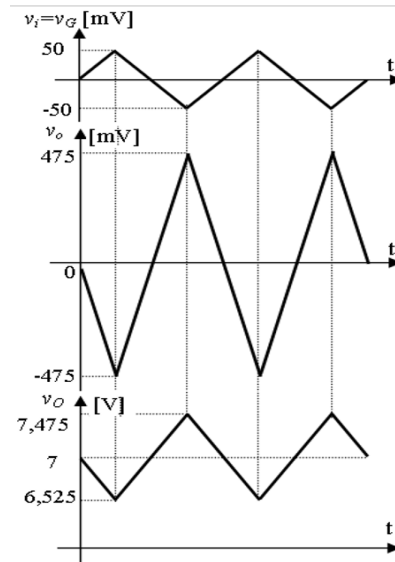
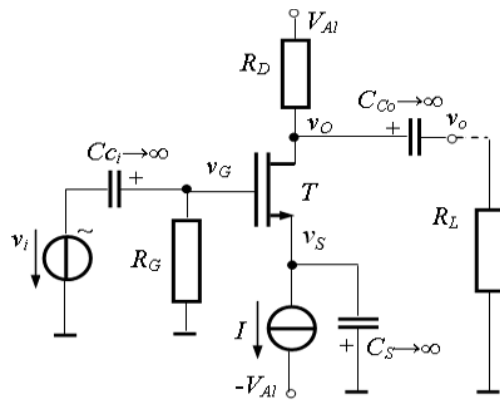




# C3. Amplificatoare fundamentale cu TMOS





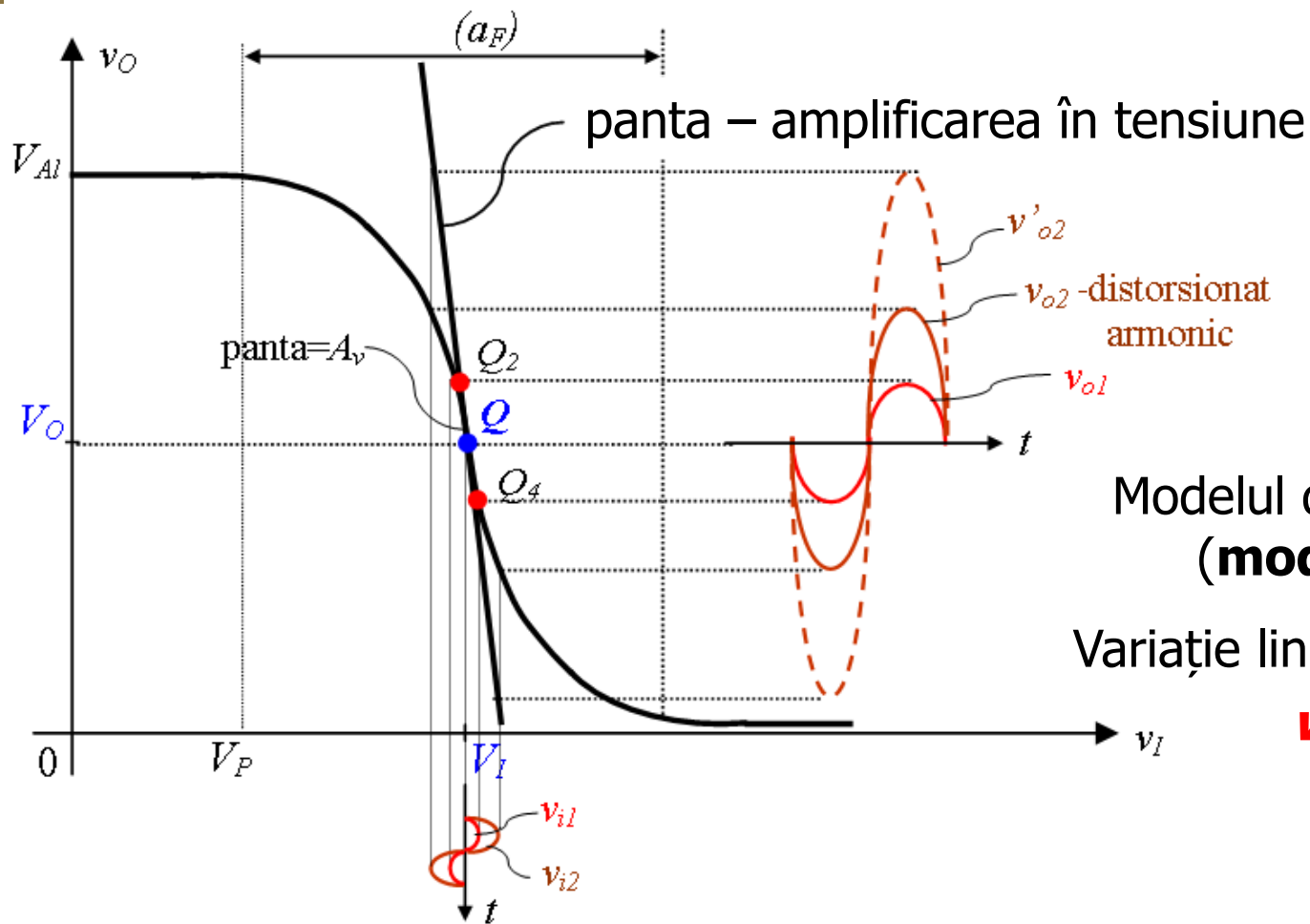
# Ce învățăm azi

## Tranzistoare *MOS*

- Modele de semnal mic
  - funcționare la semnal mic
  - parametri de semnal mic
  - modele uzuale
- Amplificatoare fundamentale cu 1 tranzistor
  - configurații fundamentale – *SC, GC, DC*
  - analiza circuitelor amplificatoare
  - determinarea performanțelor amplificatorului –  $A_V, R_{II}, R_O$



# Necesitatea aplicării semnalului variabil de intrare



Modelul de semnal mic  
(**model liniar**)

Variație liniară în jurul PSF

$$v_o(v_i)$$

Semnal mic: *semnal variabil de amplitudine mică*



# Funcționarea la semnal mic

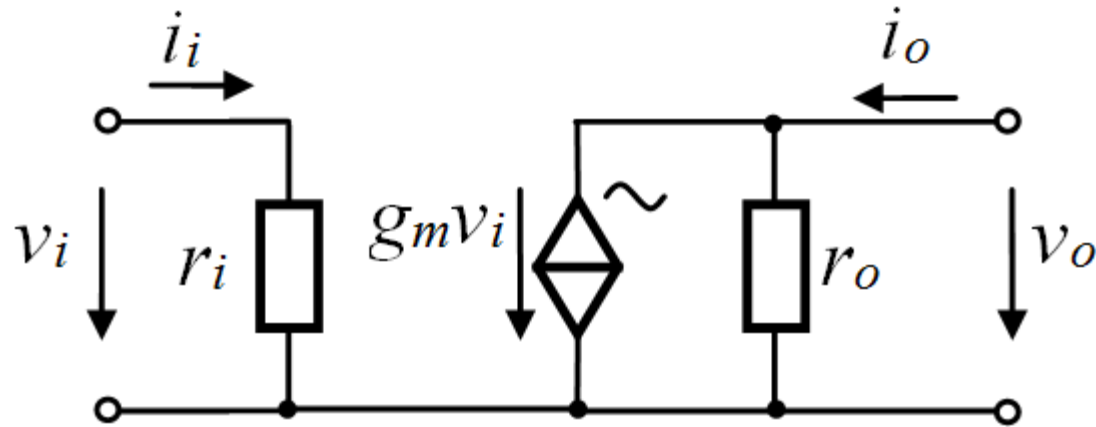
Regim de semnal mic:

- modelul de semnal mic al tranzistorului
- parametri de semnal mic (diferențiali, dinamici)
- **valorile parametrilor de semnal mic depind și de PSF**

Modelul tranzistorului

- la **frecvențe joase și medii:**
  - rezistență de intrare
  - rezistență de ieșire
  - sursă comandată care arată **transferul intrare-ieșire**
- la **frecvențe înalte**
  - modelul se completează cu capacitățile parazite dintre terminalele tranzistorului

# Modelul de semnal mic al tranzistorului



- diport

- rezistența de intrare  $r_i$
- rezistența de ieșire  $r_o$
- sursă de curent comandată în tensiune – SCCT

$$g_m v_i$$



# Parametri de semnal mic

## • Rezistența diferențială de intrare

- grila este izolată electric de restul structurii: - rezistența diferențială de intrare este infinit (întrerupere)

$$r_i = \infty$$

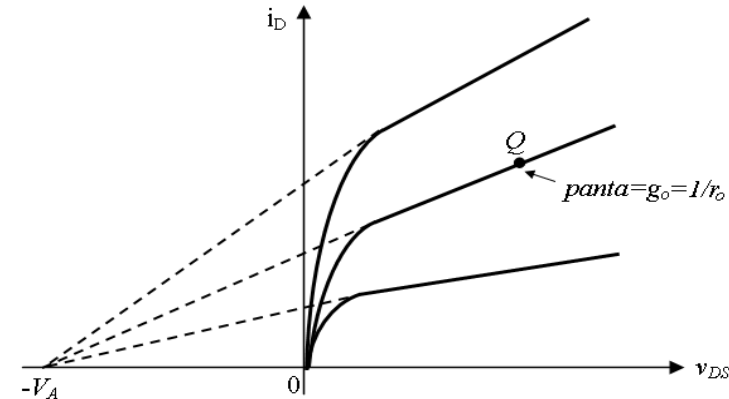
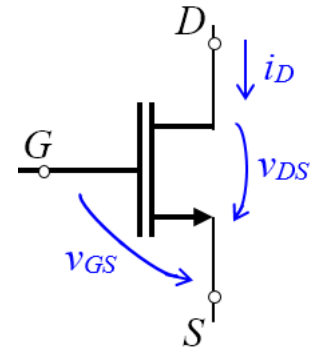
## • Rezistența diferențială de ieșire

- caracteristicile de ieșire nu sunt perfect orizontale, curentul de drenă crește ușor cu tensiunea drenă-sursă la  $V_{GS} = \text{cst.}$

$$i_D = \beta(V_{GS} - V_P)^2 \left( 1 + \frac{v_{DS}}{V_A} \right)$$

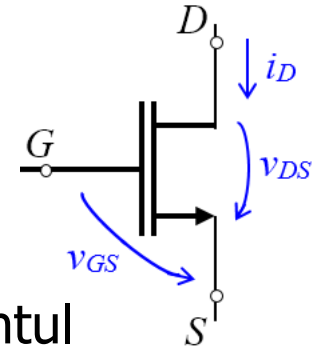
$$r_{ds} = r_o = \frac{1}{g_o} = \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} \Big|_{v_{GS}=\text{cst}} = \frac{v_{ds}}{i_d} \Big|_{v_{GS}=\text{cst}}$$

$$r_{ds} = \frac{V_A}{I_D}$$



$V_A$  – tensiunea Early

# Parametri de semnal mic



## • Transconductanța diferențială

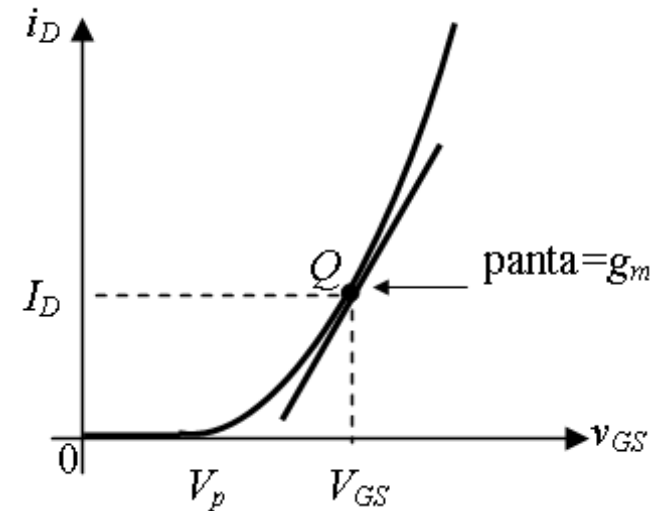
- arată transferul de la tensiunea variabilă de intrare la curentul variabil de ieșire

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{v_{DS}=cst} = \left. \frac{i_d}{v_{gs}} \right|_{v_{DS}=cst} \quad i_D = \beta (v_{GS} - V_P)^2$$

$$g_m = \left. \frac{\partial (\beta (v_{GS} - V_P)^2)}{\partial v_{GS}} \right|_Q = 2\beta (V_{GS} - V_P)$$

$$g_m = 2\beta (V_{GS} - V_P) = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_P} = 2\sqrt{\beta I_D}$$

tranzistoare integrate: 
$$g_m = \sqrt{2K \frac{W}{L} I_D}$$



$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

*TECMOS*: sursă de curent comandată în tensiune (SCCT) pentru semnal mic



# TECMOS

## regim static

$$I_D = \beta(V_{GS} - V_P)^2$$

$$R_O = \frac{V_{DS}}{I_D}$$

## regim de semnal mic

$$g_m = 2 \cdot \beta (V_{GS} - V_P) = 2 \sqrt{\beta \cdot I_D}$$

$$i_d = 2 \cdot \beta (V_{GS} - V_P) \cdot v_{gs}$$

$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

$$r_i = \infty$$

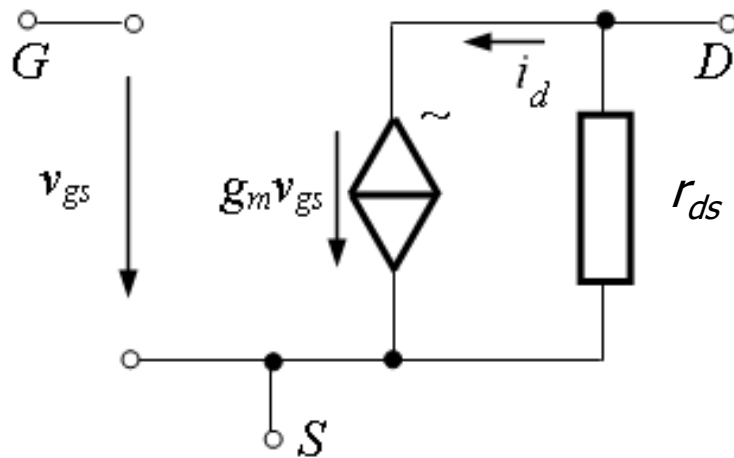
$$r_{ds} = \frac{V_A}{I_D}$$



# Modelul hibrid de semnal mic al TECMOS

## Modelul $\pi$

- la frecvențe joase și medii

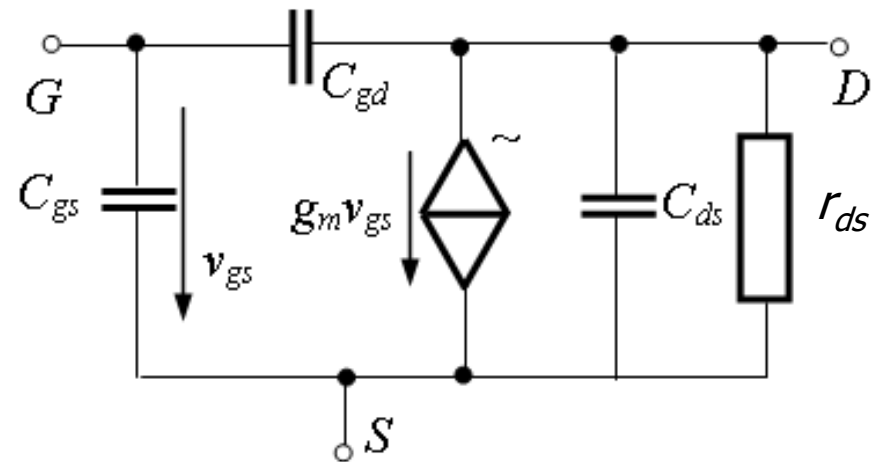


$$g_m = 2 \cdot \beta (V_{GS} - V_P) = 2 \sqrt{\beta \cdot I_D}$$

$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

$$r_i = \infty \quad r_{ds} = \frac{V_A}{I_D}$$

- la frecvențe înalte



Apar capacități parazite interne între terminale

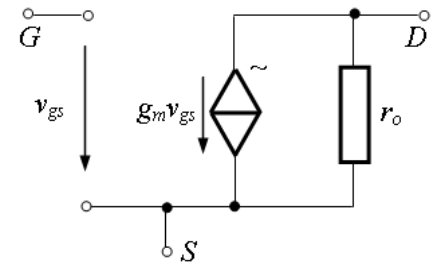
$$C_{GS}, C_{GD}, C_{DS}$$

Valori tipice de ordinul  $pF$  sau fracțiuni de  $pF$

**Modele liniare (valabile în jurul PSF)**



# Exemple numerice



Cazul 1  $\beta=2\text{mA/V}$ ,  $V_A=100\text{V}$  ; polarizare la  $I_D=2\text{mA}$ .

$$g_m = 2\sqrt{\beta I_D} = 2\sqrt{2 \cdot 2} = 4\text{mS}$$

$$r_{ds} = \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{2} = 50\text{k}\Omega$$

Cazul 2  $\beta=2\text{mA/V}^2$ ,  $V_{Th}=1,5\text{V}$   $V_A=100\text{V}$  ; polarizare la  $V_{GS}=2,5\text{V}$ .

$$g_m = 2\beta(V_{GS} - V_P) = 2 \cdot 2(2.5 - 1.5) = 4\text{mS}$$

$$I_D = \beta(V_{GS} - V_P)^2 = 2(2.5 - 1.5)^2 = 2\text{mA}$$

$$r_{ds} = \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{2} = 50\text{k}\Omega$$

Cazul 3  $K=100\mu\text{A/V}^2$  ,  $W/L=1$ ,  $V_A=100\text{V}$  ; polarizare  $I_D=100\mu\text{A}$ .

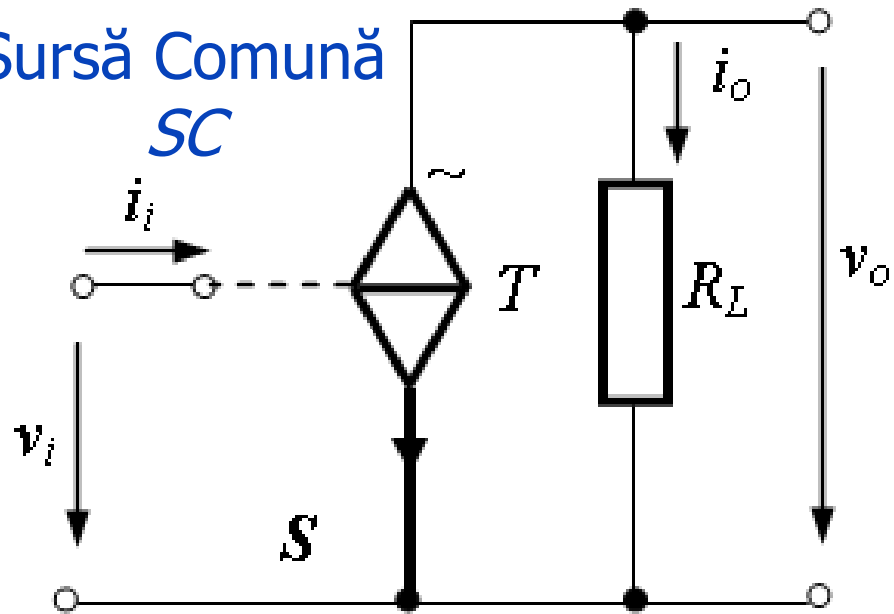
$$g_m = \sqrt{2K} \sqrt{\frac{W}{L}} \sqrt{I_D} = \sqrt{2 \cdot 100} \cdot \sqrt{1} \cdot \sqrt{100} = 0.14\text{mS}$$

$$r_{ds} = \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{0.1} = 1\text{M}\Omega$$

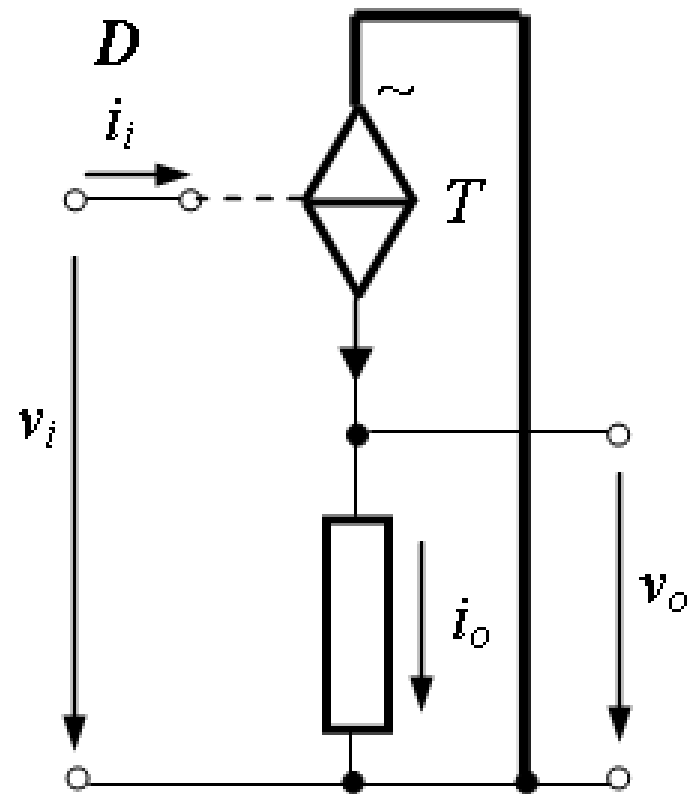


# Configurații fundamentale ale amplificatoarelor cu TECMOS

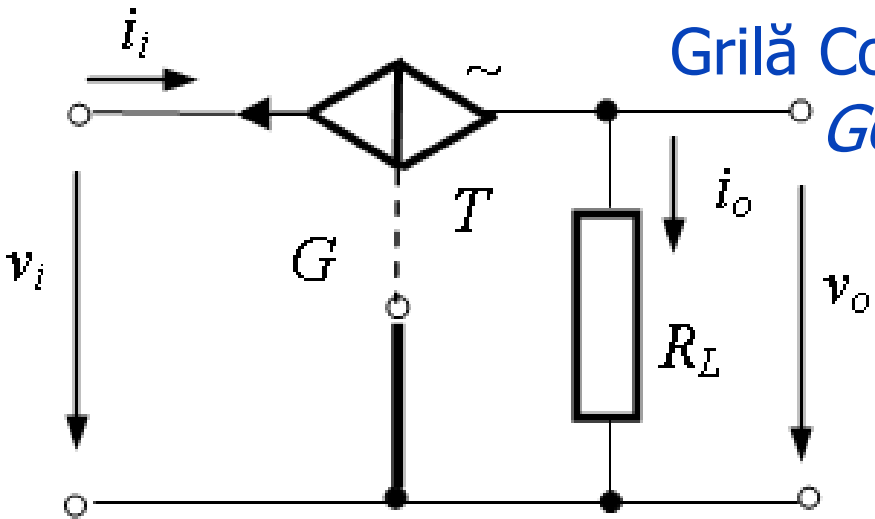
Sursă Comună  
*SC*



Drenă Comună  
*DC*



Grilă Comună  
*GC*



Numele configurației - Terminalul tranzistorului conectat la masă pe schema de semnal mic



# Cuplaj capacitiv

- Suprapunerea semnalului variabil de intrare peste nivelurile de tensiune continuă (sau curent continuu): *cuplajul capacitiv*
- Condensatoare pentru separarea semnalului variabil de cel continuu la ieșire, sau în alte puncte ale amplificatorului.
- Condensatoarele alese vor avea capacitatea *suficient de mare* pentru a fi considerate *scurtcircuite la frecvența de lucru* (impedanța mult mai mică decât a rezistentelor cu care sunt conectate în serie sau în paralel).
- In *curent continuu* (pentru determinarea *PSF*) condensatoarele sunt considerate *întreruperi*.



# Analiza amplificatoarelor cu tranzistoare

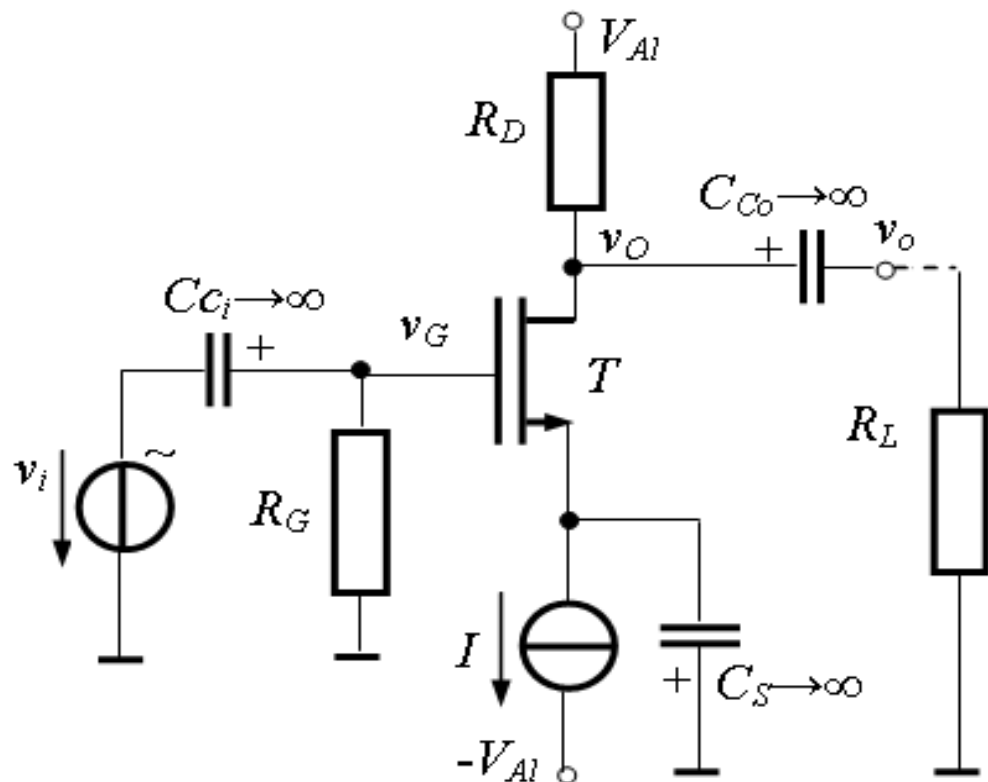
Se pornește de la circuitul complet (c.c. + semnal variabil)

- 1. Circuitul echivalent în cc** -  $C$  se înlocuiește cu întrerupere
  - se determină PSF (curentul de polarizare)
  - se determină parametrii de semnal mic ai tranzistorului –  $g_m$ ;  $r_i$ ;  $r_o$
- 2. Circuitul echivalent pentru variații (pentru semnal mic)** -  $C$  se înlocuiește cu scurt-circuit, sursele de c.c. se pasivizează
  - se determină performanțele amplificatorului:
    - amplificarea  $A_V$
    - rezistența de intrare  $R_I$
    - rezistența de ieșire  $R_O$
- 3. Forme de undă în diverse puncte ale amplificatorului**
  - variația în timp pentru semnalul variabil
  - niveluri (potențiale) de c.c.
  - variația în timp a semnalelor totale: c.c. + semnal variabil



# Configurația (conexiunea) Sursă Comună

Circuitul complet: c.c. + semnal variabil



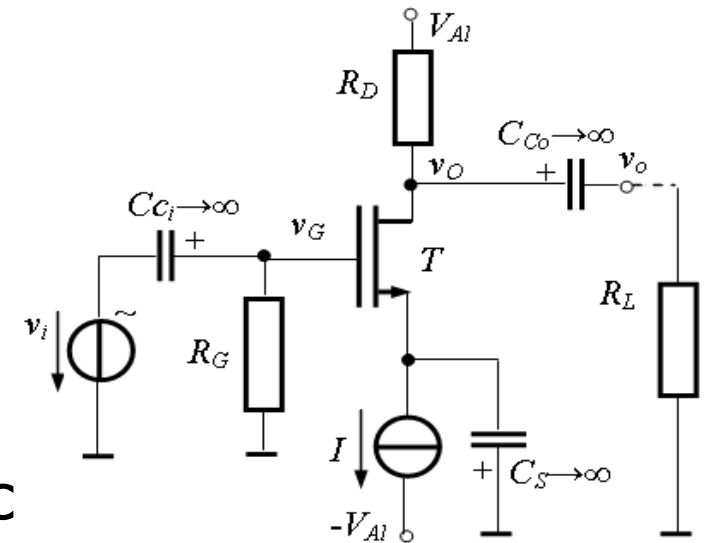
Se poate fără  $R_G$  ?

Se poate fără  $C_S$  ?

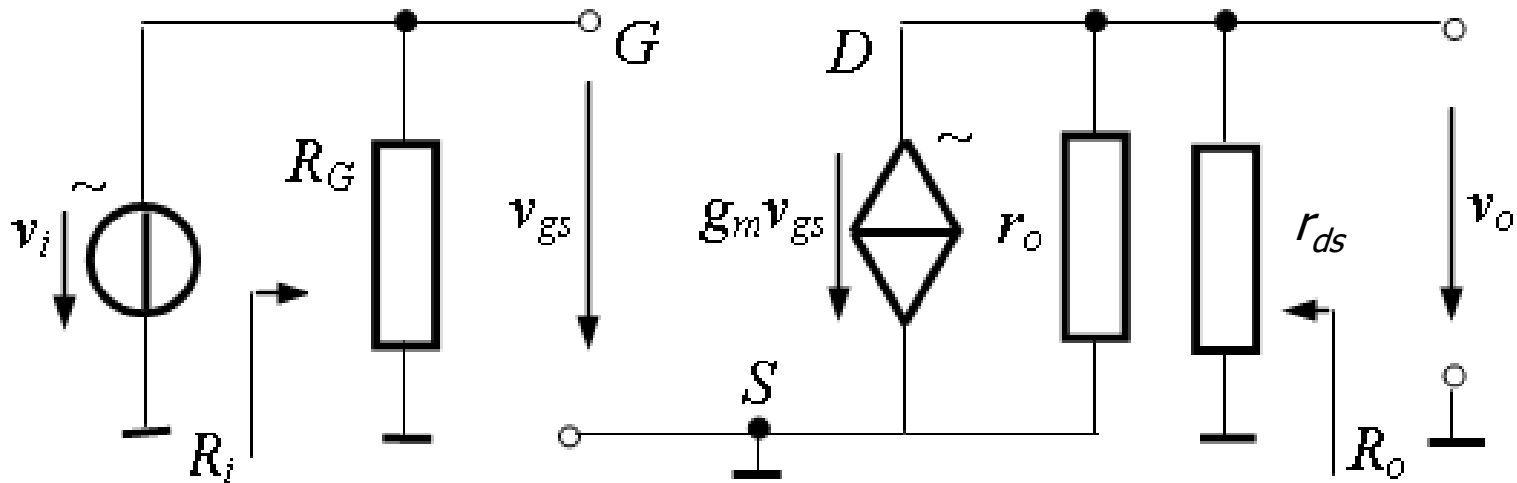
PSF ?

Circuitul echivalent în c.c. ?

# Configurația (conexiunea) Sursă Comună



Circuitul echivalent de de semnal mic





# Determinare performanțe amplificator SC

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad v_i = v_{gs}$$

$$v_o = -g_m v_{gs} (R_D || r_{ds})$$

$$A_v = -g_m (R_D || r_{ds})$$

$$A_v = -g_m (R_D || r_{ds}) \approx -g_m R_D$$

$$R_i = R_G \quad R_o = R_D || r_{ds} \approx R_D$$

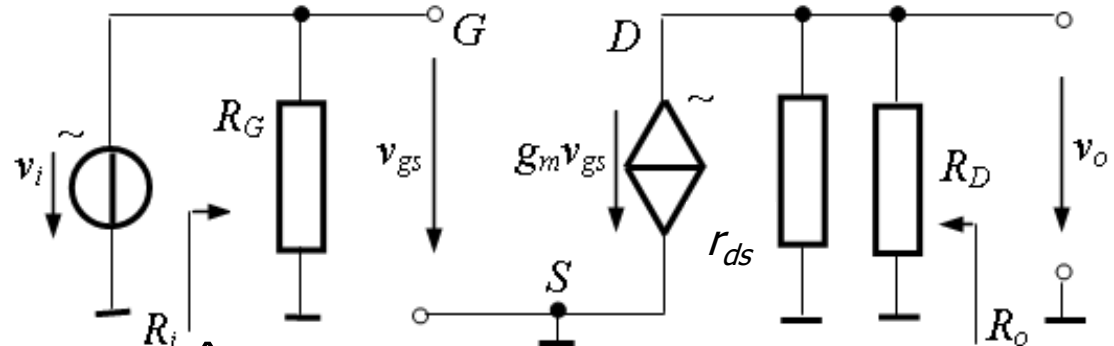
• amplificatorul este inversor

•  $R_D$  poate fi considerată rezistență de sarcină. Dacă în circuit sarcina este conectată cu un terminal la masă, atunci  $R_L$  apare în paralel cu  $R_D$ :

$$A_v = -g_m (R_D || r_{ds} || R_L)$$

• dacă mărimea de ieșire este curentul  $i_o$  prin  $R_D$  – amplificator transconductanță

$$A_{i/v} = \frac{i_o}{v_i} = -g_m \frac{r_{ds}}{r_{ds} + R_D} \approx -g_m$$



În general  $r_o$  este de ordinul sutelor de K $\Omega$  iar  $R_D$  de ordinul unităților de K $\Omega$  astfel că  $R_D || r_{ds} \approx R_D$ , adică  $r_{ds}$  se negligează

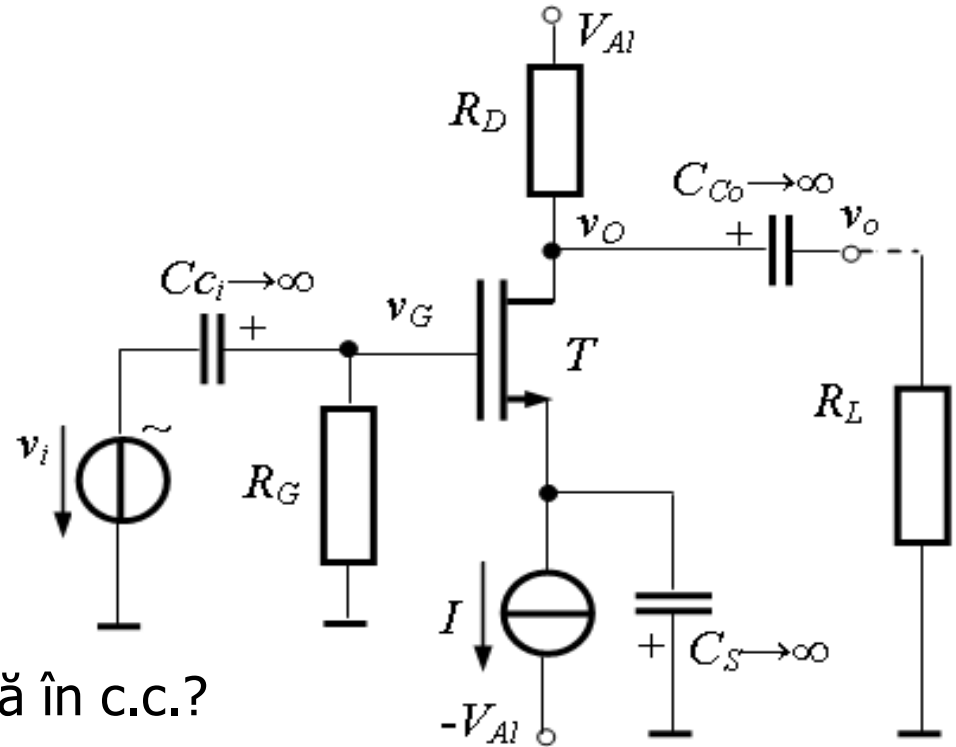


# Determinare performanțe amplificator SC

## Problemă

$$R_G = 1\text{M}\Omega; R_D = 50\text{K}\Omega;$$
$$I = 0,1\text{mA}; V_{A1} = 12\text{V}$$

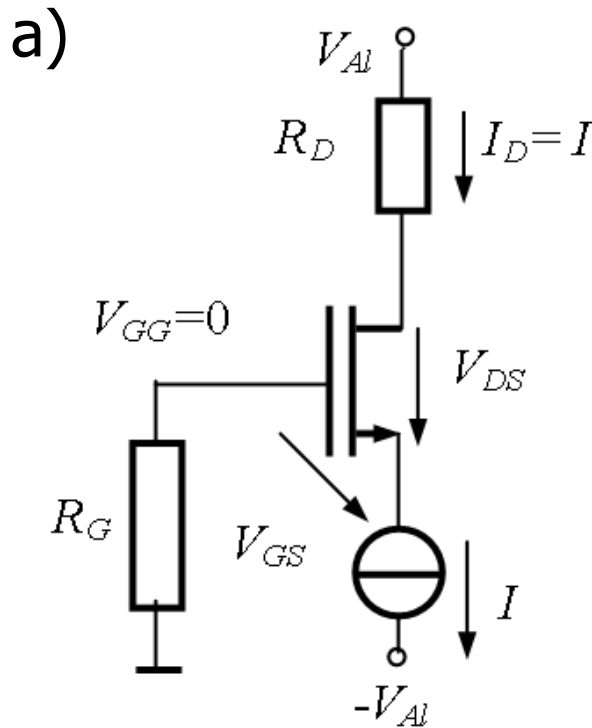
$$K = 0,1\text{mA/V}^2, W/L = 2,$$
$$V_p = 0,6\text{V} \text{ și } V_A = 100\text{V}$$



- Care este schema echivalentă în c.c.?
- Care este PSF?
- Ce valori au parametrii de semnal mic ai tranzistorului?
- Care este schema echivalentă pentru semnal mic a amplificatorului?
- Care sunt valorile amplificării și a rezistențelor de intrare și de ieșire?  
Care este modelul echivalent al amplificatorului?
- Dacă  $v_i(t)$  este tensiune triunghiulară cu amplitudine de 50mV, cum arată  $v_G(t)$ ,  $v_D(t)$ ,  $v_S(t)$ ?

# Determinare performanțe amplificator SC

## Problemă - continuare



b)

$$I_D = I = 0.1\text{mA}$$

$$V_{GG} = 0\text{V}$$

$$V_{Al} = R_D I_D + V_{DS} - V_{GS} + V_{GG}$$

$$V_{DS} = V_{Al} - R_D I_D + V_{GS} - V_{GG}$$

$$I_D = \frac{k}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_P)^2$$

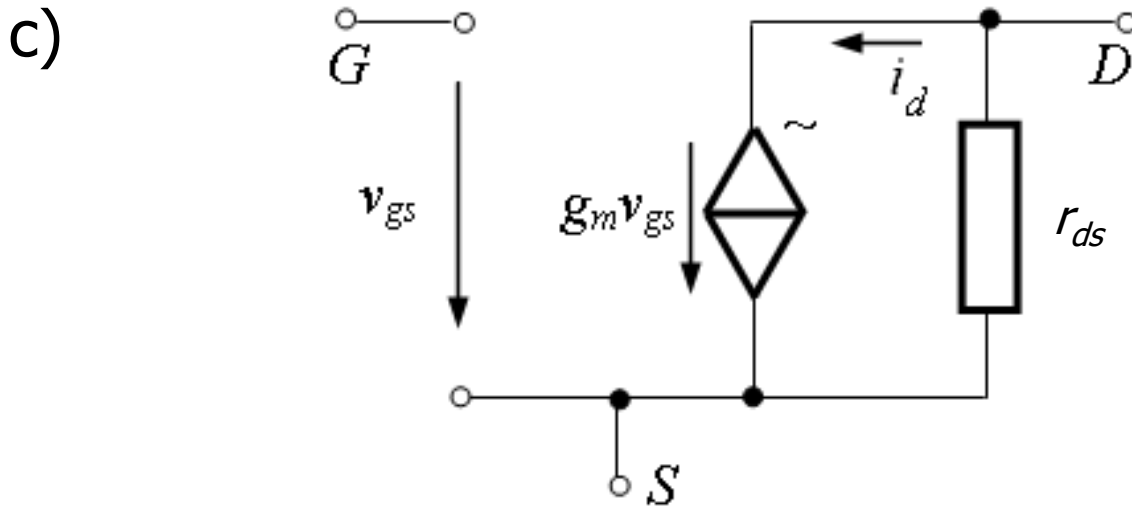
$$V_{GS} = V_P + \sqrt{\frac{I_D}{\frac{k}{2} \frac{W}{L}}} = 0,6 + \sqrt{\frac{0,1}{\frac{0,1}{2} \cdot 2}} = 1,6\text{V}$$

$$V_{DS} = 12 - 50 \cdot 0,1 + 1,6 - 0 = 8,6\text{V}$$

$$Q(0,1\text{mA}; 8,6\text{V})$$

# Determinare performanțe amplificator SC

## Problemă - continuare

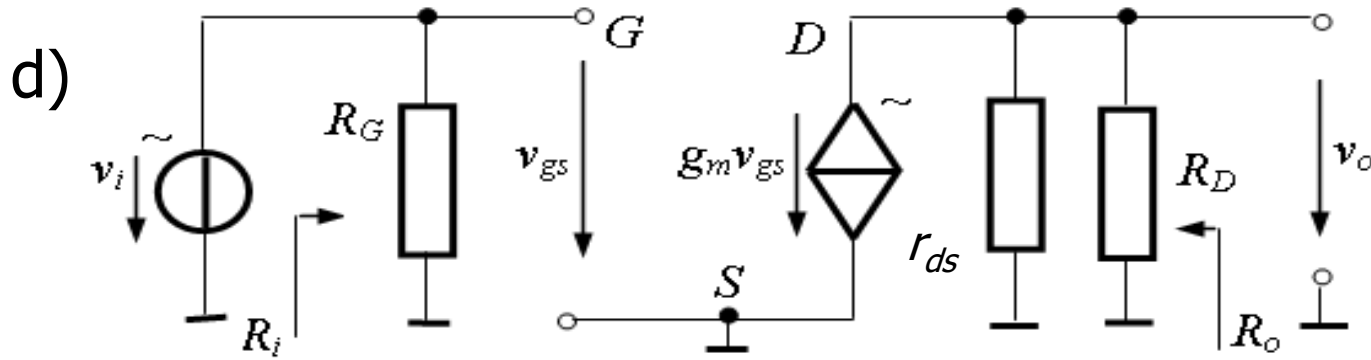


$$g_m = \sqrt{2K} \sqrt{\frac{W}{L}} \sqrt{I_D} = \sqrt{2 \cdot 0,1} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{0,1} = 0,2 \text{ mS}$$

$$r_{ds} = \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{0,1} = 1 \text{ M}\Omega$$

# Determinare performanțe amplificator SC

## Problemă - continuare



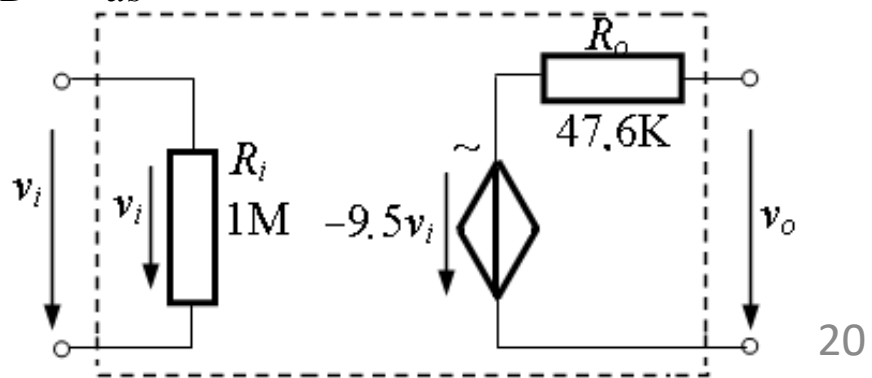
e)  $A_v = -g_m(R_D || r_{ds}) = -0,2 \cdot (50 || 1000) = -9,5$

sau  $A_v \approx -g_m R_D = -0,2 \cdot 50 = -10$

$R_i = R_G = 1 \text{ M}\Omega$

$R_o = R_D || r_{ds} = 47,6 \text{ k}\Omega$  sau  $R_o \approx R_D = 50 \text{ k}\Omega$

modelul echivalent al  
amplificatorului:



# Determinare performanțe amplificator SC

## Problemă - continuare

f)

$$v_G(t) = V_G + v_\lambda(t)$$

$$V_G = 0V$$

$$v_o(t) = A_v \cdot v_\lambda(t) = -9,5 v_\lambda(t),$$

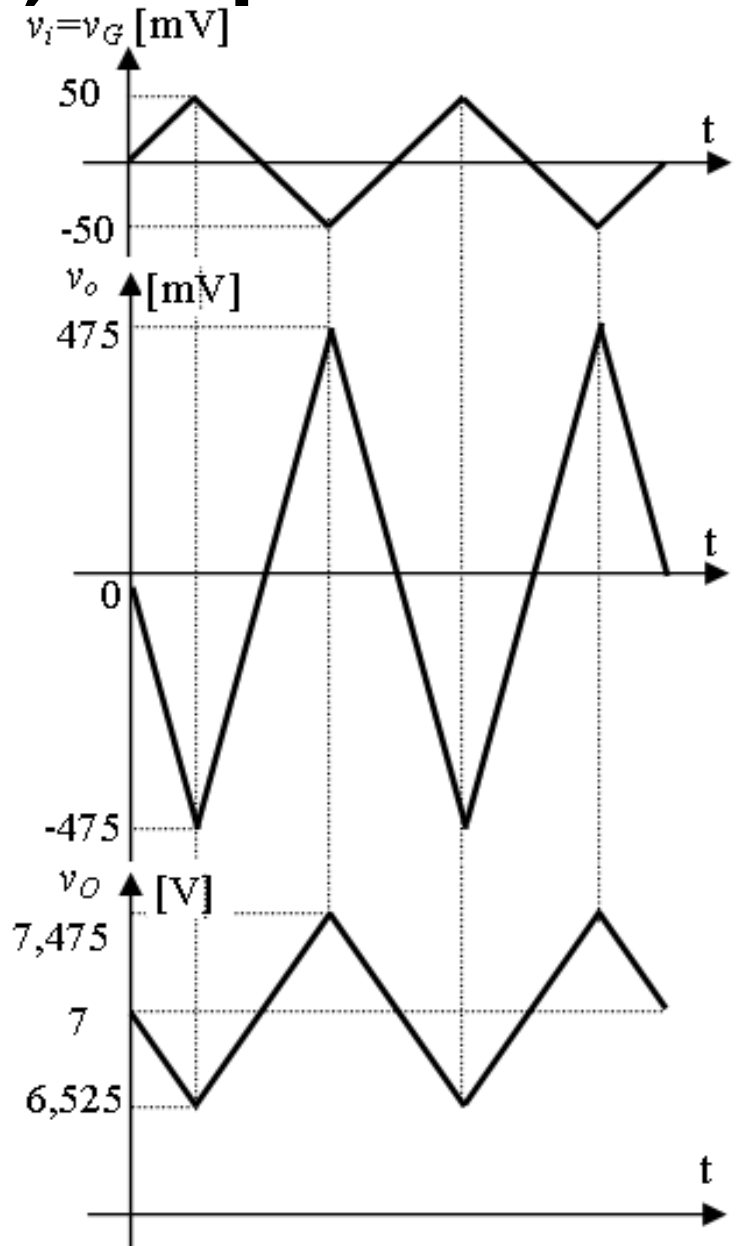
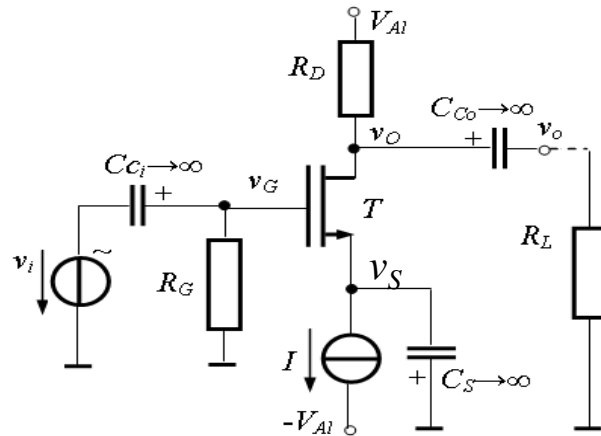
$$V_O = V_{AI} - R_D I = 12 - 50 \cdot 0,1 = 7V$$

$$\hat{V}_o = |A_v| \hat{V}_i = 9,5 \cdot 50 = 475 \text{ mV}$$

$$v_o(t) = V_O + v_o(t) = 7V - 9,5 v_i(t)$$

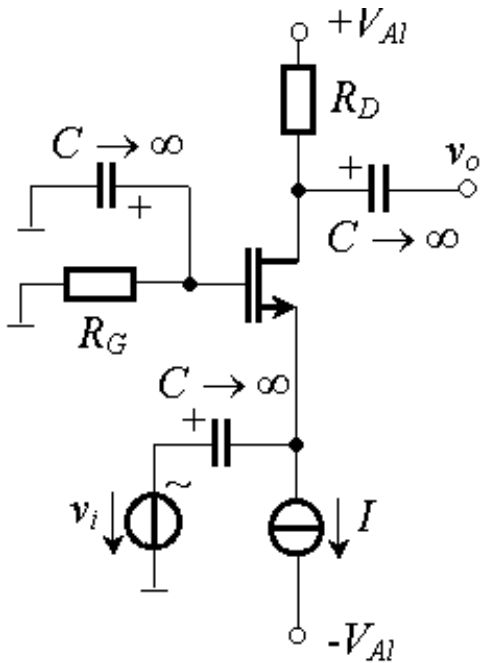
$$V_S = -V_{GS} + V_G = -1.6V; \quad v_s(t) = 0V$$

$$v_s(t) = V_S + v_s(t) = -1.6V$$





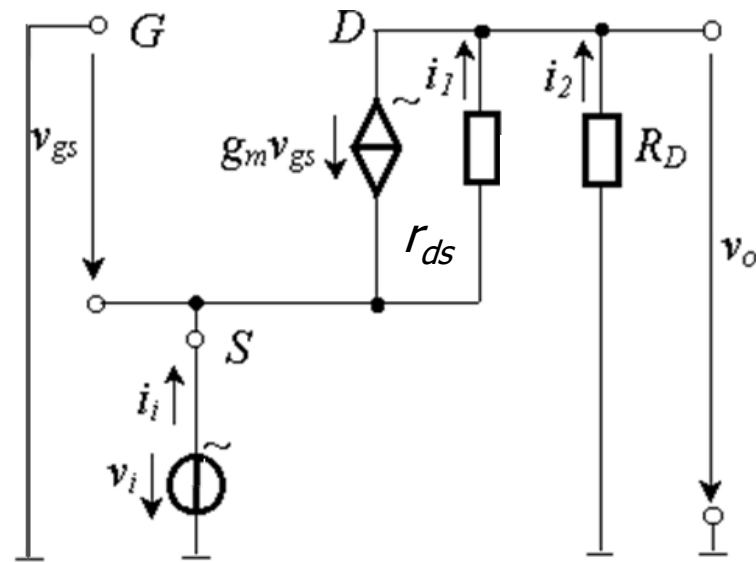
# Configurația (conexiunea) Grilă Comună



$$v_o = -R_D i_2; \quad v_i = -v_{gs}$$

$$R_D i_2 - i_1 r_{ds} + v_i = 0$$

$$i_1 = g_m v_{gs} - i_2$$



$$A_v = \frac{R_D (g_m r_{ds} + 1)}{R_D + r_{ds}}$$

Dacă  $g_m r_{ds} \gg 1$      $A_v \cong g_m \frac{R_D r_{ds}}{R_D + r_{ds}}$

$$A_v \cong g_m (R_D || r_{ds})$$

neglijăm  $r_{ds}$      $A_v \cong g_m R_D$

$$R_o = r_{ds} || R_D$$

$$i_i \cong -g_m v_{gs}$$

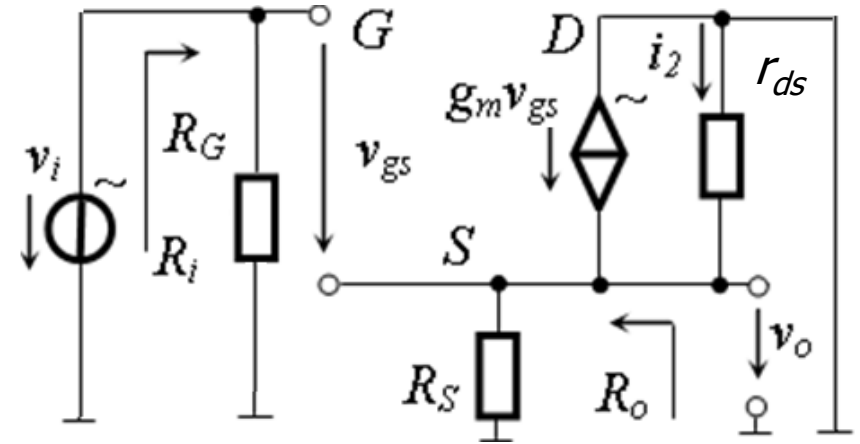
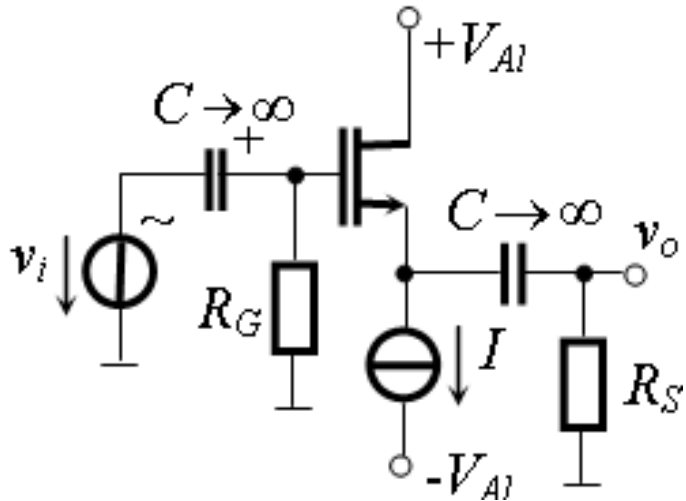
$$v_i = -v_{gs}$$

$$R_i = \frac{v_i}{i_i}$$

$$R_i \cong \frac{1}{g_m}$$



# Configurația (conexiunea) Drenă Comună



$$v_o = (R_S \parallel r_o) g_m v_{gs}; \quad v_i = v_{gs} + v_o$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(R_S \parallel r_o) g_m}{1 + (R_S \parallel r_o) g_m} \approx \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S}$$

Dacă  $g_m R_S \gg 1$   $A_v \approx 1$

Repetor (de tensiune) pe sursă

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_S \parallel r_s$$

$$r_s = \frac{-v_{gs}}{-g_m v_{gs} - v_{gs}/r_{ds}}$$

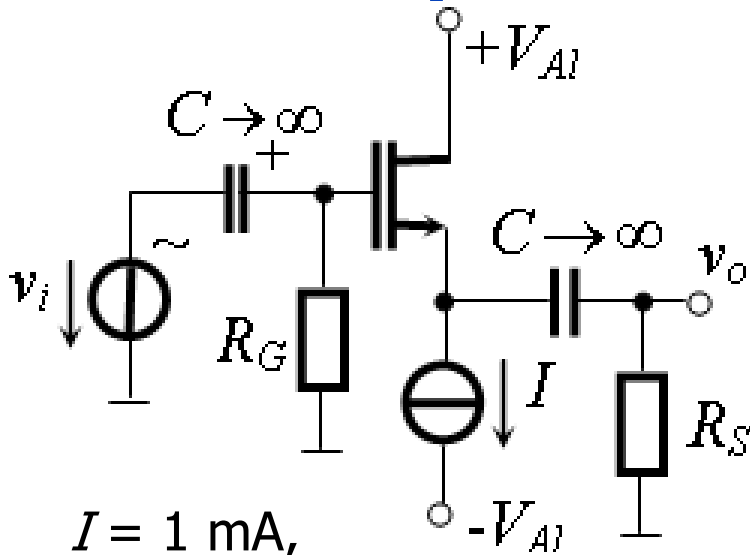
$$r_s = \frac{1}{g_m + 1/r_{ds}} = \frac{r_{ds} \frac{1}{g_m}}{r_{ds} + \frac{1}{g_m}} = r_{ds} \parallel \frac{1}{g_m}$$

$$R_o = R_S \parallel r_{ds} \parallel \frac{1}{g_m} \cong R_S \parallel \frac{1}{g_m}$$

$r_s$  rezistența văzută în Sursă cu  $v_i$  pasivizată

# Configurația (conexiunea) Drenă Comună

## Exemplu numeric



$$I = 1 \text{ mA,}$$

$$R_G = 2 \text{ M}\Omega$$

$$R_S = 5 \text{ k}\Omega$$

$$K = 0.1 \text{ mA/V}^2$$

$$W/L = 4$$

$$V_A = 100 \text{ V}$$

?  $A_v$   $R_{i_i}$  și  $R_o$

$$g_m = \sqrt{2k} \sqrt{\frac{W}{L}} \sqrt{I} = \sqrt{2 \cdot 0,1} \cdot \sqrt{4} \cdot \sqrt{1} = 0,89 \text{ mS}$$

$$r_{ds} = \frac{V_A}{I_D} = \frac{100}{1} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{1}{g_m} = \frac{1}{0,89} = 1,12 \text{ K}\Omega$$

$$A_v = \frac{(R_S || r_{ds}) g_m}{1 + (R_S || r_{ds}) g_m} = \frac{(5 || 1000) \cdot 0,89}{1 + (5 || 1000) \cdot 0,89} = 0,82$$

$$R_o = R_S || r_{ds} || \frac{1}{g_m} = 5 || 1000 || \frac{1}{0,89} = 0,92 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = R_G = 2 \text{ M}\Omega$$





# Ce am învățat azi

## Tranzistoare *MOS*

- Modele de semnal mic
  - funcționare la semnal mic
  - parametri de semnal mic
  - modele uzuale
- Amplificatoare fundamentale cu 1 tranzistor
  - configurații fundamentale – *SC, GC, DC*
  - analiza circuitelor amplificatoare
  - determinarea performanțelor amplificatorului –  $A_V, R_{II}, R_O$