

Fondamenti di Elettronica

02

Modelli degli amplificatori

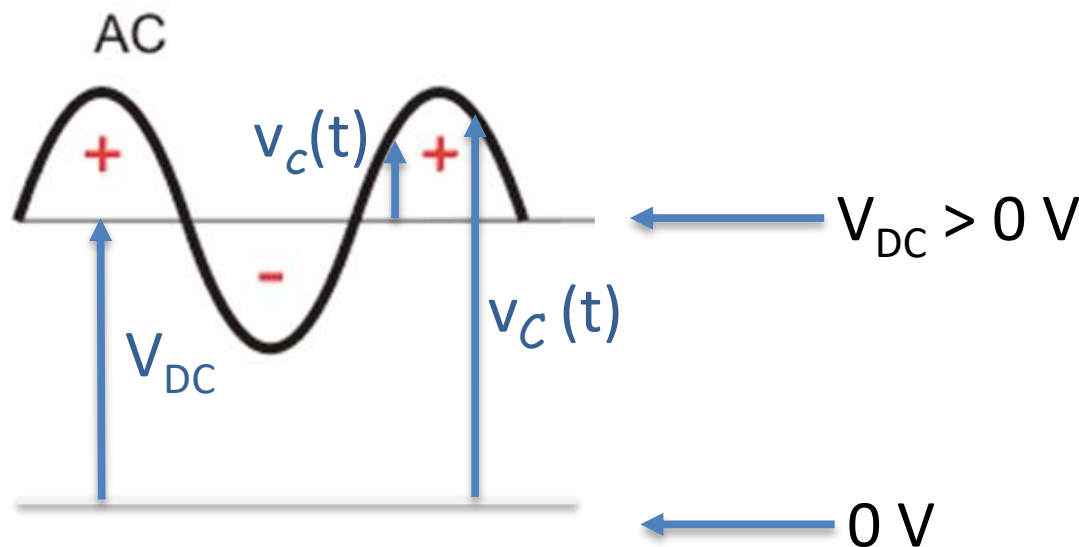


Enrico Zanoni

enrico.zanoni@unipd.it

Amplificatori : simboli e convenzioni

Segnale composto da una componente continua + una componente tempovariante



componente continua (DC) = lettera maiuscola, pedice maiuscolo

componente ac (segnale), senza la componente DC = lettera minuscola, pedice minuscolo

grandezza istantanea totale = lettera minuscola, pedice maiuscolo

ampiezza del segnale = lettera maiuscola, pedice minuscolo

$$v_C(t) = v_c(t) + V_C; \quad v_c(t) = V_c \sin(\omega t)$$

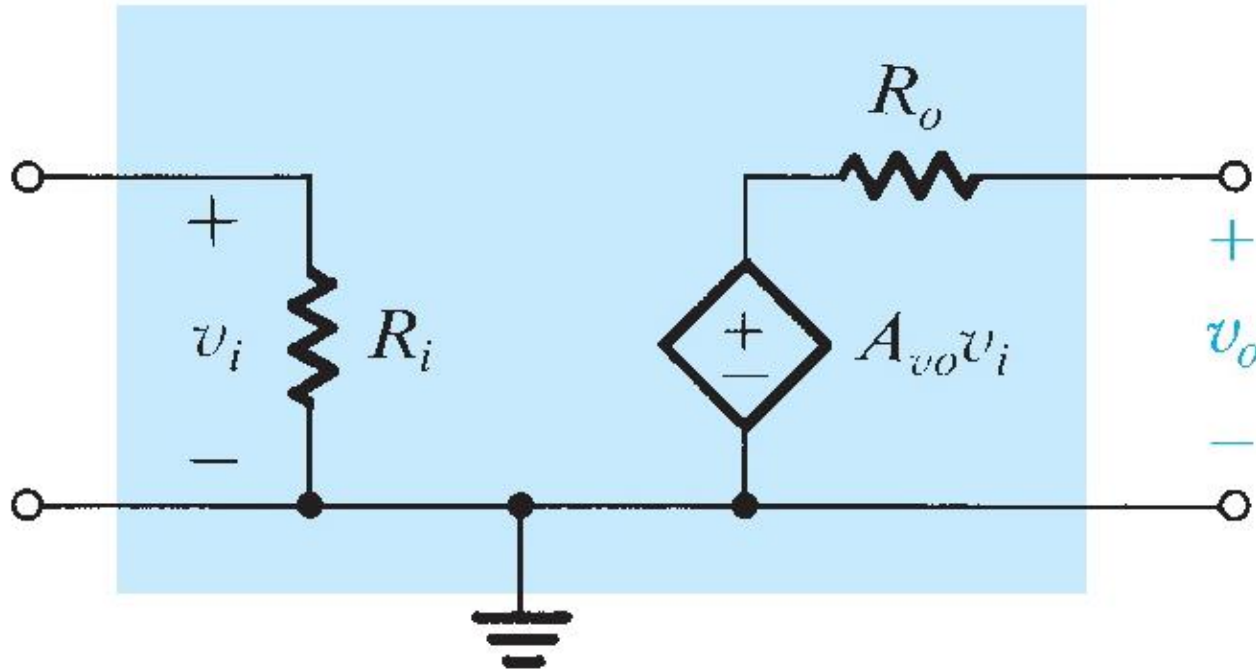
zanoni, adesso conto quante volte ti sbagli...



Modello «a doppio bipolo» di un amplificatore

- a partire da una descrizione del comportamento fisico dell'amplificatore
- → definiamo un modello «circuitale», cioè un «circuito elettrico equivalente»
- vale a dire trasformiamo l'amplificatore in una rete elettrica equivalente che comprende resistori, condensatori, induttori e generatori pilotati in tensione o in corrente
- consideriamo solo i segnali (le componenti continue non ci interessano) quindi v_i , v_o , i_i , i_o (tutto minuscolo: solo le *variazioni* di tensione e corrente)
- lasciamo da parte per il momento condensatori e induttori
- le relazioni tra le grandezze sono tutte lineari, non ci sono meccanismi intrinseci di retroazione o feedback : possiamo separare completamente l'ingresso dall'uscita →
- sono tutti modelli UNILATERALI : il flusso del segnale è UNIDIREZIONALE, dall'ingresso verso l'uscita

Modello a doppio bipolo di un amplificatore di tensione



Modello dell'amplificatore come rete lineare a due porte

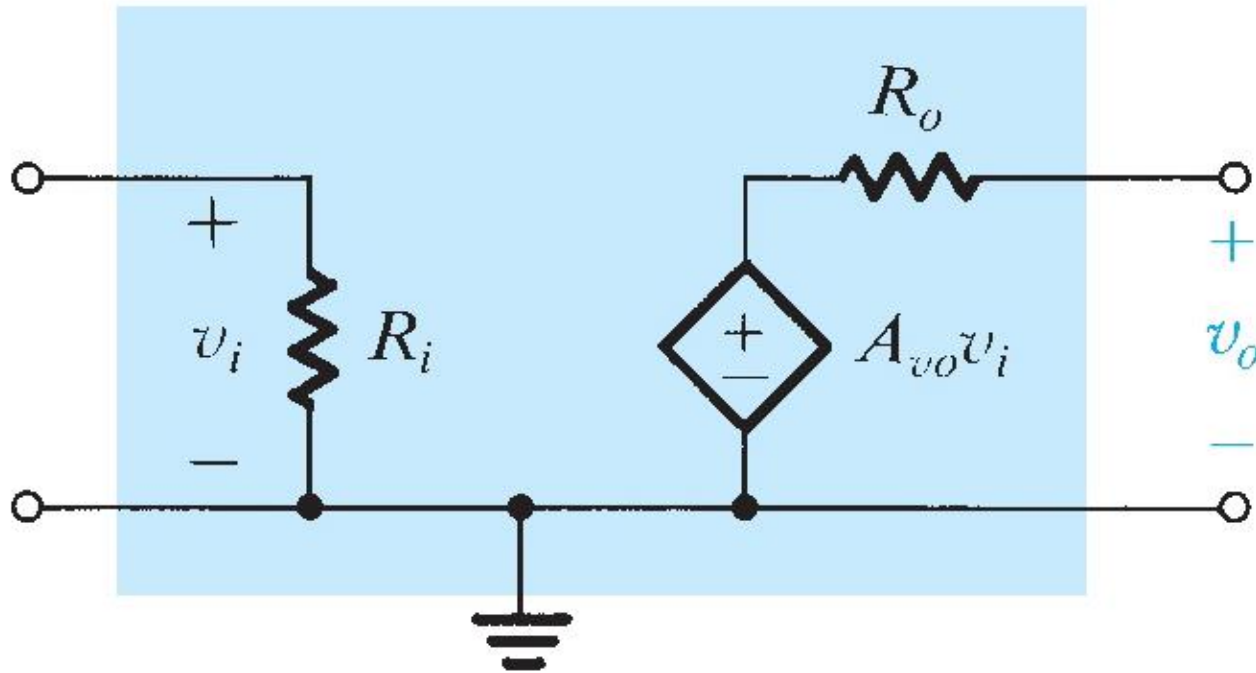
ingresso: modellato da una **resistenza di ingresso R_i**

uscita: **generatore di Thevenin** pilotato dalla tensione di ingresso v_i

A_{vo} = **guadagno in tensione** «a circuito aperto» = **senza carico**
applicato all'uscita: $v_o = A_{vo} v_i$

R_o = **resistenza di uscita dell'amplificatore**

Modello a doppio bipolo di un amplificatore di tensione

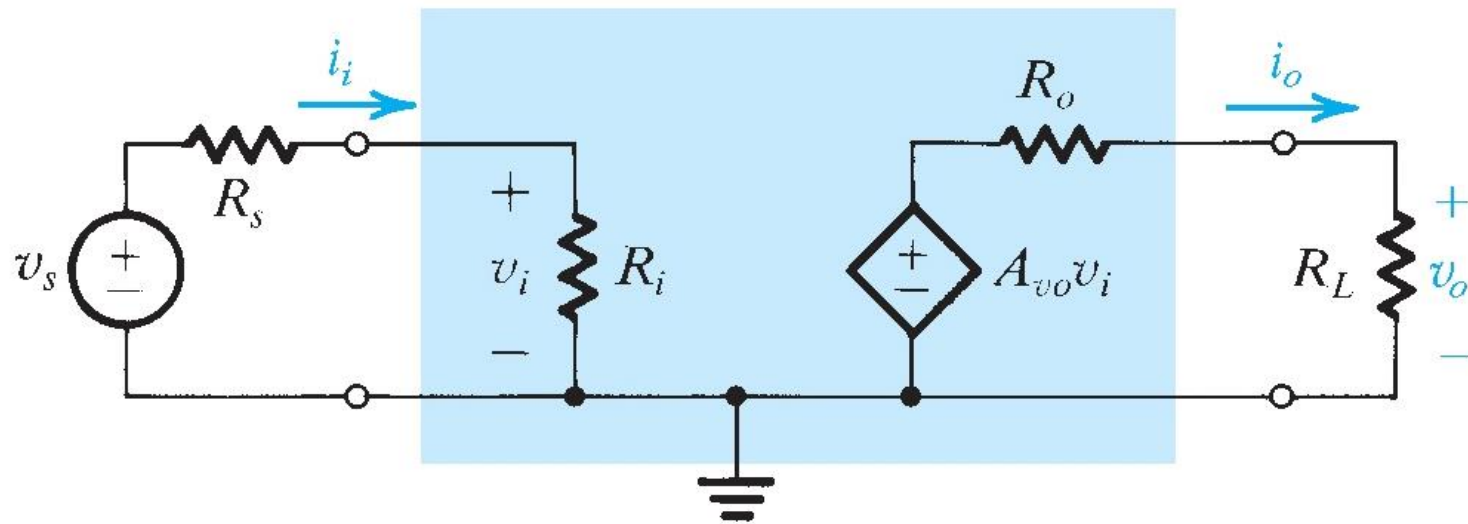


A_{vo} = guadagno in tensione «a circuito aperto» = senza carico applicato all'uscita:

$$v_o = A_{vo} v_i$$

A circuito aperto su R_o non passa corrente = non c'è caduta di tensione, quindi v_o è uguale alla tensione del generatore

Amplificatore di tensione: effetto di R_i e R_o sul guadagno



sorgente

amplificatore

carico

- modelliamo la sorgente come un generatore di Thevenin
- applichiamo un carico resistivo R_L in uscita

$$v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

$$v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

Guadagno dell'amplificatore di tensione con sorgente e carico

$$v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_s} \quad v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

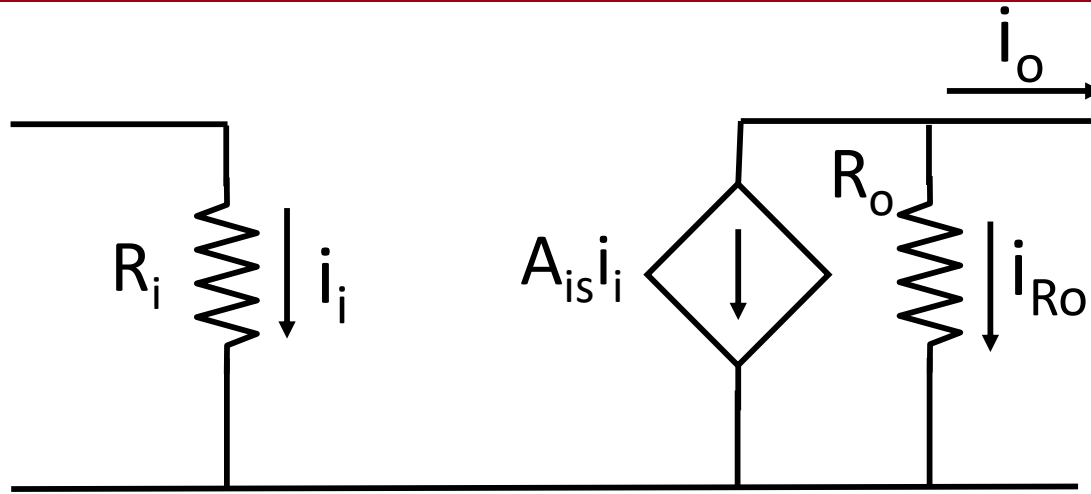
quindi il guadagno complessivo è dato da:

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = A_{vo} \underbrace{\frac{R_i}{R_i + R_s}}_{\substack{\text{partitore} \\ \text{di ingresso}}} \underbrace{\frac{R_L}{R_o + R_L}}_{\substack{\text{partitore} \\ \text{di uscita}}}$$

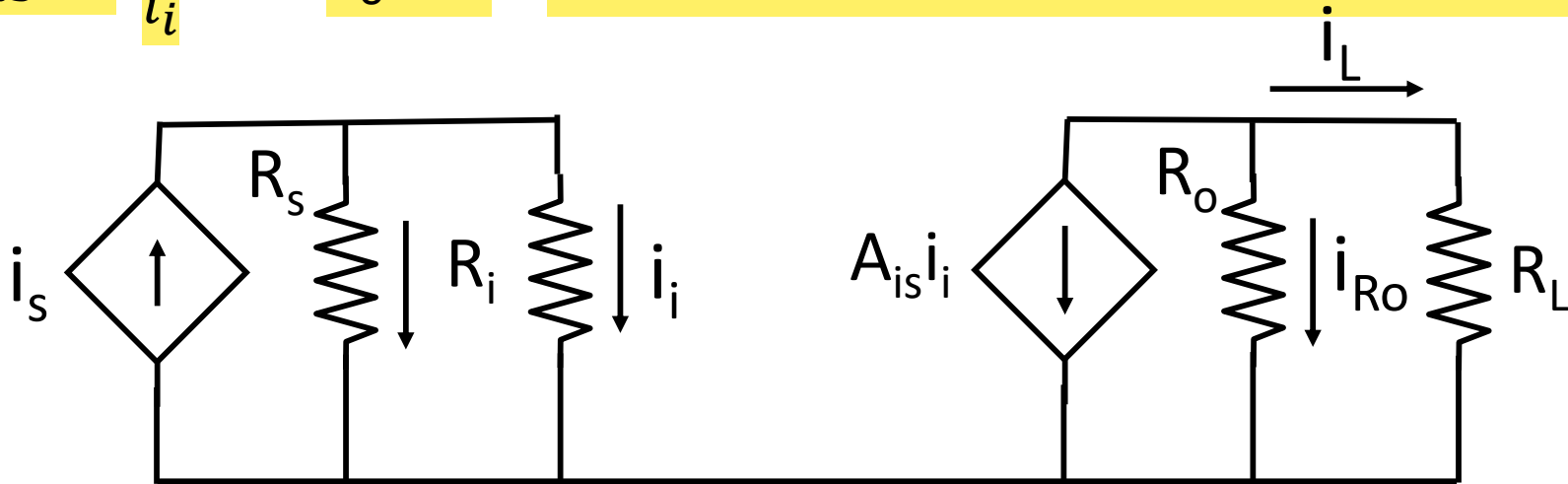
→1 per $R_s \ll R_i$ →1 per $R_L \gg R_o$

Per avere $A_v = A_{vo} = \text{max guadagno}$ è necessario che $R_i \rightarrow \infty$ e $R_o \rightarrow 0$

Modello a doppio bipolo dell'amplificatore di corrente

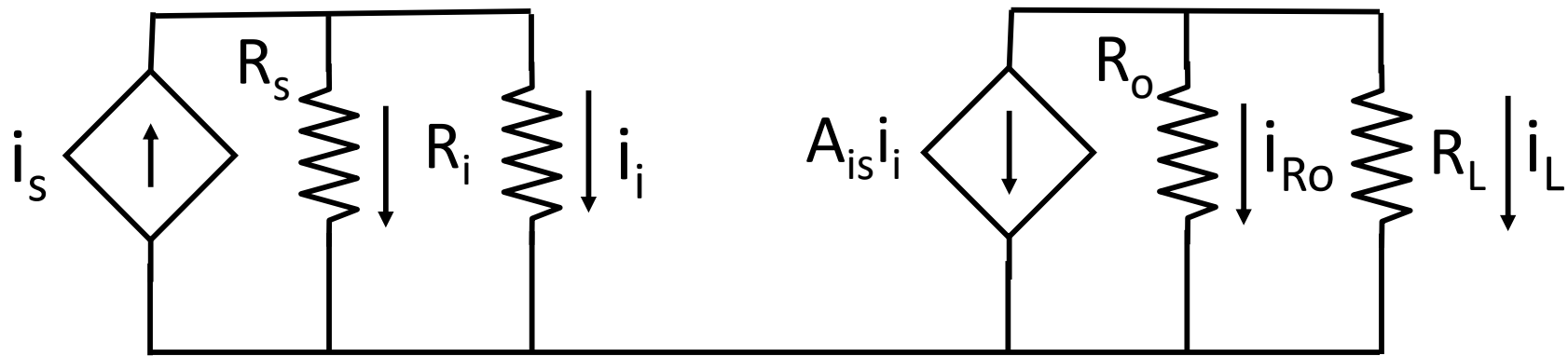


$A_{is} = \frac{i_o}{i_i}$ con $v_o = 0$ «guadagno di corrente in cortocircuito»



Effetto della sorgente e del carico sul guadagno in corrente

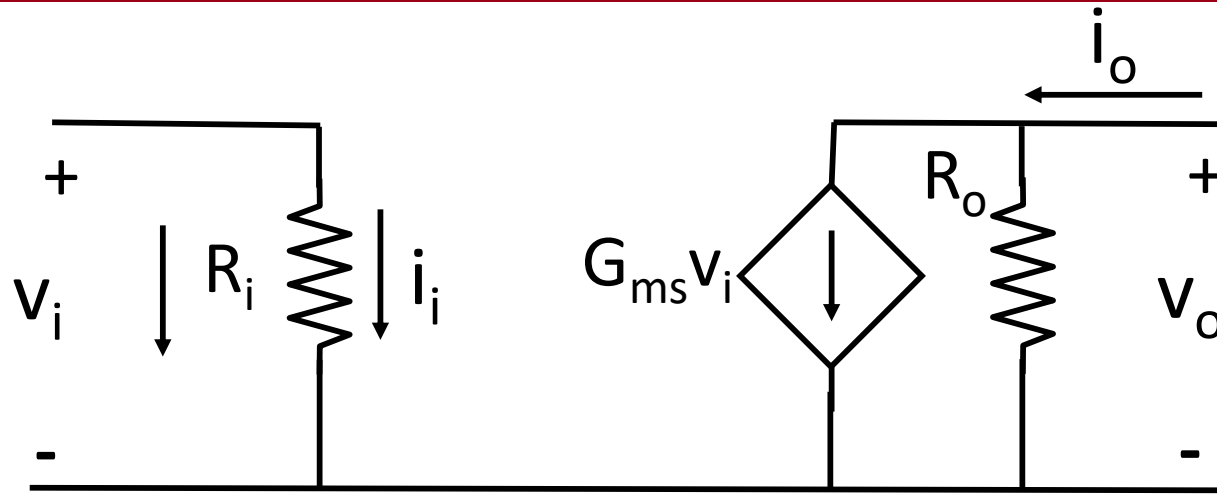
$$A_{is} = \frac{i_o}{i_i} \text{ con } v_o = 0 \text{ «guadagno di corrente in cortocircuito»}$$



$$A_i = \frac{i_L}{i_s} \quad i_i = i_s \frac{R_s}{R_s + R_i}; \quad i_L = A_{is} i_i \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

perchè il guadagno A_i sia massimo e pari a A_{is} (s sta per «short-circuit», corto circuito) deve essere $R_i \ll R_s$ e $R_o \gg R_L$; in pratica $R_i \rightarrow 0$ e $R_o \rightarrow \infty$

Modello a doppio bipolo dell'amplificatore di transconduttanza

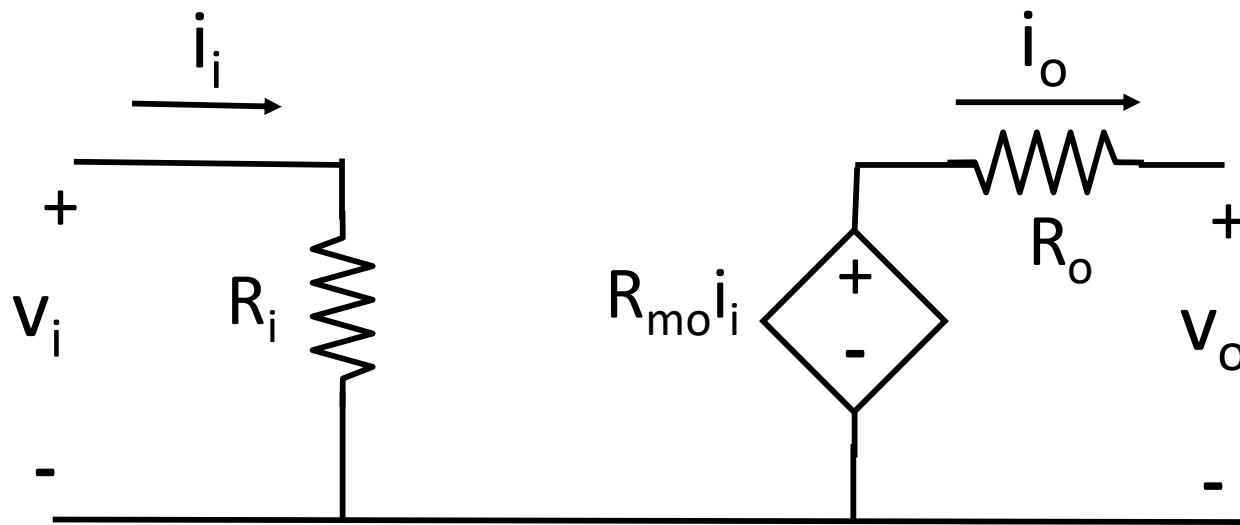


$$G_{ms} = \frac{i_o}{v_i} \quad \text{guadagno di transconduttanza in corto circuito}$$

perchè sia $G_{ms} = \frac{i_o}{v_i} = G_m = \frac{i_L}{v_s}$ deve essere

$$R_i \rightarrow \infty \text{ e } R_o \rightarrow \infty$$

Modello a doppio bipolo dell'amplificatore di transimpedenza



$R_{mo} = \frac{v_o}{i_i}$ guadagno di transimpedenza o transresistenza a circuito aperto

perchè sia $R_{mo} = \frac{v_o}{i_i} = R_m = \frac{v_L}{i_s}$ deve essere

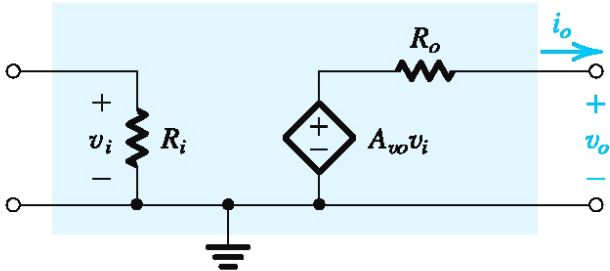
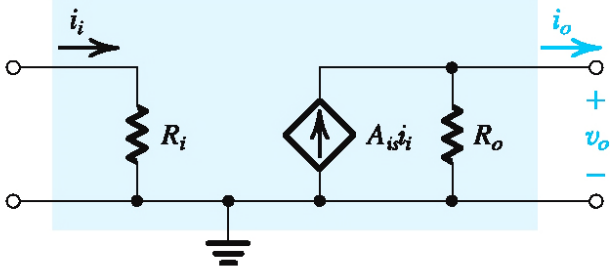
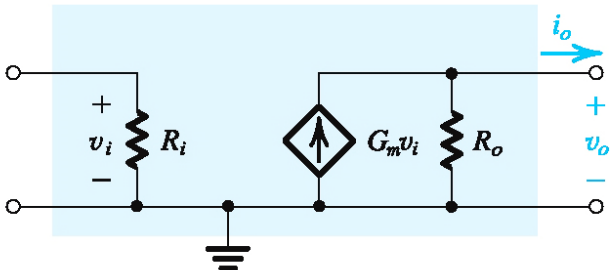
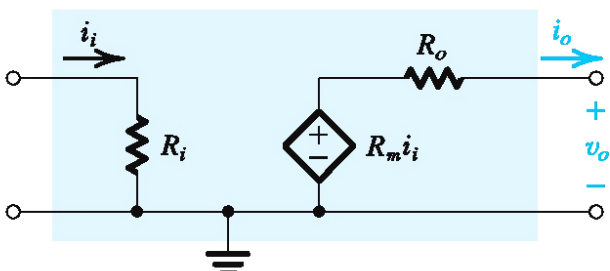
$R_i \rightarrow 0$ e $R_o \rightarrow 0$

Tabella riassuntiva sulla classificazione degli amplificatori

Simbolo	Guadagno	Guadagno max	R_i ideale	R_o ideale
$A_v = v_L/v_s$	Tensione	A_{vo} a circuito aperto	∞	0
$A_i = i_L/i_s$	Corrente	A_{is} in corto circuito	0	∞
$G_m = i_L/v_s$	Transconduttanza	G_{ms} in corto circuito	∞	∞
$R_m = v_L/i_s$	Transresistenza	R_{mo} a circuito aperto	0	0

Con i valori di R_i e R_o ideali l'amplificazione diventa indipendente dai valori della resistenza della sorgente R_s e del carico R_L . Il guadagno diventa pari al valore massimo

I quattro tipi di amplificatori

Tipo	Modello circuitale	Parametro di guadagno	Caratteristiche ideali
Amplificatore di tensione		Guadagno di tensione a circuito aperto $A_{vo} \equiv \left. \frac{v_o}{v_i} \right _{i_o=0} \quad (\text{V/V})$	$R_i = \infty$ $R_o = 0$
Amplificatore di corrente		Guadagno di corrente in cortocircuito $A_{is} \equiv \left. \frac{i_o}{i_i} \right _{v_o=0} \quad (\text{A/A})$	$R_i = 0$ $R_o = \infty$
Amplificatore in transconduttanza		Transconduttanza di cortocircuito $G_m \equiv \left. \frac{i_o}{v_i} \right _{v_o=0} \quad (\text{A/V})$	$R_i = \infty$ $R_o = \infty$
Amplificatore in transresistenza		Transresistenza di circuito aperto $R_m \equiv \left. \frac{v_o}{i_i} \right _{i_o=0} \quad (\text{V/A})$	$R_i = 0$ $R_o = 0$

Equivalenza tra i modelli

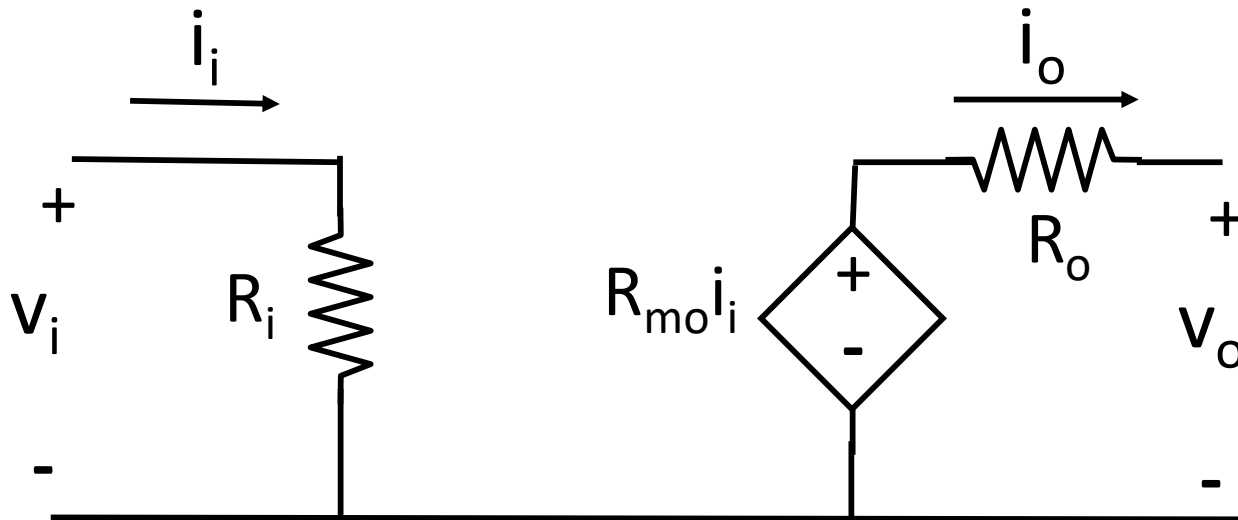
E' possibile trasformare un modello di amplificatore in un altro.

Un guadagno in tensione pari a A_{is} corrisponde ad un guadagno in tensione $A_{vo} = A_{is} * (R_o/R_i)$.

Allo stesso modo $A_{vo} = G_m R_o$; oppure $A_{vo} = R_m/R_i$

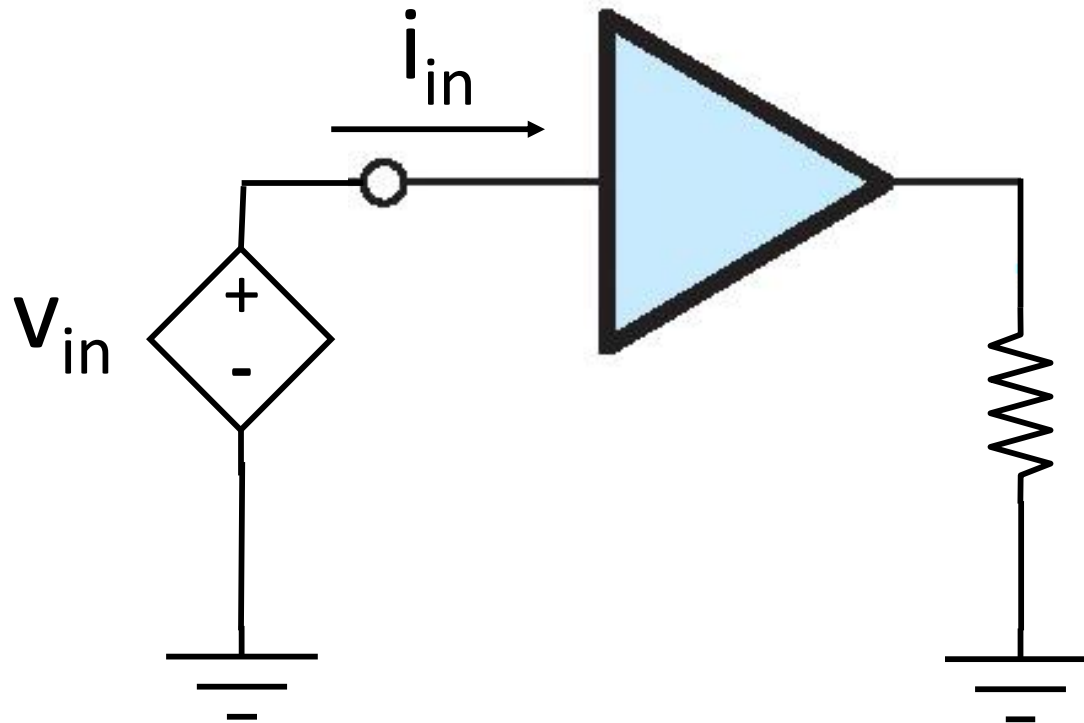
$A_{vo} = v_o/v_i = (R_{mo}i_i)/v_i$ (a circuito aperto); ma $i_i R_i = v_i$; $i_i/v_i = 1/R_i$

$A_{vo} = v_o/v_i = (R_{mo})i_i/v_i = R_{mo}/R_i$



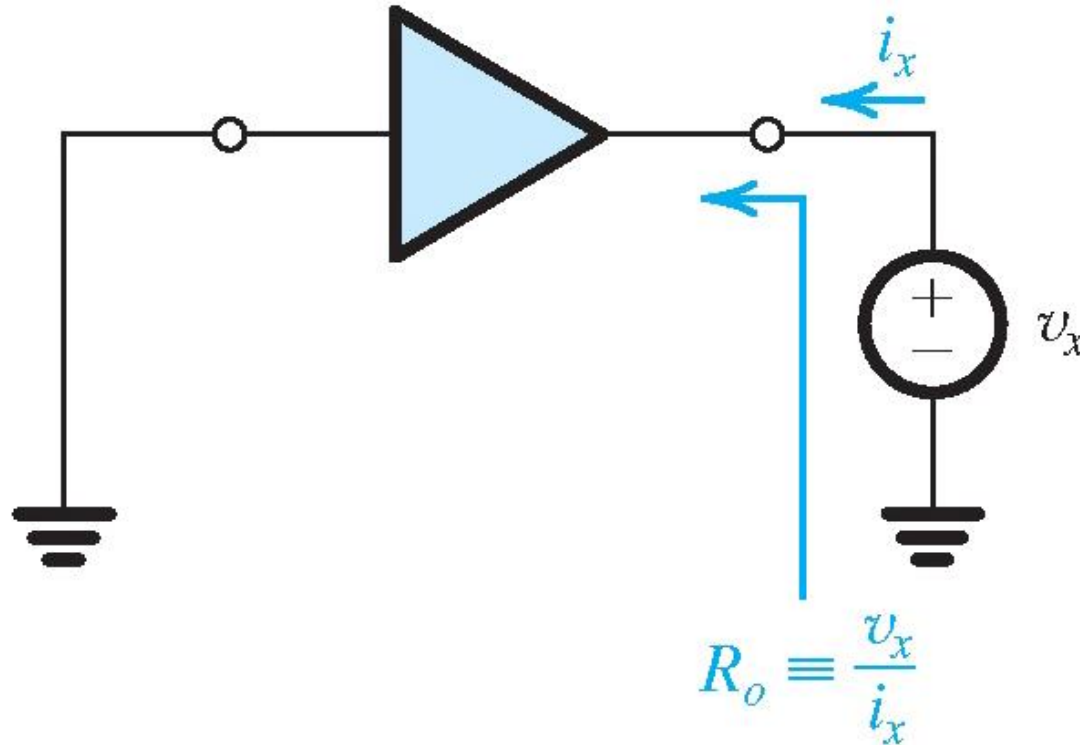
$R_{mo} = \frac{v_o}{i_i}$ guadagno di transimpedenza o transresistenza a circuito aperto

Calcolo della resistenza di ingresso di un amplificatore



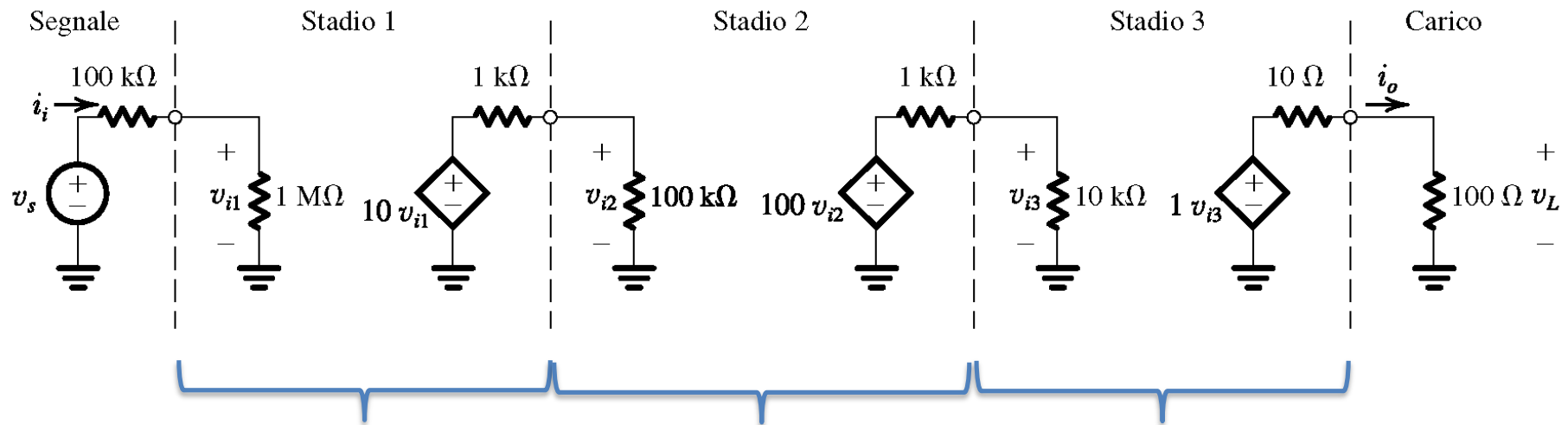
- Si applica all'ingresso un generatore di tensione di test v_{in}
- si misura la corrente di ingresso i_{in}
- la resistenza di ingresso R_{in} è data da $v_{in}/i_{in} = R_{in}$

Calcolo della resistenza di uscita di un amplificatore



- Si annullano tutti i generatori indipendenti ($v_s = 0$, $i_s = 0$) – (cioè si cortocircuitano i generatori di tensione e si aprono i generatori di corrente)
- Si applica un generatore di tensione di test v_x all'uscita.
- Si calcola la corrente entrante nell'uscita dell'amplificatore, i_x
- La resistenza di uscita R_{out} è data da $R_{out} = v_x / i_x$

Caratteristiche di un amplificatore «a tre stadi»



$$A_{vo1}=10$$

$$R_{i1}=1 \text{ M}\Omega$$

$$R_{o1}=1 \text{ k}\Omega$$

$$A_{vo2}=100$$

$$R_{i2}=100 \text{ k}\Omega$$

$$R_{o2}=1 \text{ k}\Omega$$

$$A_{vo3}=1$$

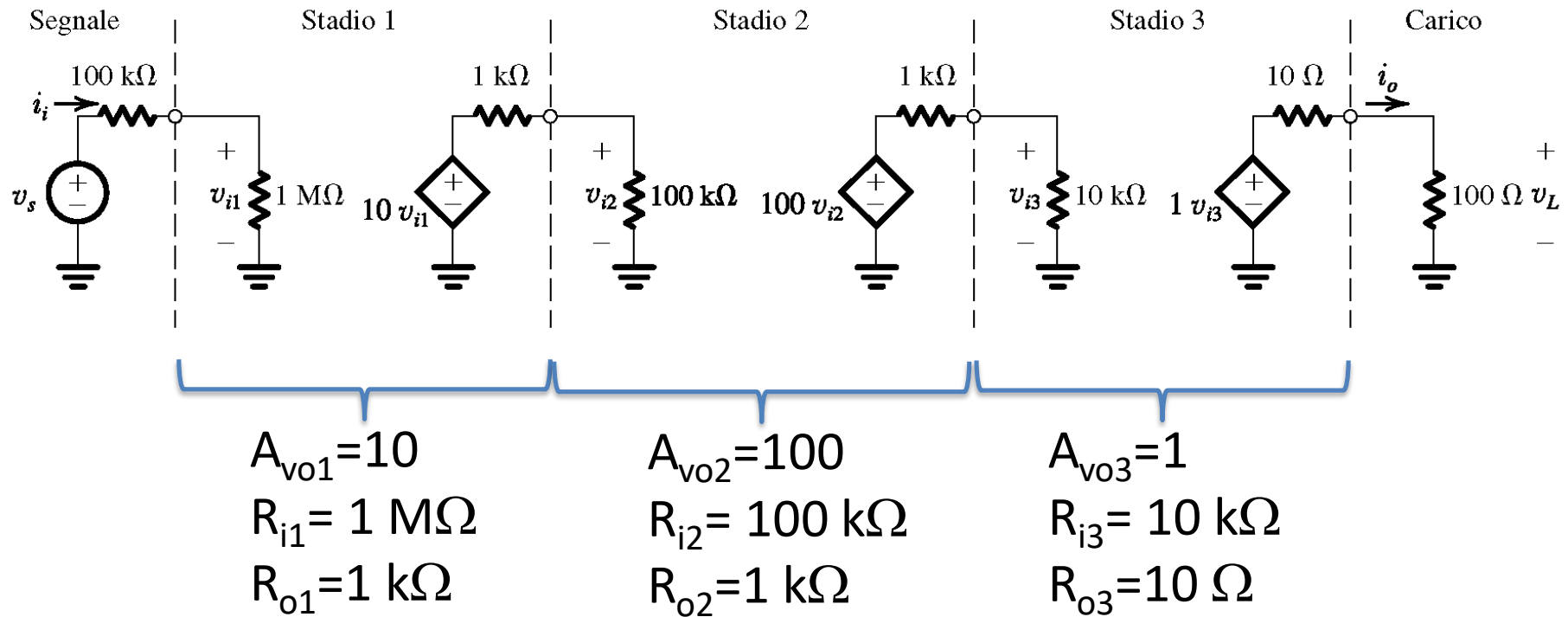
$$R_{i3}=10 \text{ k}\Omega$$

$$R_{o3}=10 \Omega$$

$$A_{v\text{totale}} = 10 \times 100 \times 1 \text{ ???} = 1000 \text{ ???}$$

$$A_{i\text{totale}} ? \quad A_{p\text{totale}} ?$$

Caratteristiche di un amplificatore «a tre stadi»



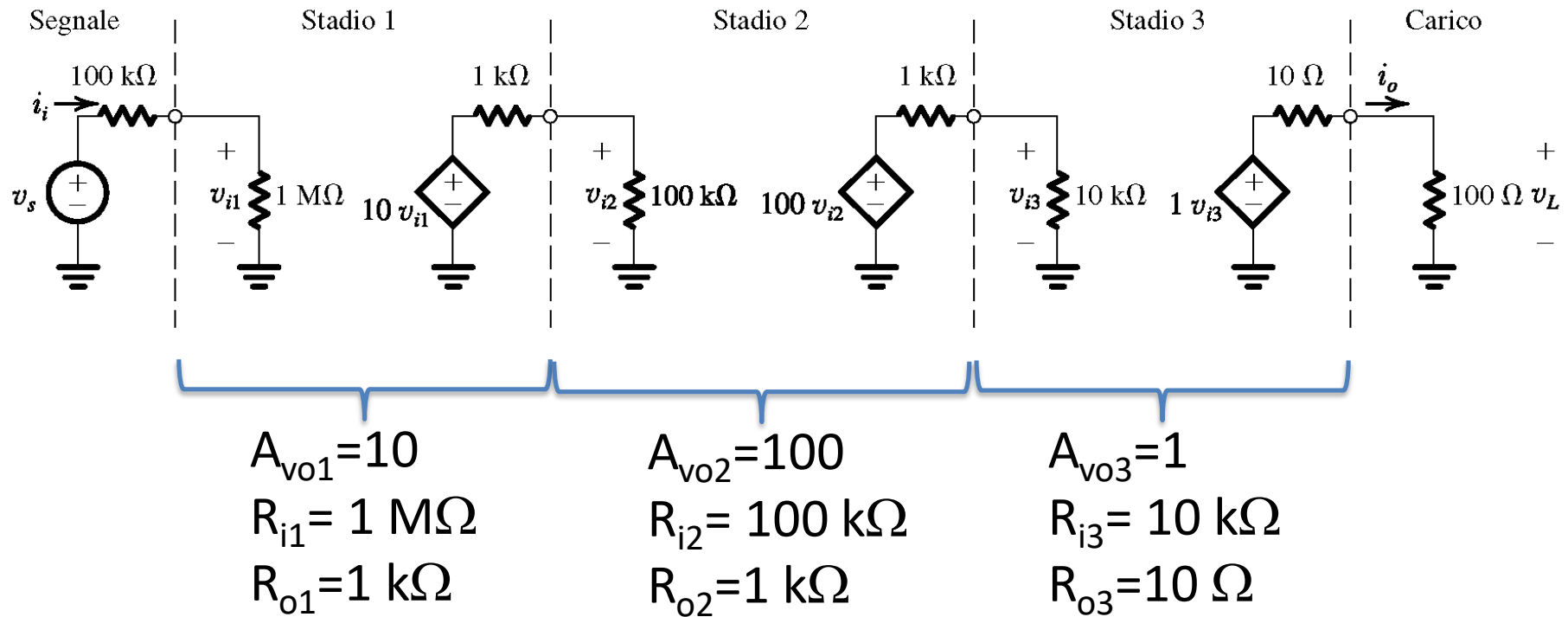
- Calcoliamo il guadagno effettivo di ogni stadio tenendo conto dell'effetto di carico del successivo
- La resistenza di ingresso dello stadio n+1-esimo, R_{in+1} , rappresenta la resistenza di carico dello stadio n-esimo R_{Ln}

$$A_{v1} = \frac{v_{i2}}{v_s} = A_{vo1} \frac{R_{i1}}{R_{i1} + R_s} \frac{R_{i2}}{R_{o1} + R_{i2}} =$$

$$= 10 \frac{10^6}{10^6 + 10^5} \frac{10^5}{10^3 + 10^5} = 10 \times 0.909 \times 0.99 = 8.99$$

per il primo stadio :

Caratteristiche di un amplificatore «a tre stadi»

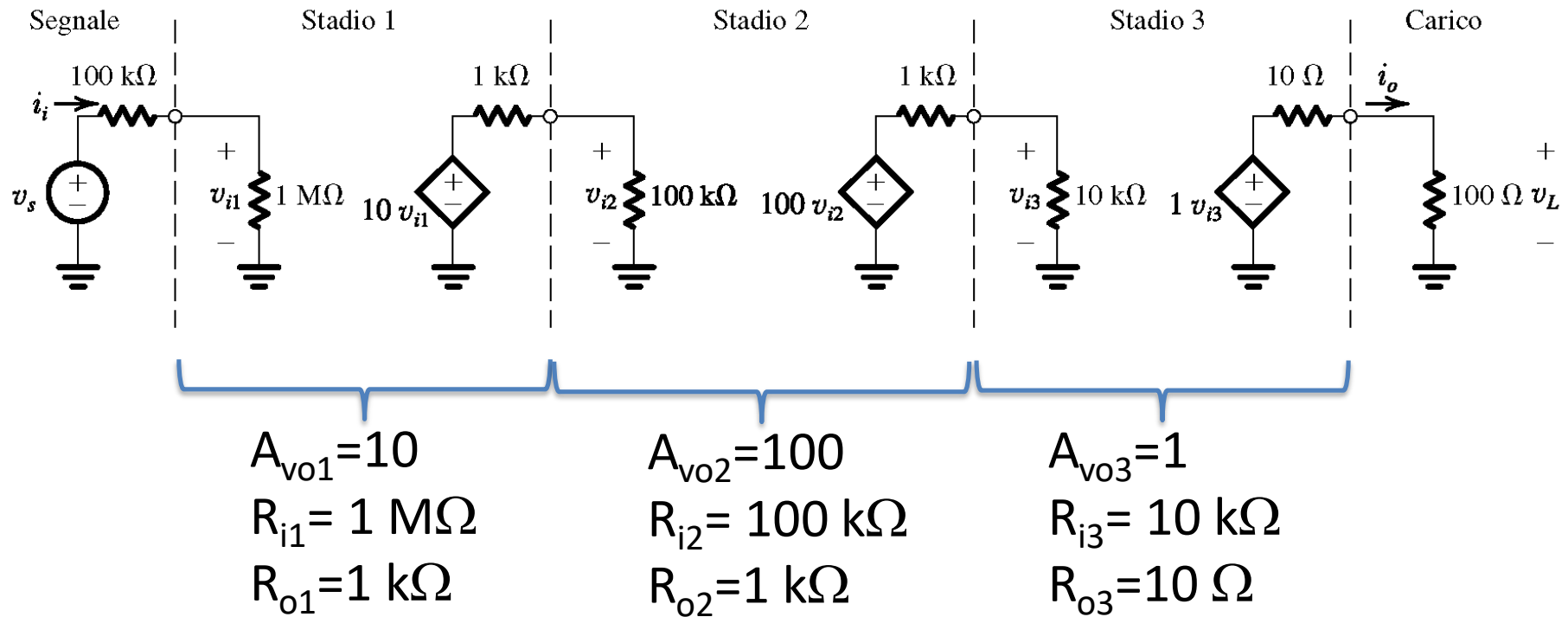


- Dal 2do stadio in poi il partitore di ingresso è già incluso
- Dobbiamo includere l'effetto di carico in uscita dovuto alla resistenza di ingresso dello stadio successivo

$$\begin{aligned}
 A_{v2} &= \frac{v_{i3}}{v_{i2}} = \\
 &= A_{vo2} \frac{R_{i3}}{R_{o2} + R_{i3}} = 100 \frac{10^4}{10^3 + 10^4} = 100 \times 0.909 = 90.9
 \end{aligned}$$

per il secondo stadio :

Caratteristiche di un amplificatore «a tre stadi»



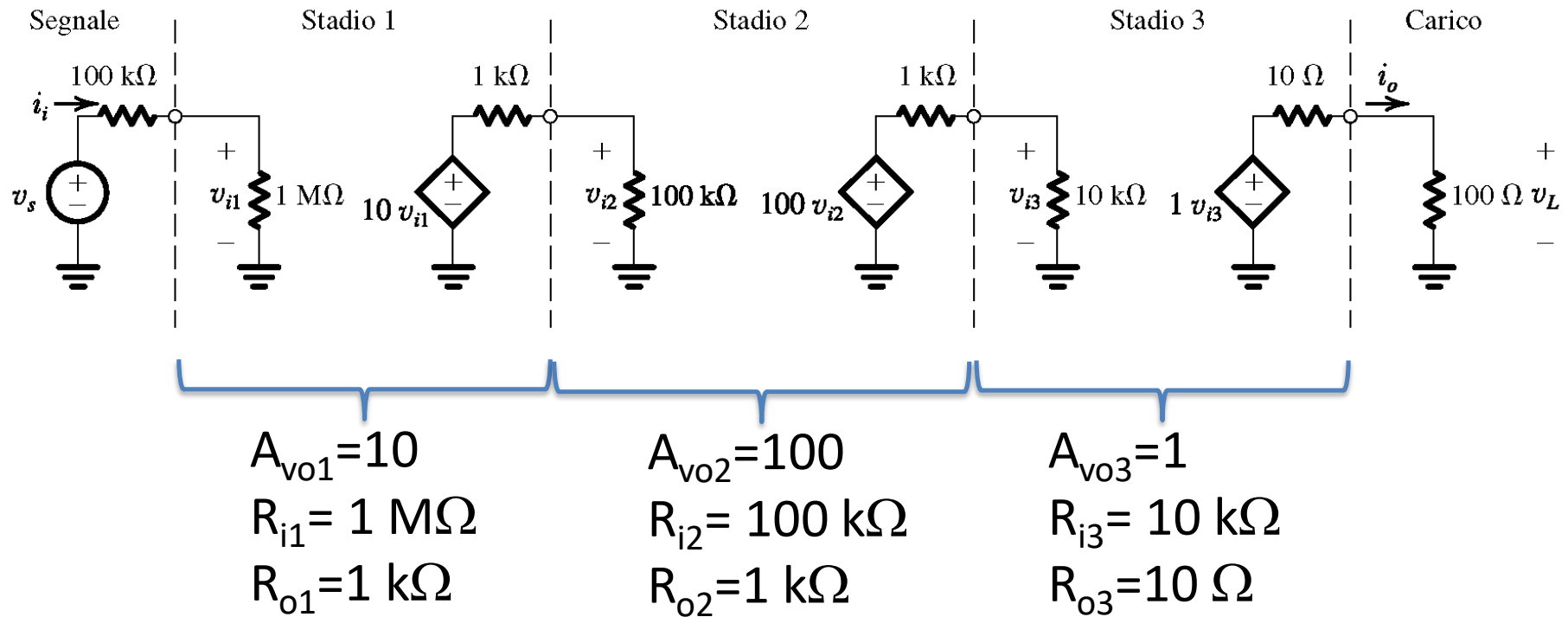
- Per il 3o stadio abbiamo includere l'effetto in uscita dovuto alla resistenza di carico

$$A_{v3} = \frac{v_L}{v_{i3}} =$$

$$= A_{vo3} \frac{R_L}{R_{o3} + R_L} = 1 \frac{10^2}{10 + 10^2} = 1 \times 0.909 = 0.909$$

per il terzo stadio :

Caratteristiche di un amplificatore «a tre stadi»

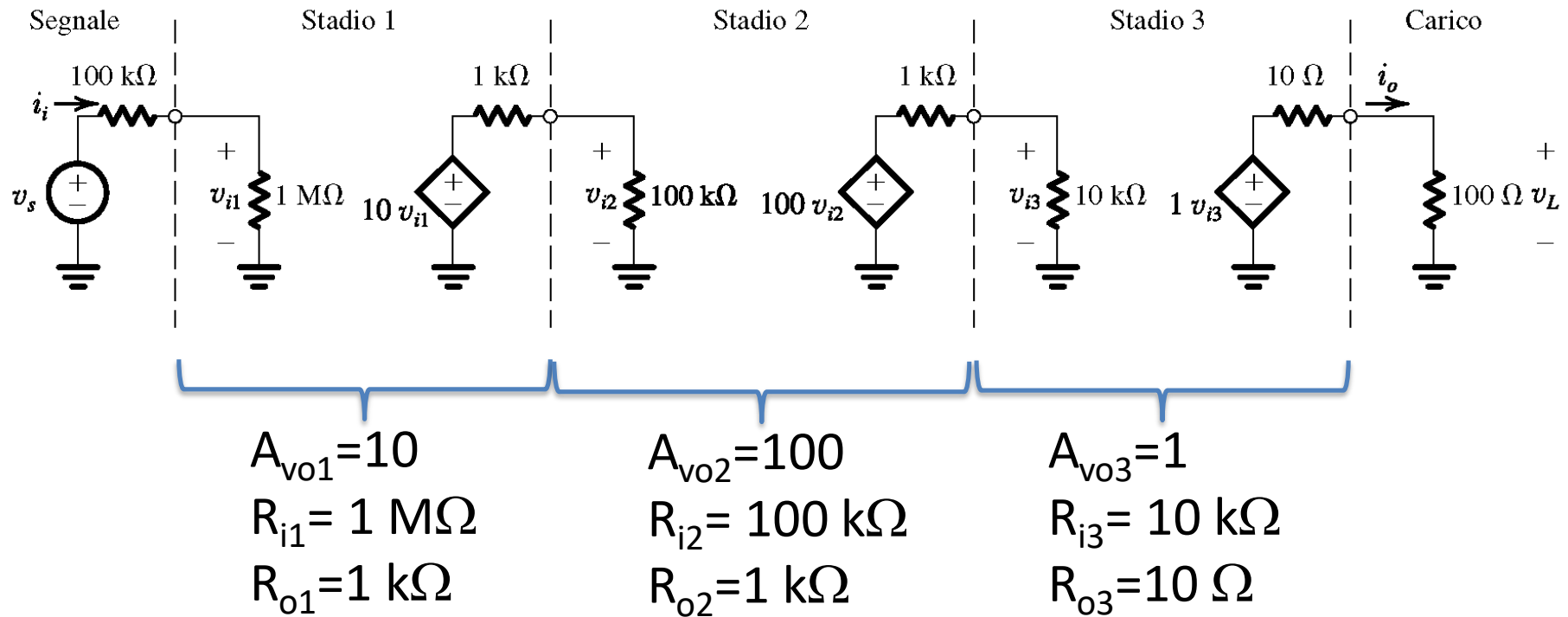


guadagno totale dalla sorgente v_s alla tensione sul carico v_L

$$A_{v1}A_{v2}A_{v3} = \frac{v_L}{v_s} = 8.99 \times 90.9 \times 0.909 = 743 \frac{V}{V}$$

" $A_{v_{sL}}$ ", incluso l'effetto di carico di R_L

Caratteristiche di un amplificatore «a tre stadi»

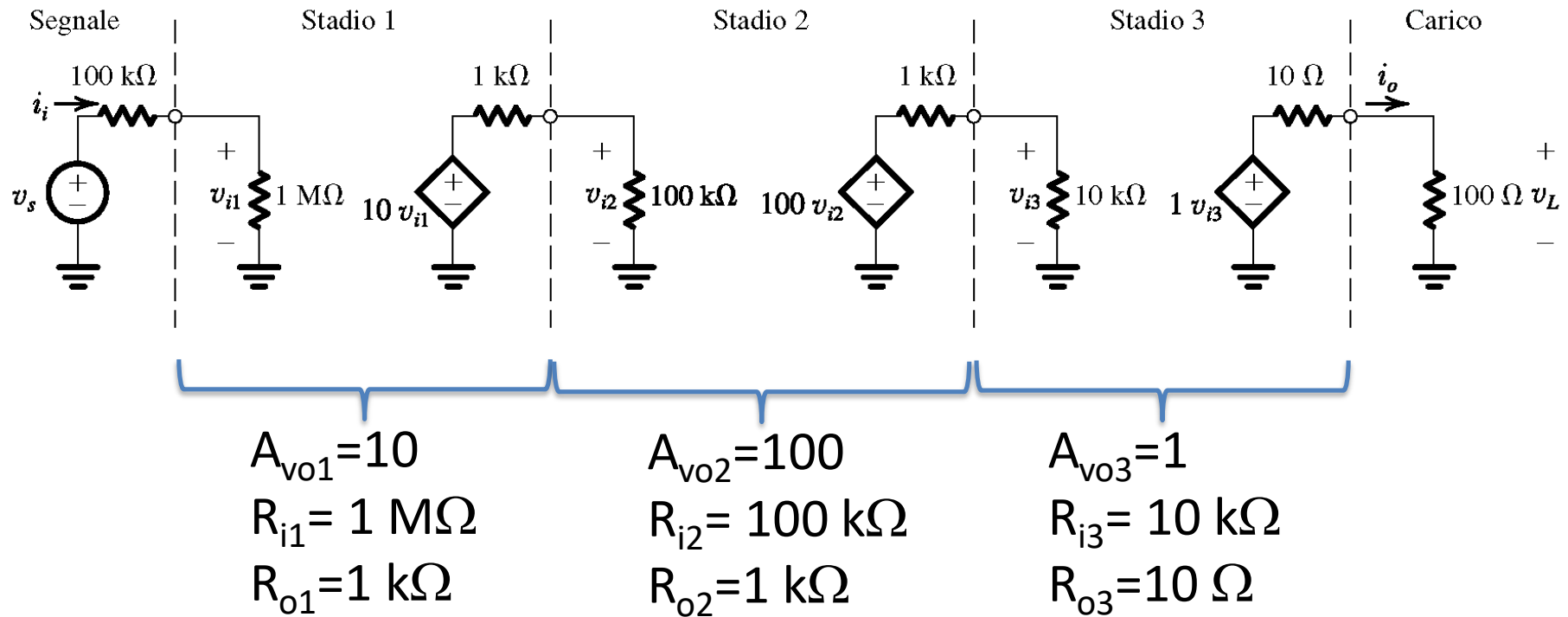


guadagno totale dalla tensione di ingresso v_{i1} a v_L

$$\frac{v_L}{v_{i1}} = \frac{v_L}{v_s} \frac{v_s}{v_{i1}} = A_{v1} A_{v2} A_{v3} \frac{R_{i1} + R_s}{R_{i1}} = 0.743 \times \frac{10^6 + 10^5}{10^6} \frac{V}{V} = 817$$

" A_{viL} "

Guadagno in corrente dell'amplificatore a tre stadi»

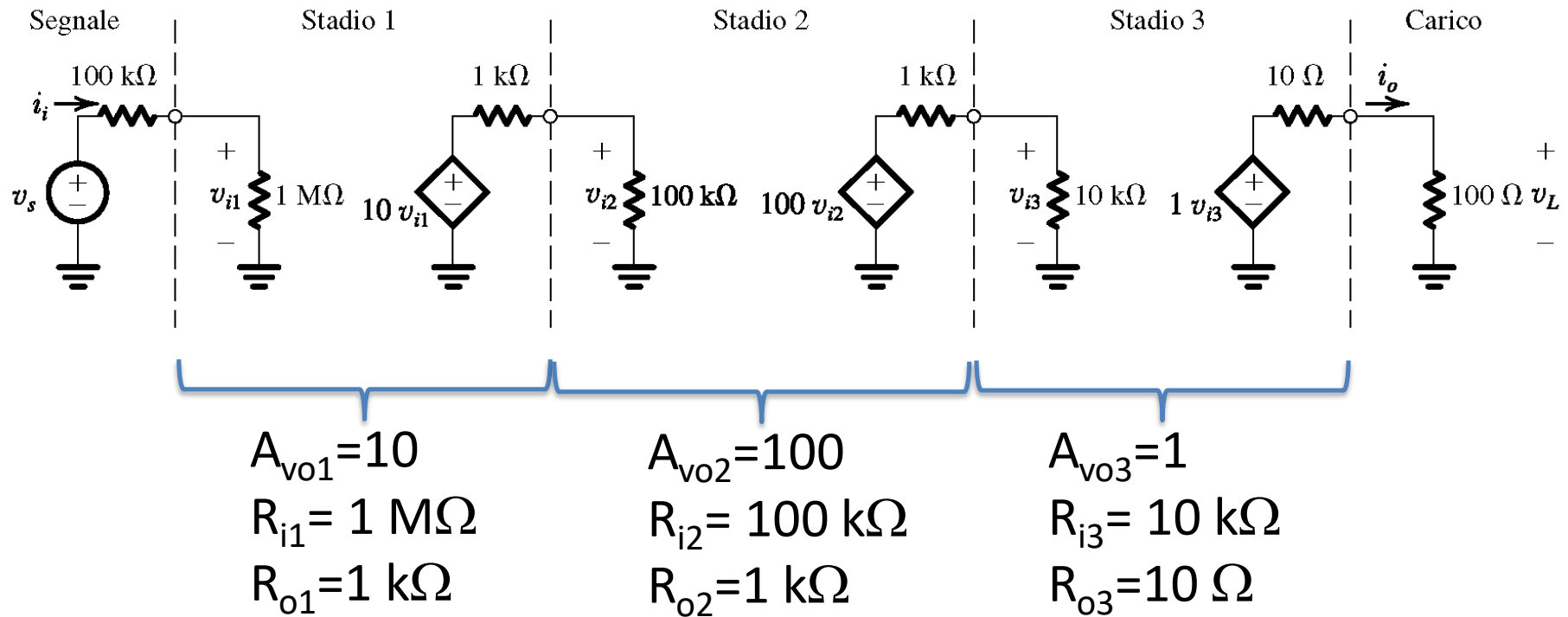


- Calcoliamo il guadagno effettivo di ogni stadio tenendo conto dell'effetto di carico del successivo
- La resistenza di ingresso dello stadio n+1-esimo, R_{in+1} , rappresenta la resistenza di carico dello stadio n-esimo R_{Ln}

$$A_{iL}(R_L = 100\Omega) = \frac{i_o}{i_i} = \frac{v_L}{R_L} \frac{R_{i1}}{v_{i1}} = 817 \times \frac{R_{i1}}{R_L} = 817 \times \frac{10^6}{10^2}$$

guadagno in corrente su $100\text{ }\Omega$: $8.17 \times 10^6\text{ A/A}$

Guadagno in potenza dell'amplificatore a tre stadi



- Calcoliamo il guadagno effettivo di ogni stadio tenendo conto dell'effetto di carico del successivo
- La resistenza di ingresso dello stadio n+1-esimo, R_{in+1} , rappresenta la resistenza di carico dello stadio n-esimo R_{Ln}

$$A_P(R_L = 100\Omega) = \frac{i_o v_L}{i_i v_{i1}} = A_{viL} A_{iL} = 8.17 \times 10^6 \times 817 = 66.8 \times 10^8 \text{ W/W}$$

guadagno in potenza su 100 Ω

$$20 \log_{10} A_{vSL} = 20 \log_{10} 743 = 57.4 \text{ dB}$$

$$20 \log_{10} A_{viL} = 20 \log_{10} 817 = 58.24 \text{ dB}$$

$$20 \log_{10} A_{iL} = 20 \log_{10} 8.17 \times 10^6 = 138.2 \text{ dB}$$

$$10 \log_{10} A_{PL} = 10 \log_{10} 66.8 \times 10^8 = 98.25 \text{ dB}$$