
Stadi di Uscita

Stadi di uscita

Lo stadio di uscita di un amplificatore è progettato per avere una bassa resistenza di uscita e fornire all'amplificatore la capacità di erogare correnti relativamente elevate.

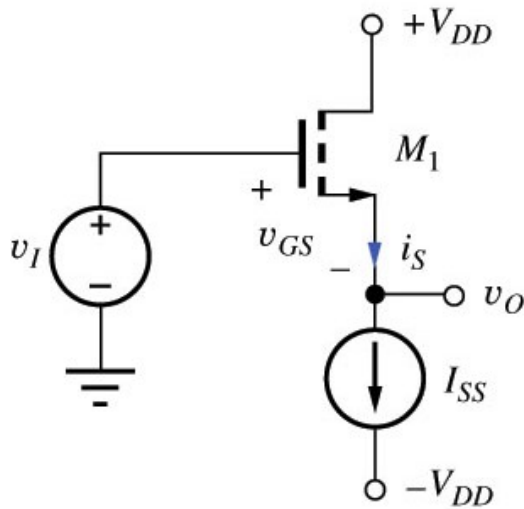
Classificazione degli stadi di uscita:

Inseguitori: amplificatori in Classe A – Per un segnale di ingresso sinusoidale, i transistor conducono durante l'intero periodo: angolo di conduzione = 360° .

Push-pull: amplificatori in Classe-B – Per un segnale sinusoidale, ciascuno dei due transistor conduce durante un semi-periodo dell'ingresso: angolo di conduzione = 180° .

Classe AB: le caratteristiche della Classe A e della Classe B sono combinate. È la configurazione più comunemente utilizzata come stadio di uscita negli amplificatori operazionali.

Stadio di uscita in classe A: inseguitore di source



Consideriamo un amplificatore a Drain comune, polarizzato con un generatore di corrente I_{SS} in serie al source.

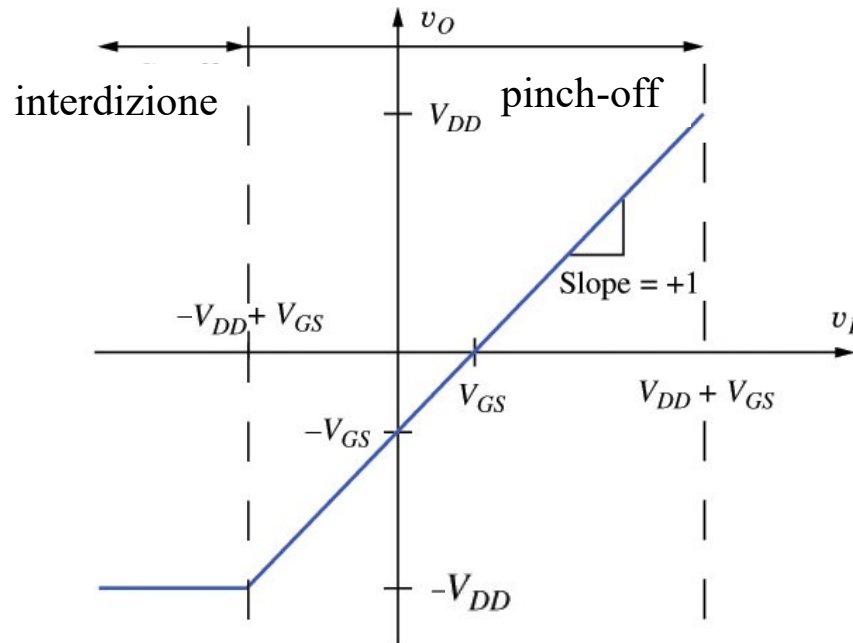
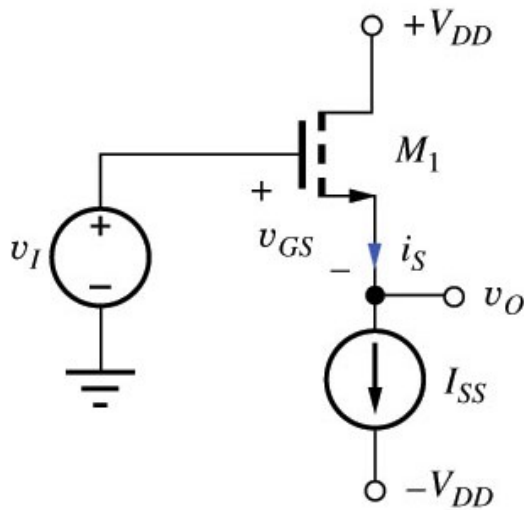
Trascuriamo per il momento la presenza del carico (supponiamo, in altri termini, che la resistenza di carico sia infinita)

$$I_D = \frac{1}{2} K (V_{GS} - V_T)^2 = I_{SS} = \text{const}$$

$$V_{GS} = V_T + \sqrt{2I_{SS} / K} \quad V_{GS} \text{ è costante}$$

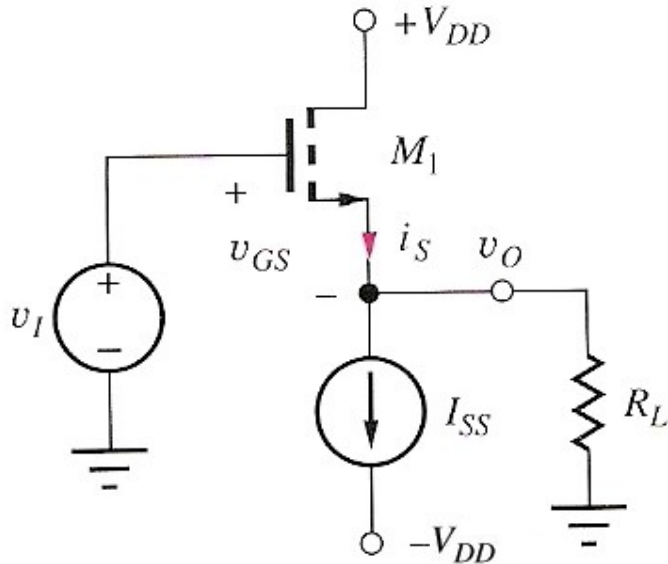
$$v_O = v_I - V_{GS} = v_I - V_T - \sqrt{2I_{SS} / K} \quad \text{La relazione fra } v_O \text{ e } v_I \text{ è lineare}$$

Stadio di uscita in classe A: inseguitore di source



$$v_O = v_I - V_T - \sqrt{2I_{SS} / K}$$

Stadio di uscita in classe A: inseguitore di source



Consideriamo ora la presenza di una resistenza di carico R_L collegata all'uscita. La corrente di source è:

$$i_S = I_{SS} + \frac{v_O}{R_L} > 0$$

La corrente di source del MOS non può essere negativa.

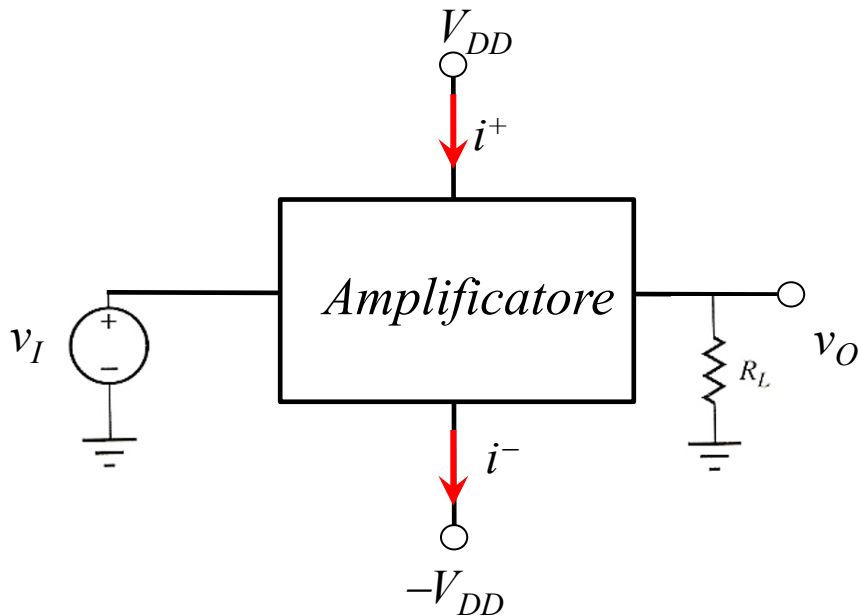
Pertanto:

$$v_{O,\min} = -I_{SS} / R_L$$

Conviene dunque scegliere: $I_{SS} = V_{DD} / R_L$, in modo che la tensione di uscita possa variare fra $\pm V_{DD}$

Rendimento

Consideriamo un amplificatore, con la sua alimentazione $\pm V_{DD}$, ed un carico R_L . Effettuiamo un bilancio delle potenze in gioco, ipotizzando di avere in uscita un segnale sinusoidale: $v_O(t) = V_M \sin(2\pi t / T)$



La potenza media erogata dall'alimentazione, indicando con i^+ ed i^- le correnti in figura, è data da:

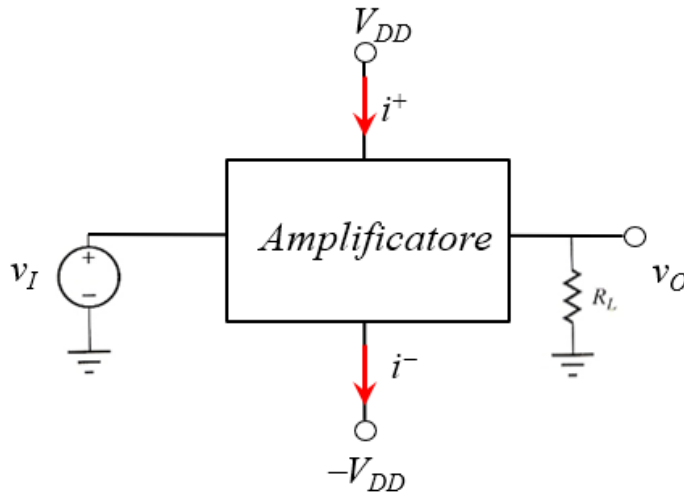
$$P_{ALIM} = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{DD} i^+(t) + V_{DD} i^-(t)] dt$$

La potenza media fornita al carico (ricordando che il valore efficace dell'uscita è $V_M / \sqrt{2}$) è data da: $P_L = \frac{V_M^2}{2R_L}$

La potenza erogata dal generatore di ingresso è trascurabile (assumendo che l'amplificatore abbia una resistenza di ingresso molto maggiore di R_L)

Rendimento

Il rendimento dell'amplificatore è dato da: $\eta = P_L / P_{ALIM}$



Si noti che: $0 < \eta < 1$

La condizione ideale è: $\eta = 1$, che corrisponde al caso in cui tutta la potenza fornita dall'alimentazione viene utilmente sfruttata per pilotare il carico.

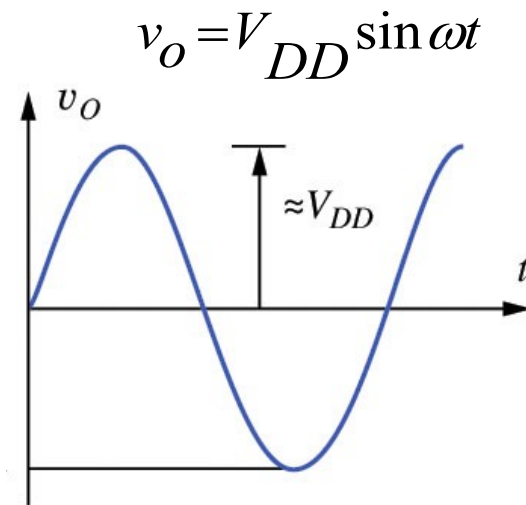
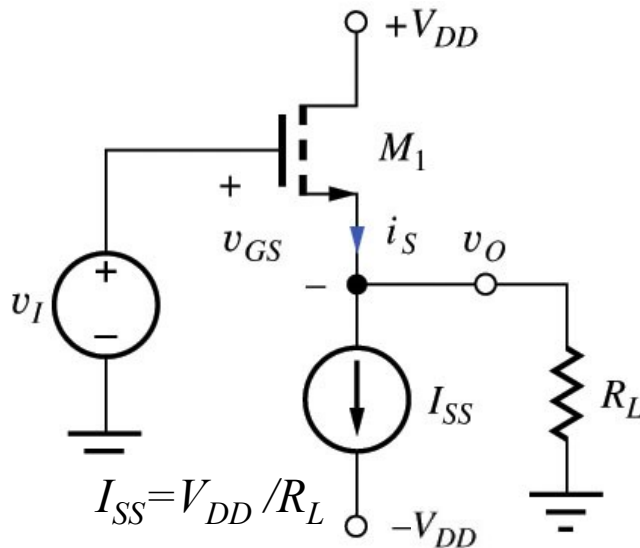
Da notare ancora che la potenza dissipata dall'amplificatore è data da: $P_{ampl} = P_{ALIM} - P_L = P_{ALIM}(1 - \eta)$

È auspicabile aumentare al massimo il rendimento anche per limitare la dissipazione di potenza sull'amplificatore, che si traduce in un riscaldamento dell'amplificatore stesso.

Calcolo del rendimento dell'amplificatore in classe A

Scegliamo $I_{SS} = V_{DD} / R_L$, in modo che la tensione di uscita possa variare fra $\pm V_{DD}$

Supponiamo inoltre di applicare un segnale sinusoidale in ingresso, in modo che l'uscita sia anch'essa sinusoidale con ampiezza V_{DD} , ovvero: $v_O(t) = V_{DD} \sin(2\pi t / T)$

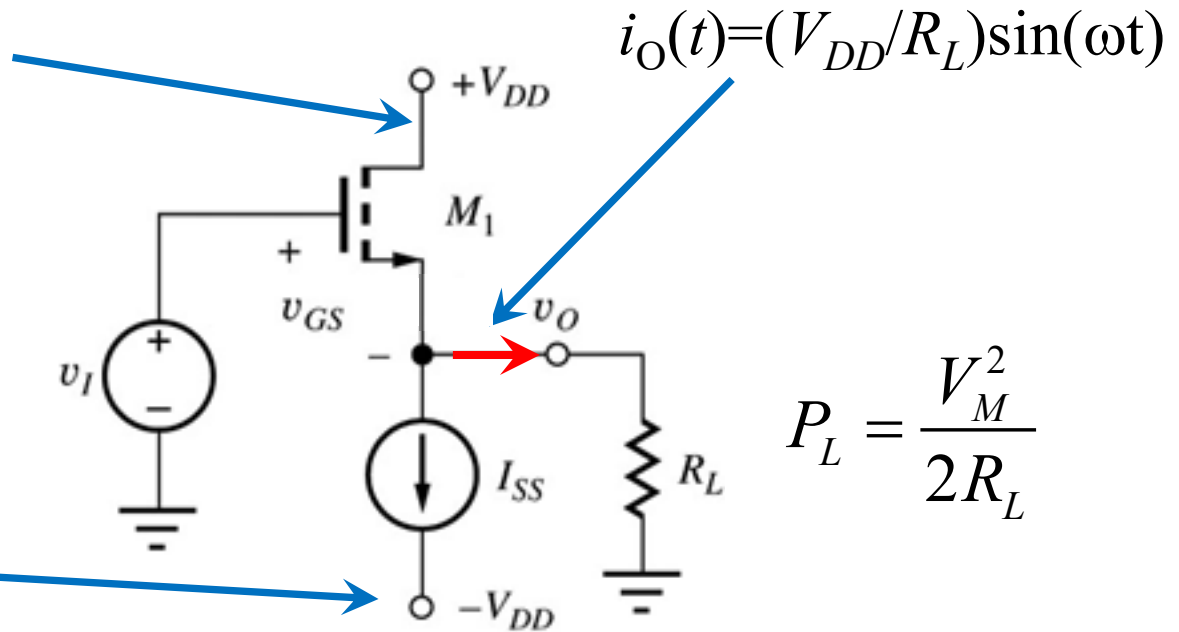


Calcolo del rendimento dell'amplificatore in classe A

Potenza dissipata
dall'alimentazione
positiva:

$$V_{DD}(I_{SS} + i_O(t))$$

Potenza dissipata
dall'alimentazione
negativa: $V_{DD}I_{SS}$



$$P_L = \frac{V_M^2}{2R_L}$$

$$P_{ALIM} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[V_{DD}I_{SS} + V_{DD} \left(I_{SS} + \frac{V_{DD}}{R_L} \sin(\omega t) \right) \right] dt = 2V_{DD}I_{SS}$$

Calcolo del rendimento dell'amplificatore in classe A

$$\text{Rendimento: } \eta_{\text{Classe-A}} = \frac{P_L}{P_{\text{ALIM}}} = \frac{\frac{V_{DD}^2}{2R_L}}{2V_{DD}I_{SS}} = \frac{V_{DD}}{4R_L I_{SS}} = \frac{1}{4}$$

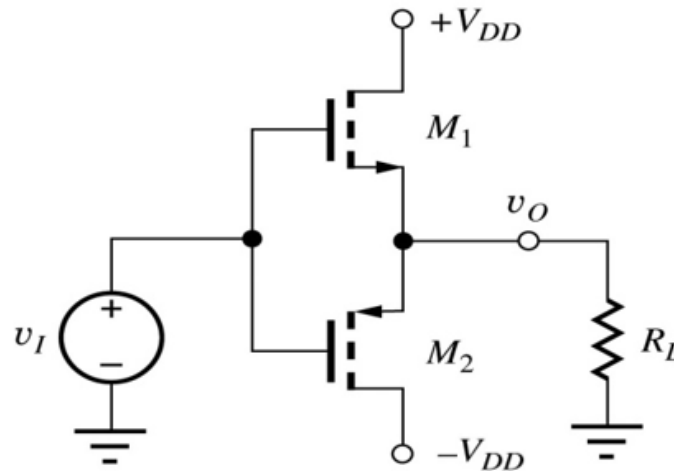
(Ricordiamo che: $I_{SS} = V_{DD} / R_L$)

Il rendimento dell'amplificatore in classe A è dunque del 25%.

E' facile osservare che questo è il valore massimo del rendimento: se l'ampiezza del segnale di uscita è minore di V_{DD} il rendimento è inferiore.

Il basso rendimento dell'amplificatore in classe A è legato al fatto che le alimentazioni erogano corrente (e quindi dissipano potenza) anche per segnale di ingresso nullo. La potenza dissipata dalle alimentazioni è infatti $V_{DD}^2 / (2R_L)$ è costante e non dipende dall'ampiezza del segnale di uscita.

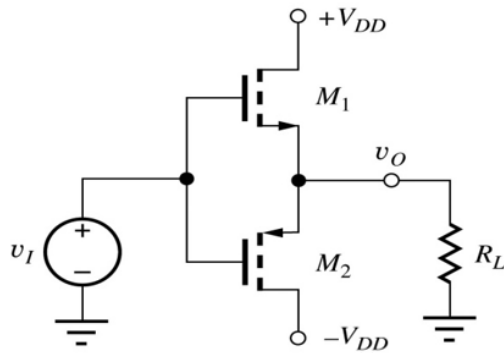
Stadio di uscita in classe B (Push-Pull)



Il circuito può essere visto come due inseguitori di source. Il dispositivo NMOS opera quando il segnale di uscita è positivo, mentre il PMOS conduce durante le semionde negative (si parla di circuito push-pull).

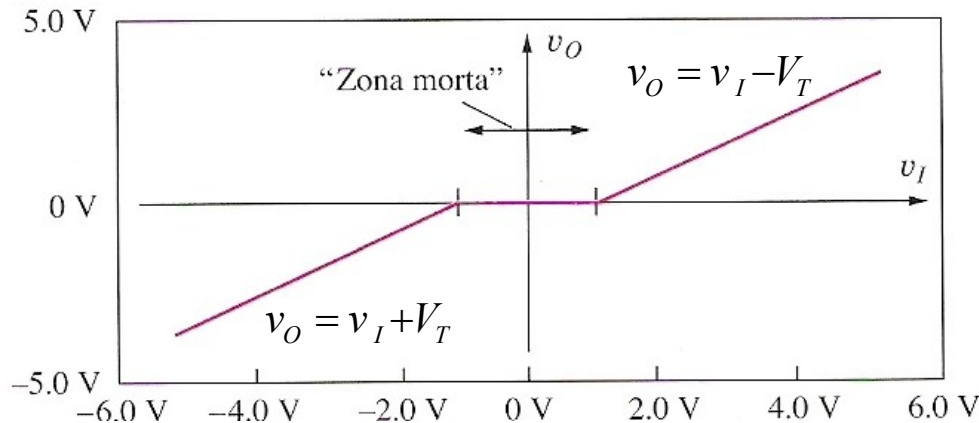
Quando il segnale di uscita è nullo entrambi i dispositivi sono interdetti, a differenza dell'amplificatore in classe A.

Stadio di uscita in classe B (Push-Pull)



Quando la tensione di ingresso è positiva e maggiore di V_T , il NMOS opera come inseguitore, fornendo un'uscita: $v_O = v_I - V_T$ per: $v_I > V_T$

Analogamente, quando la tensione di ingresso è negativa e minore di $-V_T$, il PMOS opera come inseguitore, con: $v_O = v_I + V_T$ per: $v_I < -V_T$

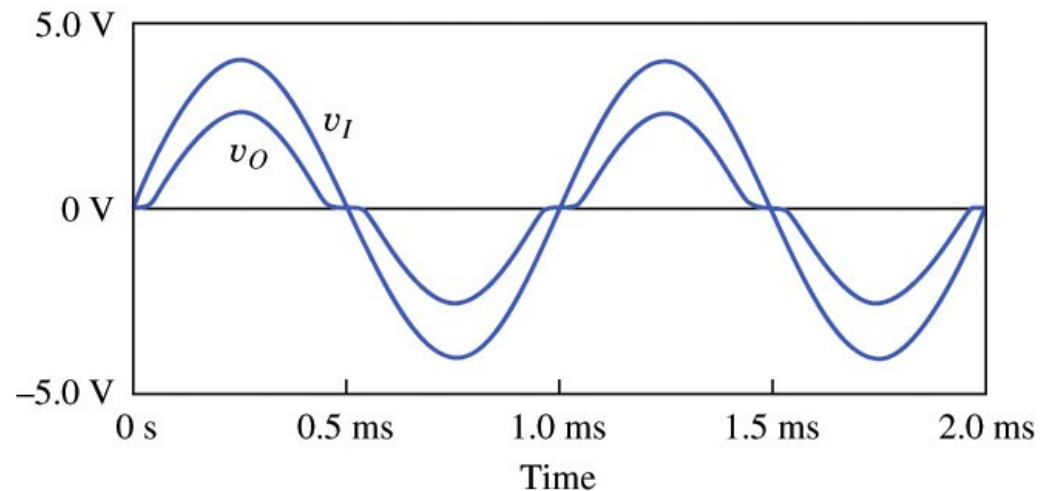
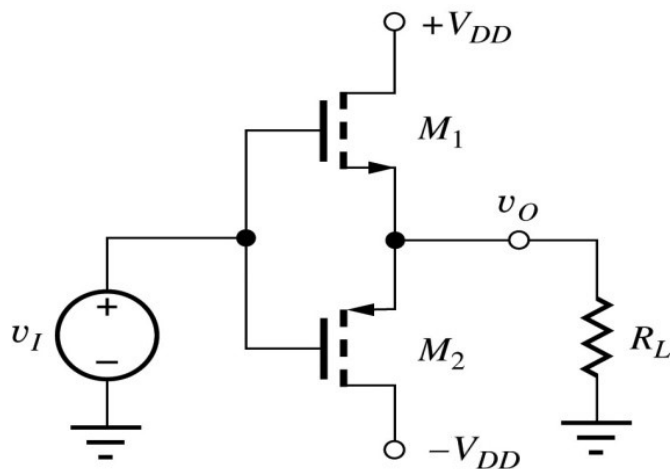


Per: $-V_T < v_I < V_T$ entrambi i dispositivi sono interdetti e la tensione di uscita è nulla. Si ha quindi una "zona morta" nella caratteristica di trasferimento

Effetto della "zona morta" nello stadio di uscita in classe B (Push-Pull)

Supponiamo di applicare un segnale di ingresso sinusoidale allo stadio di uscita in classe B. A causa della "zona morta" per: $-V_T < v_I < V_T$ il segnale di uscita presenta **una distorsione non lineare**, in corrispondenza dei passaggi per lo zero del segnale.

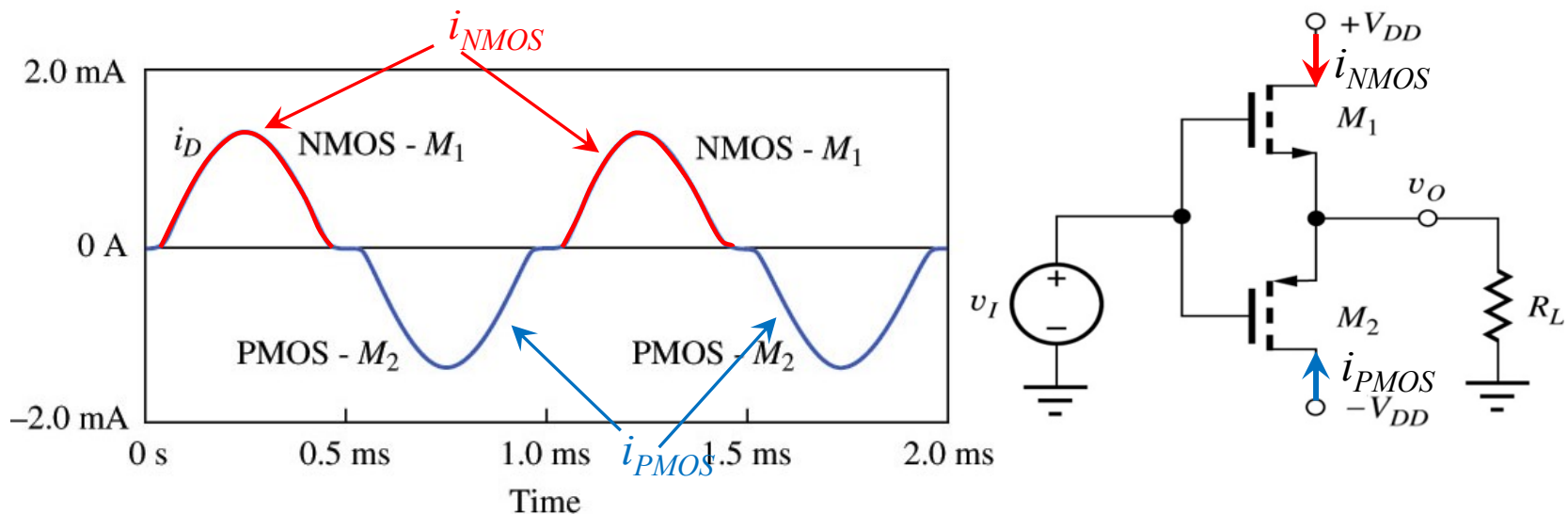
Si parla di **distorsione di crossover**, o di attraversamento.



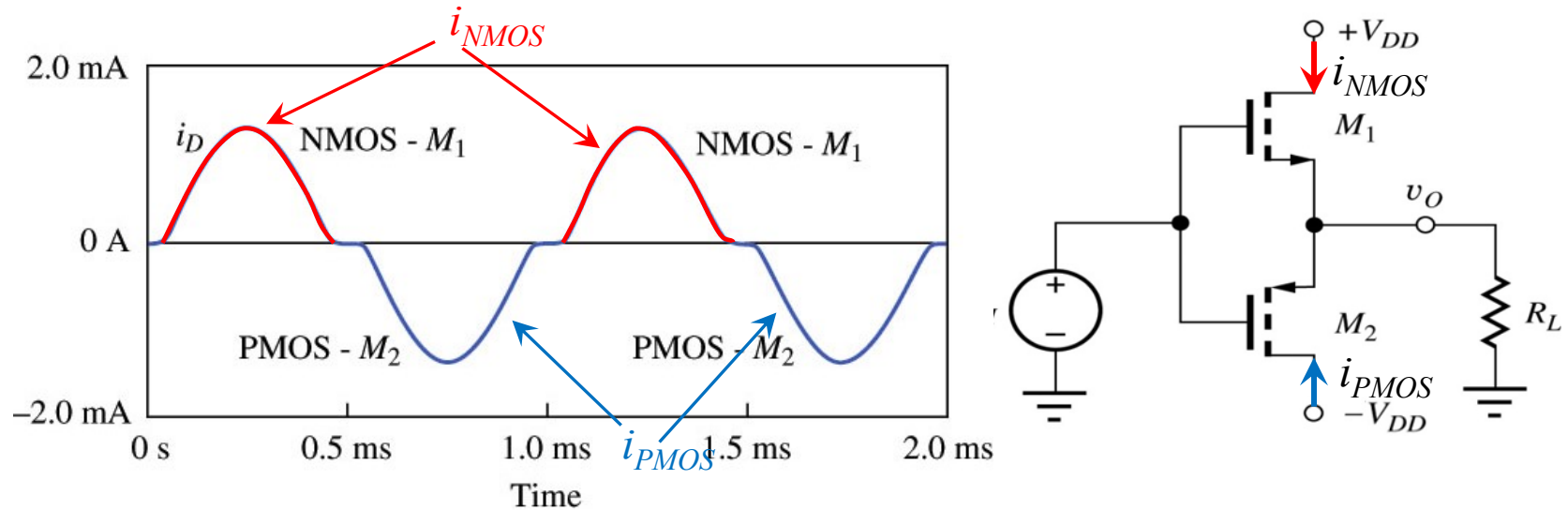
Stadio in Classe-B: rendimento

Trascuriamo la distorsione da crossover ed ipotizziamo che l'uscita sia una sinusoide di ampiezza V_{DD}

La corrente erogata dai generatori V_{DD} e $-V_{DD}$ sarà un **semiperiodo** di sinusoide:



Stadio in Classe-B: rendimento



Potenza dissipata dall'alimentazione positiva $+V_{DD}$

$$P_{V_{pos}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{DD} \frac{V_{DD}}{R_L} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt = \frac{V_{DD}^2}{R_L} \frac{1}{T} \frac{T}{2\pi} \left| -\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right|_{t=0}^{t=T/2} = \frac{V_{DD}^2}{\pi R_L}$$

Classe-B: rendimento

La potenza complessiva erogata dall'alimentazione sarà, per simmetria, il doppio di quella relativa al generatore $+V_{DD}$

Abbiamo pertanto:
$$P_{ALIM} = \frac{2V_{DD}^2}{\pi R_L}$$

La potenza fornita al carico è:
$$P_L = \frac{V_M^2}{2R_L}$$

Rendimento:
$$\eta_{Classe-B} = \frac{P_L}{P_{ALIM}} = \frac{\frac{V_{DD}^2}{2R_L}}{\frac{2V_{DD}^2}{\pi R_L}} = \frac{\pi}{4} \simeq 0.785$$

Rendimento: confronto Classe-A Classe-B

$$\eta_{Classe-A} = \frac{1}{4} \qquad \eta_{Classe-B} = \frac{\pi}{4} \simeq 0.785$$

L'amplificatore in classe B migliora significativamente il rendimento rispetto allo stadio di uscita in classe A.

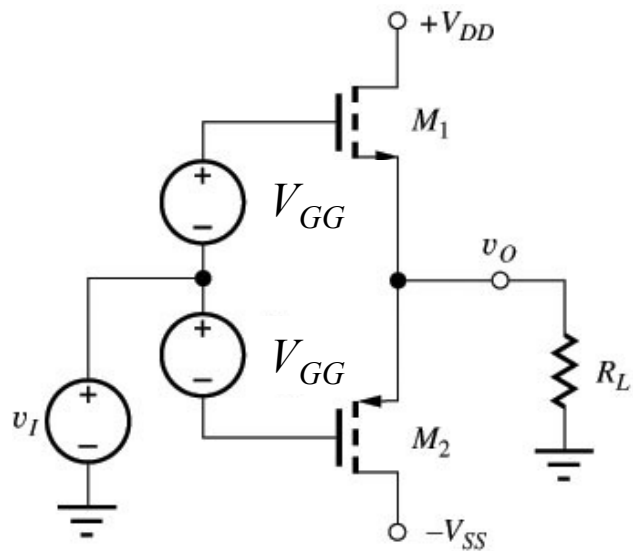
Nello stadio di uscita in classe B, in particolare, si può osservare che per segnale di ingresso nullo la potenza erogata dalle alimentazioni è zero. Il prezzo da pagare per l'aumentato rendimento è la presenza della distorsione di crossover.

Per segnale sinusoidale, il dispositivo nell'amplificatore in classe A conduce per tutto il periodo (angolo di conduzione di 360°).

Nello stadio di uscita in classe B, invece, ogni dispositivo conduce per meno di un semiperiodo, a causa della zona morta nella caratteristica di trasferimento (angolo di conduzione $< 180^\circ$).

Amplificatori in classe AB

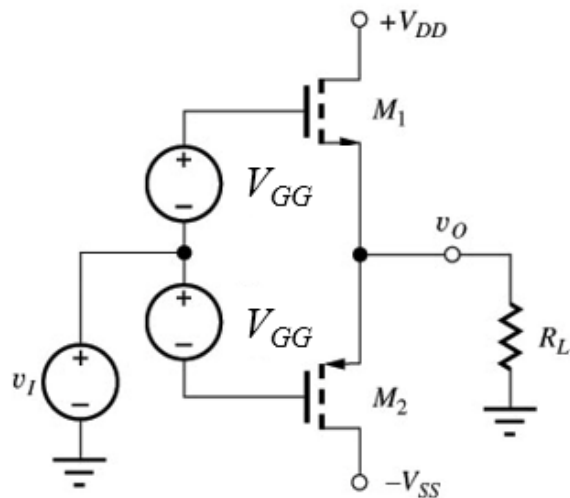
Vengono introdotti per eliminare la distorsione di crossover, mantenendo l'elevato rendimento degli amplificatori in classe B



Il circuito include due inseguitori, in modalità push-pull come per lo stadio in classe B. A differenza del circuito in classe B, i dispositivi sono polarizzati in modo da garantire un debole passaggio di corrente (molto minore della corrente di picco erogata al carico) anche per segnale di ingresso nullo.

Per entrambi i dispositivi si ha un angolo di conduzione compreso fra 180° e 360°

Polarizzazione dell'amplificatore in classe AB



L'aggiunta dei generatori di tensione V_{GG} consente di ridurre o eliminare la zona morta presente nella caratteristica di trasferimento dell'amplificatore in classe B

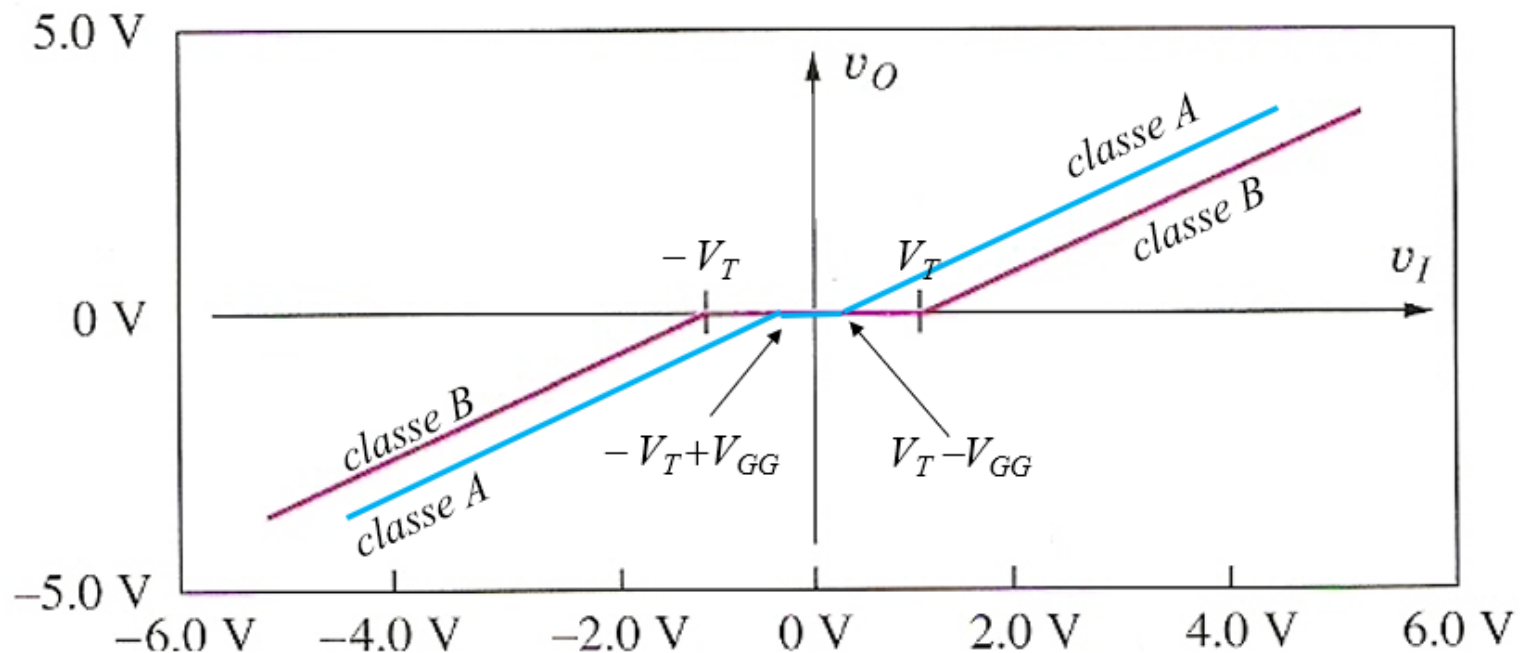
Supponiamo che la tensione di ingresso sia positiva. Se $v_I + V_{GG} > V_T$ il NMOS entra in conduzione ed opera come inseguitore, fornendo un'uscita: $v_O = v_I + V_{GG} - V_T$ per: $v_I > V_T - V_{GG}$

Analogamente, quando la tensione di ingresso è negativa e minore di $-V_T + V_{GG}$, il PMOS opera come inseguitore, con:

$$v_O = v_I - V_{GG} + V_T \text{ per: } v_I > -V_T + V_{GG}$$

Polarizzazione dell'amplificatore in classe AB

Rispetto all'amplificatore in classe B, l'ampiezza della zona morta si riduce da $2V_T$ a: $2V_T - 2V_{GG}$



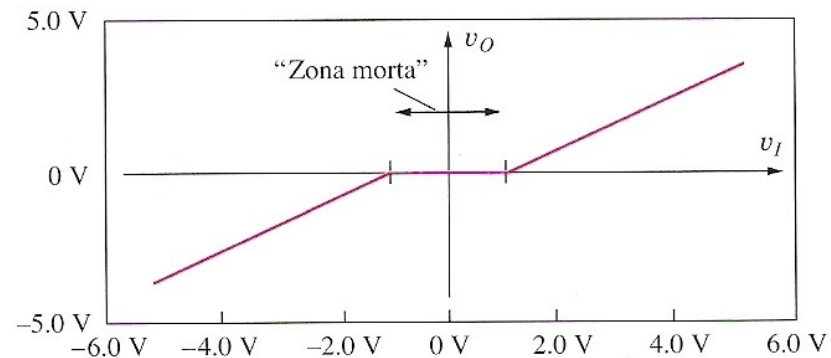
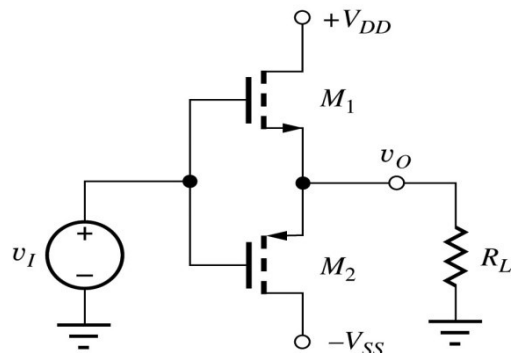
Polarizzazione dell'amplificatore in classe AB

La soluzione ideale sarebbe scegliere $V_{GG}=V_T$. In questo modo si eliminerebbe la zona morta e la distorsione di crossover, pur lasciando i dispositivi in interdizione per ingresso nullo (angolo di conduzione= 180°).

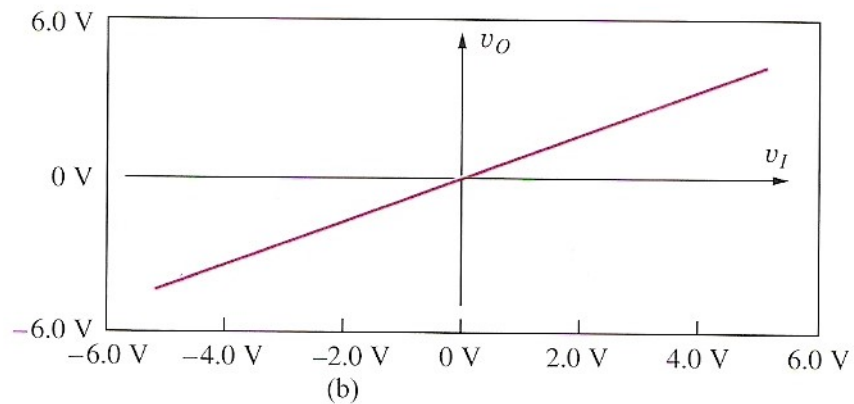
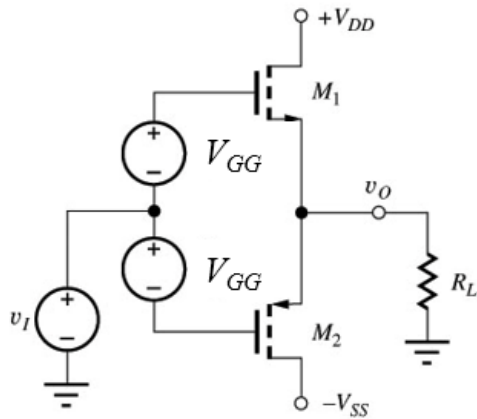
In pratica, si sceglie $V_{GG}>V_T$ per avere un certo margine di sicurezza.

L'angolo di conduzione dei dispositivi risulta pertanto $> 180^\circ$.

Amplificatori in classe AB

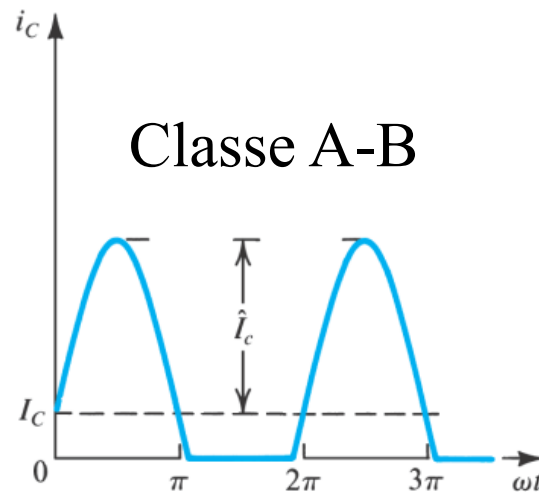
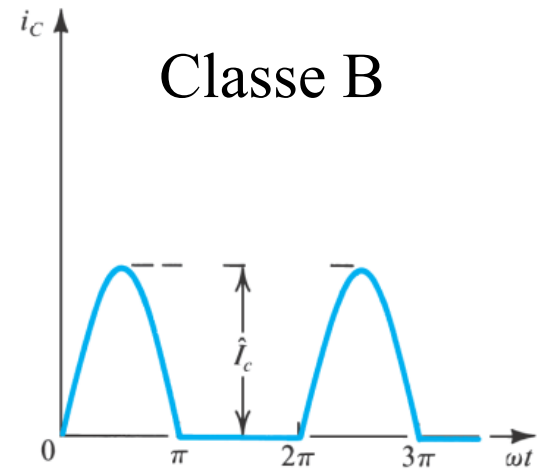
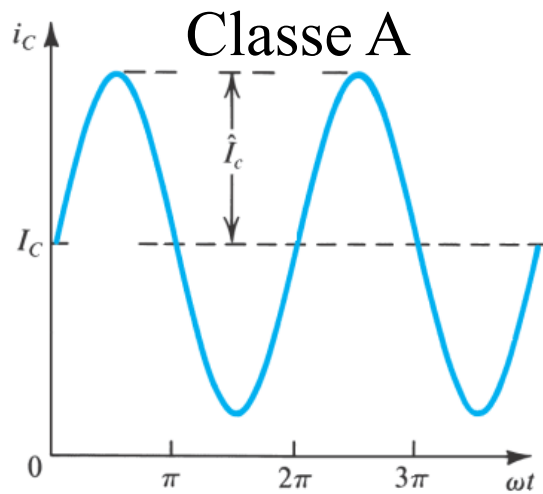


Classe B



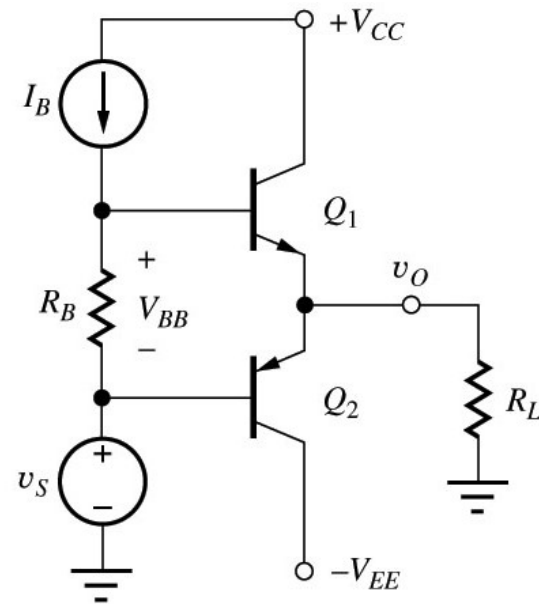
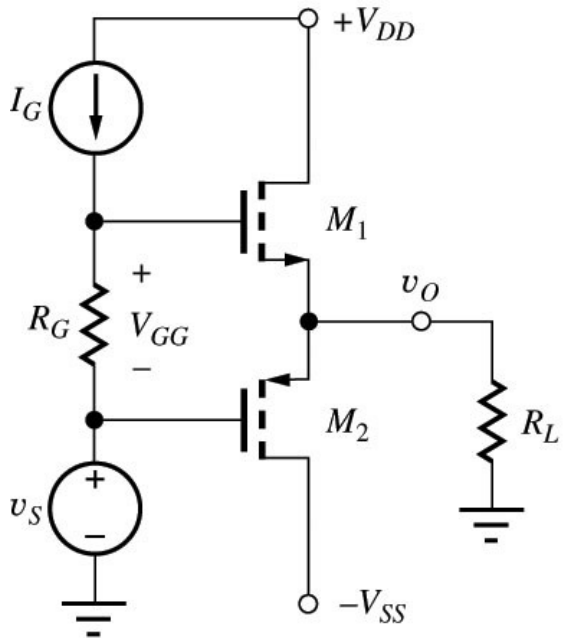
Classe AB

Forme d'onda della corrente di drain

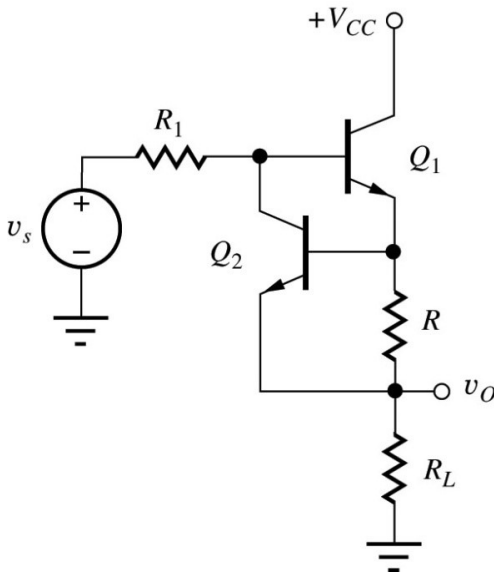


Polarizzazione dell'amplificatore in classe AB

In pratica non si utilizzano dei generatori di tensione per polarizzare l'amplificatore in classe AB; è sufficiente una resistenza, in cui viene forzata una opportuna corrente:



Protezione dal cortocircuito



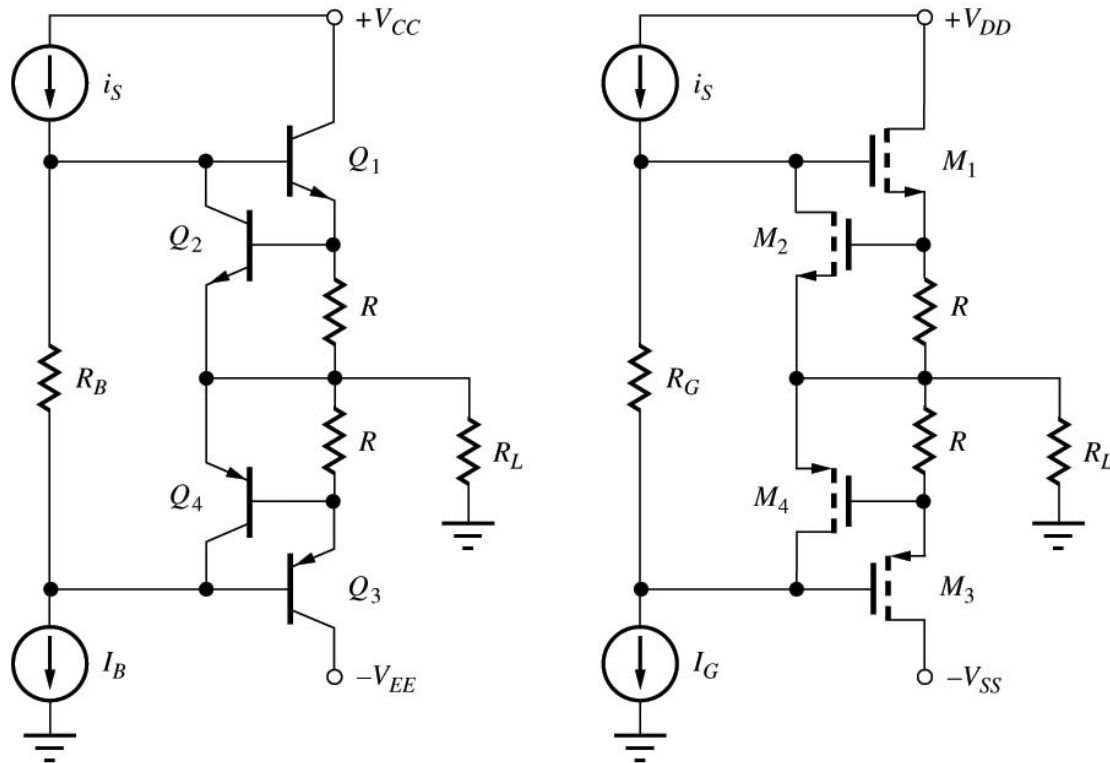
Se l'uscita dell'amplificatore viene accidentalmente cortocircuitata a massa si manifesta un elevato passaggio di corrente che può portare alla distruzione dei dispositivi dello stadio di uscita.

Per proteggere lo stadio di uscita si inserisce una protezione, costituita dal transistor Q_2 e dalla resistenza R .

Nel normale funzionamento del circuito, la caduta di tensione ai capi di R è < 0.7 V, ed il transistor Q_2 è interdetto. Il dispositivo Q_2 entra in conduzione, limitando la corrente di base di Q_1 , quando la caduta su R raggiunge 0.7V. Pertanto, la corrente I_{E1} è limitata a: $I_{E1,MAX} = 0.7/R$

Protezione dal cortocircuito

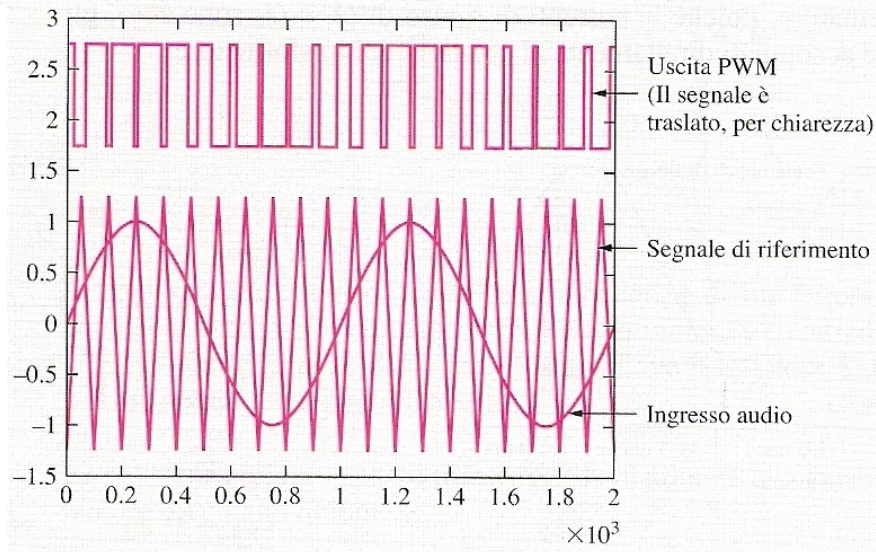
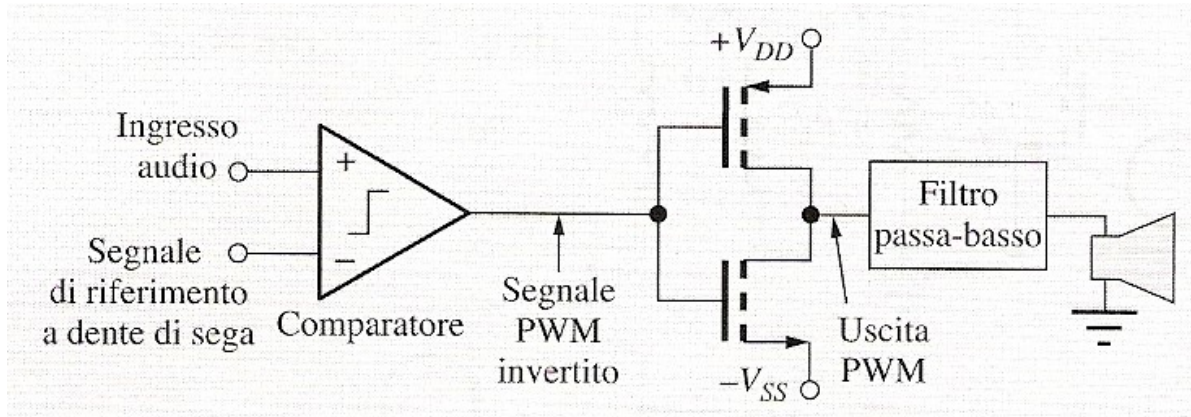
Circuiti di protezione per stadi di uscita in classe AB



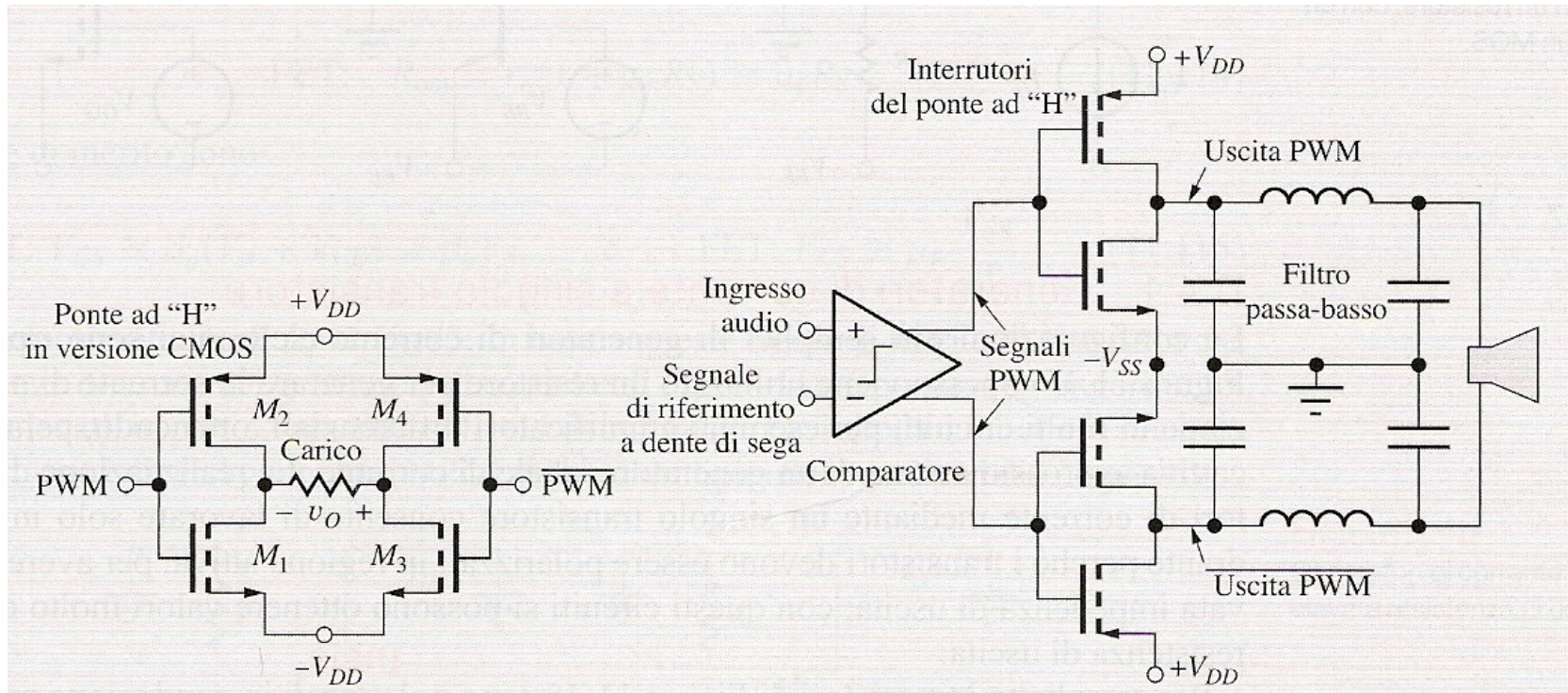
Amplificatori audio in classe D

Come abbiamo visto, l'efficienza degli amplificatori in classe A, B e AB è inferiore a 80%. Al fine di migliorare l'efficienza (in particolar modo nei sistemi alimentati a batteria o comunque laddove si richieda una ridotta dissipazione di potenza) sono state sviluppate diverse topologie di amplificatori a commutazione (switching). Una di queste topologie è l'amplificatore in classe D, mostrato nella figura seguente.

Amplificatori audio in classe D



Amplificatori audio in classe D



La tensione d'uscita può assumere due valori:

$$V_O = V_{DD} - (-V_{DD}) = 2V_{DD} \quad \text{oppure:} \quad V_O = -V_{DD} - V_{DD} = -2V_{DD}$$

Tensione doppia $\Rightarrow$ potenza quadrupla