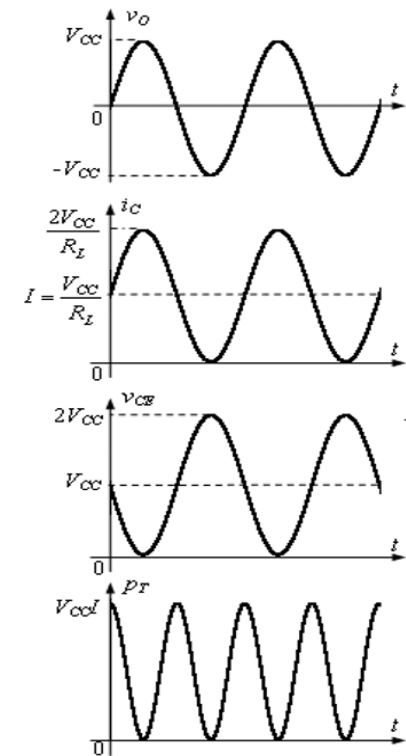




# C6. Amplificatoare de putere. Clasa A, B, AB

$$\eta = \frac{P_O}{P_{Al}}$$

Clasa de functionare	Interval de conductie	Randament maxim teoretic
A	$t_C = T$	25%
B	$T/2$	78,5%
AB	$T/2 < t_C < T$	78,5%
C	$t_C < T/2$	90%



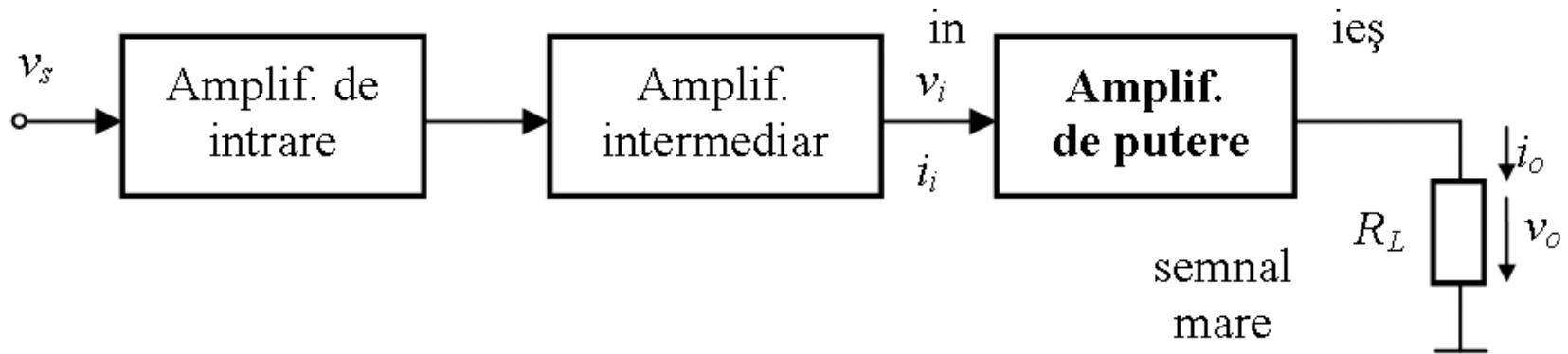


# Ce învățăm azi

## Amplificatoare de putere

- Cerințe. Randament
- Clase de funcționare
- Clasa A
  - CSTV, Puteri, Randament, Cronograme
- Clasa B
  - CSTV, Puteri, Randament, Cronograme
- Clasa AB
  - CSTV, circuit de polarizare cu diode, protecția la scurtcircuit

# Amplificatoare de putere



- amplificarea în tensiune este redusă sau chiar nu există
- amplificarea în curent este mare

$$v_o \approx v_i \quad i_o > i_i$$

$$p_i = i_i v_i \quad p_o = i_o v_o \quad p_o > p_i$$

Se mai numesc și amplificatoare de **semnal mare** sau amplificatoare **de ieșire**.



# Cerințe pentru amplificatoare de putere

- ❖ **rezistență de ieșire scăzută** (poate furniza semnal de ieșire fără pierdere de putere )
- ❖ **liniaritate cât mai bună** (semnal de ieșire nedistorsionat)

$$THD = \frac{\sqrt{V_{ef2}^2 + V_{ef3}^2 + V_{ef4}^2 + \dots}}{V_{ef1}}$$

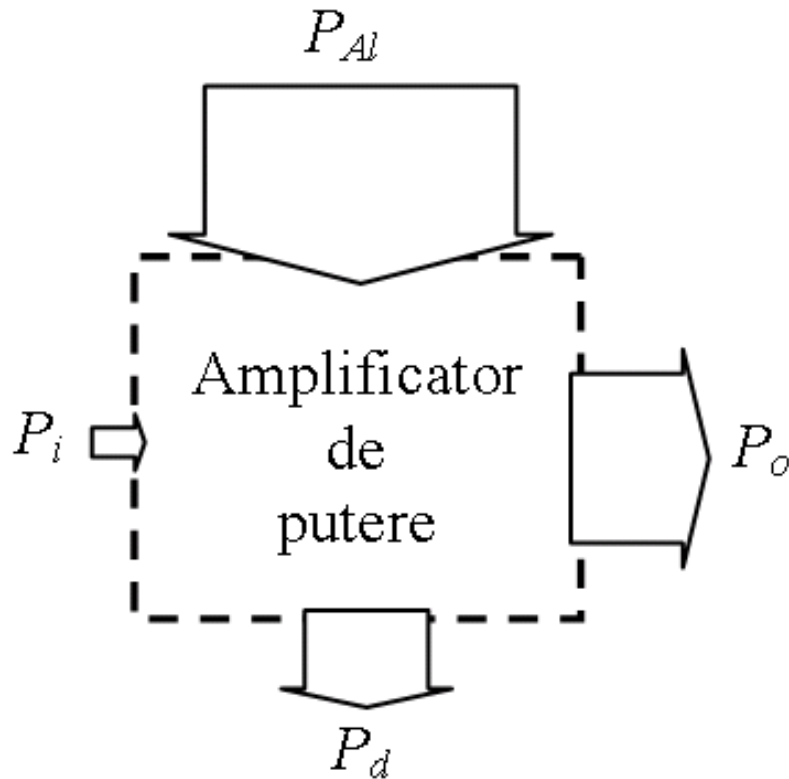
$$THD < 1\%$$

amplificatoare  
Hi-Fi

*THD* – Total Harmonic Distorsions (foaia de catalog)

- ❖ **randament** (cât mai) **ridicat** (prelungeste durata de funcționare a bateriilor)

# Transfer de putere. Randament



$$P_i + P_{Al} = P_d + P_o$$

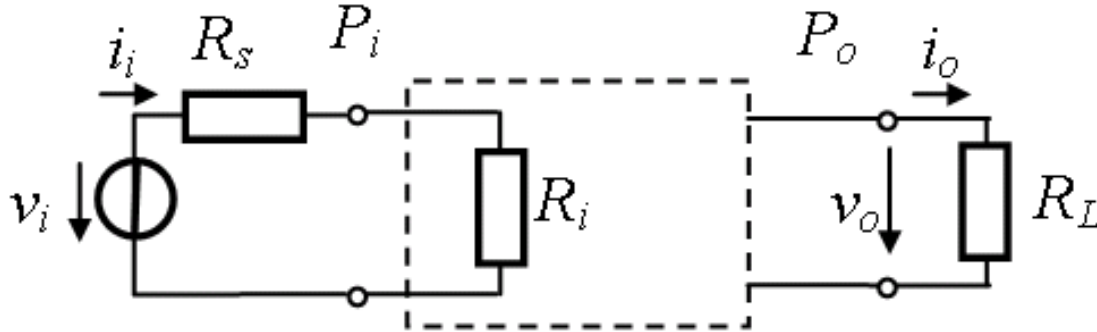
$$P_i \ll P_{Al}$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_{Al}}$$

$P_d$  - putere disipata sub forma de caldură (putere pierduta)

# Amplificarea în putere

Facultativ



$$A_p = \frac{P_o}{P_i}$$

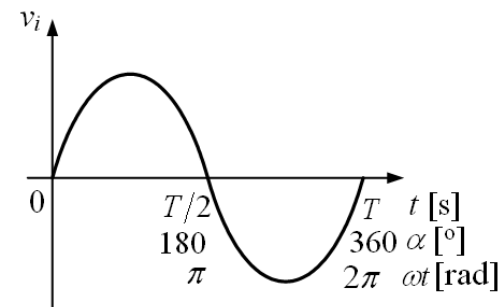
Puteri medii, în regim sinusoidal

$$P_o = \left( \frac{\hat{V}_o}{\sqrt{2}} \right)^2 \frac{1}{R_L} = \frac{\hat{V}_o^2}{2R_L}$$
$$P_i = R_i \left( \frac{\hat{I}_i}{\sqrt{2}} \right)^2 = R_i \frac{\hat{V}_i^2}{2(R_i + R_s)^2}$$

$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \left( \frac{\hat{V}_o}{\hat{V}_i} \right)^2 \frac{(R_i + R_s)^2}{R_i R_L}$$
$$R_i \gg R_s$$
$$A_p \approx \left( \frac{\hat{V}_o}{\hat{V}_i} \right)^2 \frac{R_i}{R_L}$$

# Clase de funcționare

- în concordanță cu intervalul de conducție al tranzistorului amplificator într-o perioadă a semnalului sinusoidal

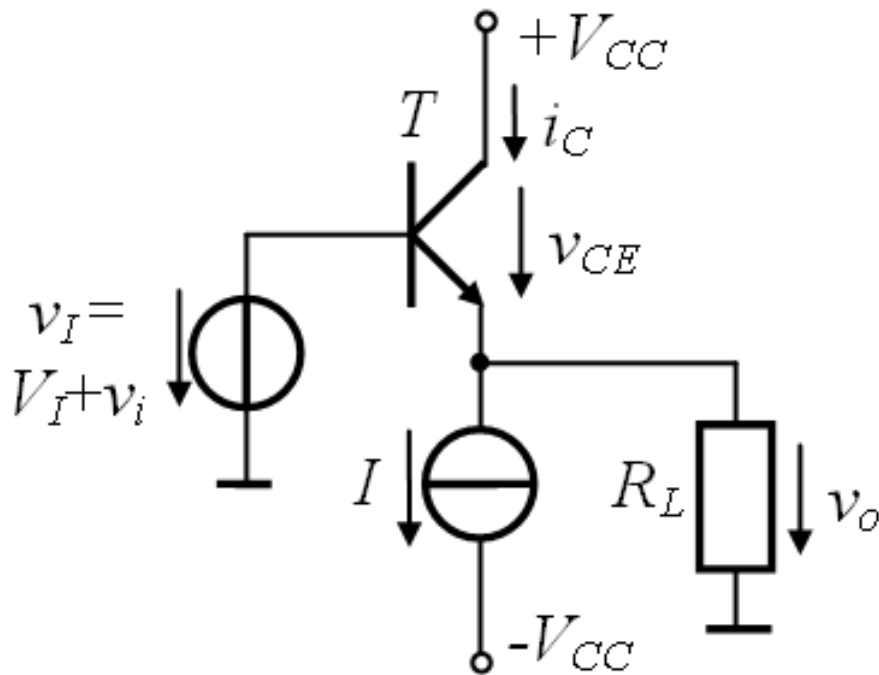


Clasa de funcționare	Interval de conducție	Randament maxim teoretic	Obs.
A	$t_c = T$	25%	amplificatoare de semnal mic
B	$T/2$	78,5%	distorsiuni de racordare; amplificatoare audio
AB	$T/2 < t_c < T$	78,5%	elimina distorsiunile de racordare; amplificatoare audio
C	$t_c < T/2$	90%	transmitatoare RF, sarcina acordată pentru etajul de amplificare
D	comutare	80% - 95%	utilizează modularea impulsurilor în latime și filtrarea pasivă la ieșire; amplificatoare audio (subwoofer în automobile), controlul motoarelor cc.
E	comutare	96%	amplificatoare acordate (unde radio și microunde)
G	similar AB		comutarea tensiunii de alimentare în funcție de mărimea semnalului de ieșire
H	similar G	100%	Tensiune de alimentare este "modulată" de semnalul de ieșire (menținută cu puțin peste mărimea semnalului).



# Amplificator de putere în clasa A

Intervalul de conducție al T – **întreaga perioadă** a semnalului de intrare sinusoidal



$$v_o \approx v_i$$

semnal variabil

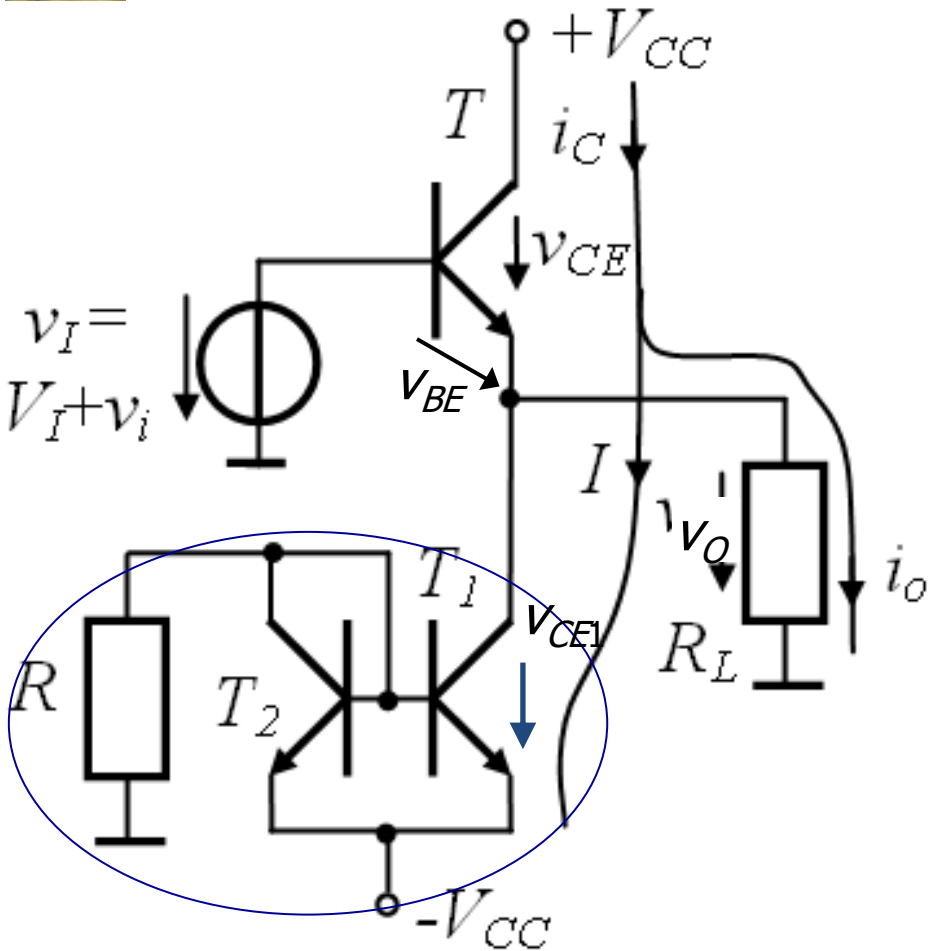
Repetor pe emitor pentru tensiunea variabila de intrare

Conexiunea colector comun (CC)

Cum se poate implementa sursa de curent?



# CSTV amplificator de putere în clasă A



$$v_o = v_i - v_{BE} = v_i - 0,7V$$

$$v_{CE} = V_{CC} - v_o; \quad v_{CE1} = v_o + V_{CC}$$

$$v_i \uparrow, \quad v_o \uparrow, \quad v_{CE} \downarrow$$

$$v_{Omax} = V_{CC} - v_{CEsat} \approx V_{CC}$$

$T$  – ajunge la saturație

$$v_{Imax} = v_{Omax} + 0,7V \approx V_{CC} + 0,7V$$

$$v_i \downarrow, \quad v_o \downarrow, \quad v_{CE1} \downarrow$$

$$v_{Omin} = -V_{CC} + v_{CE1sat} \approx -V_{CC}$$

$T_1$  – ajunge la saturație

$$v_{Imin} = v_{Omin} + 0,7V \approx -V_{CC} + 0,7V$$

Sursa de curent



$$I = \frac{V_{CC} - V_{BE2}}{R}$$

# CSTV amplificator de putere în clasă A

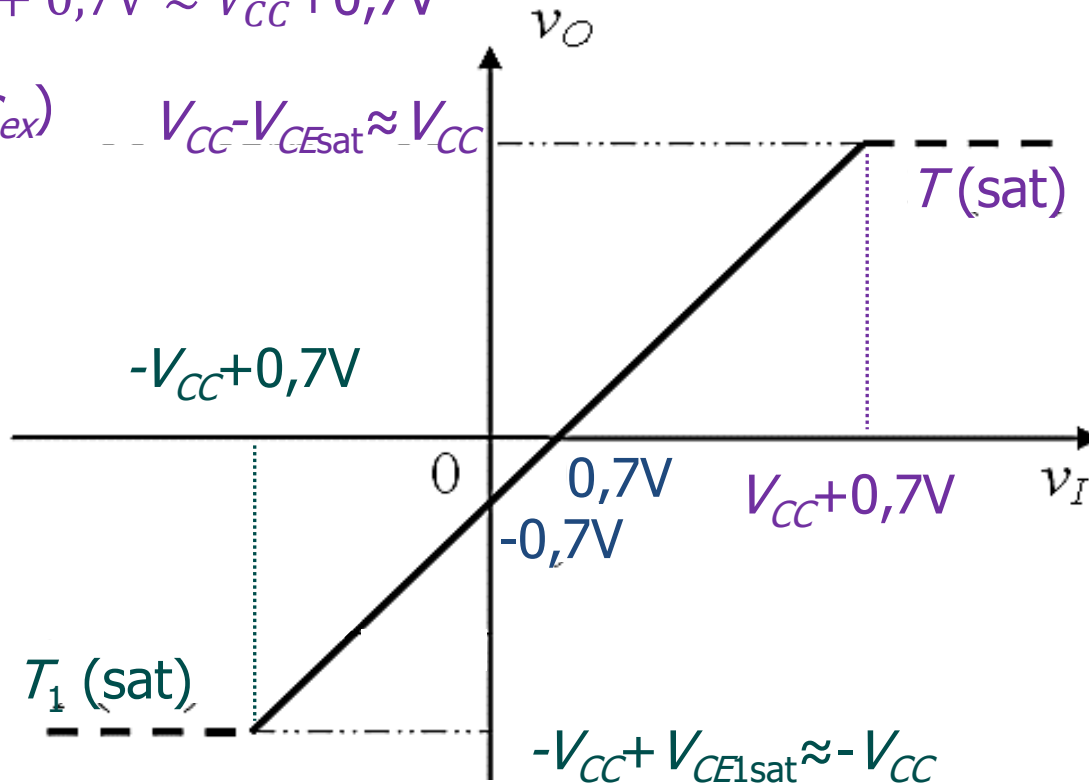
$$v_{Omax} = V_{CC} - v_{CEsat} \approx V_{CC}$$

$$v_O = v_I - v_{BE} = v_I - 0,7V$$

$$v_{Imax} = v_{Omax} + 0,7V \approx V_{CC} + 0,7V$$

$T$  – saturație ( $c_{ex}$ )

$$V_{CC} - V_{CEsat} \approx V_{CC}$$

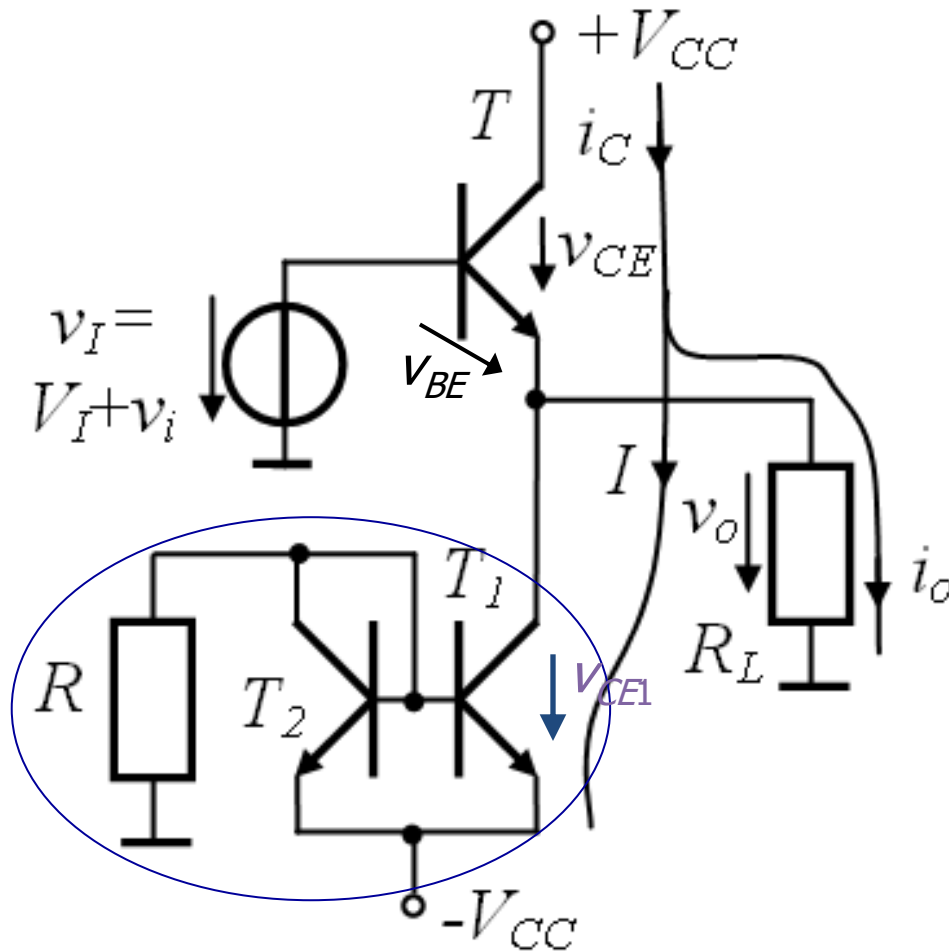


$T_1$  – saturație ( $c_{ex}$ )

$$v_{Omin} = -V_{CC} + v_{CE1sat} \approx -V_{CC}$$

$$v_{Imin} = v_{Omin} + 0,7V \approx -V_{CC} + 0,7V \quad 10$$

# CSTV amplificator de putere în clasă A



$$i_C = I + i_o = I + \frac{v_o}{R_L}$$

$$i_{Cmax} = I + \frac{v_{Omax}}{R_L} = I + \frac{V_{CC}}{R_L}$$

$$i_{Cmin} = I + \frac{v_{Omin}}{R_L} = I - \frac{V_{CC}}{R_L}$$

$$T - (a_F); \quad i_{Cmin} \geq 0$$

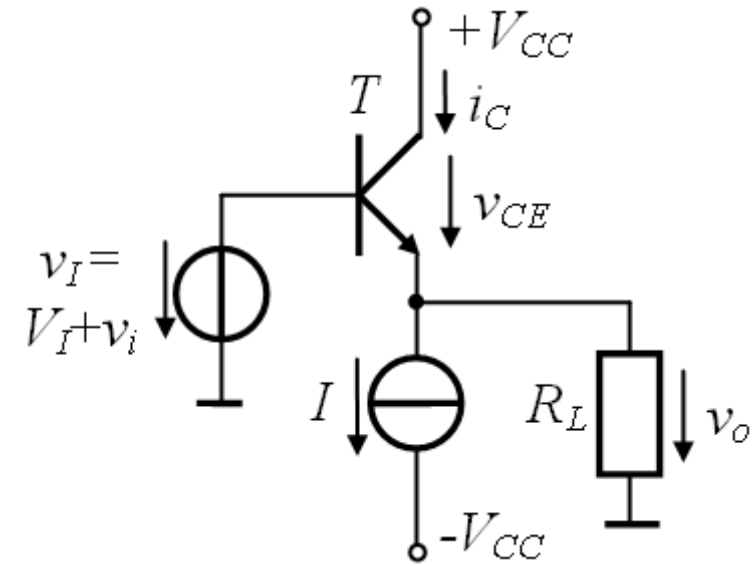
$$I - \frac{V_{CC}}{R_L} \geq 0; \quad R_L I \geq V_{CC}$$



# Puteri. Randament

$$v_i(t) = \hat{V}_i \sin \omega t \quad i_o(t) = \hat{I}_o \sin \omega t$$

$$v_o(t) = \hat{V}_o \sin \omega t \quad \hat{I}_o = \frac{\hat{V}_o}{R_L}$$



Puterea medie consumată de la alimentare:

$$P_{Al} = P_{+V_{cc}} + P_{-V_{cc}} = V_{CC} i_{cmed} + (-V_{CC})(-I)$$

$$i_C(t) = I + \frac{v_o(t)}{R_L} = I + \frac{\hat{V}_o \sin \omega t}{R_L}$$

$$i_{cmed} = I + 0 = I$$

$$P_{Al} = 2V_{CC}I$$

Se consumă putere și în lipsa semnalului de intrare (conduce la scăderea randamentului)



# Puteri. Randament

Putere instantanee la ieșire

$$p_o(t) = i_o(t)v_o(t) = \frac{v_o^2(t)}{R_L} = \frac{\hat{V}_o^2 (\sin \omega t)^2}{R_L}$$

Putere medie la ieșire

$$P_o = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\hat{V}_o^2}{R_L} \left( \sin \frac{2\pi}{T} t \right)^2 dt$$

•Tensiunea și curentul de ieșire sunt sinusoidale

$$P_o = v_{oef} i_{oef} = \frac{\hat{V}_o}{\sqrt{2}} \frac{\hat{I}_o}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{V}_o^2}{2R_L}$$

$$P_o = \frac{\hat{V}_o^2}{2R_L}$$

Randamentul mediu

$$\eta = \frac{P_o}{P_{Al}} = \frac{\frac{\hat{V}_o^2}{2R_L}}{2V_{CC}I} = \frac{\hat{V}_o^2}{4V_{CC}R_LI}$$

Randamentul mediu maxim  $\eta_{\max}$   $\hat{V}_o = V_{CC}$   $R_L I = V_{CC}$   $\eta_{\max} = 25\%$

$R_L$  cât mai mică, dar să asigure excursia maximă la ieșire ( $R_L I \geq V_{CC}$ )

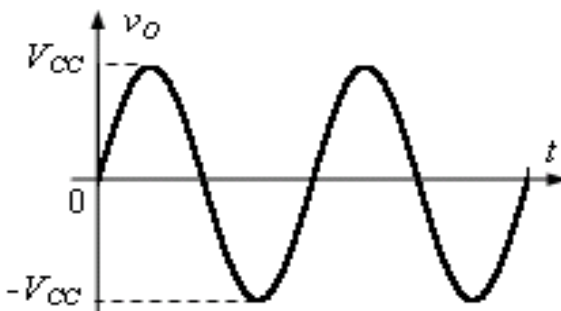
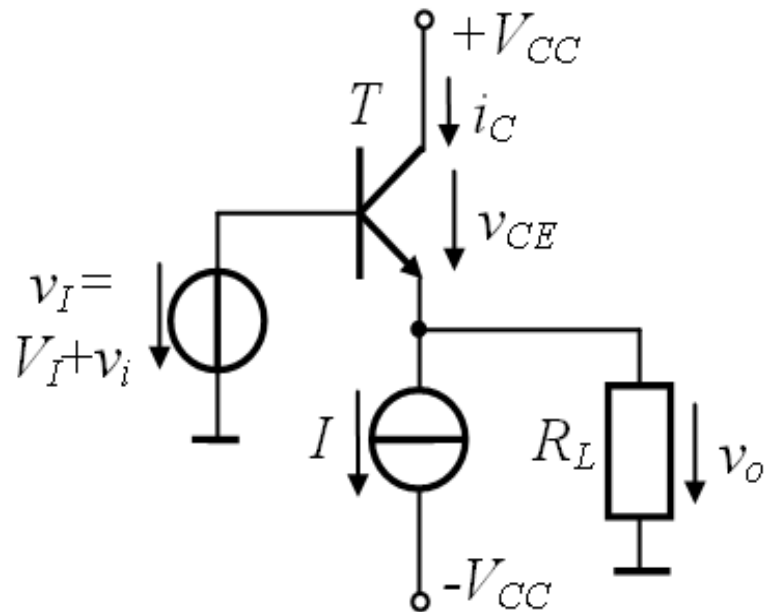
În practică  $\eta \leq 20\%$



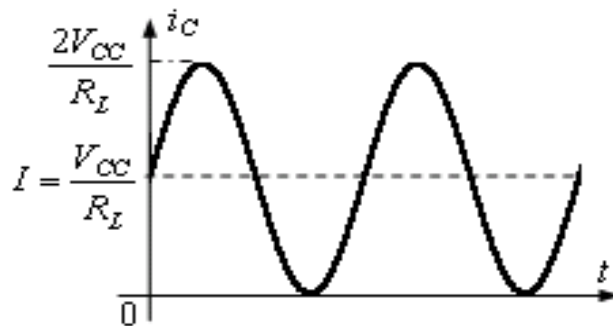
# Cronogram

În condiții de randament maxim

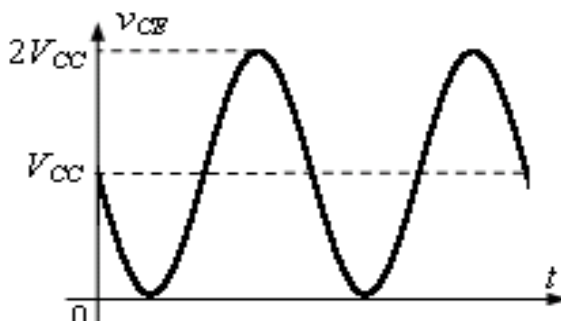
$$\hat{V}_O = V_{CC}, \quad R_L I = V_{CC}$$



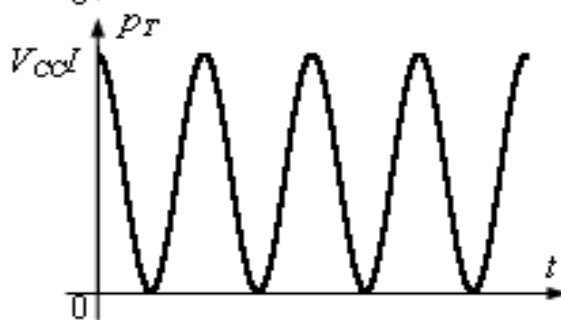
$$v_o(t) = V_{CC} \sin \omega t$$



$$i_c(t) = I + \frac{v_o(t)}{R_L}$$



$$v_{CE}(t) = V_{CC} - v_o(t)$$



$$p_T = i_C(t)v_{CE}(t)$$



# Clasa A

## Problemă

Pentru o funcționare corectă a sursei de curent  $I_{pol}$  este necesar ca  $V_{I_{pol}} > 0$ . Pentru  $T$ :  $V_{BEon} = 0,7V$ ;  $V_{CEsat} \approx 0V$ ;  $\beta = 50$ .

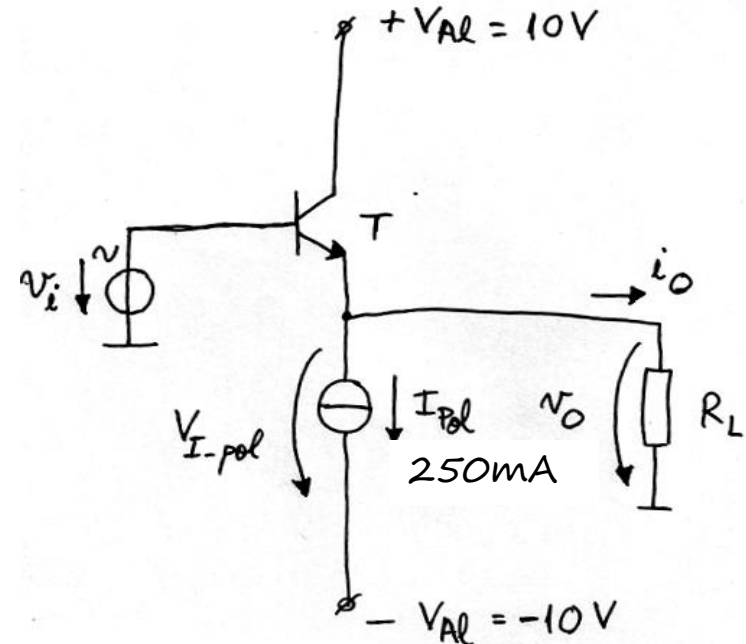
**a)** Care este clasa de funcționare? Justificați răspunsul. Ce valoare are randamentul mediu maxim posibil?

**b)** Care este valoarea optimă a  $R_L$  (asigură excursia maximă a tensiunii de ieșire și randament mediu maxim)?

**c)** Cum arată cronogramele  $v_o(t)$ ,  $v_{CE}(t)$ ,  $i_o(t)$ ,  $i_c(t)$  pentru:  $R_L = 40 \Omega$

și  $v_i(t) = 0,7 + 8\sin\omega t$  [V]?

**d)** Pentru  $v_i(t)$  și  $R_L$  de la punctul c) care sunt valorile medii pentru puterea consumată de la sursele de alimentare, puterea în sarcină și randamentul?

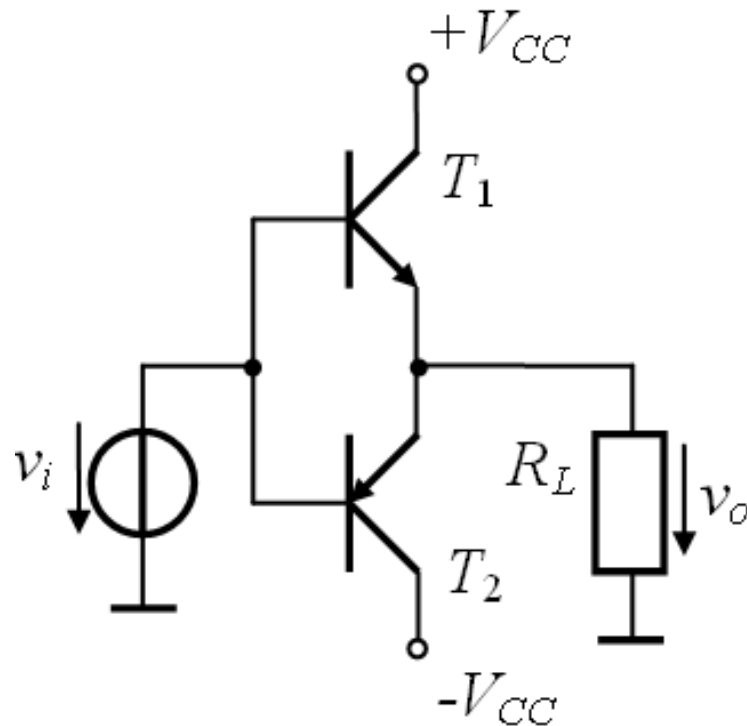




# Amplificator de putere în clasa B

Intervalul de conducție – fiecare tranzistor se află în conducție **aproximativ o jumătate de perioadă** a semnalului de intrare sinusoidal

Etaj în contratimp, tranzistoare complementare (push - pull)



$$v_o \approx v_i \quad \text{semnal variabil}$$

Repetor pe emitor pentru tensiunea variabila de intrare

Conexiunea colector comun (CC)



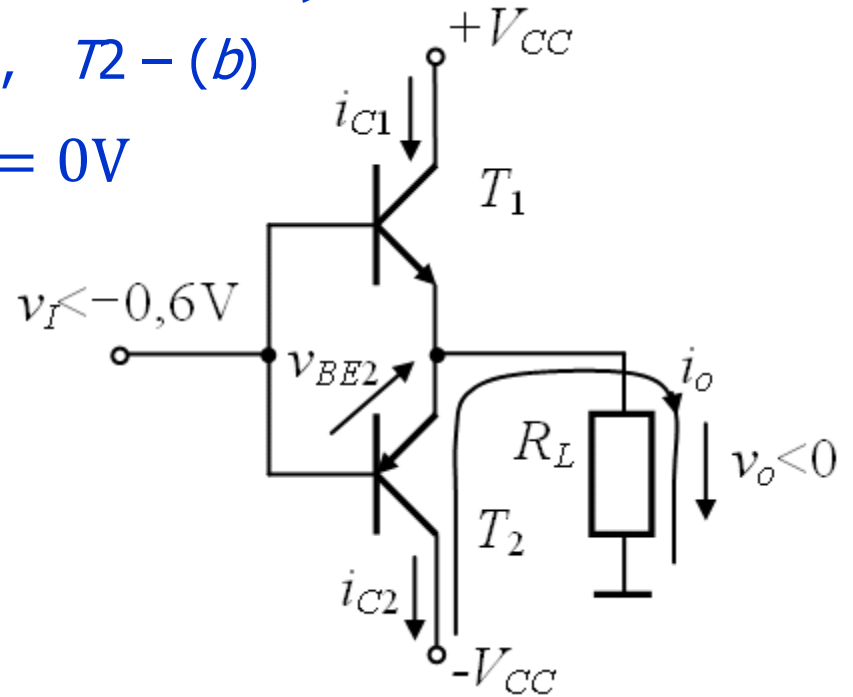
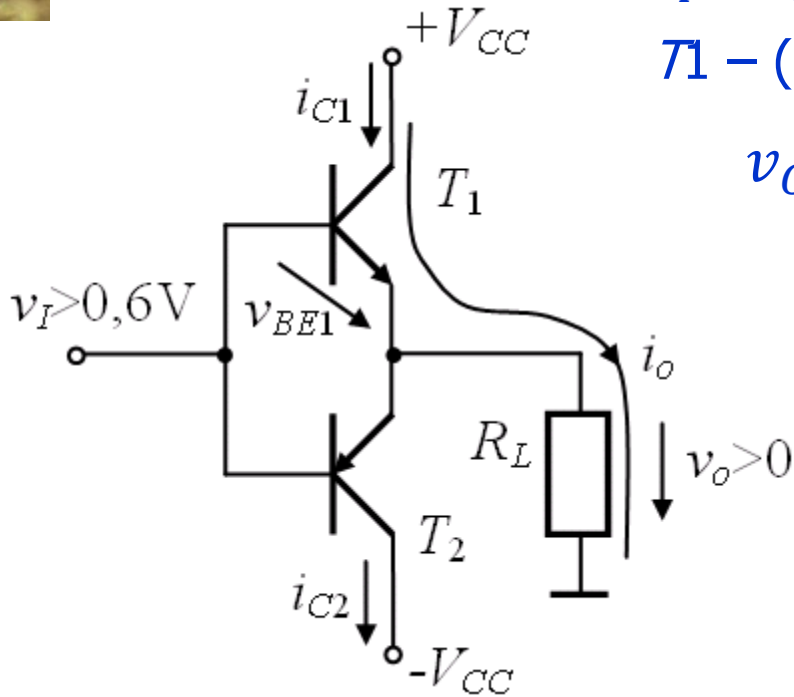
# Funcționare



$$v_I \in (-0,7V; 0,7V)$$

$$T_1 - (b), T_2 - (b)$$

$$v_O = 0V$$



$$v_I \geq 0,7V \quad T_1 - (c), T_2 - (b)$$

$$v_O = v_I - v_{BE1} = v_I - 0,7V$$

$$i_o > 0 \quad i_{C1} = i_o \quad i_{C2} = 0$$

$$v_{Omax} = V_{CC} - V_{CEsat} \approx V_{CC}$$

$$v_I \leq -0,7V \quad T_1 - (b), T_2 - (c)$$

$$v_O = v_I - v_{BE2} = v_I + 0,7V$$

$$i_o < 0 \quad i_{C2} = -i_o \quad i_{C1} = 0$$

$$v_{Omin} = -V_{CC} + V_{CE1sat} \approx -V_{CC}$$



# CSTV

$$v_I \geq 0,7V \quad v_O = v_I - v_{BE1} = v_I - 0,7V$$

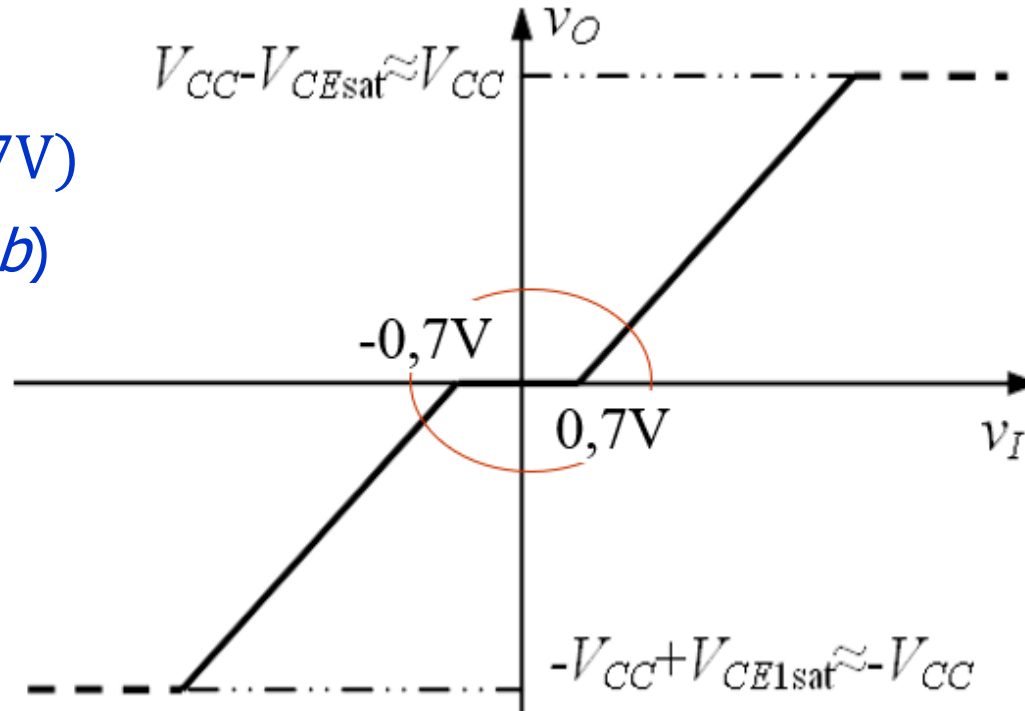
$T1 - (c), T2 - (b)$

$$v_{o\max} = V_{CC} - V_{CEsat} \approx V_{CC}$$

$$v_I \in (-0,7V; 0,7V)$$

$T1 - (b), T2 - (b)$

$$v_O = 0V$$



$$v_I \leq -0,7V \quad T1 - (b), T2 - (c)$$

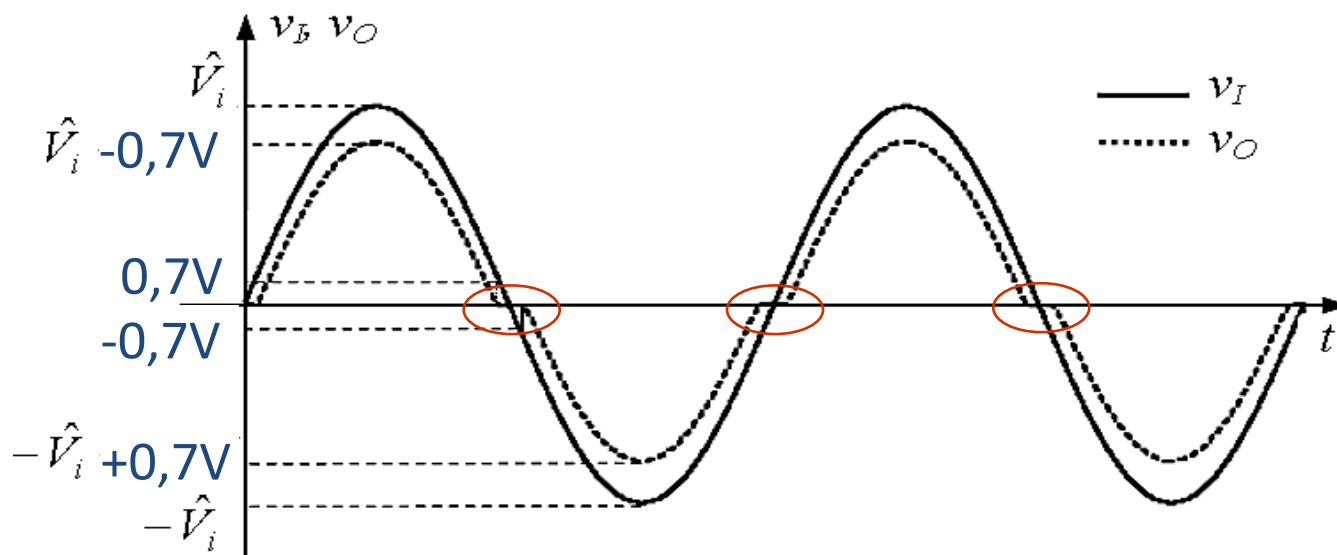
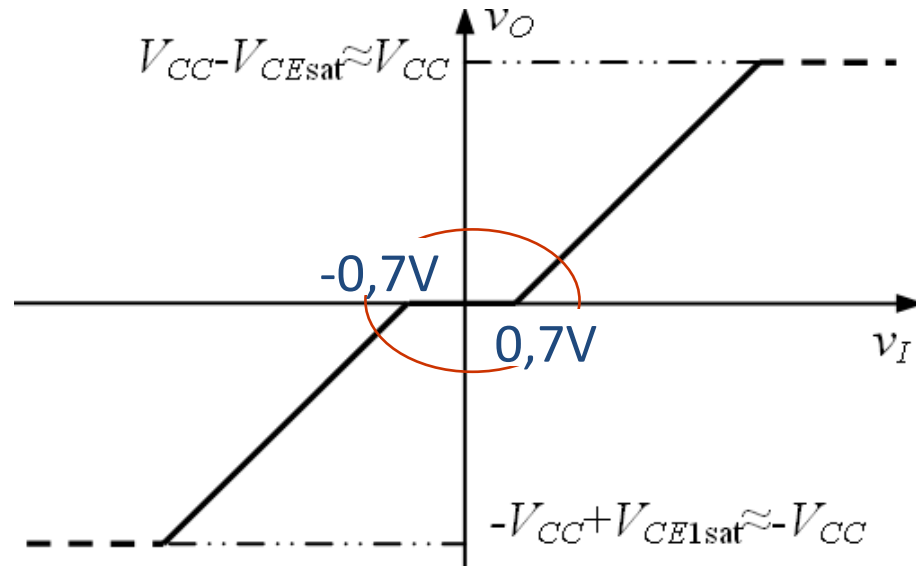
$$v_O = v_I - v_{BE2} = v_I + 0,7V$$

$$v_{o\min} = -V_{CC} + V_{CE1sat} \approx -V_{CC}$$



# CSTV – distorsiuni de racordare (de trecere prin zero)

Scad randamentul etajului de amplificare

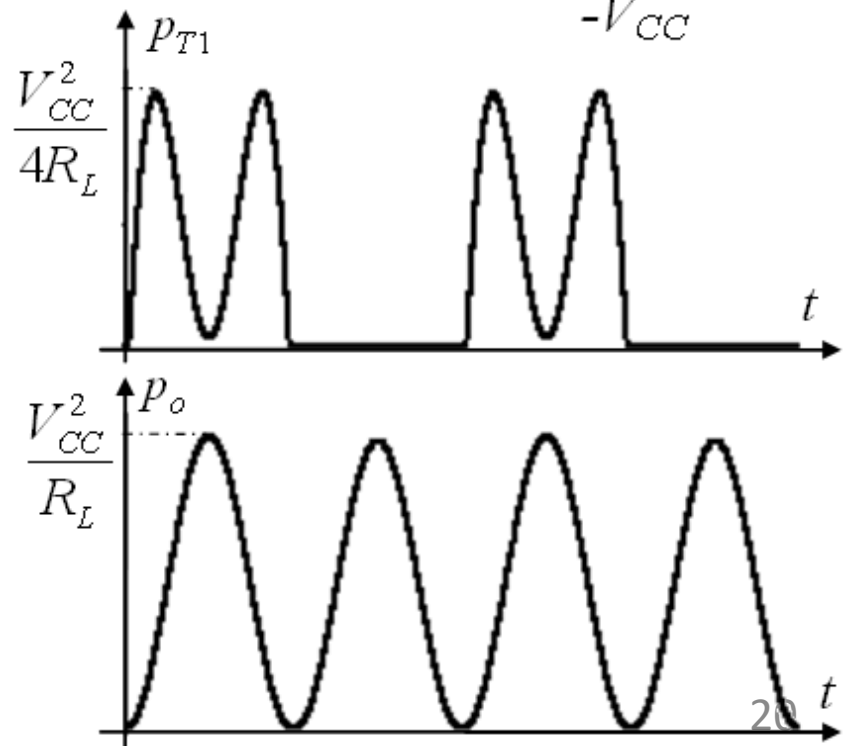
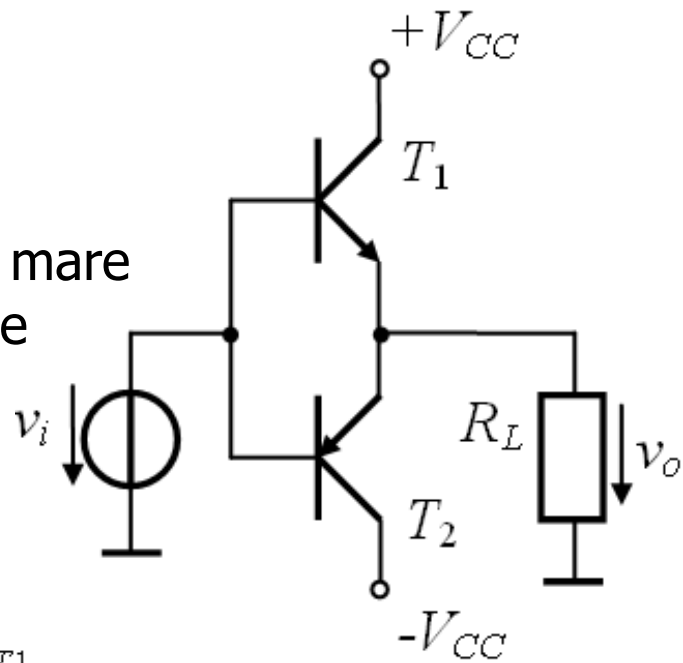
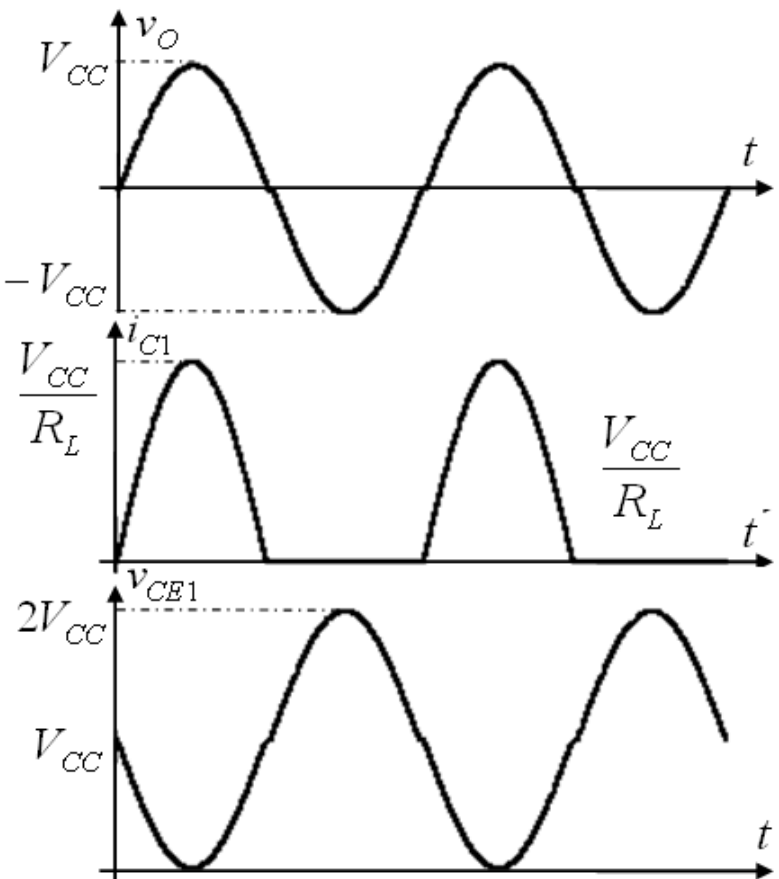




# Cronograme

Se consideră amplitudinea semnalului suficient de mare încât să poată fi neglijate distorsiunile de racordare

$$v_o(t) = \hat{V}_o \sin \omega t \quad \hat{V}_o = V_{CC}$$





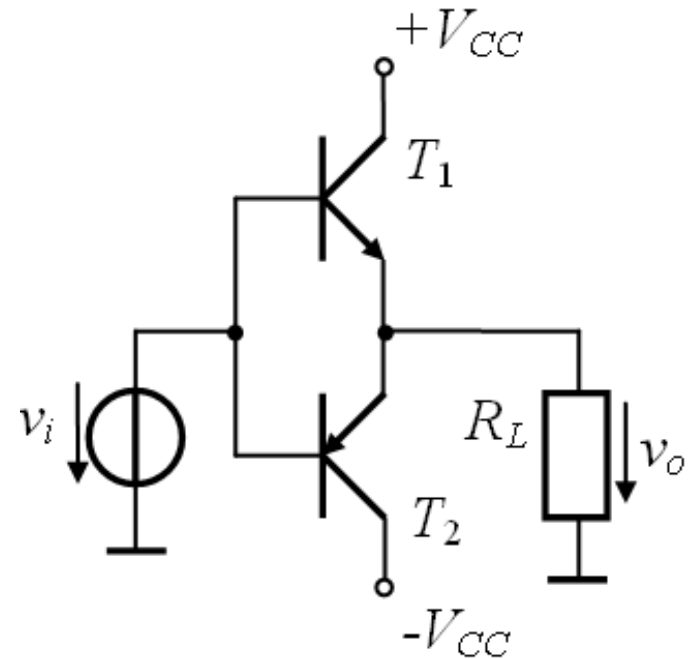
# Puteri. Randament

$$v_i(t) = \hat{V}_i \sin \omega t$$

$$v_o(t) = \hat{V}_o \sin \omega t$$

$$i_o(t) = \hat{I}_o \sin \omega t$$

$$\hat{I}_o = \frac{\hat{V}_o}{R_L}$$



$$\eta = \frac{P_o}{P_{Al}}$$

Valori medii pe o perioadă a tensiunii de ieșire



# Puterea consumată de la alimentare

Putere instantanee de la sursa de alimentare pozitivă  $p_{Al}^+ = V_{CC} i_{C1}(t)$

Putere medie pe o perioadă (de la sursa de alimentare pozitivă)

$$I_{C1} = \frac{I_{Omax}}{\pi} \quad \text{Curentul mediu} \quad P_{Al}^+ = \frac{I_{Omax}}{\pi} * V_{CC} = \frac{\widehat{V}_O * V_{CC}}{\pi * R_L}$$

Putere medie pe o perioadă (consumată de la alimentare, ambele surse)

$$P_{Al} = P_{Al}^+ + P_{Al}^- = 2 \left[ \frac{I_{Cmax}}{\pi} * V_{CC} \right] \quad P_{Al} = \frac{2 * \widehat{V}_O * V_{CC}}{\pi * R_L}$$



# Puterea de la ieșirea circuitului

Putere instantanee la ieșire

$$p_o(t) = i_o(t)v_o(t) = \frac{v_o^2(t)}{R_L} = \frac{\hat{V}_o^2(\sin \omega t)^2}{R_L}$$

Putere medie la ieșire

- tensiunea și curentul de ieșire sunt sinusoidale

$$P_o = v_{oef}i_{oef} = \frac{\hat{V}_o}{\sqrt{2}} \frac{\hat{I}_o}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{V}_o^2}{2R_L}$$

$$P_o = \frac{\hat{V}_o^2}{2R_L}$$



# Randament mediu

Putere medie pe o perioadă (consumată de la alimentare)

$$P_{Al} = \frac{2 * \widehat{V}_o * V_{CC}}{\pi * R_L} \quad \text{Pentru } \widehat{V}_o = V_{CC} \quad P_{Almax} = \frac{2 \widehat{V}_{CC}^2}{\pi R_L}$$

Putere medie la ieșire

$$P_o = \frac{\widehat{V}_o^2}{2R_L} \quad \text{Pentru } \widehat{V}_o = V_{CC} \quad P_{Omax} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$$

Randamentul mediu

$$\eta = \frac{P_o}{P_{Al}} = \frac{\widehat{V}_o^2}{2R_L} \frac{\pi R_L}{2 V_{CC} \widehat{V}_o} = \frac{\pi \widehat{V}_o}{4 V_{CC}}$$

Randament mediu maxim

$$\text{Pentru } \widehat{V}_o = V_{CC} \quad \eta_{max} = \frac{\pi}{4} = 78,5\%$$





# Tranzistorul amplificator

Facultativ

Putere disipată pe fiecare tranzistor

$$P_T = \frac{1}{2} (P_{AI} - P_O) \quad P_T = \frac{1}{2} (P_{AI} - P_O) = \frac{1}{\pi} \frac{V_{CC} \hat{V}_o}{R_L} - \frac{\hat{V}_o^2}{4R_L}$$

La randament maxim:  $\hat{V}_o = V_{CC}$   $P_T = \frac{1}{\pi} \frac{V_{CC}^2}{R_L} - \frac{V_{CC}^2}{4R_L} = 0.068 \frac{\hat{V}_{CC}^2}{R_L}$

Care este puterea medie maximă pe fiecare tranzistor în funcție de amplitudinea tensiunii de ieșire?

$$\frac{dP_T}{d\hat{V}_o} = 0 \quad \Rightarrow \quad \hat{V}_o = \frac{2}{\pi} V_{CC} = 0,64V_{CC}$$

Putere medie maximă:  $\hat{V}_o = 0,64V_{CC}$   $P_{T \max} = \frac{1}{\pi^2} \frac{V_{CC}^2}{R_L} \approx 0,1 \frac{V_{CC}^2}{R_L}$

Putere instantanee maximă:  $\hat{V}_o = V_{CC}$   $P_{T \max} = \frac{1}{4} \frac{V_{CC}^2}{R_L} = 0,25 \frac{V_{CC}^2}{R_L}$

$$i_{C \max} = \frac{V_{CC}}{R_L} \quad v_{CE \max} = 2V_{CC}$$



# Amplificator de putere în clasa AB

Intervalul de conducție – fiecare tranzistor se află în conducție **exact o jumătate de perioadă** a semnalului de intrare sinusoidal

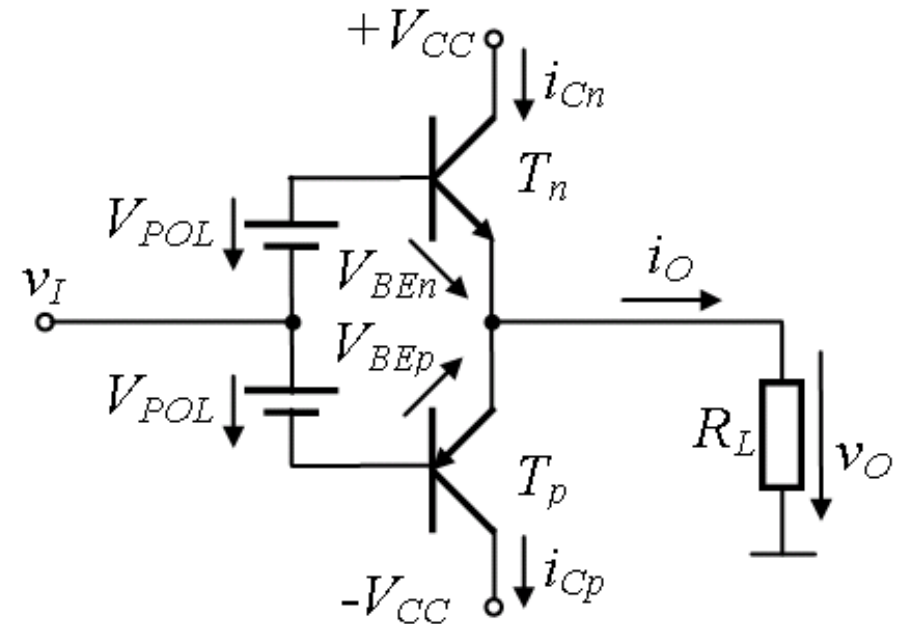
- polarizare în curent continuu a tranzistoarelor cu un curent redus – eliminarea distorsiunilor de racordare

$$V_{POL} \approx 0,7V$$

$$I = I_S e^{\frac{V_{POL}}{V_T}}$$

$$v_I = 0$$

Curentul static  
in tranzistoare



$v_I$  - pozitivă

$$v_O(t) = v_I(t) + V_{POL} - V_{BE n} \approx v_I(t)$$

$v_I$  - negativă

$$v_O(t) = v_I(t) - V_{POL} - V_{BE p} \approx v_I(t)$$

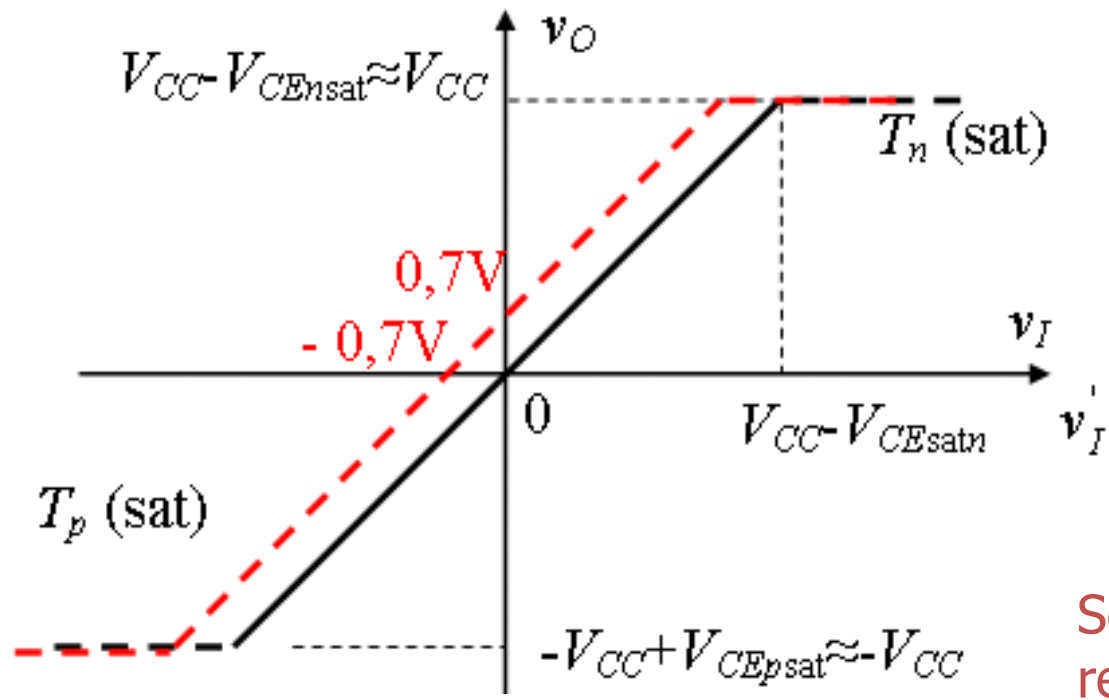
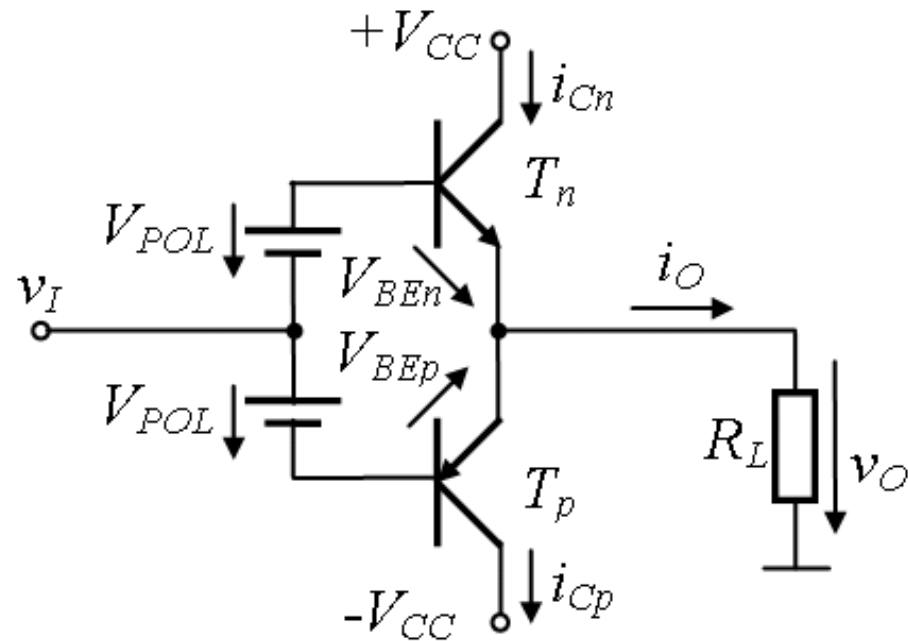


# CSTV

$$v_I > 0$$

$$v_O(t) = v_I(t)$$

$$v_O(t) = v_I'(t) + 0,7V$$



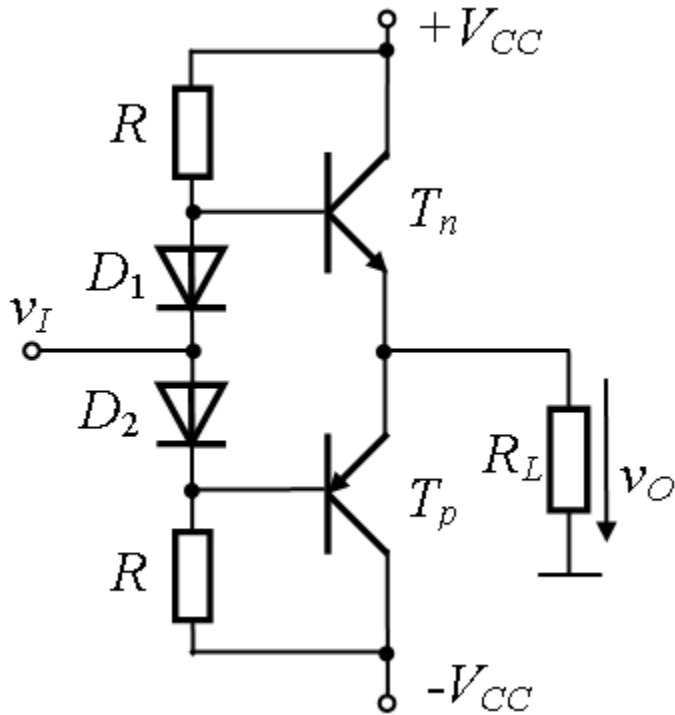
$$v_I > 0 \text{ V}$$

$T_n (c), T_p (b)$

Solutii posibile pentru realizarea  $V_{POL}$  ???

$$v_I < 0 \text{ V} \quad T_n (b), T_p (c)$$

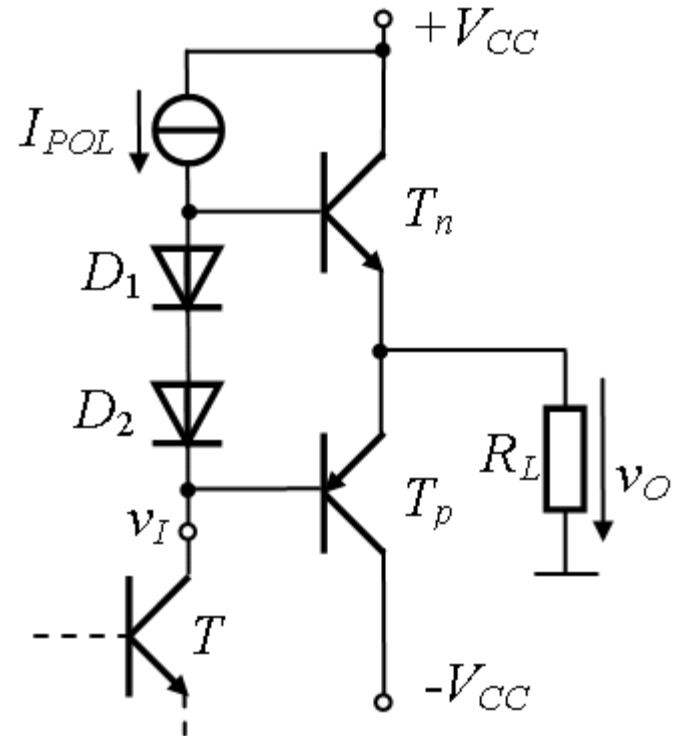
# Circuite de polarizare cu diode



Prin  $R$  trece curentul prin diode și curentul de bază al tranzistoarelor, inclusiv pentru curent maxim de iesire.

$$V_{CC} = +15V \quad \hat{V}_O = 8V \quad \beta = 50$$

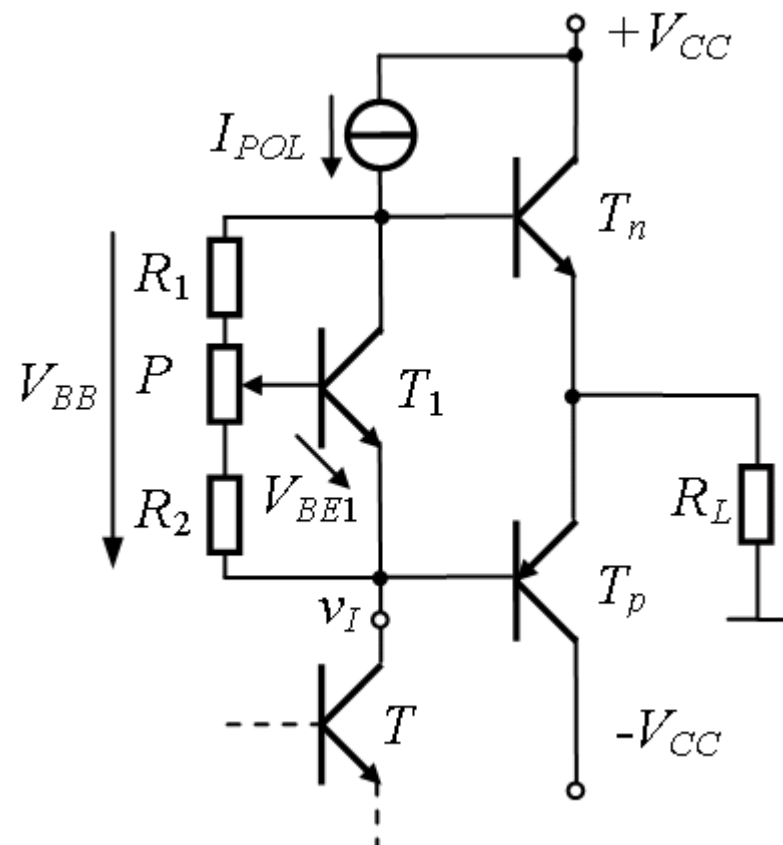
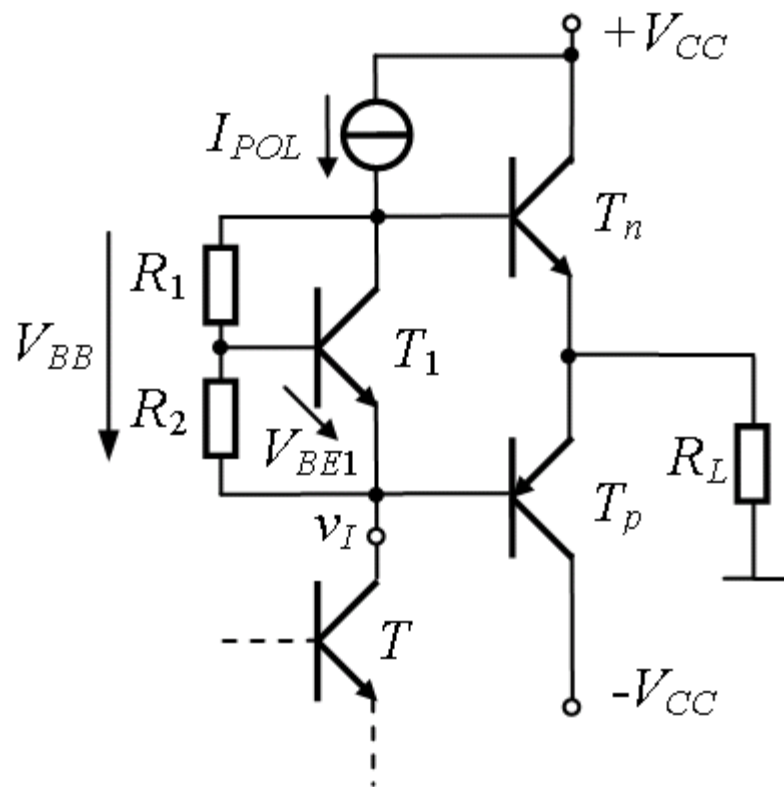
$$R_L = 100\Omega, I_{D1} = 1.5\text{mA} \quad R = ?, I_R = ?$$



Tranzistorul  $T$  face parte din etajul anterior de amplificare, *etaj pilot*

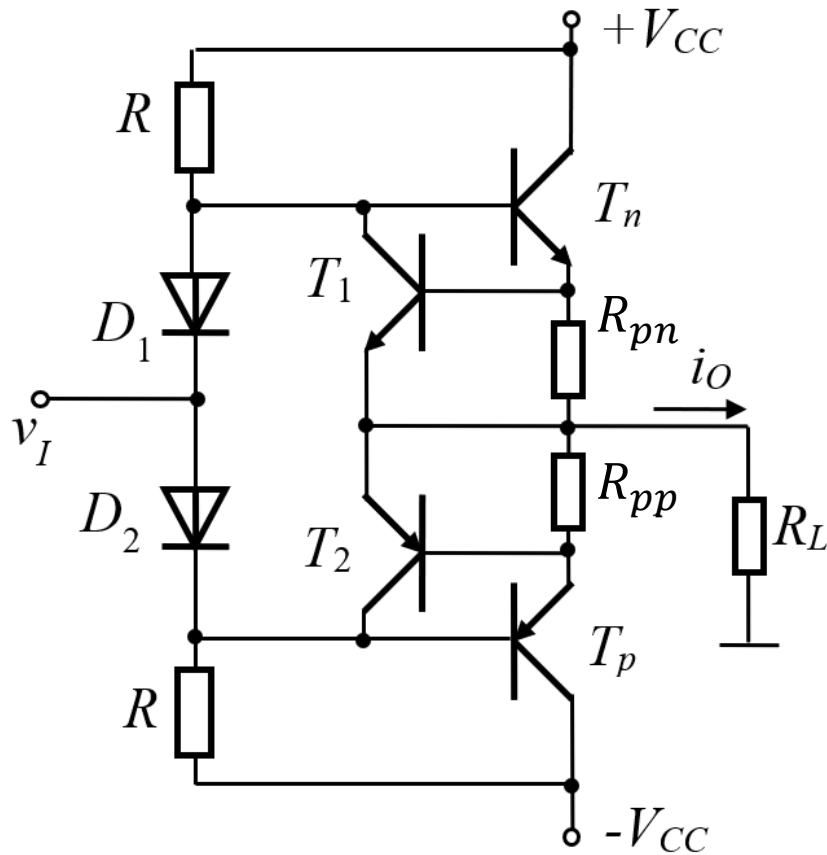
# Circuite de polarizare cu multiplicarea $V_{be}$

*Facultativ*



$$V_{BB} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{BE1}$$

# Protecția la scurtcircuit



- $R_{pn}$ ,  $R_{pp}$  introduc RN locală
- Asigură stabilizare termică (împotriva ambalării termice)

Elementele care asigură protecția la scurtcircuit:

- $T_1$ ,  $R_{pn}$  – pentru  $v_o > 0V$
- $T_2$ ,  $R_{pp}$  – pentru  $v_o < 0V$

## Când $v_o > 0V$

➤ Dacă  $R_{pn}i_o < 0,6V$

$$T_1 - (b); \quad i_o = \frac{v_o}{R_L}$$

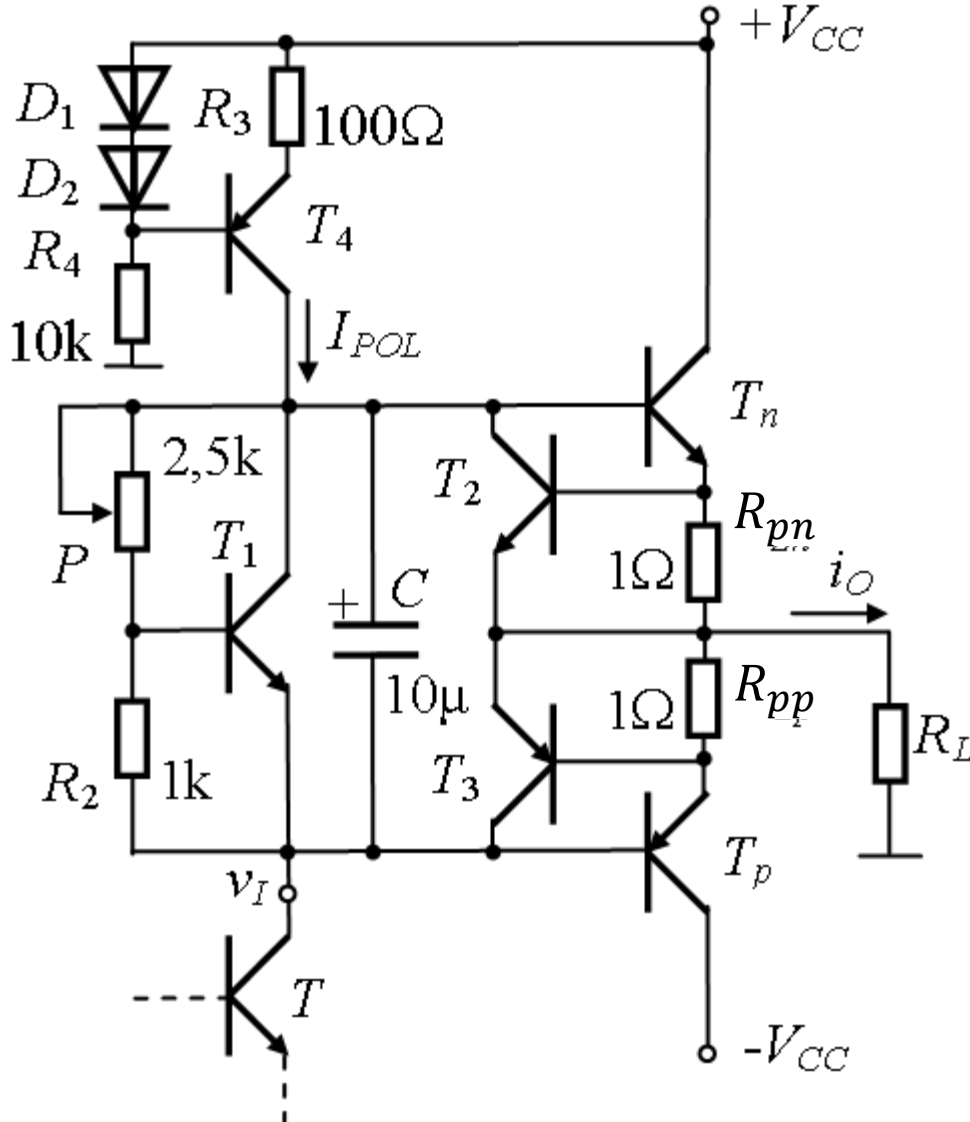
➤ Dacă  $i_o$  crește, când  $R_{pn}i_o = 0,7V$

$$T_1 - (c); \quad i_{Omax} = \frac{V_{BE1,on}}{R_{pn}} = \frac{0,7V}{R_{pn}}$$

Se pierde tensiune (până la 0,7V) pe rezistențele de protecție

# Protecția la scurtcircuit – Exemplu

*Facultativ*



$$I_{POL} = \frac{0,7 + 0,7 - 0,7}{0,1} = 7\text{mA}$$

$P$  asigură reglajul tensiunii de polarizare între  $V_{BE}$  și  $3,5 V_{BE}$

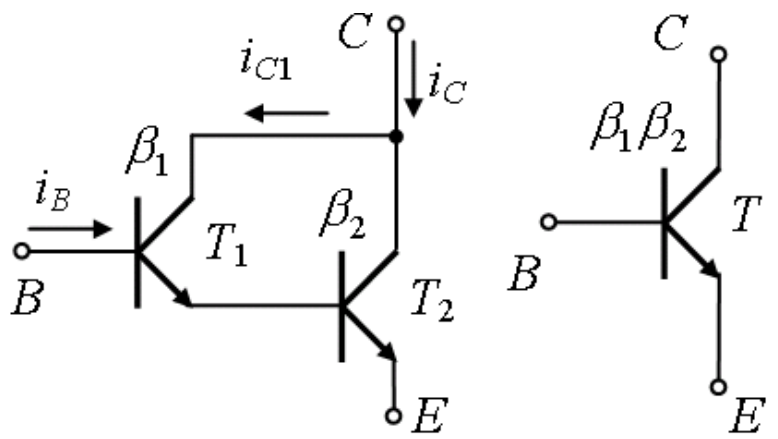
$C$  - în bazele  $T_n$  și  $T_p$  este același semnal variabil de intrare

$$i_{Omax} = 0,7\text{A}$$

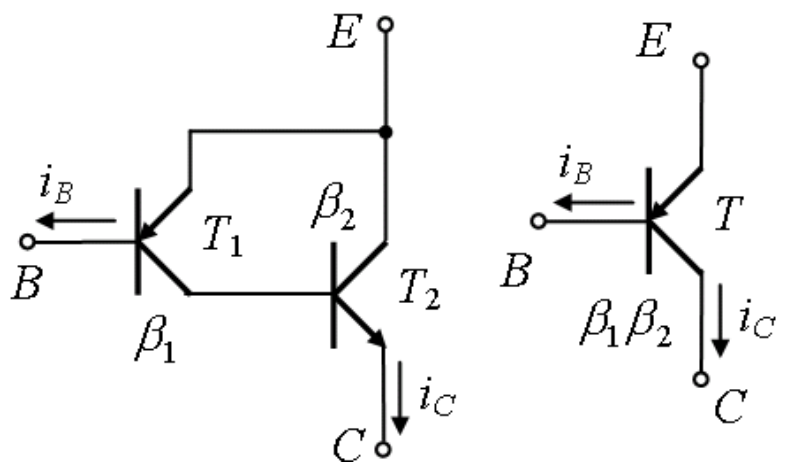


# Utilizarea tranzistoarelor echivalente cu amplificare mare în curent

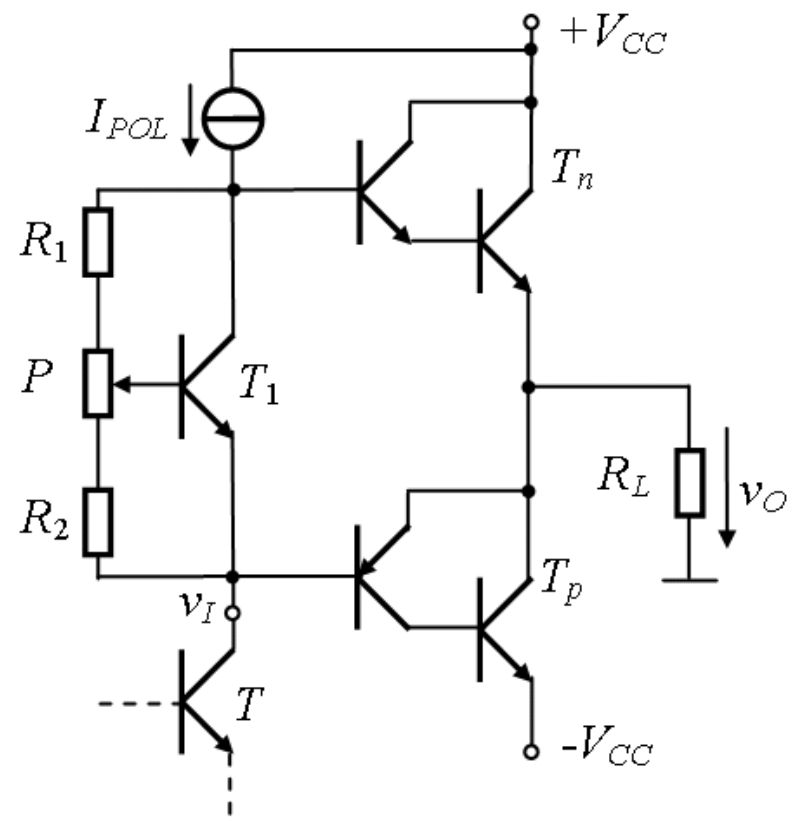
*Facultativ*



Configuratie Darlington *nnp*



Tranzistor compus *pnp*



- Necesare pentru curent mare de ieșire





# Clasa AB

## Problemă

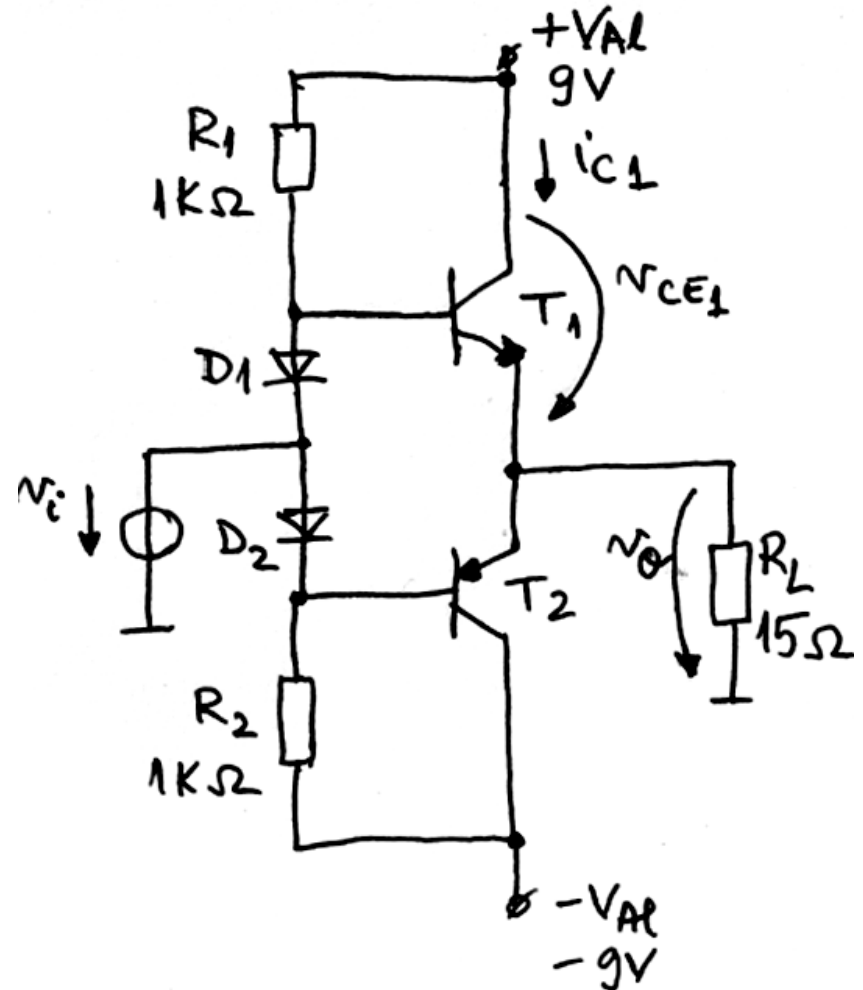
Care este aplicația realizată de circuit? Justificați răspunsul prin examinarea duratelor de conducție ale  $T_1$  și  $T_2$  pentru un semnal de intrare  $v_i(t)$  sinusoidal. Care este rolul:  $D_1, D_2$ ;  $R_1, R_2$ ? Ce valoare are randamentul maxim posibil teoretic pentru acest etaj?

a) Deduceți și reprezentați grafic CSTV  $v_o(v_i)$  pentru  $v_i \in [-9V; 9V]$ .

b) Cum arată cronogramele:  $v_o(t)$ ;  $i_{C1}(t)$ ;  $v_{CE1}(t)$ , pentru  $v_i(t) = 5 \sin \omega t$  [V]?

c) Calculați: puterea medie în sarcina  $R_L$ ; puterea medie consumată de la sursele de alimentare; randamentul mediu pentru  $v_i(t) = 5 \sin \omega t$  [V]?

d) Pentru  $v_i(t) = 7 \sin \omega t$  [V], ce valoare trebuie să aibă  $R_L$  pentru ca puterea în sarcină să fie de 7W? Ce valori au în acest caz puterea medie de la alimentare și randamentul mediu?





# Ce am învățat azi

## Amplificatoare de putere

- Cerințe. Randament
- Clase de funcționare
- Clasa A
  - CSTV, Puteri, Randament, Cronograme
- Clasa B
  - CSTV, Puteri, Randament, Cronograme
- Clasa AB
  - CSTV, circuit de polarizare cu diode, protecția la scurtcircuit