione sono trascurabili.



$$\begin{aligned} R_1 &= 30\text{k}\Omega \\ R_2 &= 150\text{k}\Omega \\ R_3 &= 22\text{k}\Omega \\ R_4 &= 47\text{k}\Omega \\ R_5 &= 270\text{k}\Omega \\ R_6 &= 10\text{k}\Omega \\ R_7 &= 15\text{k}\Omega \\ R_8 &= 20\text{k}\Omega \\ R_9 &= 20\text{k}\Omega \\ R_{10} &= 20\text{k}\Omega \end{aligned}$$



## Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= 30\text{k}\Omega \\ R_2 &= 150\text{k}\Omega \\ R_3 &= 22\text{k}\Omega \\ R_4 &= 47\text{k}\Omega \\ R_5 &= 270\text{k}\Omega \\ R_6 &= 10\text{k}\Omega \\ R_7 &= 15\text{k}\Omega \\ R_8 &= 20\text{k}\Omega \\ R_9 &= 20\text{k}\Omega \\ R_{10} &= 20\text{k}\Omega \end{aligned}$$

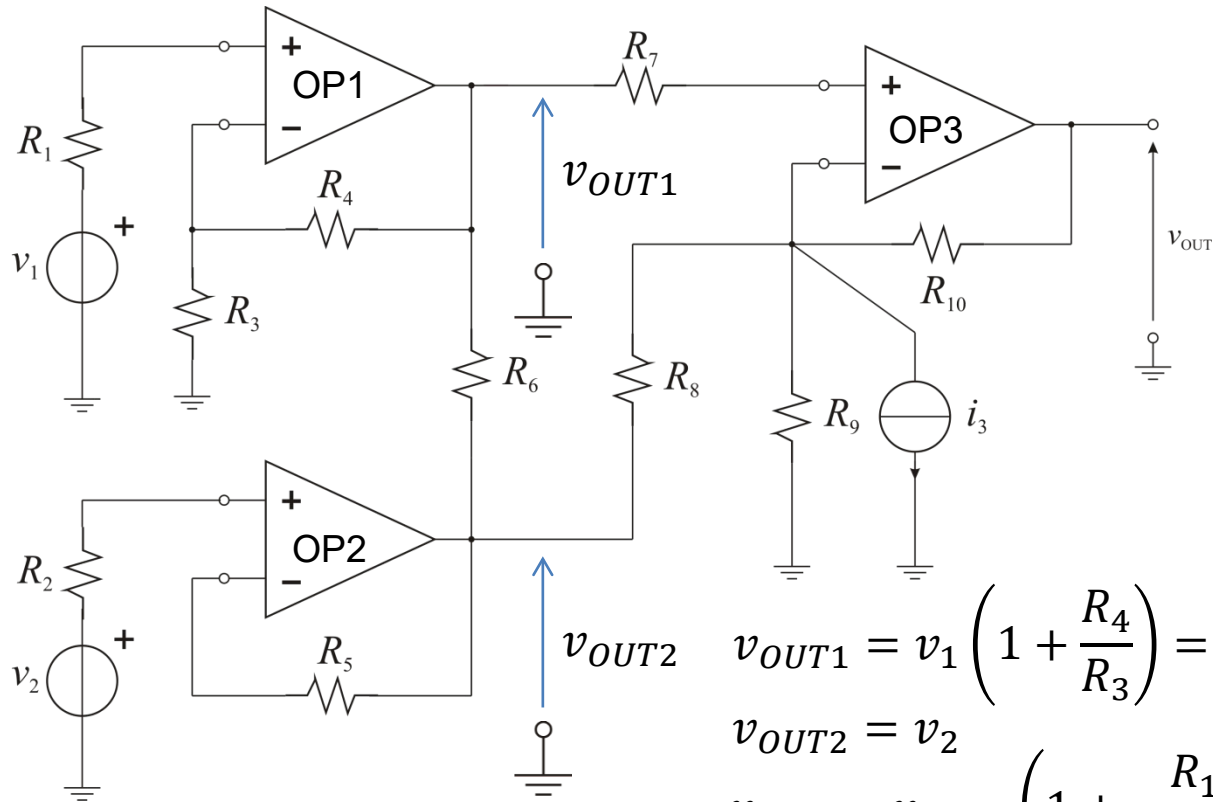
$$v_{OUT1} = v_1 \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 3v_1$$

$$v_{OUT2} = v_2$$

- In  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_5$  la corrente è nulla.
- $R_6$  è collegata tra le uscite degli operazionali ( $\rightarrow$  generatori ideali di tensione): è un carico e non ha influenza nel calcolo di  $v_{OUT1}$   $v_{OUT2}$ )
- OP1 si riconduce ad un amplificatore di tensione non invertente, OP2 a un voltage follower.



# Esercizio



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 30\text{k}\Omega \\
 R_2 &= 150\text{k}\Omega \\
 R_3 &= 22\text{k}\Omega \\
 R_4 &= 44\text{k}\Omega \\
 R_5 &= 270\text{k}\Omega \\
 R_6 &= 10\text{k}\Omega \\
 R_7 &= 15\text{k}\Omega \\
 R_8 &= 20\text{k}\Omega \\
 R_9 &= 20\text{k}\Omega \\
 R_{10} &= 20\text{k}\Omega
 \end{aligned}$$

$$v_{OUT1} = v_1 \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 3v_1$$

$$v_{OUT2} = v_2$$

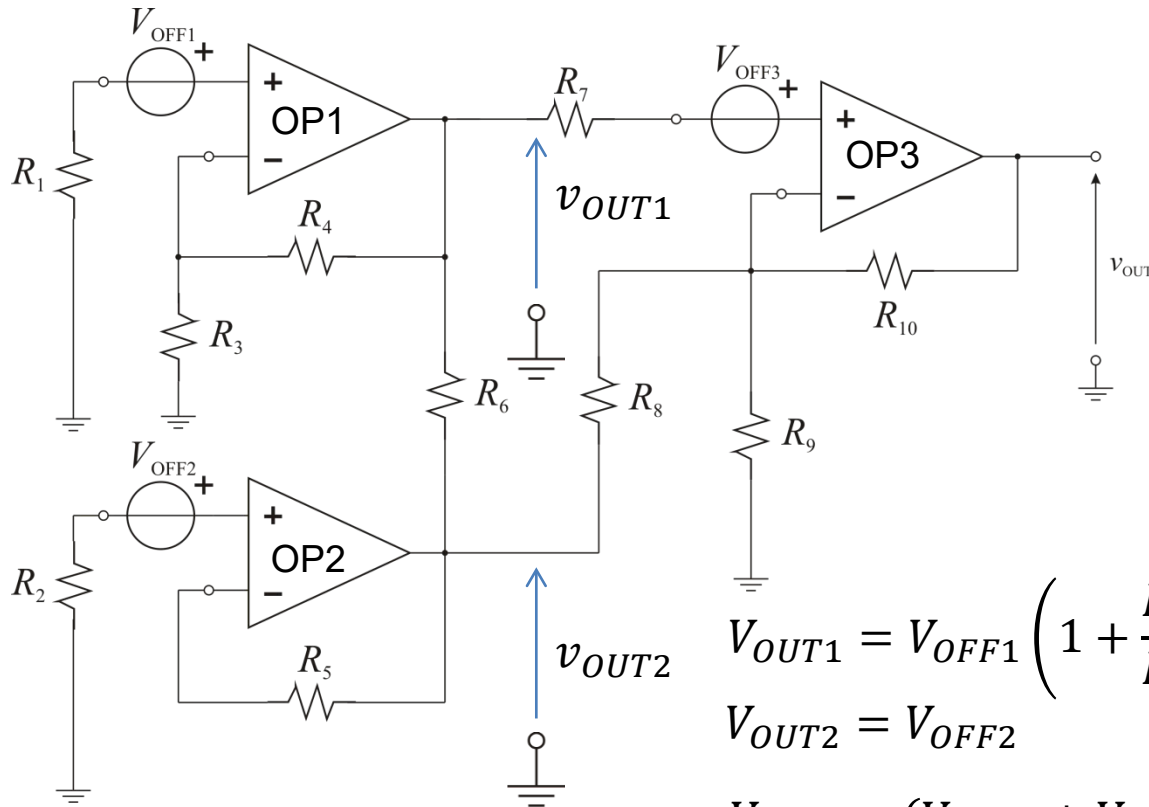
$$v_{OUT} = v_{OUT1} \left( 1 + \frac{R_{10}}{R_8 \parallel R_9} \right) - v_{OUT2} \frac{R_{10}}{R_8} + i_3 R_{10}$$

$$v_{OUT} = \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \left( 1 + \frac{R_{10}}{R_8 \parallel R_9} \right) v_1 - \frac{R_{10}}{R_8} v_2 + R_{10} i_3$$

$$v_{OUT} = 9v_1 - v_2 + 20\text{k}\Omega \cdot i_3$$



# Esercizio



$$\begin{aligned} R_1 &= 30\text{k}\Omega \\ R_2 &= 150\text{k}\Omega \\ R_3 &= 22\text{k}\Omega \\ R_4 &= 44\text{k}\Omega \\ R_5 &= 270\text{k}\Omega \\ R_6 &= 10\text{k}\Omega \\ R_7 &= 15\text{k}\Omega \\ R_8 &= 20\text{k}\Omega \\ R_9 &= 20\text{k}\Omega \\ R_{10} &= 20\text{k}\Omega \end{aligned}$$

$$V_{OUT1} = V_{OFF1} \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 3V_{OFF1}$$

$$V_{OUT2} = V_{OFF2}$$

$$V_{OUT} = (V_{OUT1} + V_{OFF3}) \left( 1 + \frac{R_{10}}{R_8 \parallel R_9} \right) - V_{OUT2} \frac{R_{10}}{R_8}$$

$$\Delta V_{OUT} = \left[ \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) V_{OFF1} + V_{OFF3} \right] \left( 1 + \frac{R_{10}}{R_8 \parallel R_9} \right) - \frac{R_{10}}{R_8} V_{OFF2}$$

$$\Delta V_{OUT} = 9V_{OFF1} + 3V_{OFF3} - V_{OFF2}$$



$$\Delta V_{OUT} = 9V_{OFF1} + 3V_{OFF3} - V_{OFF2}$$

Il caso peggiore si ha quando tutti i contributi sono massimi in valore assoluto e si sommano in modulo (ad es.:  $V_{OFF1}$  e  $V_{OFF3}$  sono positivi e  $V_{OFF2}$  è negativo o  $V_{OFF1}$  e  $V_{OFF3}$  sono negativi e  $V_{OFF2}$  è positivo)

$$\Delta V_{OUT,max} = 90\text{mV} + 30\text{mV} - (-10\text{mV}) = 130\text{mV}$$

$$\Delta V_{OUT,max} = -90\text{mV} - 30\text{mV} - 10\text{mV} = -130\text{mV}$$

Si conclude quindi che:

$$\Delta V_{OUT} \in (-130\text{mV}, 130\text{mV})$$

e si osserva come il contributo del primo amplificatore operazionale sia dominante

