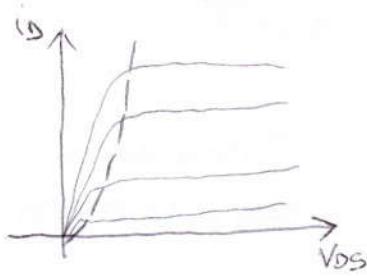


$$\text{TRIODO } I_D = K [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

$$\text{SAT } I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

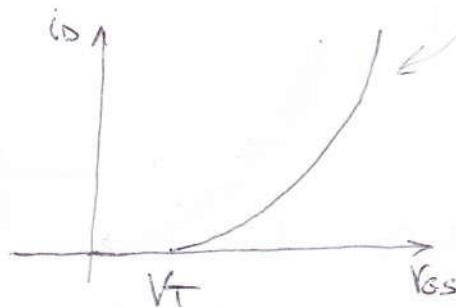
NMOS



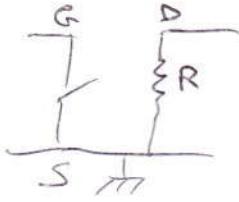
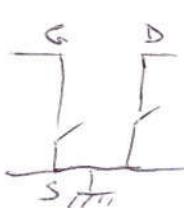
$$\text{SAT } \begin{cases} V_{GS} > V_T \\ V_{DS} \geq V_{GS} - V_T \end{cases}$$

$$\text{TRIODO } \begin{cases} V_{GS} > V_T \\ V_{DS} < V_{GS} - V_T \end{cases}$$

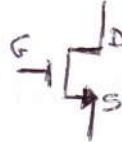
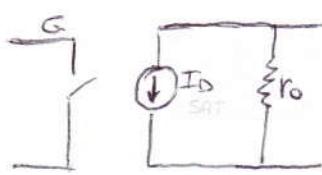
$$\text{INTER. } \{ V_{GS} < V_T \}$$



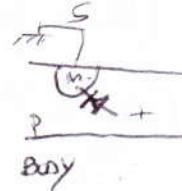
$$r_o = \left[ -\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right]^{-1} = [\lambda I_D]^{-1} = \frac{V_A}{I_D} \quad V_A = \frac{1}{\lambda}$$



$$R = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{V_{DS}}{K [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]} = \frac{1}{2K(V_{GS} - V_T)}$$



EFFETTO BODY



SI VERIFICA QUANDO  $V_S \neq V_B$   
DI SOLITO QUANDO HIO PIU'  
TRANSLATE SUA STESSA BASE  
IN TAL CASO IL BODY HA UNA  
TENSIONE NEGATIVA CHE AVITA LA  
CONDUZIONE DENTRO IL CANALE MA ALLARGA  
IL CANALE FAGLIANO SOGLIA (MOVIMENTO  
DI CORRENTE)

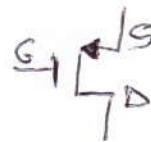
PMOS

$$\text{TRIODO } V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

$$I_D = K [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$\text{SAT } V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

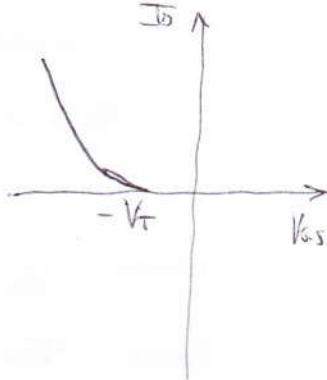
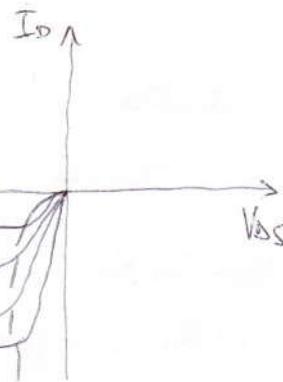
$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$



$$\mu_n = 3 \mu_p \quad \Rightarrow \quad 3 \left( \frac{W}{L} \right)_P = \left( \frac{W}{L} \right)_n$$

PER AVERE  
LO STESSO K

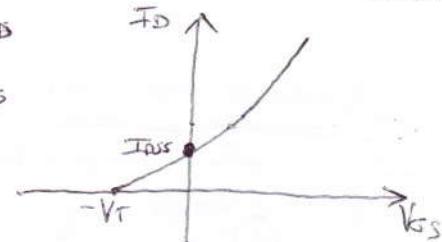
HO SEMPRE  
 $V_T, V_{GS}, V_{DS} < 0$



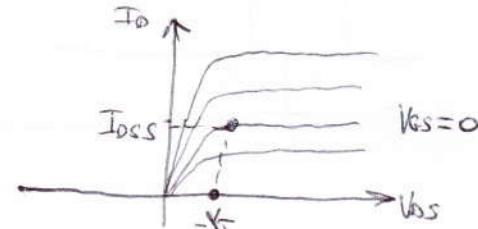
1

NMOS A SVIETAMENTO

CANALE  
GIÀ ESISTENTE

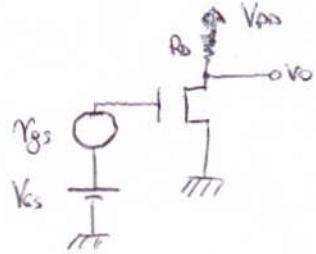


ONE  
NMOS  
HA CON  
 $V_T < 0$



$V_{GS} = 0$

## FET COME AMPLIFICATORE

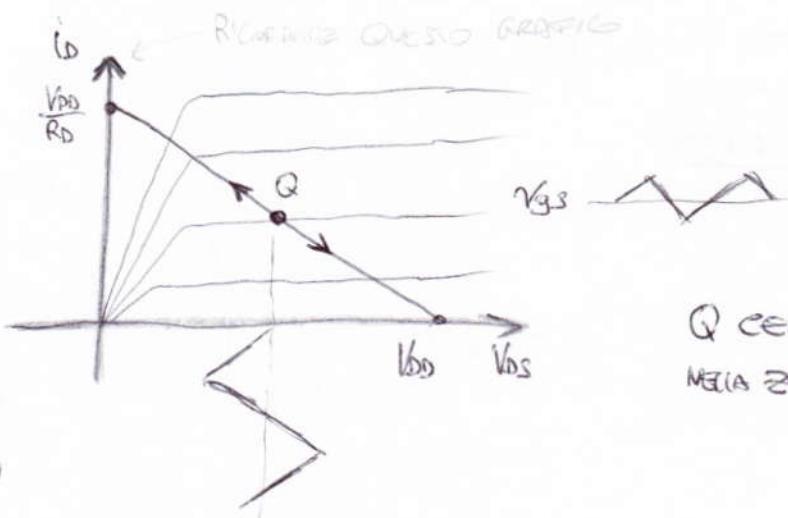


$$V_{DS} = I_D R_D + V_{DS}$$

EQ ALDO MAGNA

$$I_D = \frac{V_{DS}}{R_D} - \frac{V_{DS}}{R_D}$$

RESTA DI CARGA



Q CENTRATO  
NELLA ZONA DI SAT.

$\gamma_{GS} = 0$

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{DS} = I_D R_D + V_{DS}$$

$V_{GS} \neq 0$

$$V_{GS} = V_{GS} + \gamma_{GS}$$

$$\downarrow$$

$$i_D = K(V_{GS} + \gamma_{GS} - V_T)$$

$$= K(V_{GS} - V_T)^2 + 2K(V_{GS} - V_T)\gamma_{GS} + \underbrace{K\gamma_{GS}^2}_{\text{non curante}}$$

Vogliamo che

$$2K(V_{GS} - V_T)\gamma_{GS} \gg K\gamma_{GS}^2$$

$$\gamma_{GS} \ll 2(V_{GS} - V_T)$$

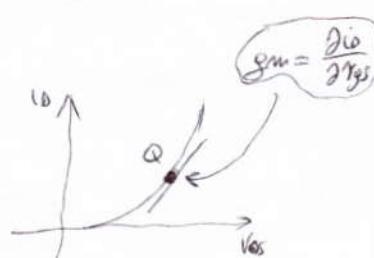
COND DI PICCOLO  
SEGNALE

$$i_D = I_D + i_d$$

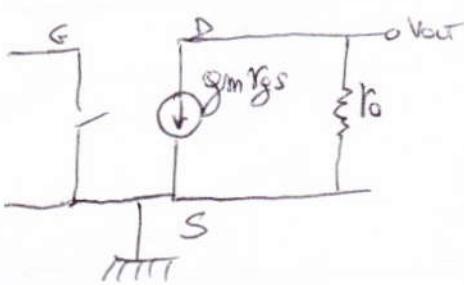
$$i_d = 2K(V_{GS} - V_T)\gamma_{GS}$$

$$g_m = \frac{i_d}{\gamma_{GS}} = 2K(V_{GS} - V_T)$$

OPPURE



CIRCUITO PER PICCOLI SEGNAGLI



GUADAGNO

$$V_{DS} = V_{DD} - i_D R_D$$

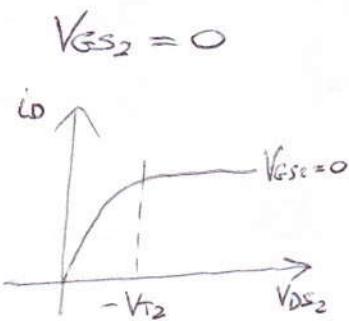
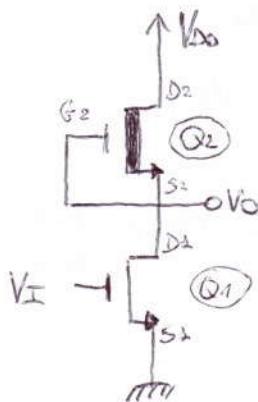
$$\text{MA } i_D = I_D + i_d$$

CONTINUA  $V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$

SEGNALE  $\Delta V_{DS} = -i_d R_D = -g_m \gamma_{GS} R_D$

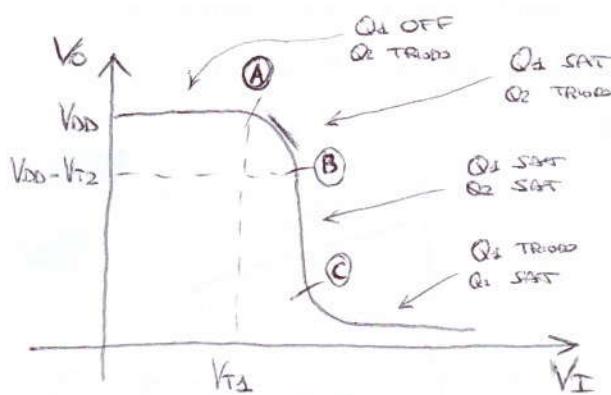
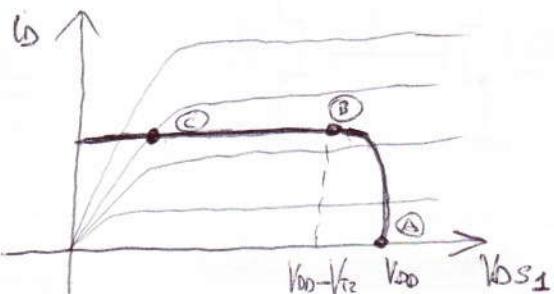
$$\Delta V = \frac{\Delta V_{DS}}{\gamma_{GS}} = -g_m R_D$$

## NMOS CON CARICO A SWIOTAMENTO

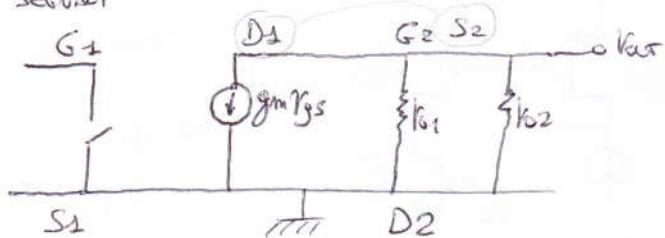


$$V_{DD} = V_{GS1} + V_{GS2}$$

$$\hookrightarrow V_{DS1} = V_{DD} - V_{DS2}$$



CIRCUITO ED  
PICCOLI SEGNAVI

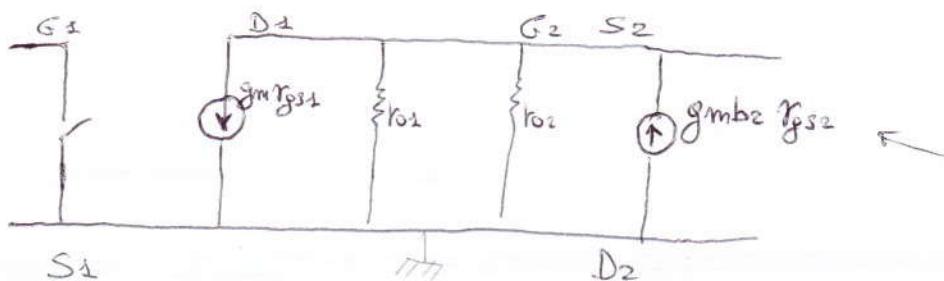


$$i = \omega^2 \cdot v$$

$$r_o = -g_m r_{ss} \cdot [r_{D1} // r_{D2}]$$

$$A_v = -g_m [r_{D1} // r_{D2}]$$

INCLUSIONE EFFETTO BODY



Può essere sostituito con

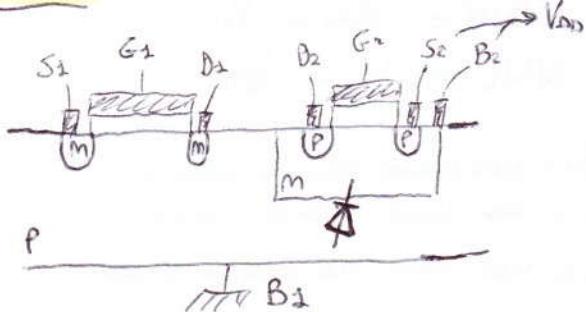
$$R = \frac{V}{I} = \frac{r_{ss2} r_{ss1}}{g_m b_1 g_m b_2} = \frac{1}{g_m b_2}$$

$$r_o = -g_m r_{ss1} \left[ \frac{1}{g_m b_2} // r_{D1} // r_{D2} \right]$$

$$\text{MA } \frac{1}{g_m b_2} \ll r_{D1} \approx r_{D2} \longrightarrow r_o = -\frac{g_m r_{ss1}}{g_m b_2}$$

$$A_v = -\frac{g_m 1}{g_m b_2} = -\frac{g_m 1}{g_m 2} \cdot \frac{1}{\gamma}$$

## CMOS



[2]

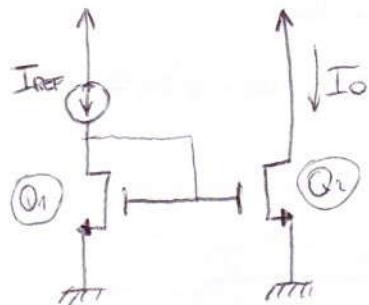
NO EFFETTO BODY PERCHÉ:

S2 e B2 allo stesso potere = VDD

S1 e B1 allo stesso potere = 0

B2 > B1  $\Rightarrow$  diodo non conduce  
perché inverso

## SPECCHIO DI CORRENTE



$$\left\{ \begin{array}{l} V_{DS1} = V_{DS2} = V_D \\ V_{GS1} = V_{GS2} = V_G \end{array} \right.$$

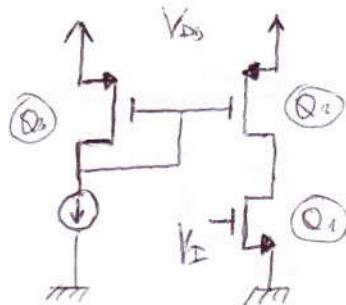
$$\frac{I_{REF}}{I_O} = \frac{K_1}{K_2}$$

$$I_{REF} = K_1 (V_{GS} - V_T)^2$$

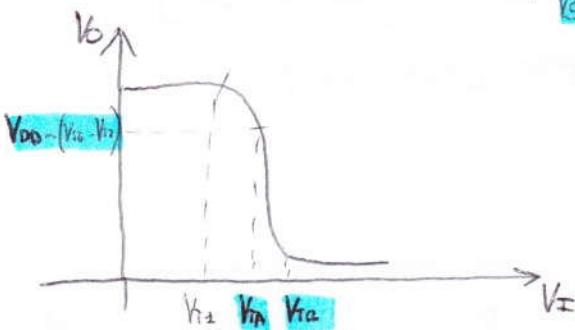
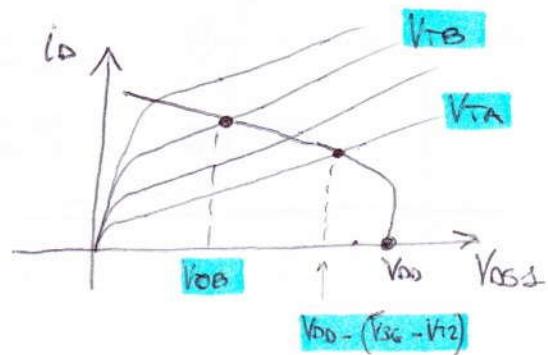
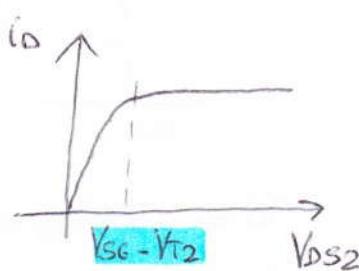
$$I_O = K_2 (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\rightarrow I_O = I_{REF} \frac{K_2}{K_1}$$

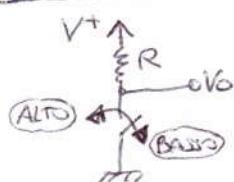
## AMPLIFICATORE CMOS



STESO RAGIONAMENTO DEI NMOS CON CARICO A SWINGAMENTO MA CAMBIANO ALCUNI PARAMETRI DATO CHE Q2 È UN PMOS



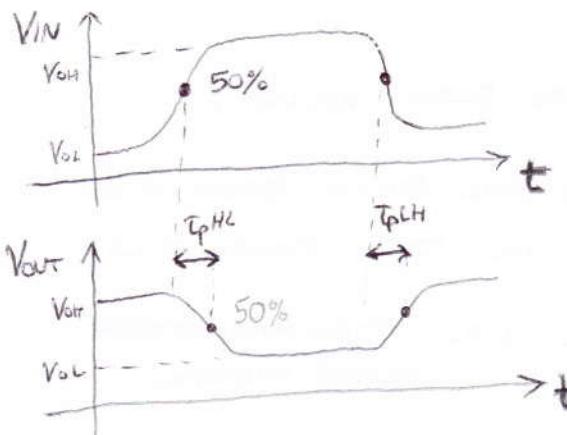
## INVERTER (IN GENERALE)



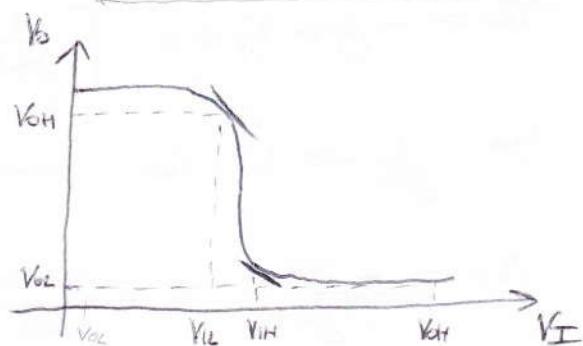
$$V^+ = 0 \rightarrow V_O = V^+$$

$$V^+ = 1 \rightarrow V_O = 0$$

## TENPI DI PROPAGAZIONE



## MARGINI DI RUNTORE



$$NHH = V_OH - V_OH$$

$$NNL = V_OH - V_OH$$

$V_OH$  = MIN VALORE ALTO IN USCITA

$V_OH$  = MAX VALORE BASSO IN USCITA

$VIL$  = MAX VALORE PER INCREMENTO BASSO

$VIH$  = MIN VALORE PER INCREMENTO ALTO

## POTENZA DISSIPATA

$$\text{INBI } P = V \cdot I$$

$$P_{\text{DISS}} = P_{\text{STAT}} + P_{\text{DINAMICA}}$$

$P_{\text{DINAM}}$

$$V_{\text{out}} = 0 \rightarrow V_{\text{out}} = 1$$

$$E_{\text{Supply}} = \int V_{\text{cc}} \cdot i \, dt = V_{\text{cc}} \int i \, dt = V_{\text{cc}} \cdot Q \stackrel{Q=VC}{=} V_{\text{cc}}^2 C$$

$$E_{\text{diss}_R} = \frac{1}{2} V_{\text{cc}} C$$

$$E_{\text{cavolo}} = \frac{1}{2} V_{\text{cc}} C$$

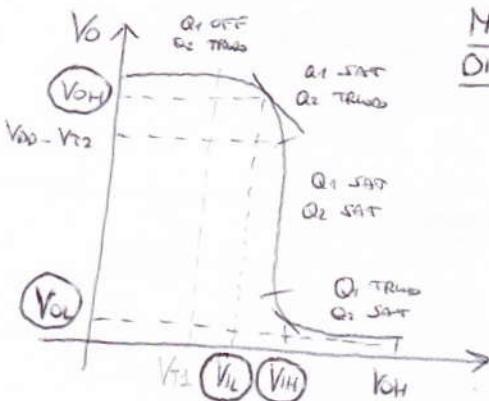
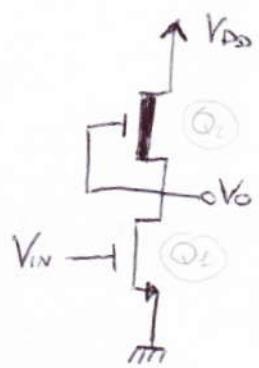
$$V_{\text{out}} = 1 \rightarrow V_{\text{out}} = 0$$

$$E_{\text{diss}_R R_{\text{v}}} = \frac{1}{2} V_{\text{cc}} C$$

$$Q=VC$$

$$P_{\text{diss}} = P V_{\text{cc}}^2 C$$

## INVERTER NMOS CON CARICO A SWINGAMENTO



MARGINI DI FUORIUSCITA

$$V_{OH} = V_{DD}$$

$$|VOL| \quad Q_1 \text{ TRAVO} \quad Q_2 \text{ SAT}$$

$$ID_1 = ID_2$$

$$K_1 [2(V_{DD} - V_{T2}) V_{DS2} - V_{DS2}^2] = K_2 (V_{DS2} - V_{T2})^2$$

$$* K_1 [2(V_{IN} - V_{T1}) V_{DS1} - V_{DS1}^2] = K_2 + |V_{T2}|^2$$

$$\text{Se } V_{IN} = V_{OH} = V_{DD} \quad e \quad V_{out} = V_{OL}$$

$$(V_{OL}) = \frac{|V_{T2}|^2}{KR 2 (V_{in} - V_{T1})}$$

$|V_{IH}|$  STEDE condizione di  $V_{OL}$

$$\frac{\partial V_0}{\partial V_I} \neq 1 \text{ si impone} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_0}{\partial V_I} = -1 \\ V_{IN} = V_{IH} \end{array} \right.$$

OTTENGO

$$(V_{IH}) = V_{T1} + \frac{2|V_{T2}|^2}{\sqrt{3} KR}$$

$|V_{IL}|$   $Q_1 \text{ SAT} \quad Q_2 \text{ TRAVO}$

$$K_2 (V_{DS1} - V_{T2})^2 = K_2 [2(V_{DS1} - V_{T2}) V_{DS2} - V_{DS2}^2]$$

$$K_1 (V_{IN} - V_{T1})^2 = K_2 [2(-V_{T1}) V_{DS2} - V_{DS2}^2]$$

$$\frac{\partial V_0}{\partial V_I} \neq 1 \text{ si impone} \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_0}{\partial V_I} = -1 \\ V_{IN} = V_{IL} \end{array} \right.$$

$$(V_{IL}) = V_{T1} + \frac{V_{T2}}{KR}$$

3

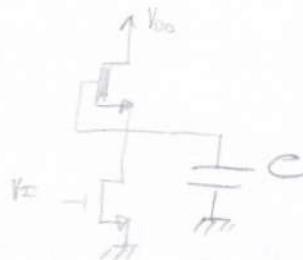
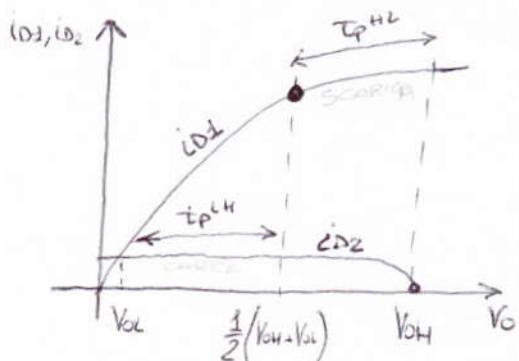
## POTENZA DISSIPATA

STATICA  $P_{\text{diss}}^{(1)} = 0$

DINAMICA

$$P_{\text{diss}}^{(2)} = V_{DD} \cdot I_2 = V_{DD} \cdot K_2 (V_{GS2} - V_{T2}) = V_{DD} \cdot K_2 / V_{T2}$$

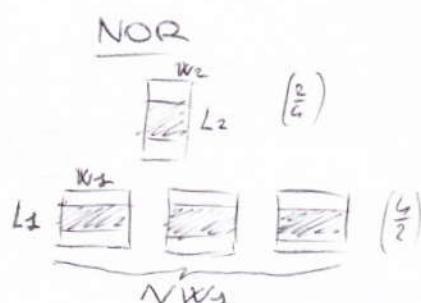
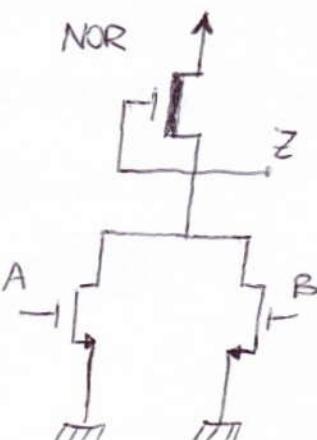
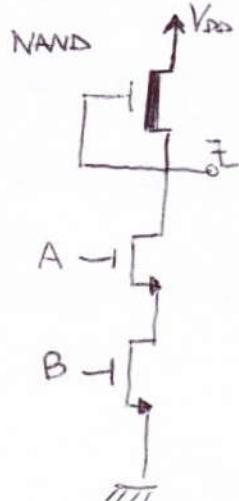
## TEMPI DI PROPAGAZIONE



$$t_p^{HL} = \frac{C [V_{DD} - \frac{1}{2}(V_{GS2} + V_{DD})]}{I_2} = \frac{C (V_{DD} - V_{GS2})}{2K_2(V_{GS2} - V_{T2})^2} = \frac{C (V_{DD} - V_{GS2})}{2K_2 V_{T2}^2}$$

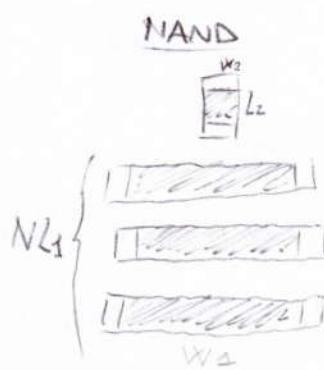
$$t_p^{LH} = \frac{C [\frac{1}{2}(V_{GS2} + V_{DD}) - V_{OL}]}{I_2} = \frac{C (V_{DD} - V_{GS2})}{2K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2} = \frac{C (V_{DD} - V_{GS2})}{2K_2 V_{T2}^2}$$

## PORTE LOGICHE NMOS E DIMENSIONAMENTO



A	B	Z
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

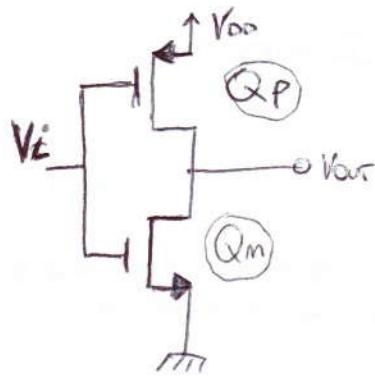
A	B	Z
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



per avere  $K_R$  uguale  
• quello della NOR  
 $\frac{W_2 \text{ NAND}}{NL_1} \cdot \frac{L_2}{W_2} = \frac{W_1 \text{ NOR}}{L_2} \cdot \frac{L_2}{W_2}$

$$W_1 \text{ NAND} = NW_2 \text{ NOR}$$

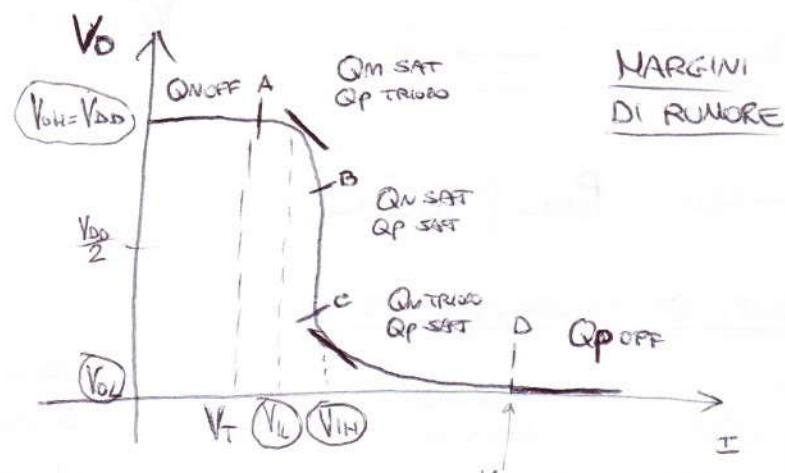
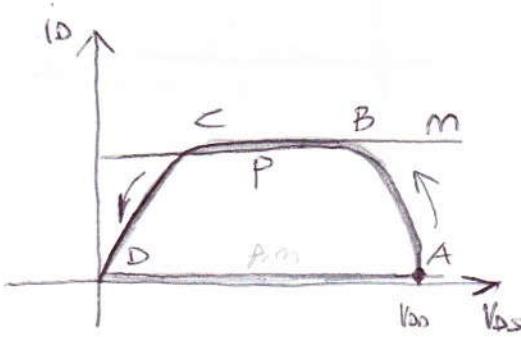
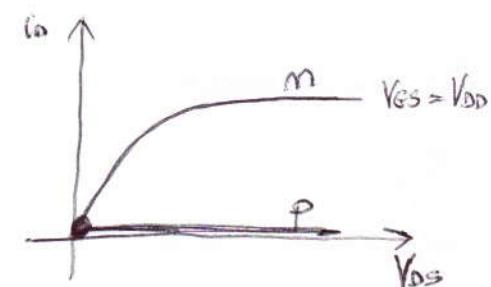
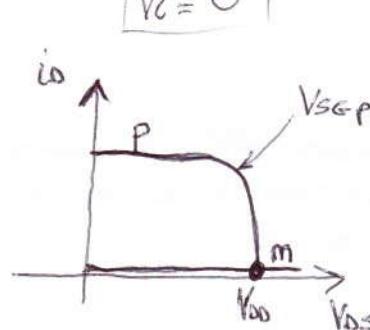
## INVERTER CMOS



$$V_{GSm} = V_i$$

$$V_{GSp} = V_i - V_{DD}$$

$$\boxed{V_i = V_{DD}}$$



$$BC \text{ IN } \frac{V_{DD}}{2} \Leftrightarrow K_p = K_m$$

$$\boxed{V_{IH}} = V_{DD}$$

$$\boxed{V_{IL}} = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_m = i_{Dp} \quad K_m = K_p = K \\ V_{Im} = V_{Ip} = V_T \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{GSm} = V_i \quad V_{GSm} = V_{out} \\ -V_{GSp} = V_{DD} - V_i \quad -V_{GSp} = V_{DD} - V_{out} \end{array} \right.$$

$\boxed{V_{IL}}$  Qm SATURATO Qp TRIODO

$$K(V_{GSm} - V_T)^2 = K[2(V_{GSp} - V_T)V_{GSp} - V_{GSp}^2]$$

$$(V_i - V_T)^2 = 2(V_{DD} - V_i - V_T)(V_{DD} - V_{Im}) - (V_{DD} - V_{Il})^2$$

$$\frac{\partial V_o}{\partial V_i} = -1 \quad V_i = V_{IL} \quad \frac{\partial V_o}{\partial V_i} = -1$$

$$\text{OTTENGO } \boxed{V_{IL}} = \frac{3V_{DD} + 2V_T}{8}$$

$$NML = V_{IL} - V_{OL} = \frac{3V_{DD} + 2V_T}{8}$$

4

$\boxed{V_{IH}}$  Qm TRIODO  
Qp SATURATO

PER SIMMETRIA  
Posso dire che  
 $NML = NMH$

OPPURE

$$K[2(V_{GSm} - V_T)V_{GSm} - V_{GSm}^2]$$

$$K(V_{GSp} - V_T)^2$$

STESO PROCEDIMENTO DI PRIMA  
con  $V_i = V_{IH}$  TROVO

$$\boxed{V_{IH}} = \frac{5V_{DD} - 2V_T}{8} \quad NMH = V_{IH} - V_{IL}$$

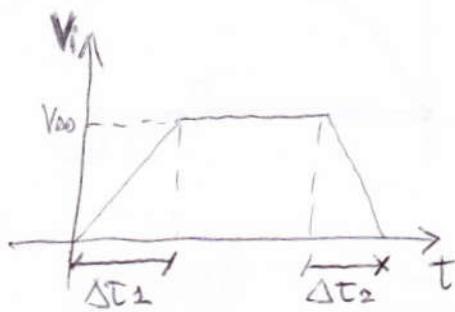
$$\text{STATICA} \quad P_{\text{diss}}^{(0)} = P_{\text{diss}}^{(1)} = 0$$

### POTENZA DISSIPATA

PERCHÉ COME ABBIANO VISTO NEL GRAPPI PRECEDENTI  $I_0 - V_{DS}$ ,  $I = 0$

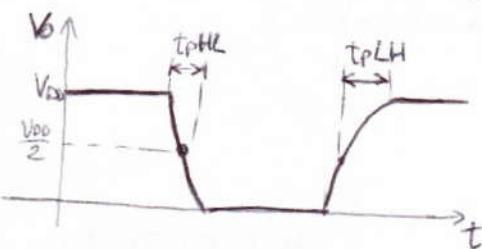
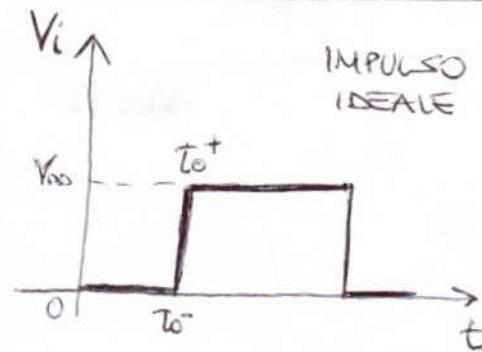
$$\text{DUNQUE } P = V \cdot I = 0$$

### DINAMICA



$$\text{QUINDI } P_{\text{diss}} = P V_{DD}^2 C$$

### TEMPI DI PROPAGAZIONE



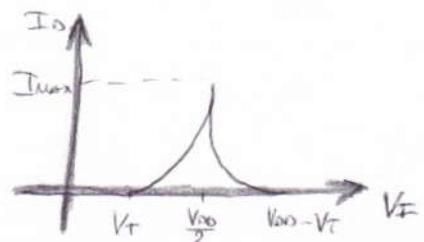
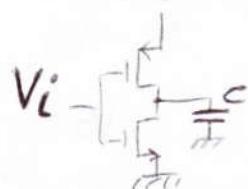
- SCARICA DA  $V_{DD}$  A  $V_{DD} - V_T$   
QN SAT QP OFF

$$I_{DN} = K_m (V_{DD} - V_T)^2$$

$$t_{PHL1} = \frac{C [V_{DD} - (V_{DD} - V_T)]}{K_m (V_{DD} - V_T)^2}$$

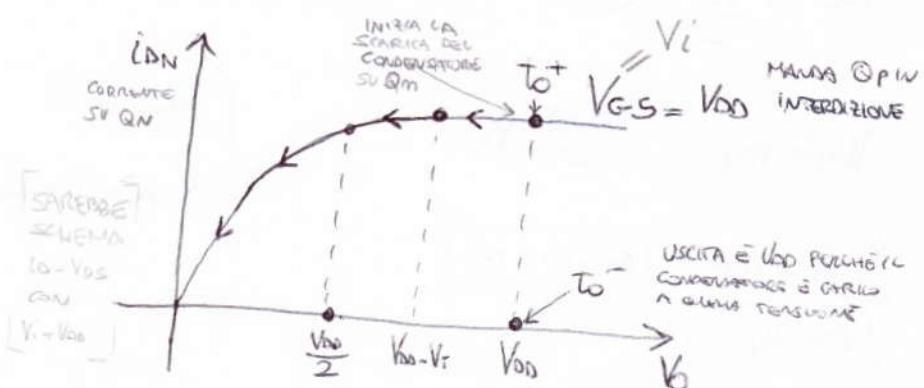
$$= \frac{C V_T}{K_m (V_{DD} - V_T)^2}$$

CURRENTI CHE CIRCOLANO SONO ENTRambi IN DIREZIONE DI  
SIGNIFICATIVA QUANDO È PRESENTE LA CAPACITÀ  
IN USCITA



RICORDARE QUESTO GRAPPO

IPOTIZZANDO CIRCUITO SIMMETRICO  $t_{PHL}^{HL} = t_{PL}^{LH}$   
DUNQUE CONSIDERO SOLO IL TRAFO  
 $H \rightarrow L$  DI  $V_0$



- SCARICA DA  $V_{DD} - V_T$  A  $\frac{V_{DD}}{2}$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{DN} = -C \frac{dV_0}{dt} \\ I_{DN} = K_m [2(V_{DD} - V_T)V_0 - V_0^2] \end{array} \right.$$

USUAGLIANDO E RIDUCENDO L'EQ. DIFF.  
OTTOGO

$$t_{PHL2} = \frac{C}{2K_m(V_{DD} - V_T)} \ln \left( \frac{3V_{DD} - 4V_T}{V_{DD}} \right)$$

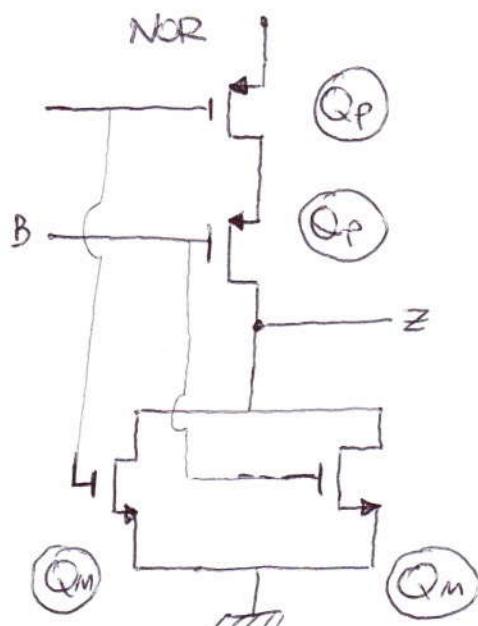
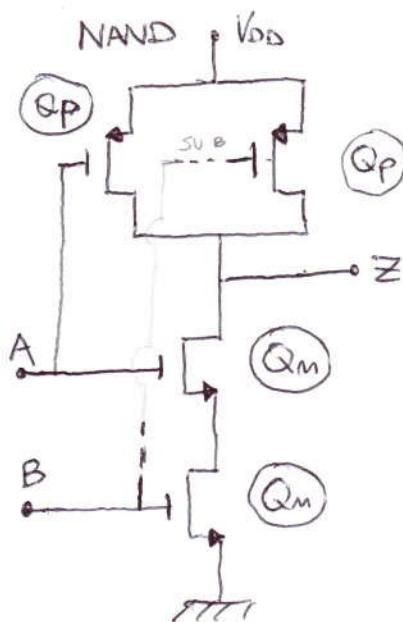
$$T_{PHL} = T_{PHL1} + T_{PHL2}$$

Se  $K \approx 0,2 \cdot V_{DD}$   $\Rightarrow T_{PHL} \approx \frac{0,8C}{Km V_{DD}}$

### • CARICA DI C

PER SIMMETRIA HIO E' CHE  $T_{PLH} = \frac{0,8C}{Kp V_{DD}}$

### PORTE LOGICHE CMOS E DIMENSIONAMENTO



RICORDARE CHE  
PNOS FUNZIONA  
AL CONTRARIO  
 $1 \rightarrow$  APERTO  
 $0 \rightarrow$  CHIUSO

QUINDI DATO CHE OGNI  
COPIA QP-QM HA LO STESSO  
INGRESSO, SE È ACCESO  
NMOS È SPENTO IL PMOS  
E VICEVERSA

CASO PEGGIOR QUANDO HO  
1 SOLO INGRESSO BAIXO E  
QUINDI LA CAPACITÀ DI  
USCITA SI CARICA DA  
UN SOLO PMOS ON

VALE

$$K_p eq = K_p$$

$$K_n eq = \frac{K_n}{N}$$

CASO PEGGIORE QUANDO HO  
1 SOLO INGRESSO ALTO E  
QUINDI LA CAPACITÀ DIVENTA  
SI SCARICA SU UN SOLO  
NMOS ON

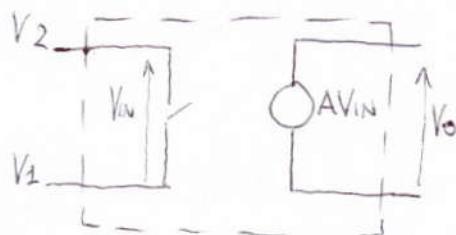
VALE

$$K_p eq = \frac{K_p}{N}$$

$$K_n eq = K_n$$



## AMPLIFICATORI OPERAZIONALI IDEALI



$$V_o = A(V_2 - V_1) \quad A = \infty \quad \text{Bomba infinita}$$

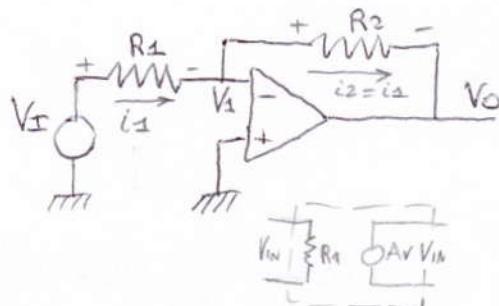
$$R_{in} = \infty \quad R_o = 0 \quad \text{Reiez. modo comune}$$

(no corrente in ingresso)

(se  $V_2 = V_1 \rightarrow V_o = 0$ )

SEMPRE SATURO DATO CHE  $A = \infty \Rightarrow$  INTRODURRE CONTROAZIONE

### CONF. INVERTENTE



$$V_o = A^{\infty} (V_2 - V_1)$$

$$V_2 = V_1 = 0$$

C.C.V.  
NON VALE IN  
SATURAZIONE

EO ALTA  
MAGNA

$$V_o + V_{R2} + V_1 = 0$$

$$V_o = -V_{R2} = \text{CADUTA DI POTENZIALE SU } R_2$$

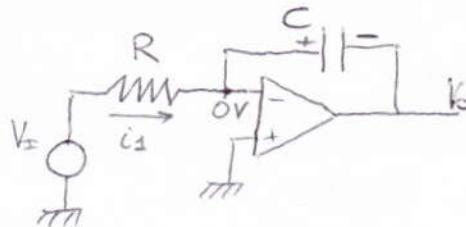
$$i_1 = \frac{V_I}{R_1} = i_2 \rightarrow$$

$$V_o = -i_2 R_2 = -V_I \frac{R_2}{R_1}$$

$$(Av) = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$(R_{in}) = R_1 \quad (R_o) = 0$$

### INTEGRATORE (PASSEGASSO CON $\omega_H = 0$ )



$$Av = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{1}{j\omega C} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

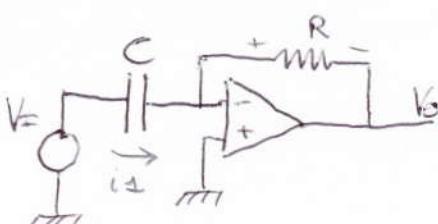
$$i_1 = \frac{V_I}{R}$$

$$(Vo) = -V_C = -\frac{Q}{C} = V_{oc} - \frac{1}{C} \int i dt = V_{oc} - \frac{1}{RC} \int V_{in} = V_{oc} - \frac{V_{in}}{RC} t$$

N.B.

PER  $CV=0$ ,  $A<\infty$  (cioè in continua funziona come ad avvolo aperto FD) INSERITO UNA RESISTENZA IN PARALLELO AL CAPACITORE

### DERIVATORE (PASSEGASSO CON $\omega_L = \infty$ )



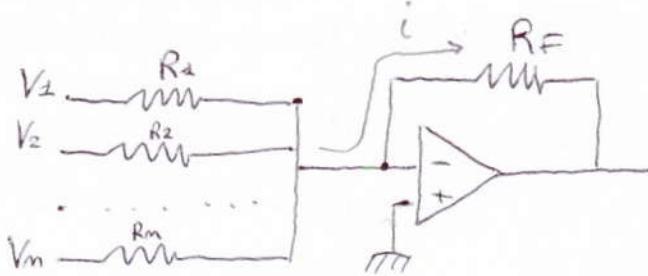
$$Av = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = -j\omega RC$$

$$i_1 = C \frac{dV_I}{dt}$$

$$(Vo) = -i_1 R = -RC \frac{dV_I}{dt}$$

N.B. PER EVITARE CHE FUNZIONI COME UN AMPLIFICATORE DI RUORO INSERIRE UNA RESISTENZA IN SERIE DOPPIO CONDENSATORE

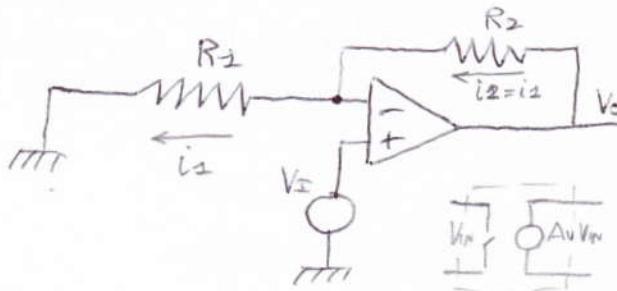
## SOMMATORI



$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n}$$

$$\textcircled{16} \quad V_o = -i R_F = -\left(V_1 \frac{R_F}{R_1} + V_2 \frac{R_F}{R_2} + \dots + V_n \frac{R_F}{R_n}\right)$$

## CONF. NON INVERTENTE

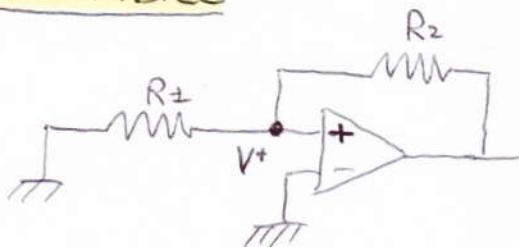


$$i_1 = \frac{V_i}{R_1} = i_2 = i \rightarrow$$

$$V_o = i R_1 + i R_2 = i (R_1 + R_2) = \frac{V_i}{R_1} (R_1 + R_2)$$

$$\textcircled{A_v} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \textcircled{R_{in}} = \infty \quad \textcircled{R_{out}} = 0$$

## BISTABILE



È UN AMPLIF. OPERAZ. CONTROACCIONATO POSITIVAMENTE

HA DUE STATI STABILI

IN  $T=0$  IPOTIZZO  $V^+=0$

SE INCREMENTO POSITIVAMENTE  $V^+$   $\rightarrow V_o$  AUMENTA  $\Leftrightarrow$  UNA FRAZIONE  $\beta = \frac{R_1}{R_1+R_2}$

È RIPORTATA SU  $V^+$   $\rightarrow$  PROCESSO SI RIPETE FINO A QUANDO C'è OPERAZ.

VA IN SATURAZIONE

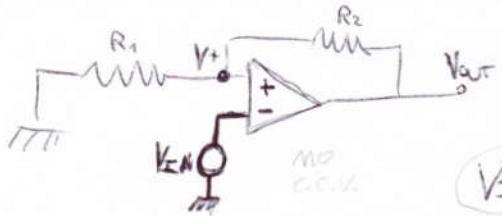
$$L^+ = V_o$$

$\rightarrow$

$$V^+ = \beta L^+ = L^+ \frac{R_1}{R_1+R_2}$$

SE INCREMENTO NEGATIVAMENTE  $V^+$  HO LA STESSA COSA MA CON  $L^- = V_o$   $V^+ = \beta L^-$

## BISTABILE INVERTENTE



SE AVEVO INCREMENTATO POSITIVAMENTE

$$V_0 = L^+$$

$$V^+ = \beta L^+$$

$V_{IN}$  AUMENTA

QUANDO  $V_{IN} < V^+$  NON SUCCIDE NULCA

QUANDO  $V_{IN} \geq V^+$  OVVERO  $V_{IN} \geq \beta L^+$  ALLORA IN INGRESSO ALL'OPERAZ.

HO UNA TENSIONE NEGATIVA CHE VIENE AMPLIFICATA E RIPORTATA IN INGRESSO FINO A QUANDO L'OPERAZIONE VA IN SATURAZIONE  $L^- = V_0$

SE AVEVO INCREMENTATO NEGATIVAMENTE O APRIRO DAL PROCESSO PRECEDENTE

$$V_0 = L^- \quad V^+ = \beta L^-$$

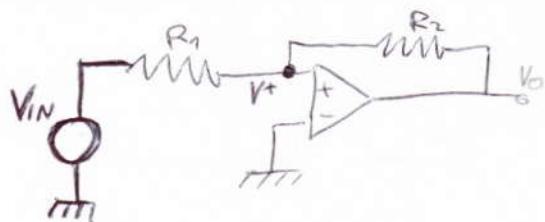
$V_{IN}$  DIMINUISCE

QUANDO  $V_{IN} > V^+$  NON SUCCIDE NULCA

QUANDO  $V_{IN} \leq V^+$  OVVERO  $V_{IN} \leq \beta L^-$  ALLORA IN INGRESSO ALL'OPERAZ.

HO UNA TENSIONE POSITIVA CHE VIENE AMPLIFICATA E RIPORTATA IN INGRESSO FINO A QUANDO L'OPERAZIONE VA IN SATURAZIONE  $L^+ = V_0$

## BISTABILE NON INVERTENTE



SE AVEVO INCREMENTATO POSITIVAMENTE

$$V_0 = L^+$$

$$V^+ = V_{IN} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



QUANDO  $V_{IN} > V_{TL}$  NON SUCCIDE NULCA PERCHÉ  $V^+$  RIMANE POSITIVA

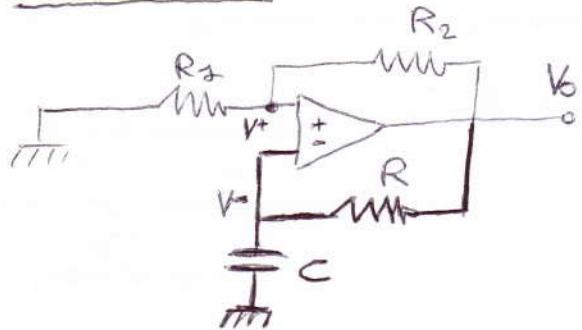
QUANDO  $V_{IN} \leq V_{TL}$   $V^+$  DIVENTA NEGATIVA QUANDO PER IL SISTEMA PERTURBANTE HO IL CASO DI STABILITÀ

$$V_{TL} = -L^+ \frac{R_1}{R_2}$$

N.B! TROVATO SISTEMI CON

$V_0 = L^+ \quad V^+ = 0$  NEGL'ES. SOPRA

## ASTABILE



OTTENUTO COLLEGANDO UN CIRCUITO RC

IN CONTROAZIONE AL BISTABILE

SE AUSVO INCREMENTATO POSITIVAMENTE

$$V_o = L^+ \quad V^+ = \beta L^+$$

IL CONDENSATORE SI CARICA VERSO  $L^+$

ATTRaverso la resistenza R quindi la

Tensione su  $V^-$  (che è quella del condensatore)

CRESCЕ ESPONENTIALMENTE CON COSTANTE

DI TEMPO  $\tau = RC$

QUANDO  $V^- = \beta L^+$  IL BISTABILE COMMUTA

E QUNDI AVEREMO

$$V_o = L^- \rightarrow V^+ = \beta L^- \quad V^- = \beta L^+$$

COND CARICO A

A QUESTO PUNTO IL CONDENSATORE INIZIA

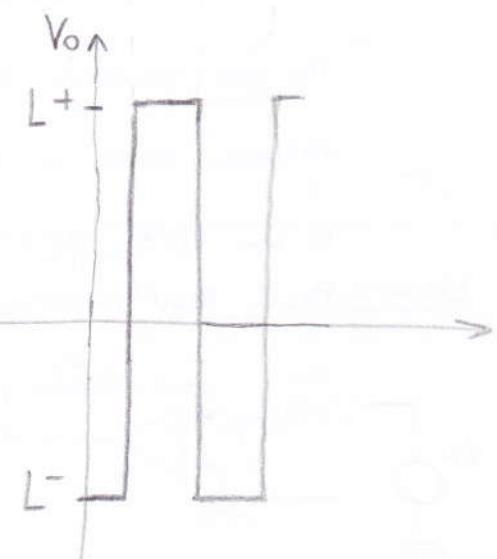
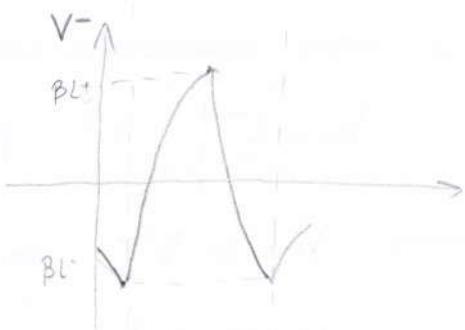
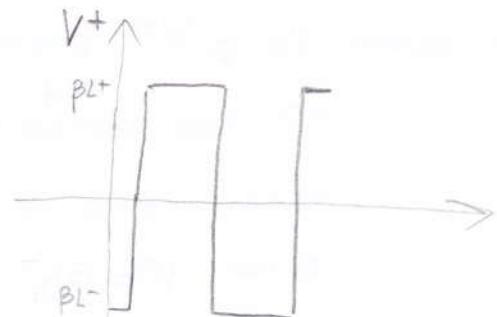
A SCARICARSI VERSO  $L^-$  E LA TENSIONE

SU  $V^-$  DECRESCHE ESPONENTIALMENTE CON

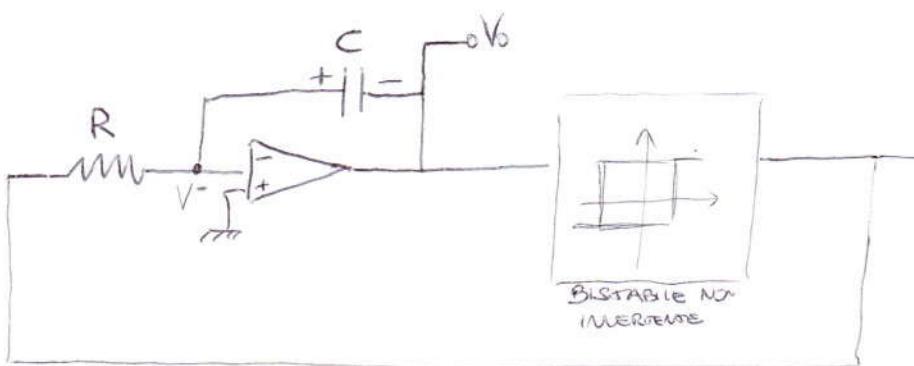
COSTANTE DI TEMPO  $\tau = RC$

QUANDO  $V^- = \beta L^-$  IL BISTABILE COMMUTA

DI NUOVO E RESTA ALLA SITUAZIONE DI PRIMA



## ASTABILE PER GENERAZIONE ONDE TRIANGOLARI



OTTENUTO COLLEGANDO UN INTEGRATORE IN CONNESSIONE AD UN BISTABILE NON INVERTENTE

N.B. IN PRATICA IL BISTABILE HA IN USCITA UN'ONDA QUADRATA (CHE HA COME VALORI  $L^+$  E  $L^-$ ) CHE VIENE RICONTROLLATA COME INGRESSO INVERTENTE ALL'INTEGRATORE CHE DARA' IN USCITA  $V_2$  UN'ONDA TRIANGOLARE

SE AVETTO INCREMENTATO POSITIVAMENTE

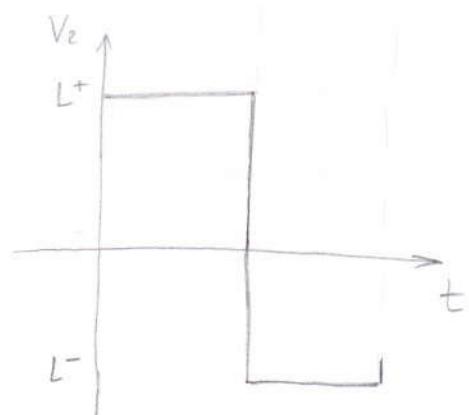
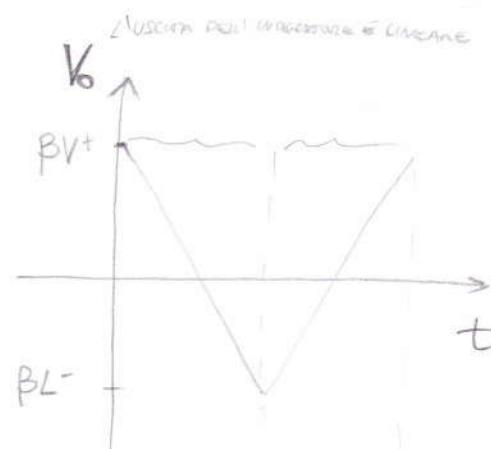
$$V_2 = L^+$$

IL CONDENSATORE SI CARICA VERSO  $L^+$   
ATTRAVERSO LA RESISTENZA  $R$  QUINDI  
LA TENSIONE DI USCITA DECRESCHE  
LINEARMENTE

QUANDO  $V_2 = BL^-$  IL BISTABILE

COMMUTA E QUINDI AVEREMO

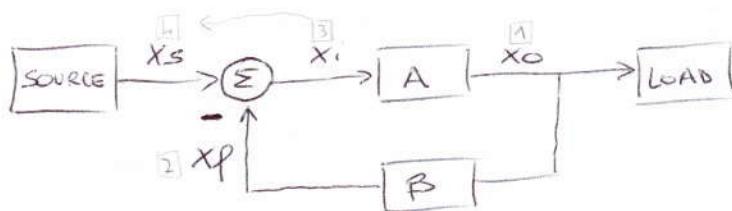
$$V_2 = L^-$$





## PRODOTTO BANDA - GUADAGNO COSTANTE (AMPL. CONTROEAR.)

SCHEMA E GUADAGNO CONTROEAR. NEUTRALE



$$AF = \frac{x_o}{x_s} = \frac{Ax_i}{x_i(1+Af)} = \frac{A}{1+A\beta}$$

AUMENTO DELLA LATENZA DI BANDA

$$\frac{\text{GUADAGNO}}{\text{ANALOGO}} \quad A(s) = \frac{Am}{1 + \frac{s}{\omega_{WH}}} \quad \frac{\text{GUADAGNO}}{\text{NOMINALE}}$$

PASSA BASSI CON TAGLIO \$\omega\_{WH}\$

GUADAGNO IN  
CONTROEAR.

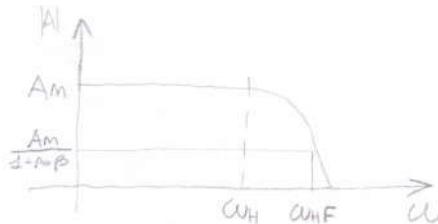
$$Af(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta} = \frac{Am / 1 + Am\beta}{1 + s / \omega_{WH} (1 + Am\beta)}$$

DIMINUITO RISPETTO AD \$A(s)\$

\$\omega\_{WH}\$ AUMENTATO  
RISPETTO A \$\omega\_{WH}\$

PRODOTTO  
BANDA-GUADAGNO  
COSTANTE

$$AF \cdot \omega_{WH} = \frac{Am}{1 + Am\beta} \cdot \omega_{WH} (1 + Am\beta) = Am \omega_{WH}$$



## CONFIGURAZIONI DI BASE

INGRESSO SE DEVO ANNULLARE UNA

- TENSIONE, MI INSERISCO IN SERIE
- CORRENTE,  $\parallel$  IN PARALLELO

USCITA SE DEVO OTTENERE UNA :

- TENSIONE, MI INSERISCO IN PARALLELO
- CORRENTE, MI INSERISCO IN SERIE

AMPL. TENSIONE = SERIE-PARALLELO

MODIFICA IMPEDENZE

AMPL. CORRENTE = PARALLELO-SERIE

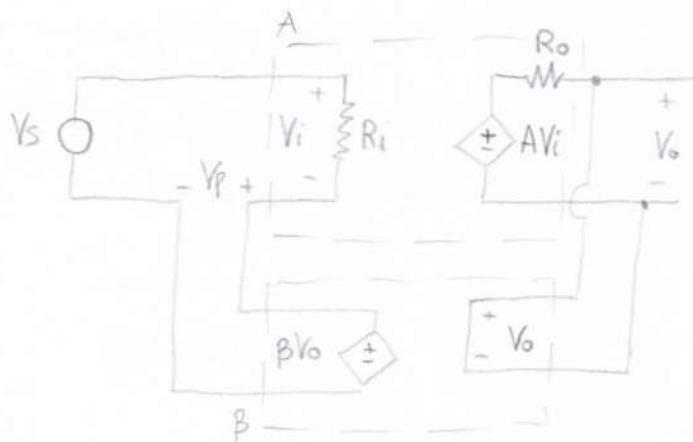
PARALLELO  $\rightarrow$  RIDUCE

AMPL. TRACONDUTTANZA = SERIE-SERIE (CORRENTE / TENSIONE)

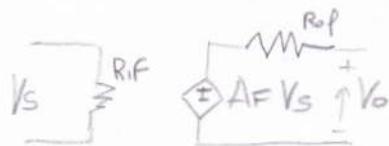
SERIE  $\rightarrow$  AUMENTA

AMPL. TRANSRESISTENZA = PARALLELO-PARALLELO

## AMPLIFICATORE DI TENSIONE



CIRCUITO EQUIVALENTE



$$A_F = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 + AB} \frac{AV_i}{V_i(1+AB)}$$

- $V_s = V_i \cdot B V_o = V_i + AB V_i = V_i (1 + AB)$

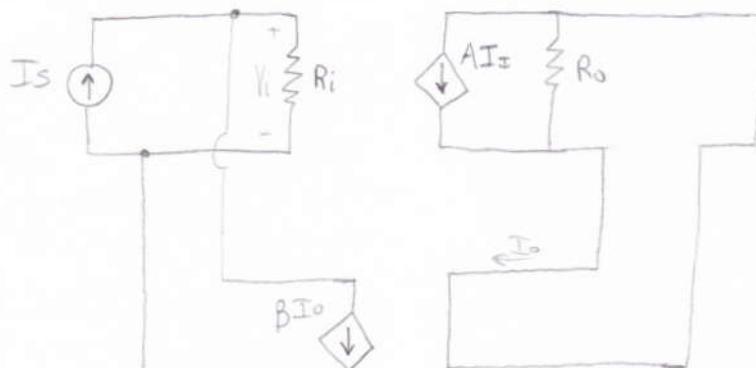
- $\begin{cases} V_s = 0 \\ V_o = V_x \end{cases} \quad V_i = -B V_x \quad V_x = I_x R_o - AB V_x$

$$V_x (1 + AB) = I_x R_o \quad I_x = \frac{V_x (1 + AB)}{R_o} \rightarrow$$

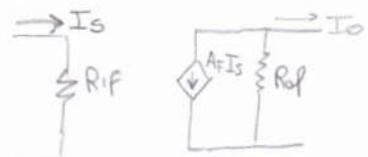
$$R_{IF} = \frac{V_s}{I_x} = \frac{V_s}{\frac{V_x}{R_o}} = R_i \frac{V_s}{V_x} = R_i (1 + AB)$$

$$R_{OF} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{R_o}{1 + AB}$$

## AMPLIFICATORE DI CORRENTE



CIRCUITO EQUIVALENTE



$$A_F = \frac{I_o}{I_s} = \frac{A}{1 + AB}$$

$$R_{IF} = \frac{R_i}{1 + AB}$$

$$R_{OF} = R_o (1 + AB)$$

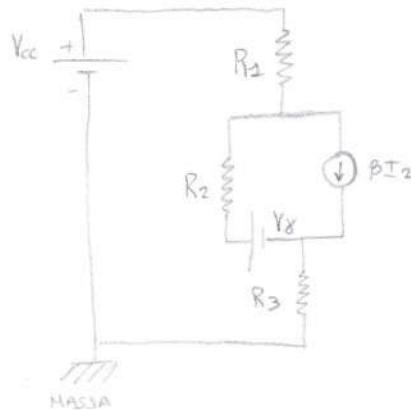
ESERCIZI

SVOLTI

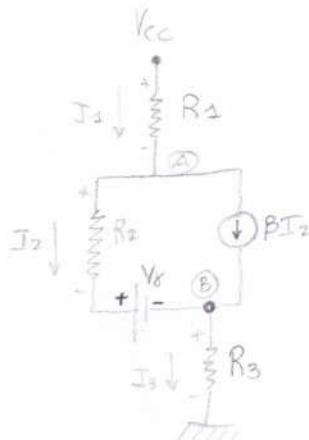
IN AULA

## ESERCIZIO 17

RICHIAMI SUI CIRCUITI LINEARI



=



TROVARE LE VARIE CORRENTI / DIFF. DI POTENZIALE

[NB] PICCOLI SUGGERIMENTI: NEVA EQ. DELLA MAGNA, SE POSSIBILE SVILUPPO IL GENERATORE DI CORRENTE

$$V_{CC} = I_1 R_1 + I_2 R_2 + V_x + I_3 R_3$$

A QUESTO PUNTO HA 1 EQ. E 3 INCONITE

GRANDE A KIRKHOFF POSSO INTRODURRE ALTRE 2 EQUATIONI

(Nodo A)  $I_1 - I_2 - BI_2 = 0$

POSITIVE ENTRANTI

NEGATIVE USCIENTI

LA RISERVO

Ⓐ  $I_1 = I_2 + BI_2 = I_2 (\beta + 1)$

Ⓑ  $I_2 (\beta + 1) = I_3$

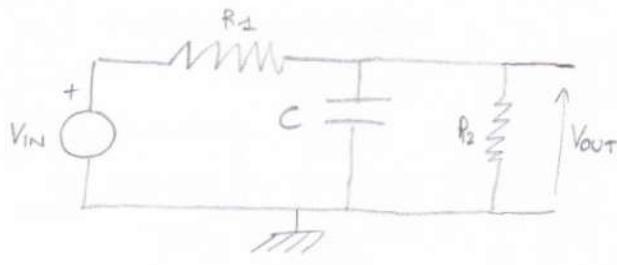
UNA VOLTA TROVATE LE CORRENTI POSSO CALCOLARE ANCHE

$$V_B = I_3 R_3$$

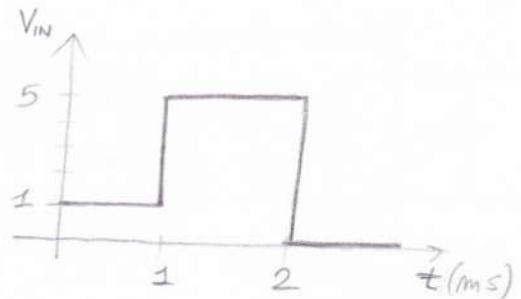
$$V_A = I_2 R_2$$

# ✓ Esercizio

METODO ASINTOTICO CONDENSATORE



$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 1 \text{ k}\Omega \quad C = 10 \text{ nF}$$



TROVARE  $V_{out}$

DATO CHE  $C$  ED  $R_2$  STANNO IN PARALLELO, LA TENSIONE AI CAPI DI  $R_2$  ( $V_{out}$ ) È LA STESSA CHE STA AI CAPI DI  $C$

RISOLVO CON IL METODO ASINTOTICO

$$V_c(t) = V(\infty) - [V(\infty) - V(t_0)] e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$$

$$\cdot V_c(1 \text{ ms}) = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ V}$$

PARTITURE  
DI TENSIONE

TERMINATO IL TRANSITURLO  
DOPO IL PRIMO GRADINO



$$\cdot V(\infty) = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 5 \cdot 0,5 = 2,5 \text{ V}$$

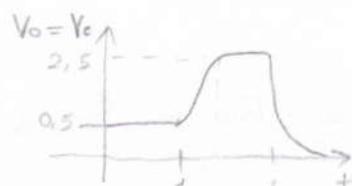
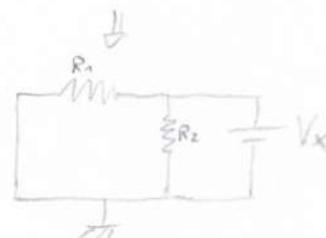
$$\cdot \tau = C R_{eq}$$

$$= C \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) =$$

$$= 10 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} =$$

$$= 10 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 10^3 = 5 \mu\text{s}$$

Reg. LA CALCOLA SOSTITUENDO A  $C$  UN GENERATORE  
DI TENSIONE  $V_x$  E STACCATO (CONTINUAMENTE)  
I GENERATORI INDIPENDENTI



$$V_c(t) = 2,5 - 2e^{-\frac{t-10^{-3}}{5 \cdot 10^{-9}}}$$

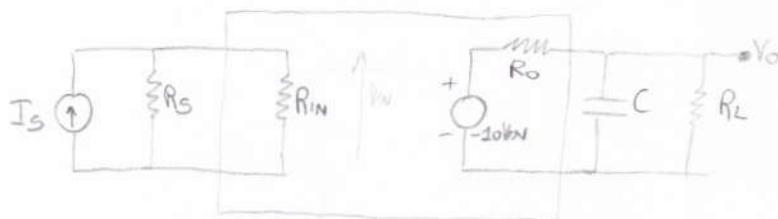
$$R_{eq} = R_1 // R_2$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

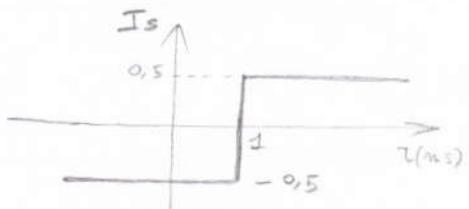
$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

1

# ✓ Esercizio RETE A 2 PORTE



GENERATORE DI CORRENTE



$$R_S = 3 \text{ k}\Omega \quad R_{IN} = 2 \text{ k}\Omega \quad R_O = 5 \text{ k}\Omega \quad R_L = 10 \text{ k}\Omega \quad C = 3 \mu\text{F}$$

Trovare  $V_C$  nel Tempo

$$V_C(t) = V(\infty) - [V(\infty) - V(t_0^-)] e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$$

NB! IN SCATICA C È UN CIRCUITO APERTO PERCHÉ È CARICO/STABILITO E NON PASSA CORRENTE

$$V_C(t_0^-) = \text{c'è LA STESSA TENSIONE CHE STA SU } R_L \text{ (perché in parallelo)}$$

$$= -10 V_{IN} \frac{R_L}{R_O + R_L} =$$

$$= -10 \left( I_S \cdot \frac{R_S R_{IN}}{R_S + R_{IN}} \right) \cdot \frac{R_L}{R_O + R_L} =$$

$$= +4 \text{ V}$$

PARTITORE DI CORRENTE

$$I_{IN} = \frac{R_S}{R_S + R_{IN}}$$

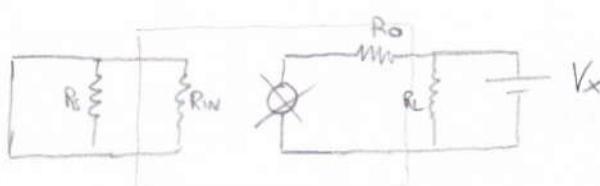
DA UNA CORRENTE!

(quale deve moltiplicare per  $R_{IN}$ )

$$V_C(\infty) = -4 \text{ V} \quad (\text{OTTENUTO COME PRIMA MA CON } I_S = 0,5 \text{ E NON } -0,5)$$

$$\gamma = C R_{eq}$$

dove  $R_{eq}$  è il calcolo sostituendo al condensatore una GENERATORE DI TENSIONE  $V_x$  e ANNULLANDO GLI EFFETTI DEI GENERATORI INDIVIDUALI



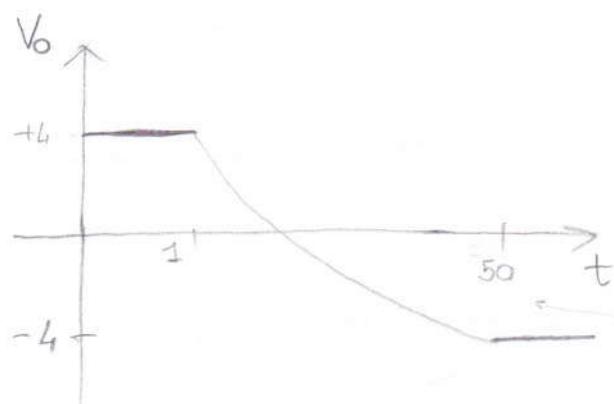
HO ELIMINATO ANCHE IL CEN

CORRELTAMENTE PERCHÉ  $V_{IN} = 0$

$$\text{È FACILE VEDERE CHE } R_{eq} = R_L // R_O$$

QUINDI

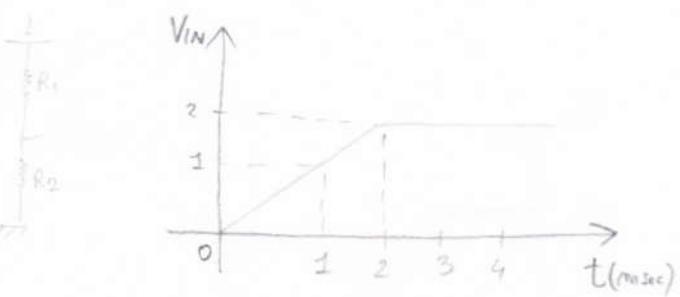
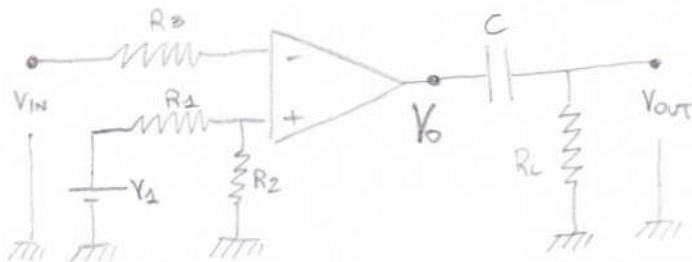
$$\tau = C \frac{R_L R_0}{R_L + R_0} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{50 \cdot 10^3}{15} = 10 \text{ ms}$$



INBI TEMPO PER CARICA/SCARICA  
DEL CONDENSATORE =  $5 \tau$

## ESERCIZIO AMPL. OPERAZ. IDEALE

Per il seguente circuito in presente in Vin, graficare l'andamento nel tempo delle tensione d'uscita Vout



$$R_1 = 1\text{ k}\Omega \quad R_2 = 1\text{ k}\Omega \quad R_3 = 2\text{ k}\Omega \quad V_1 = 2\text{ V} \quad C = 0,1 \mu\text{F} \quad R_L = 1\text{ k}\Omega \quad L^+ = |L^-| = 5\text{ V}$$

divido l'esercizio in due parti : da Vin a Vo e da Vo a Vout

### PRIMA PARTE

$$V^+ = V_1 \frac{R_2}{R_2 + R_1} = 2 \cdot \frac{1}{2} = 1\text{ V}$$

PARTIRE  
DI TEOREMA

$$V^- = V_{IN} - V_{R_3} \rightarrow$$

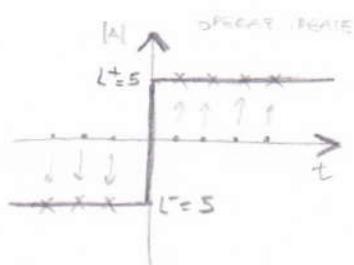
perché nell'ampl. operaz. ideale  
non entra corrente quindi non ha  
calore da potenziare su R3

DATO CHE HO UN AMPLIFICATORE OPERAZIONE IDEALE

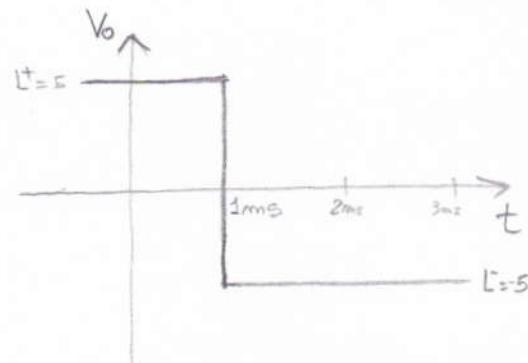
THE HA GUADAGNO INFINTO, IN USCITA AVRA' SEMPRE

$L^+$  OPPURE  $L^-$  IN BASE AL SENSO DELLA DIFFERENZA

TRA  $V^+$  E  $V^-$



$$\begin{aligned} t=0 &\rightarrow V^+ - V^- = 1\text{ V} \rightarrow L^+ \\ t=1 &\rightarrow V^+ - V^- = 0\text{ V} \rightarrow 0 \\ t>2 &\rightarrow V^+ - V^- < 0\text{ V} \rightarrow L^- \end{aligned}$$



### SECONDA PARTE

GUARDANDO LO SCHEMA DEL CIRCUITO TRA  $V_o$  E  $V_{OUT}$  MI RICORDA UN CIRCUITO PASSA-ALTO. PER ESSERNE SICURO VEDO COME SI CONVOLTA L'USCITA AL VARIARIE DELLA FREQUENZA UN'ALTRA

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad \begin{aligned} \omega = 0 &\rightarrow Z = \infty \quad \text{quando } C = \text{---} \\ \omega = \infty &\rightarrow Z = 0 \quad \text{quando } C = \text{---} \end{aligned}$$

COME HO APPIENA VERIFICATO, PASSANO SOLO LE ALTE FREQUENZE E NEL MIO CASO  
PASSA SOLO L'INVERSIONE DI TENSIONE (in  $t=1\text{ms}$ )

EQ ALLA  
NAGUA

$$V_{out} = V_0 - V_c$$

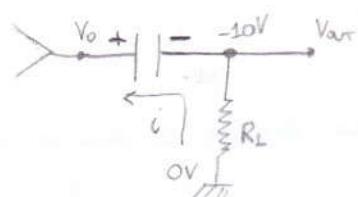
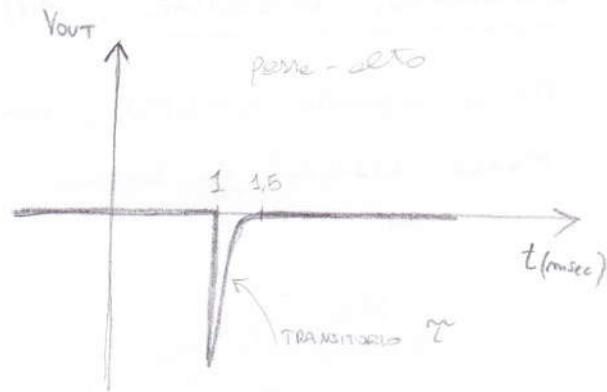
**NB!** CONSIDERO IL CONDENSATORE GIÀ CARICO  
VISTO CHE È RIMASTO SOLO UNA DIFF. DI POTENZIALE  
DI 5V AL TEMPO INFINTO

$$t \leq 1 \rightarrow V_{out} = 5 - 5 = 0V$$

$$t = 1+ \rightarrow V_{out} = -5 - 5 = -10V$$

appena c'è  
stato e'  
iniziano

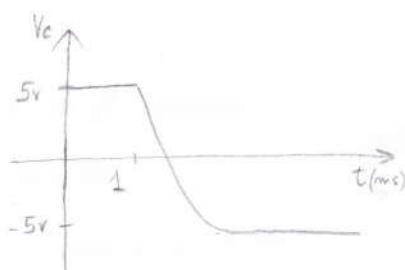
$t > 1^+$  A QUESTO PUNTO SUA RESISTENZA  $\frac{R_L}{C}$  C'È UNA  
DIFF. DI POTENZIALE  $\rightarrow$  E CORRE UNA CORRENTE  
DA  $V_{0+}$  A  $V_{0-}$ . IL CONDENSATORE VIENE  
SCARICATO OVEVA LA SUA TENSIONE VARIA IN modo  
ESPOVENTIALE



$$V_c = V(\infty) - [V(\infty) - V(t_0^-)] e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$$

$$V(\infty) = V_0 - V_{out} = -5 - 0 = -5V$$

$$V(t_0^-) = \dots = 5 - 0 = 5V$$



All'ARCO DEL GRADINO,  $V_c$  SI COMINCIA A SCARICARE  
E PASSA DA  $+5V$  A  $-5V$  QUINDI  $V_{out}$  PASSA DA  
 $-10$  A  $0$ .

**NB!** SE FACCI LA SOMMA PUNTO PER PUNTO TRA I GRATICOLI DI  
 $V_0$  E  $V_c$  OTTENGO QUESTO DI  $V_{out}$

QUANTO DURA IL TRANSITORIO?

$$\tau = R_{eq} \cdot C$$

SOLITO PROCEDIMENTO PER IL CALCOLO DI  $R_{eq}$



UNICA RESISTENZA È  $R_L$

$$\tau = R_L \cdot C$$

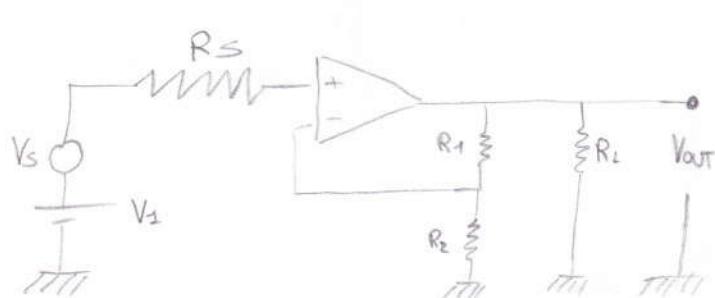
$$= 1 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}$$

$$= 0,1 \text{ ms}$$

# ESERCIZIO D'ESAME

17/07/2003

Per il seguente circuito, con  $V_s$  un segnale sinusoidale e  $V_1$  dc medio molto, calcolare la dinamica di ingresso dell'amplificatore operazionale della



$$R_s = 100 \Omega$$

$$V_1 = 1V$$

$$R_1 = 4k\Omega$$

OPERAZ IDEALE

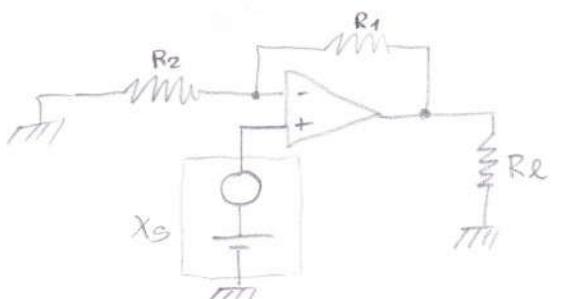
$$R_2 = 1k\Omega$$

$$A = \infty \quad R_{in} = 0$$

$$R_L = 10k\Omega$$

$$L^+ = L^- = 10V \quad R_{out} = \infty$$

POSso RIPIARE LO SCHEMA NEL SEGUENTE MODO



NON  
È UNA CONFIG INVERTENTE

ATTENZIONE

NON HO RIPORTATO  $R_s$  PERCHÉ NON HA NESSUN

EFFETTO: IN + HO  $R = \infty$ , QUINDI NON PASSA

CORRENTE ATTRAVERSO  $R_s$

$$Av = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_1 + V_s} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{4}{1} = 5$$

$$V_o = V_{in} \cdot Av = (V_1 + V_s) \cdot Av = V_{o1} + V_{os}$$

SAREBBERO  $V_s$  AMPLIFICATO  
e  
 $V_s$  AMPLIFICATO

- Conoscendo  $V_1$  e  $Av$  posso calcolare

$$V_{o1} = V_1 \cdot Av = 1 \cdot 5 = 5V$$

TNB  $V_{o1}$  È LA COMPARTE CONTINUA DI  $V_o$   
 $V_s$  È LA COMPARTE ALTERNANTE DI  $V_o$

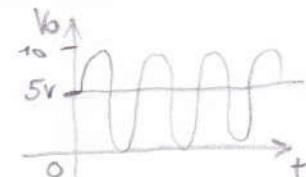
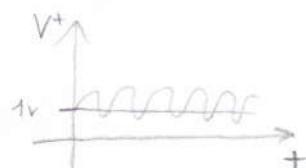
- non conosco  $V_s$  ma so che

$$L^+ \Rightarrow V_o = 10V$$

$$\rightarrow V_{os} = \frac{V_o - V_{o1}}{V_1} = \frac{10 - 5}{5} = 1V$$

- Conoscendo  $V_{os}$  e  $Av$  posso calcolare

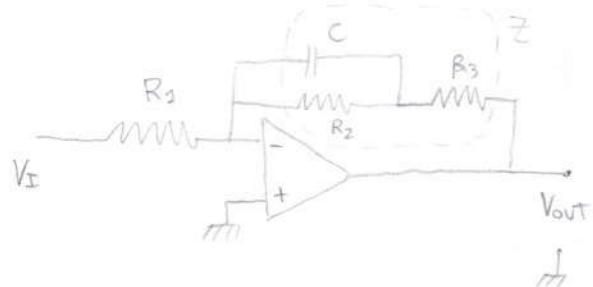
$$V_s = \frac{V_{os}}{Av} = \frac{1}{5} = 0.2V$$



# ESERCIZIO

AMPL. OPERAZ.

11/11/24



$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

AMPL. OP IDEALE

$$R_2 = 200 \text{ k}\Omega$$

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

$$C = 10 \mu\text{F}$$

$$\frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C}$$

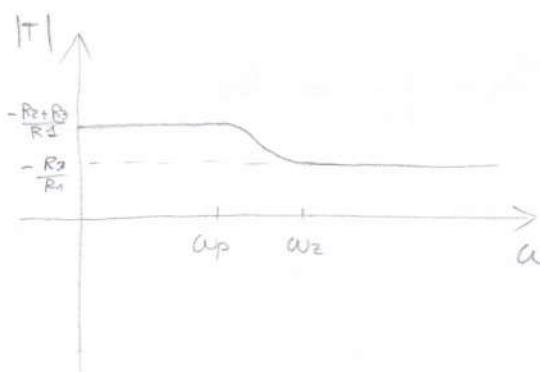
Trovare la funzione di Trasferimento

$$T(j\omega) = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = - \frac{Z}{R_1} \quad \text{dove} \quad Z = Z_{\parallel} + R_3 = R_2 \parallel C + R_3$$

QUINDI

$$T(j\omega) = - \frac{(R_2 + R_3)}{R_1} \cdot \frac{\left(1 + j\omega \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \cdot C\right)}{1 + j\omega R_2 C} = \frac{R_3 + j\omega R_2 R_3 C + R_2}{1 + j\omega R_2 C} = \frac{(R_2 + R_3) \cdot \left(1 + j\omega \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \cdot C\right)}{1 + j\omega R_2 C}$$

$$\omega_p = \frac{1}{R_2 C} \quad \omega_z = \frac{1}{R_2 \parallel R_3} \cdot C$$

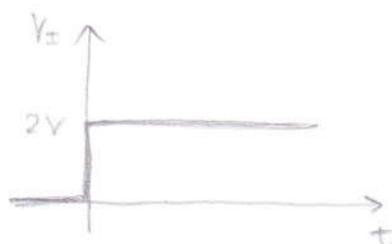


$$-\frac{R_2 + R_3}{R_1} \quad \text{PERCHÉ CON } \omega = 0 \quad \text{IL CONDENSATORE}$$

$$\text{È UN CORSO CIRCUITO} \quad \text{QUINDI} \quad T(j\omega) = -\frac{R_2}{R_1}$$

Inb non c'è R1 perché la corrente passa nel circuito attivato dopo del condensatore

Supponendo lo V<sub>I</sub> seguente determinare lo V<sub>O</sub>



$$t > 0 \rightarrow V_I = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{\text{out}} = 0$$

$t > 0$

APPPLICHIAMO IL METODO ASINTOTICO

$$V_{out}(t) = V_{out}(\infty) - [V_{out}(\infty) - V_{out}(0)] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

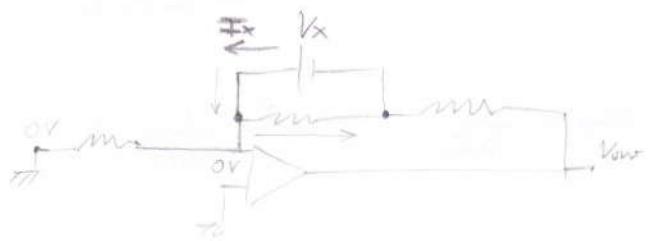
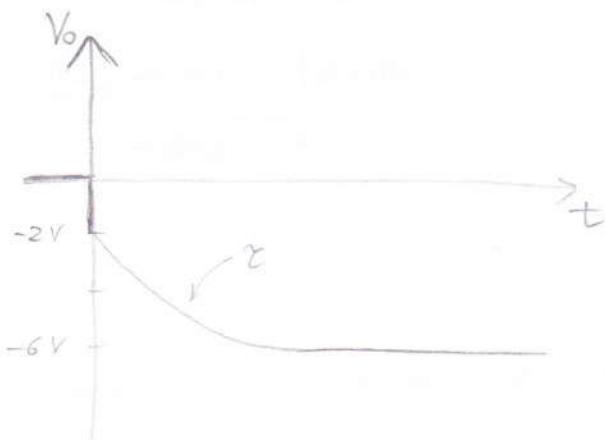
$V_{out}(\infty)$  = PASSATO IL TRANSITO IL CONDENSATORE È UN CIRCUITO APERTO

$$V_{out}(\infty) = - \frac{R_2 + R_3}{R_2} V_I = -3 \cdot 2 = -6 \text{ V}$$

$$t=0^- \rightarrow V_C(0^-) = 0 = V_C(0^+)$$

$$t=0^+ \rightarrow V_{R_3}(0^+) = I R_3 = \frac{V_I(0^+)}{R_1} \cdot R_3$$

$$V_{out}(0^+) = - V_C(0^+) - V_{R_3}(0^+) = - \frac{V_I(0^+) \cdot R_3}{R_1} = - \frac{100}{100} \cdot 2 = -2 \text{ V}$$



$$R_{eq} = \frac{V_x}{I_x} = R_2$$

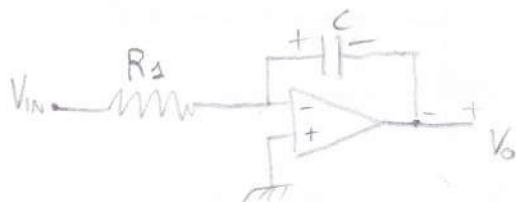
[NB] SU  $R_1$  NON SCORRE CORRENTE PERCHÉ HA OVA SUL CAPO DX

[NB] SU  $R_3$  NON SCORRE CORRENTE PERCHÉ HIO  $I_x$  ENTRA IN  $V_x$

$$\tau = R_2 C$$

# ✓ Esercizio

## INTEGRATORE (INVER.)



$$R_2 = 1\text{ k}\Omega$$

$$C = 1\text{ }\mu\text{F}$$

$$L^+ = L^- = 10\text{ V}$$

INTEGRATORE IDEALE

C SCARICA ALL'INIZIO

DISEGNARE ANDAMENTO DI  $V_o$

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

$$V_{in} = \text{cost.}$$

NB: IL CIRCUITO VEDE UNA TENSIONE COSTANTE PERCHÉ LA TENDENZA NON È VARIATA DALL'ISTANTE PRECEDENTE

$$V_o = -\frac{V_{in}}{RC} \cdot t \quad (V_o \text{ integratore - comp. iniettore})$$

$$t > 0 \rightarrow V_o = -\frac{2}{1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} t = -2 \text{ V/ms} = -2 \text{ mV/s}$$

$$t > 2 \rightarrow V_o = V_{c_{2ms}} - \frac{V_{in}}{RC} t = -4 - \left(-\frac{1}{10^3}\right)t = -4 + 1 \text{ V/ms}$$

NB:

$$I_1 = \frac{2\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 2\text{ mA}$$

$$T_1 = 2\text{ ms} (2-0)$$

$$\text{CARICA} = 4$$

$$I_2 = \frac{-1\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = -1\text{ mA}$$

$$T_2 = 4\text{ ms} (6-2)$$

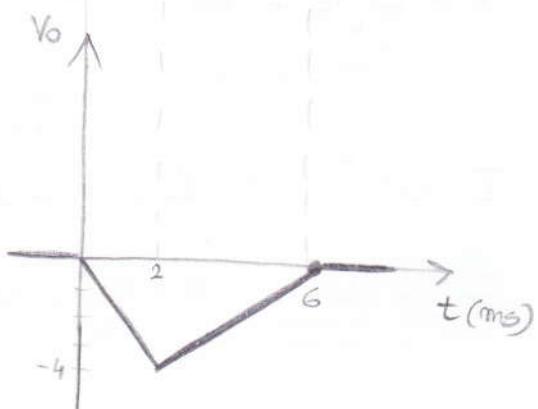
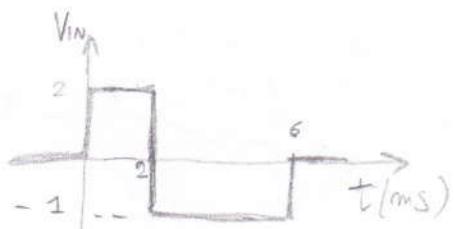
$$\text{SCARICA} = -4$$

NB:

SE  $V_{in}$  NON ANDAVA A 0, LA CARICA FORNITA AL CAPACITORE ERA LINEARE

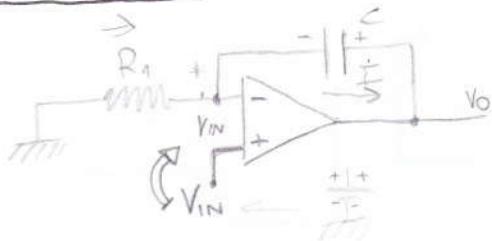
NEL PENSO IONINDI PRIMA A PÒ ANDAVA IN SATURAZIONE

infatti nel tratto con  $t > 6$   $V_o = 0$  perché  $V_{in} = 0$



## ESERCIZIO

INTEGRATORE (NON INVERT)



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

$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$L^+ = L^- = 10 \text{ V}$$



DISSEGNARE L' ANDAMENTO DI  $V_o$

$$V_o = +V_c + V_{in} \quad (V_o \text{ comp. non invertente})$$

NON INVERTENTE

HA BISOGNO DI  
TEMPO PER CARICAZIONE

$$t = 0^+ \rightarrow V_o = 0 + 2$$

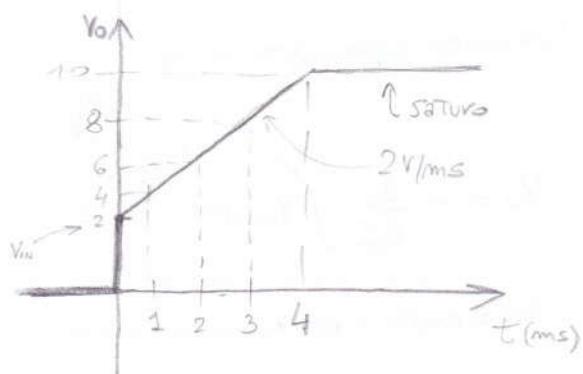
AL TEMPO 0  
C'E'  $V_{in} = V_{R1}$

SUBITO Dopo il circuito  
INIZIA A SCENDERE UNA  
CORRENTE CHE FARÀ IL  
CONDENSATORE E FA UNIRE  
LA TENSIONE AL SUOI CAPI

$$I = \frac{V_{in}}{R_1} = 2 \text{ mA}$$

$Q = \int I dt$

$$t > 0 \rightarrow V_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \frac{V_{in}}{R_1} t = \frac{2}{10^{-5}} \cdot t = 2 \text{ V/ms} \rightarrow V_o(t) = 2 \text{ V/ms} + V_{in}$$

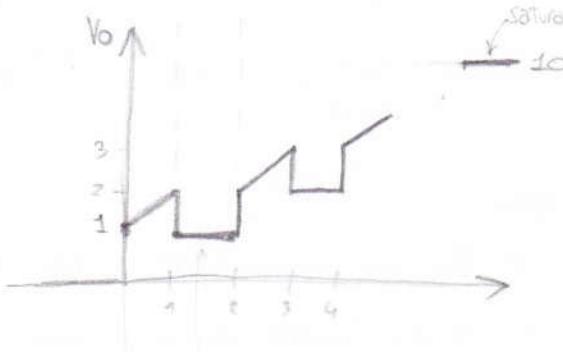
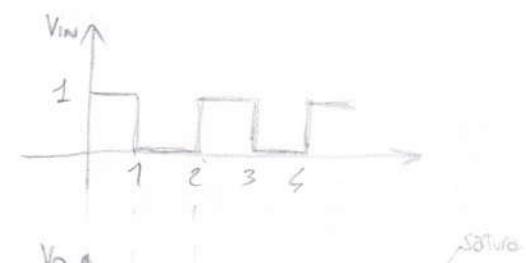


## ESERCIZIO

STESO SCHEMA DELL' ESERCIZIO PRECEDENTE

$$V_o = V_c + V_{in}$$

$$V_c/t_{20} = 1 \text{ V/ms}$$

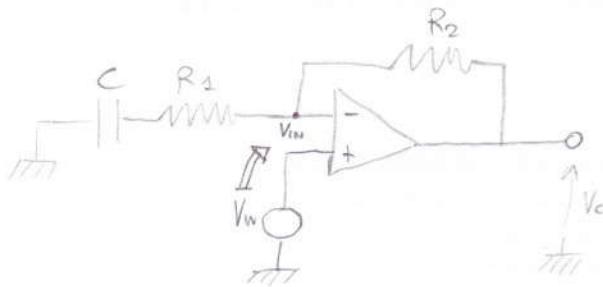
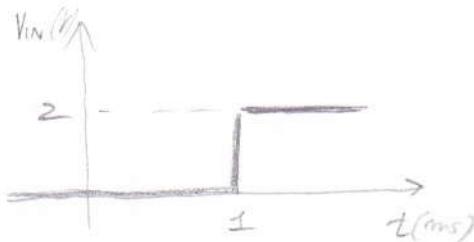


però in meno lo sta scendendo

# ✓ Esercizio

DERIVATORE

Dato il circuito in figura in cui  $V_{IN}$  è un generatore di tensione a gradino riportato nel grafico. Determinare e graficare la tensione di uscita nel tempo. Considerare l'amplificatore operazionale ideale con  $L^+ = |L^-| = 12 \text{ V}$



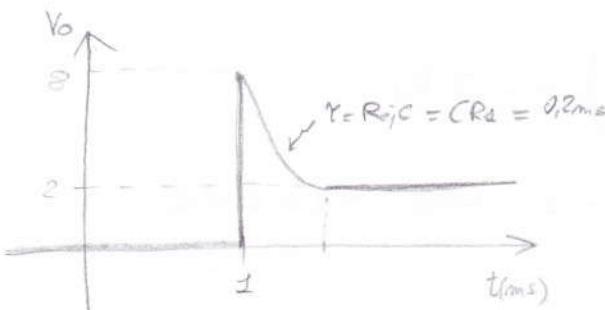
$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 6 \text{ k}\Omega \quad C = 0,1 \text{ }\mu\text{F}$$

( $V_O$  derivazione - conf. non invertente)

$$V_O = V_{R_2} + V_{IN}$$

• per tensioni continue

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{\infty} = 1$$



• nel grafico il condensatore ha un'impedenza nulla ( $w=0$ )



area non pone  
grandezze nel  
condensatore e  
su  $R_1$

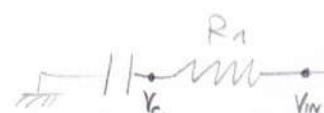
$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 4$$

quando da retta la  $R_2$   
è scorsa comune di  $R_1$   
verso lo stesso che  
corre il condensatore

$$t = 1^+ \rightarrow I = \frac{2}{R_1} = 1 \text{ mA}$$

$$V_O = V_{R_2} + V_{IN} = R_2 I + V_{IN} = 6 + 2 = 8$$

SUBITO DOPO IL GRADINO  
INIZIA A RAPPRESENTARE UNA  
CARICA CHE CARICA  
IL CONDENSATORE  
E CHE SCORRE FINO A  
QUANDO  $V_C < V_{IN}$



$$I = \frac{V_{IN} - V_C}{R_1}$$

$$t > 1^+ \rightarrow V_O = R_2 \cdot \frac{V_{IN} - V_C}{R_1} + V_{IN}$$

$$V(\infty) = 2 \Rightarrow V_O = 6 \cdot 0 + 2 = 2 \text{ V}$$

$$V(0^-) = 0 \Rightarrow V_O = 6 \cdot \frac{2}{2} + 2 = 8 \text{ V}$$

## ESERCIZIO

SOMMATORI

Dal seguente circuito, con l'amplificatore operazionale ideale, determinare  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  affinché la tensione di uscita dell'amplificatore valga:

$$V_{out} = 3V_3 - 4V_2 - 2V_1$$

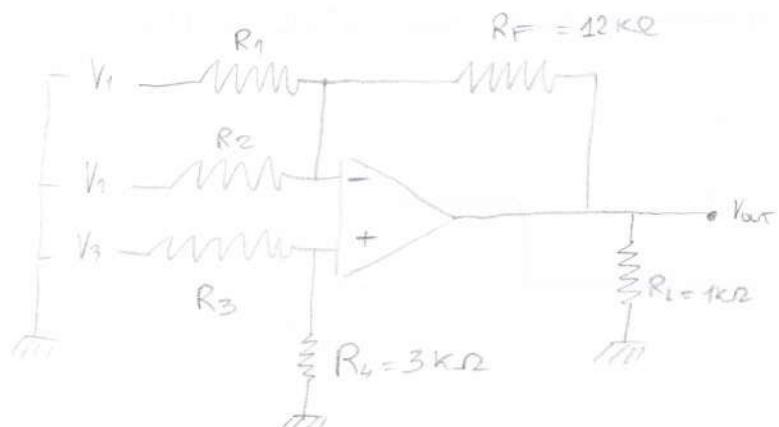
UTILIZZO LA SOVRAPPOSIZ.

DEGLI EFFETTI

INIZIANDO TUTTO PONDO DIRE CHE

$$V^+ = V_3 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

PARTITORE DI  
TENSIONE



considero



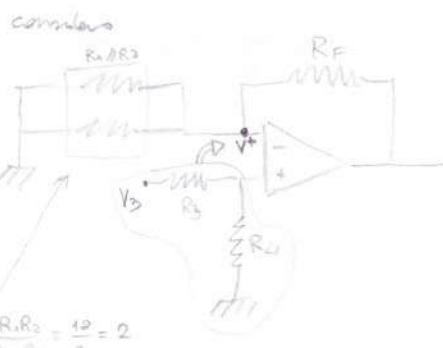
$$V_{01} = V_1 \left( -\frac{R_F}{R_1} \right) = -2V_1$$

$$\text{quindi } \frac{R_F}{R_1} = 2 \Rightarrow R_1 = 6k\Omega$$

Considero stessa da prima con  $R_2$

$$V_{02} = V_2 \left( -\frac{R_F}{R_2} \right) = -4V_2$$

$$\frac{R_F}{R_2} = 4 \Rightarrow R_2 = 3k\Omega$$



$$V_{03} = V^+ \left( 1 + \frac{R_F}{R_1//R_2} \right) = V_3 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left( 1 + \frac{R_F}{R_1//R_2} \right) =$$

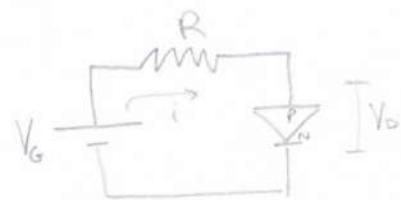
$$V_{03} = V_3 \cdot \frac{3}{R_3 + 3} \cdot \left( 1 + \frac{12}{2} \right) = \rightarrow R_3 = 4k\Omega$$

ALTRÒ MODO DI PROCEDERE

$$V_{03} \text{ in config. riunite} \quad V_0 = V^+ + I_R F = \frac{V_1}{R_1//R_2} (R_1//R_2 + R_F) = \frac{V_3 R_4}{R_3 + R_4} \cdot 7$$

$$3V_3 = V_3 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot 7 \quad 3(R_3 + R_4) = 7R_4 \quad R_3 = 4k\Omega$$

# DIODI (METODI SOL. ESEMPI)



$$\text{EQ. ALLA MAGLIA} \quad V_G = IR + V_D$$

legge della giunzione  
mi dice la corrente che  
scorre nel diodo

$$\text{quindi} \quad V_G = R(I e^{\frac{V_D}{V_T}}) + V_D$$

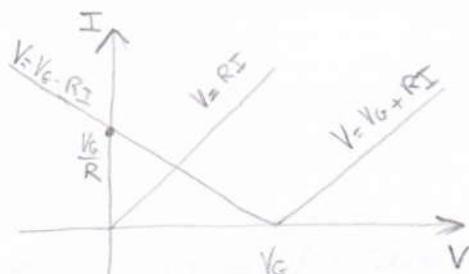
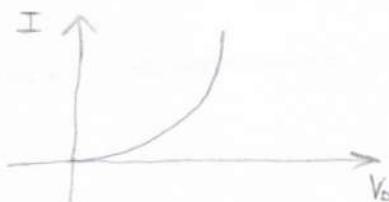
①

OBTIUTO UN METODO GRAFICO per risolvere il circuito (altrimenti non c'è facile calcolare  $V_D$ )

$$V_G - RI = V_D$$

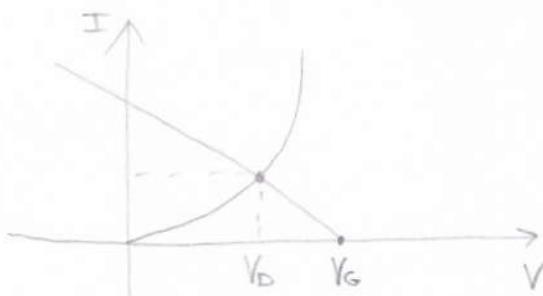
$$f(I) = g(I) \quad \text{e l'ho}$$

la trovo



SOLUZIONE

SOPRAPPONO I DUE GRAFICI E  
TROVO I PUNTI IN COMUNE

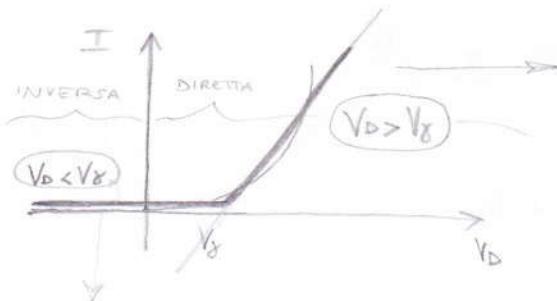


ESISTE UN ALTRO METODO →

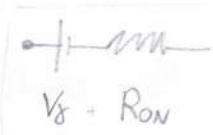
(2)

## UTILIZZO IL METODO DEGLI STATI

divido le curve Tensione - corrente del diodo in due parti lineari



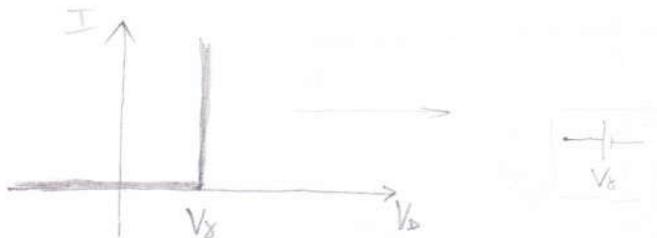
QUESTA RETTA DAL PUNTO DI VISTA CIRCOLARE È



$$\text{con } V_g = 0,6 \text{ V} \\ R_{ON} = 1,2 \text{ } \Omega$$

QUESTA RETTA DAL PUNTO DI VISTA CIRCOLARE È

SPESSO SI PUÒ CONSIDERARE  $R_{ON} = 0$  OTTENENDO



NB IPN SPESSO SI INTESE QUANDO  $R_O \ll$  RESISTENZA IN SERIE

$$\Omega \ll k \cdot \Omega$$

HO ANCHE  
NEL CASO IDEALE  $V_g = 0$

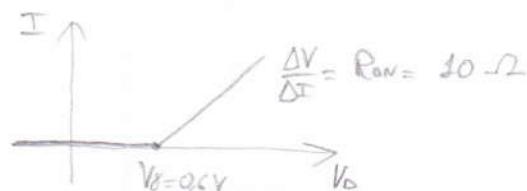
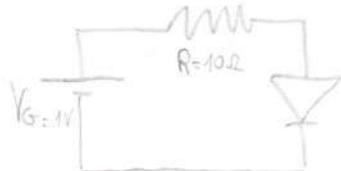
NB STESSO DISORDINE DI  $R_O$

SE  $V_G \gg V_g$  LO POSSO TRAScurare  
 $20V \gg 0,6V$

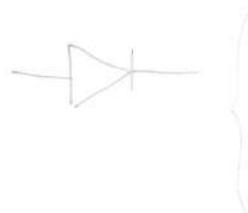


# ESERCIZIO

DIODI



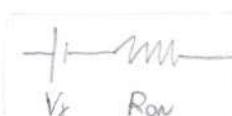
calcolare la corrente che scorre nel circuito



se  $V_D < V_F$  equivale a



se  $V_D \geq V_F$  equivale a



RICORDARE !!

PROVO AD USARNE UNO E vedo se funziona

## • SCELGO IL PRIMO



HO  $I = 0$  DATO CHE HO UN CIRCUITO APERTO

Devo VERIFICARE SE  $V_D < V_F$

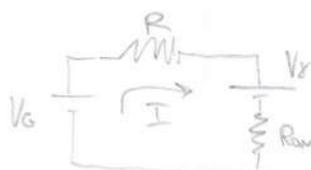
$$V_D R = 0$$

$$\Rightarrow V_G = RI + V_D$$

QUINDI

$$V_D \neq V_F$$

## • SCELGO IL SECONDO



$$\text{HO } I = \frac{V_G - V_F}{R + R_{on}} = \frac{0,4}{100} = 4 \text{ mA}$$

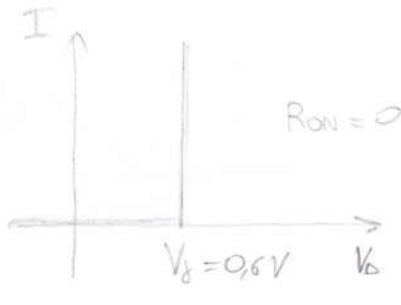
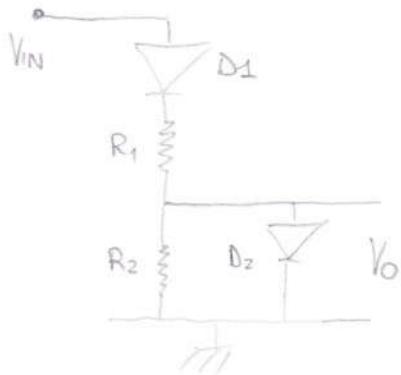
TRONTA DAI EQ. AIA

MAGNA  $V_G = IR + V_F + I R_{on}$

# ESERCIZIO

DIODI

CARATTO. I-V NEI 2 DIODI



$$R_1 = 100 \Omega$$

$$R_2 = 50 \Omega$$

Trovare la transcaratteristica ( $V_o/V_{in}$ )



se  $V_o < V_d$  equivale a



se  $V_o \geq V_d$  equivale a



AVERO 2 DIODI HO 4 COMBINAZIONI POSSIBILI

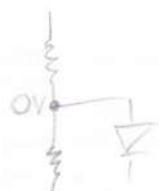
Ora provo a caso ma cerco di ragionare

- Se  $V_{in} = -$  il diodo 1 è IN INTERDIZIONE ovvero non conduce  
molto negativa QUINDI



NON SCORRE CORRENTE IN  $R_2$  e in  $D_2$

$$V_o = 0V$$



QUINDI  $V_d = 0$

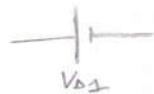
OVVERO ANCHE IL DIODO 2 È UN

EQ. ALLA MAGNA  
(rite sempre)

$$V_{in} = V_{D1} + I_1 R_1 + I_2 R_2$$

$$V_{in} = V_{D1} \quad \text{FINCHE } V_{in} = V_d = 0.6V \quad (\text{real caso})$$

• SE  $V_{IN} = +0,6 \text{ V}$  IL DIODO 1 DIVENTA



$I_1 = I_2$  PERCHÉ  
IL DIODO 2 È UN  
CIRCUITO APERTO

IN QUESTA CONDIZIONE (è scattato solo il primo diodo)

$$V_{IN} = V_D + I_1 R_1 + I_2 R_2 \Rightarrow I_1 = \frac{V_{IN} - V_D}{R_1 + R_2} = \frac{V_{IN} - 0,6}{150}$$

$$V_o = I_2 R_2 = \frac{V_{IN} - 0,6}{150} \cdot 50 = \frac{V_{IN} - 0,6}{3}$$

[NB] per graficarla mi basta trovare 2 punti

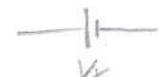
$$V_{IN} = V_D \rightarrow V_o = 0 \text{ V}$$

$$V_{IN} = 3,6 \rightarrow V_o = 1 \text{ V}$$

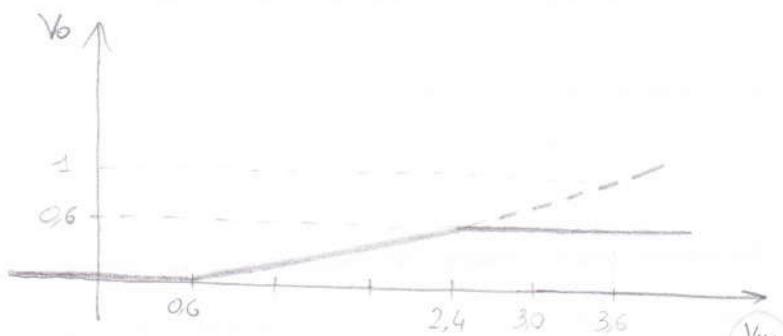
### ATTENZIONE

QUANDO  $V_o$  ARRIVA A  $0,6 \text{ V}$  IL DIODO 2 NON È PIÙ IL CIRCUITO APERTO

(perché non è più verificata  $V_o < V_D = 0,6$ ) E DIVENTA

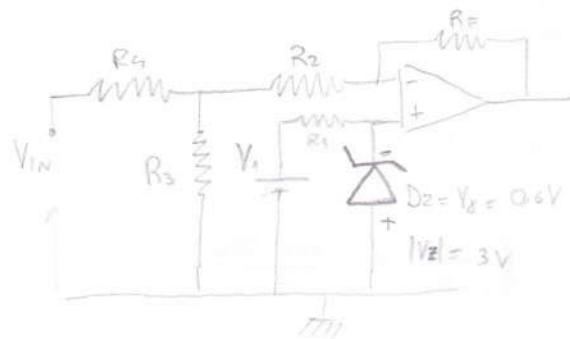


$$V_o = V_D \text{ QUINDI RIMANE SEMPRE A } 0,6 \text{ V}$$



$$V_o = \frac{V_{IN} - 0,6}{3} \rightarrow V_{IN} = 3V_o + 0,6 \\ = 3 \cdot 0,6 + 0,6 \\ = 2,4$$

## ESERCIZIO DIODI ZENER



$$V_1 = 5V$$

$$R_1 = 1k\Omega$$

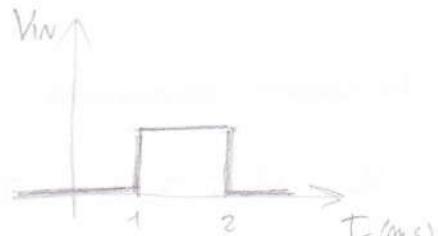
$$R_2 = 2k\Omega$$

$$R_3 = 2k\Omega$$

$$R_4 = 2k\Omega$$

$$R_5 = 3k\Omega$$

$$L^+ = |L^-| = 10V$$



NB SI CONSIGNA DI UTILIZZARE  
IL PRINCIPIO DI SOVRAPP. DEGLI EFFETTI

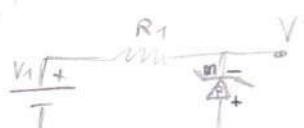
TROVARE  $V_o$  NEL TEMPO

PRINCIPIO SOVRAPP. EFFETTI

FD ovviamente c'è effetto di un generatore di Tensione e vedo come re  $V_o$  ovviamente c'è l'altro c'è vedo come re  $V_o$ , sommo le  $V_o$  ottenute

• CONSIDERO  $V_{in} = 0$

CONSIDERO  
QUESTA PARTE  
DI CIRCUITO



IL DIODO ZENER  
PUÒ ESSERE:



$$\text{se } V_o \leq -V_Z \quad \frac{1}{T} - V_Z$$

$$\text{se } -V_Z < V_o < V_Z$$

$$\text{se } V_o \geq V_Z \quad \frac{1}{T} + V_Z$$

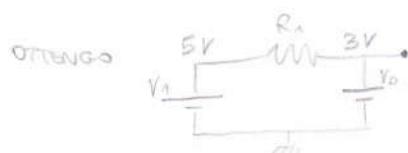
PROVO A METTERE IN CIRCUITO APERTO

$$V_D = 0 \quad \text{FD} \quad V_{R1} = 0 \quad \Rightarrow \quad V^+ = V_1 \quad \text{E ANCHE} \quad V_D = 5V$$

$$\text{MA} \quad \text{Dovevo avere che} \quad V_D < V_Z \quad (\text{perché in inverso})$$

RAGIONANDO vedo che il + di  $V_1$  è connesso alla parte M del diodo ZENER quindi

È POLARIZZATO IN INVERSO QUINDI



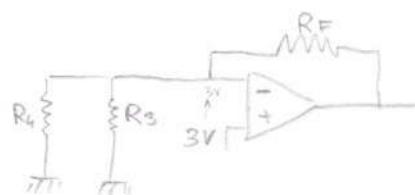
$$\text{polarizzato} \quad \frac{1}{T} + V_Z$$

$$\text{A PRESSIONE DATA CORRENTE SO CHE} \quad V_D = 3V = V^+$$

$$\text{NB} \quad i_R = \frac{5-3}{R_1} = 2mA$$

IL CIRCUITO RISULTANTE

È IL SEGUENTE



NB MOLTO SIMILE  
AD UNA CONFIG. NON  
INVERTENTE IN CM

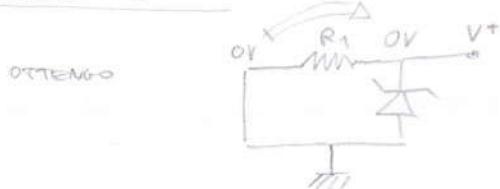
$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

IL GUADAGNO DEL NUOVO CIRCUITO SARÀ:

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_2 + R_3/R_4} = 1 + \frac{3}{2+1} = +2$$

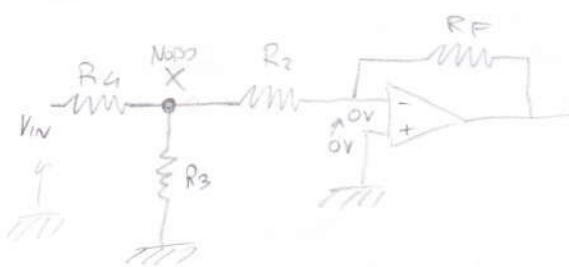
QUINDI  $V_o^{(1)} = 6V$

• CONSIDERO  $V_1 = 0$



OPERO  $V^+ = 0V$  (cioè massa)

IL CIRCUITO  
RISULTANTE È  
IL SEGUENTE



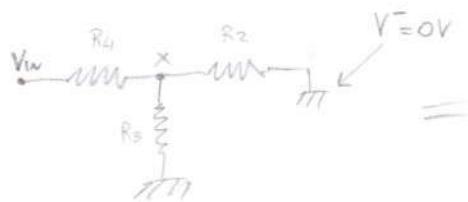
NB MOLTO SIMILE AD  
UNA CONFIG. INVERTER

IN CUI  $A_v = -\frac{R_2}{R_F}$

TENSIONE SWING:  
RESISTENZA  
D'INGRESSO

$$V_o^{(N)} = V_x \left( -\frac{R_F}{R_2} \right)$$

QUINDI DEVO TROVARE COME EVOLVE  $V_x$

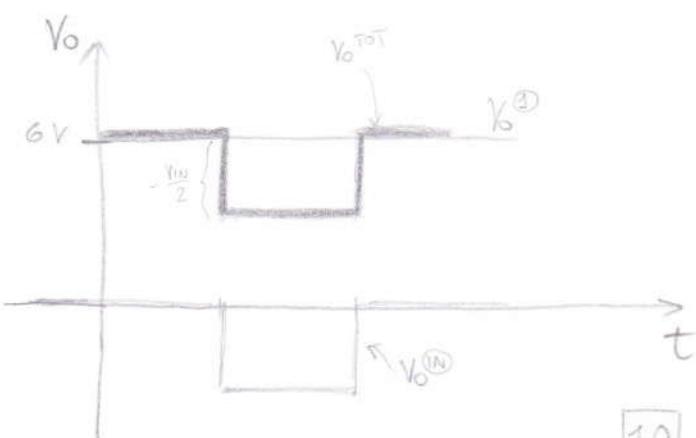


$$V_x = V_{IN} \cdot \frac{R_3//R_2}{R_3//R_2 + R_4}$$

FD

$$V_o^{(N)} = -V_{IN} \cdot \frac{R_3//R_2}{R_3//R_2 + R_4} \cdot \frac{R_F}{R_2} = -V_{IN} \cdot \frac{1}{1+2} \cdot \frac{3}{2}$$

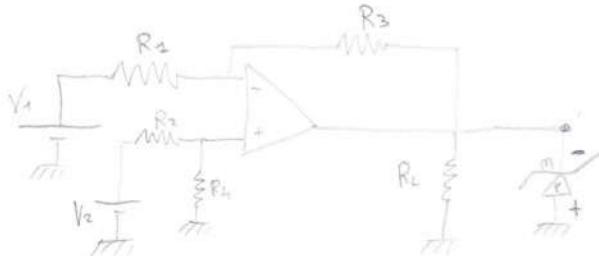
$$V_o^{(N)} = -\frac{V_{IN}}{2}$$



ATTENZIONE  
TUTTE LE CONSIDERAZIONI  
FATTE FINO AD ORA  
VALGONO SE L'AMPLIFICATORE  
NON È IN SATURAZIONE E QUINDI  
Vale il conto ormai fatto.

## ESERCIZIO

DIODO ZENER



$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 200 \text{ k}\Omega = R_4$$

$$R_3 = 300 \text{ k}\Omega$$

$$V_Z = 3 \text{ V}$$

$$V_0 = 0,6 \text{ V}$$

$$\textcircled{a} \quad V_1 = 2 \text{ V} \quad V_2 = 0 \text{ V}$$

$$\textcircled{b} \quad V_1 = 0 \text{ V} \quad V_2 = 4 \text{ V}$$

Trovare la  $V_{out}$  nel tempo

INVERT

$$\textcircled{a} \quad V_{out} = -\frac{R_3}{R_1} \cdot V_1 = -3 \cdot 2 = -6 \text{ V} \quad \text{QUESTO NON CONSIDERANDO IL DIODO ZENER}$$

IL DIODO È POLARIZZATO DIRETTAMENTE  
(Tensione negativa su anodo)  $\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \cdot V_Z \\ \cdot \text{STESO ORIENTAMENTO} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{1-}{T+} V_Z$

$$\text{QUINDI } V_{out} = -0,6 \text{ V}$$

NON INVERT.

\textcircled{b}

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) V^+ = (1+3) \cdot 2 = 8 \text{ V} \quad \text{QUESTO NON CONSIDERANDO IL DIODO ZENER}$$

IL DIODO È POLARIZZATO INVERSALEMENTE  
(Tensione positiva su anodo)  $\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \cdot V_Z \\ \cdot \text{ORIENTAMENTO INVERSO} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{1+}{T-} V_Z$

$$\text{Quindi } V_{out} = V_Z = 3 \text{ V}$$

## NOTE

SE AVESSE AVUTO IL DIODO

IN QUESTA POSIZIONE



$$\textcircled{a} - 6$$

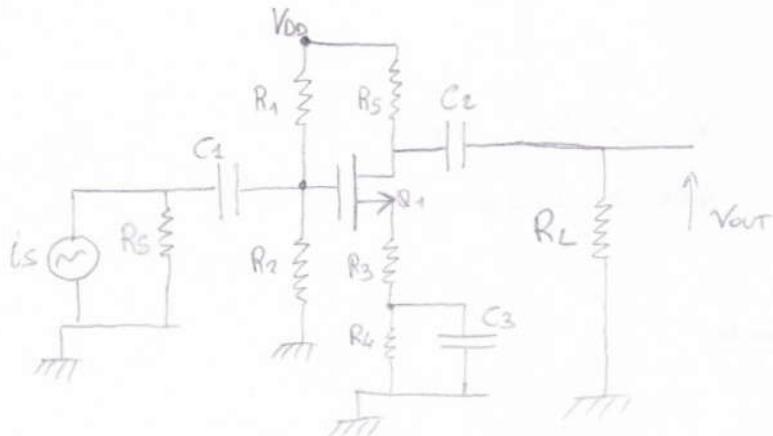
IL DIODO È POLARIZZATO INVERSALEMENTE  $\rightarrow \frac{1-}{T+} V_Z$

$$\textcircled{b} + 8$$

IL DIODO È POLARIZZATO DIRETTAMENTE  $\rightarrow \frac{1+}{T-} V_Z$

# ESERCIZIO

## TRANSISTOR



$$R_2 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 0,5$$

$$R_4 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 80 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 15 \text{ k}\Omega$$

$$V_{DD} = 10 \text{ V}$$

$$Q_4 = \begin{cases} K = 93 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \\ V_T = 1 \text{ V} \\ \lambda = 0 \end{cases}$$

$$C \rightarrow \infty$$

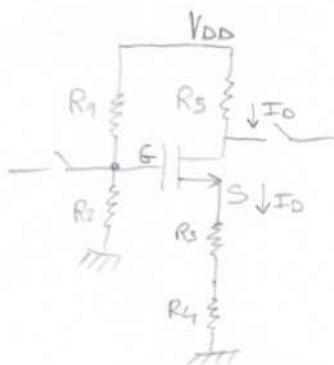
SEGNALI PICCOLI

CALCOLARE IL GUADAGNO DI TRANSRESISTENZA  $R_M = \frac{V_{OUT}}{I_S}$

TR. TRANSISTOR LINEARE

- ANALIZZO IL CIRCUITO DAL PUNTO DI VISTA DELLA POLARIZZAZIONE

TUTTI I CONDENSATORI SONO CIRCUITI APERTI, OTTENGO



CONTINUA  
magritte

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_D (R_3 + R_4)$$

magritte

MI SERVE UN'ALTRA EQUAZIONE

SE STA IN SATURAZIONE

$$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$$

QUINDI

$$V_{GS} = 10 \cdot \frac{20}{60} - I_D (2,5) = 3,33 - (I_D \cdot 2,5)$$

$$I_D = 0,3 (V_G - 1)^2$$

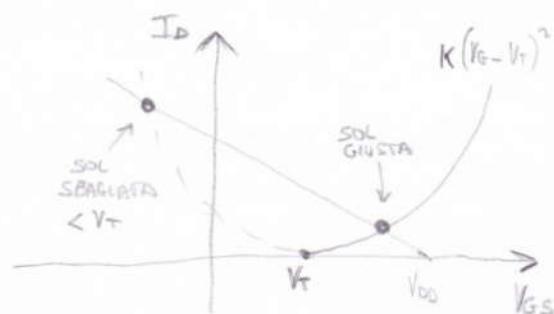
DALLA PRIMA

$$\frac{3,33 - V_{GS}}{2,5} = 0,3 (V_G - 1)^2 \rightarrow V_{GS}^2 - 0,66 V_{GS} - 3,4 = 0$$

$$V_{GS} = \frac{0,66 \pm \sqrt{0,44 + 11,56}}{2} = \begin{cases} 2,16 \text{ V} \\ -1,4 \text{ V} \end{cases}$$

$$V_{GS}^* = 2,16 \text{ V}$$

$$I_D^* = K (V_{GS} - V_T)^2 = 93 (2,16 - 1)^2 = 966 \text{ mA}$$



ER AUA  
MAGUA  $\Rightarrow V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_3 + R_4 + R_5) = 6,66 \text{ V}$

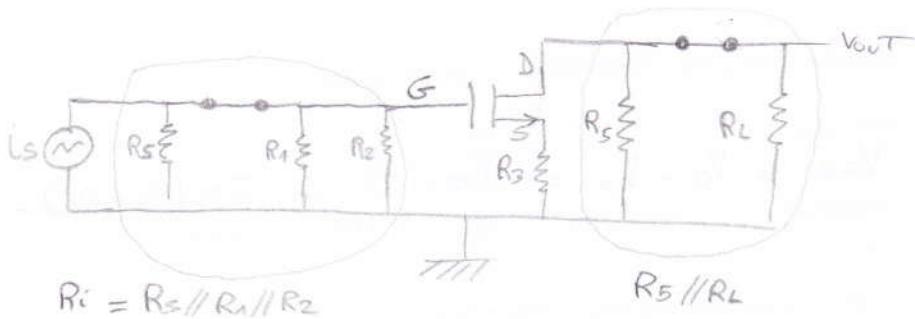
È IN ZONA DI SATURAZIONE PERCHÉ  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$   
 $6,66 > 1,16$

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_T) = 0,69 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

## ② ANALIZZO IL CIRCUITO DAL PUNTO DI VISTA DEI SEGNALI

TUTTI I CONDENSATORI SONO CORTOCIRCUITO

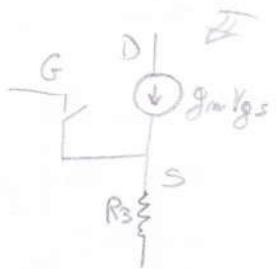
ANNULO I GENERATORI INDEPENDENTI, OTENGO  
 (tranne il segnale di alimentazione)



NB ANNULARE

- GEN DI TENSIONE = CORTOCIRCUITO
- GEN DI CORRENTE = CIRCUITO APERTO

PICCOLI SEGNALI



$$V_{OUT} = -g_m V_{GS} \cdot R_5 // R_L$$

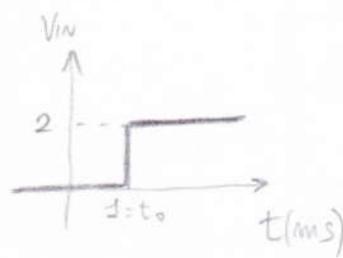
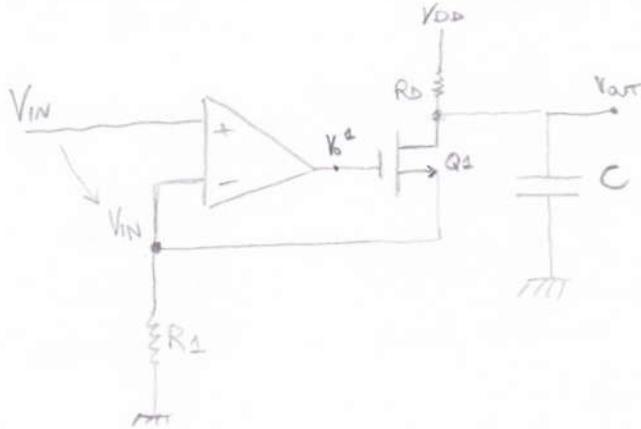
$$V_{GS} = V_g - V_s = i_S \cdot R_i - g_m V_{GS} \cdot R_3 =$$

$$= \frac{R_i i_S}{1 + g_m R_3} \quad (= \frac{A}{1 + g_m \beta})$$

$$V_{OUT} = -g_m \frac{R_i i_S}{1 + g_m R_3} \cdot \frac{R_5 R_L}{R_5 + R_L}$$

$$R_M = \frac{V_{OUT}}{i_S} = -g_m \frac{R_i}{1 + g_m R_3} \cdot \frac{R_5 R_L}{R_5 + R_L}$$

# ESERCIZIO D'ESAME



$$R_d = 2 \text{ k}\Omega$$

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

$$C = 100 \text{ nF}$$

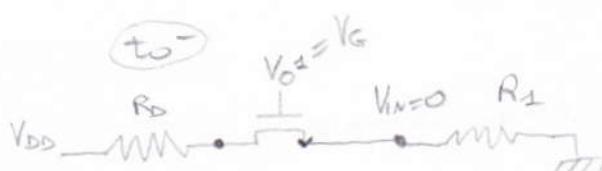
$$K = 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$Q_1 = V_T = 1 \text{ V}$$

$$I^+ = |I^-| = 10 \text{ mA}$$

$$V_{dd} = 10 \text{ V}$$

CALCOLARE V<sub>out</sub>

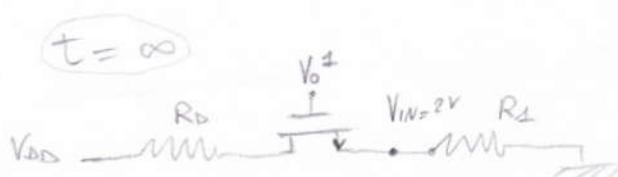


IL TRANSISTOR È INTERDITTO PERCHÉ

$$V_{GS} = 0$$

DATO CHE V<sub>IN</sub> = 0

$$V_d = V_{dd} = 10 \text{ V}$$



$$I_{R_1} = I_d = \frac{V_s}{R_1} = \frac{V_N}{R_1} = 2 \text{ mA}$$

(POTENZIANDO IL TRANSISTOR SATURATO)

$$I_d = K (V_{GS} - V_T)^2 = 2 \text{ mA}$$

QUINDI POSSO CALCOLARE V<sub>GS</sub>

$$0,5 (V_{GS} - 1)^2 = 32 \Rightarrow V_{GS} = 3 \text{ V}$$

$$\text{DATO CHE } V_{IN} = 2 \text{ V} \Rightarrow V_G = 3 + 2 = 5 \text{ V}$$

$$\text{POSSO CALCOLARE } V_d = V_{dd} - I_d R_d = 10 - 4 = 6 \text{ V}$$



$$\tau = C \cdot R_{\text{eq}}$$

MANDO A ZERO  
CORTO CIRCUITO GENERATRICE DI  
TENSIONE INDIPENDENTE

$$\tau = C \cdot R_d$$

$$= 100 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 = 0,2 \text{ ms}$$

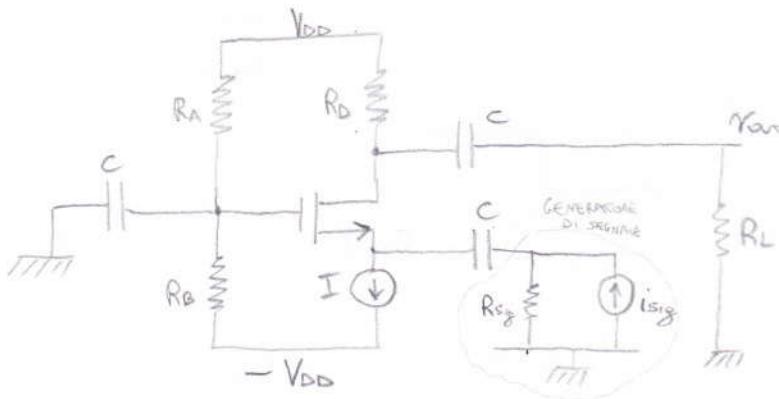
TRANSISTORE TERMINA DOPO 5  $\tau$

NB IL CONDENSATORE A T<sub>0</sub>

È SOTTO V<sub>DD</sub>! QUINDI

È UN CIRCUITO APERTO

# ESERCIZIO D'ESAME



$$V_{DD} = 5 \text{ V}$$

$$\lambda = 0$$

$$Q \equiv V_T = 2 \text{ V}$$

$$K = 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$C = \infty$$

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

$$R_B = 8 \text{ k}\Omega$$

$$I = 2 \text{ mA}$$

$$R_S = 40 \text{ k}\Omega$$

CALCOLARE IL GUADAGNO DI TRASFERIMENTO  $\frac{V_{OUT}}{i_{sig}}$

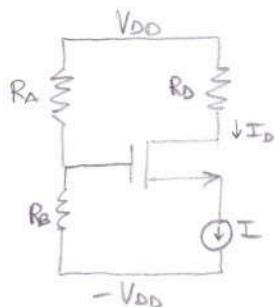
DO PER SCONTO CHE Sono IN CONDIZIONE DI PICCOLO SEGNALE

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_T)$$

ANDIAMO A VEDERE CO' STATO DI POLARIZZAZIONE DEL CIRCUITO: COME SIETE SOBRALE  
POTETE UN STATICO (CONTINUE)

INDI  $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$  se  $\omega = 0$   $Z_C = \infty \rightarrow$  CIRCUITO APERTO

IL CIRCUITO DIVENTA



MI SERVE CALCOLARE LA  $V_{DS}$  per trovare  $g_m$

IPOTIZZO CHE IL TRANSISTOR SIA SATURATO

$$\hookrightarrow I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 2 \text{ mA}$$

ALLORA  $0,5(V_{GS} - 2)^2 = 2 \rightarrow V_{GS} = 4 \text{ V}$

ORA POSSO CALCOLARE  $g_m = 2K(V_{GS} - V_T) = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$

PRIMA DI ANDARE AVANTI DEVO VERIFICARE SE IL TRANSISTOR E' EFFETTIVAMENTE IN SATURAZIONE

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_{DD} - I_{DRD} R_D - V_S = 3 - V_S$$

ATTENZIONE

$$V_S \text{ NUOVO} - V_{DD}$$

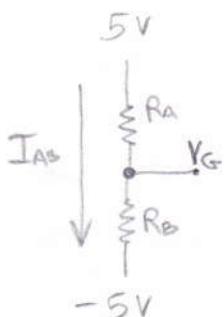
PERCHÉ per esempio

IN QUESTO CIRCUITO LA TENSIONE DI I DOPPIO DA RL

$$V_S = V_G - V_{GS}$$

### ATTENZIONE

LA CORRENTE NEI DUE RAMI È DIVERSA E SCORRELATA  
QUINDI DEVO CALCOLARE  $V_G$  SU RAMO SG INDIPENDENTEMENTE DAL DX



$$I_{AB} = \frac{V_{DD} - (-V_{GS})}{R_A + R_B} = \frac{10}{10} = 1 \text{ mA}$$

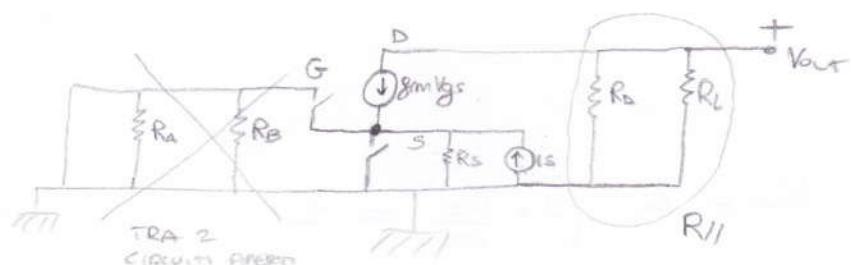
$$\rightarrow V_G = V_{DD} - I_{AB} R_A = 5 - 2 = 3 \text{ V}$$

QUINDI LA CADUTA DI POTENZIALE SU GENERATORE DI CORRENTE

$$V_S = 3 - 4 = -1 \text{ V}$$

STO IN SATURAZIONE PERCHÉ  $V_{DS} = 4 \stackrel{V_D - V_S}{=} 3 - (-1) > V_{GS} - V_T = 2 \text{ V}$

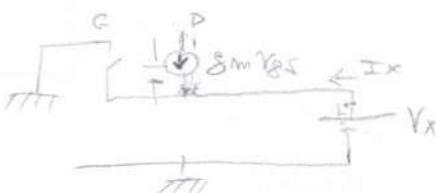
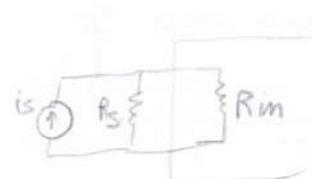
### • ANALIZZO IL CIRCUITO DAL PUNTO DI VISTA DEI SEGNALI



CIRCUITO PER PICCOLI  
SEGNALI

$$V_{out} = -g_m V_{GS} R_{II} = +g_m R_{II} \left( -i_s \frac{1}{g_m} \right)$$

$$r_{gs} = r_g - r_s = 0 - i_s \cdot \frac{1}{g_m}$$



$$I_x = -g_m V_{GS} = g_m V_x \\ V_x = -V_{GS}$$

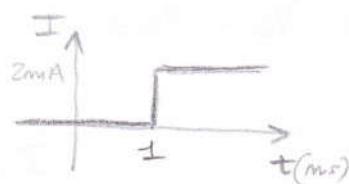
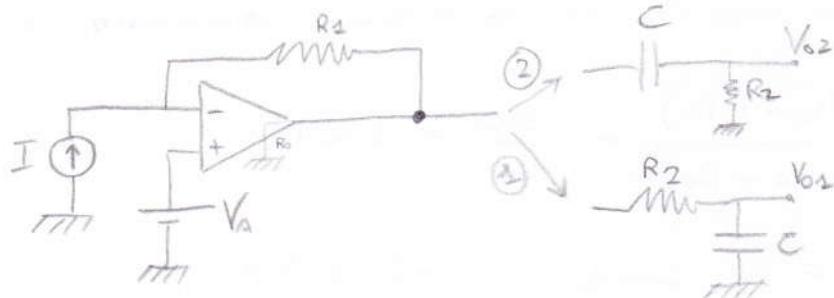
$$R_{in} = \frac{V_x}{I_x} = \frac{1}{g_m}$$

COME CALCOLA  
 $r_{gs}$ ?

$$\frac{V_{out}}{i_s} = \frac{g_m R_{II} \left( -i_s \frac{1}{g_m} \right)}{i_s} = R_{II} = 750 \Omega$$

# ESERCIZIO D'ESAME

5 GIUGNO 2013



$$R_1 = 3 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$C = 0,1 \mu\text{F} \quad V_A = 2 \text{ V}$$

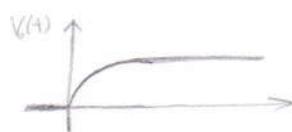
AMPL. OPERAT. IDEALE

$$(N) R_0 = 0$$

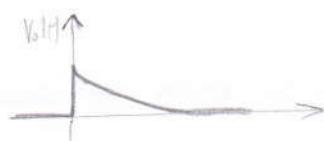
TROVARE L'ANDAMENTO NEL TEMPO DI  $V_O$  NELLE DUE SITUAZIONI.

① È UN PASSA BASSO

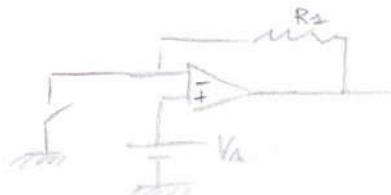
DI CUI SI SA CHE LA  
RISPOSTA AL GRADINO È



② È UN PASSA ALTO

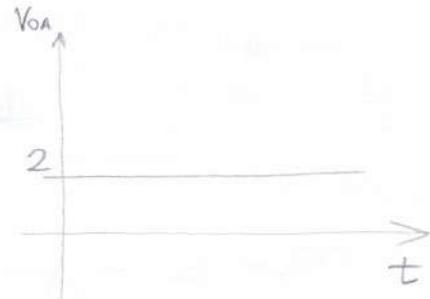


CONSIDERO SOLO  $V_A$

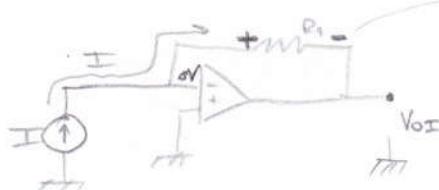


$$V_{OA} = V_A \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{\infty} \right)$$

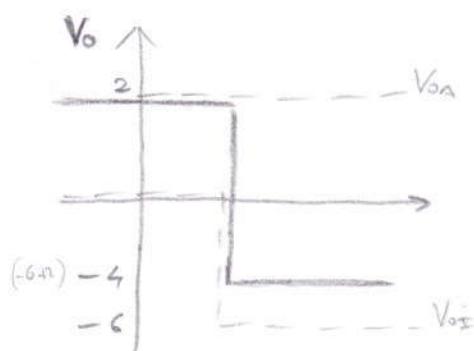
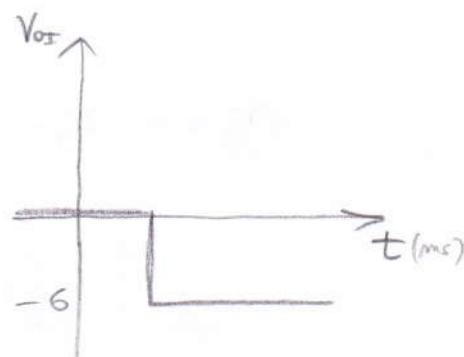
$$V_{OA} = V_A \quad \text{COMPONENTE COSTANTE}$$



CONSIDERO SOLO  $I$

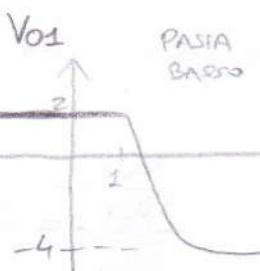
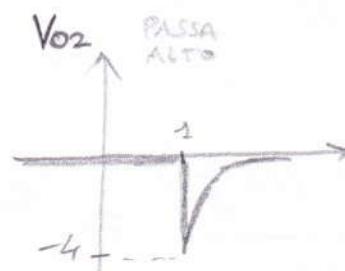


$$V_{OI} = -I R_1$$



OTTENUTO SOVRAPPONENDO  
 $V_{OA}$  e  $V_{OI}$

PASSA ALTO



$$\gamma = C R_2$$

$$= 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3$$

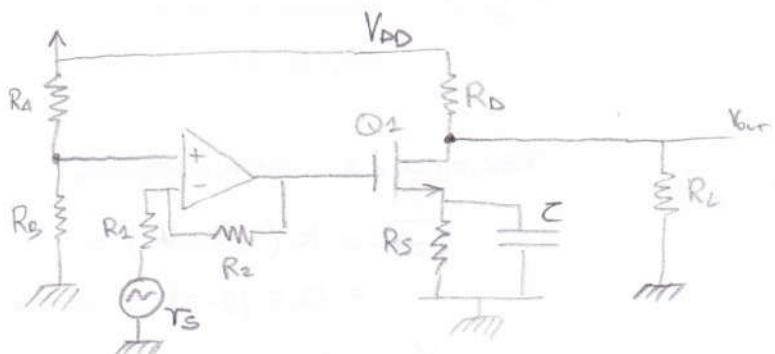
$$= 0,5 \text{ ms}$$

$$\gamma = C R_{eq}$$

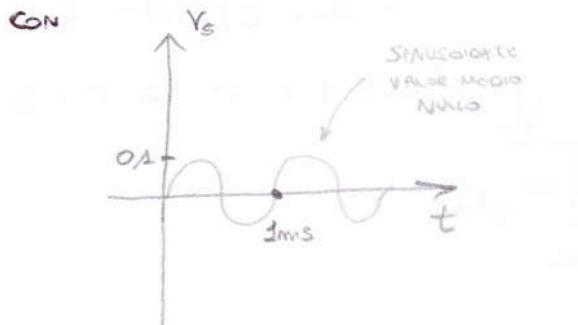
$$= C (R_2 + R_{out})$$

$$= CR_2$$

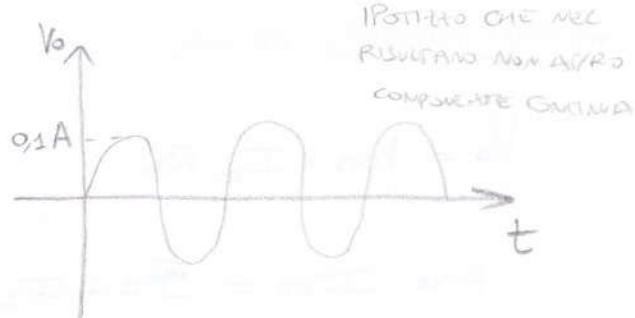
# ESERCIZIO D' ESAME



$$\begin{aligned}
 R_S &= 0.5 \text{ k}\Omega & R_D &= 2 \text{ k}\Omega \\
 R_A &= 9 \text{ k}\Omega & V_{DD} &= 10 \text{ V} \\
 R_B &= 1 \text{ k}\Omega & L^+ &= |L^-| = 10 \text{ V} \\
 R_C &= 10 \text{ k}\Omega & Q_1 &= V_T = 1 \\
 R_1 &= 2 \text{ k}\Omega & K &= 0.5 \\
 R_2 &= 6 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$



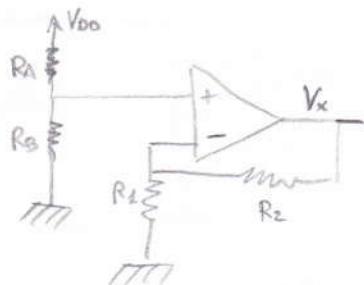
$$\begin{aligned}
 f &= 1 \text{ kHz} \\
 T &= 1 \text{ ms}
 \end{aligned}$$



DETERMINARE E GRAFICARE V\_o

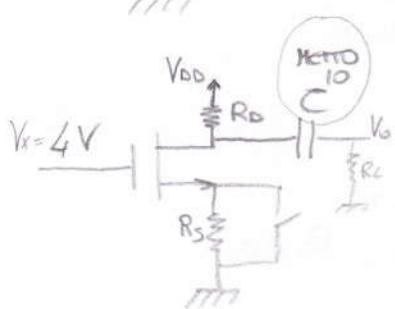
Ovvero devo calcolare il GUADAGNO DI TENSIONE DEL CIRCUITO

• ANALIZZO LA POLARIZZAZIONE (solo componenti continue che controllano il segnale)



$$V^+ = V_{DD} \cdot \frac{R_B}{R_A + R_B} = 10 \cdot \frac{1}{10} = 1 \text{ V}$$

$$V_x = V^+ \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 1 \left( 1 + 3 \right) = 4 \text{ V}$$



IOTTO TRANSISTOR IN ZONA DI SATURAZIONE

$$\begin{cases}
 I_D = k (V_{GS} - V_T)^2 \\
 V_{GS} = V_G - V_S = V_G - I_D R_S \rightarrow I_D = \frac{V_G - V_{GS}}{R_S}
 \end{cases}$$

$$\frac{V_G - V_{GS}}{R_S} = k (V_{GS} - V_T)^2 \rightarrow \frac{4 - V_{GS}}{0.5} = 0.5 (V_{GS} - 1)^2$$

$$(8 - 2V_{GS})2 = (V_{GS} - 1)^2 \rightarrow V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1 - 16 + 4V_G = 0$$

$$V_{GS}^2 + 2V_{GS} - 15 = 0$$

$$V_{GS} = \frac{-2 \pm \sqrt{4+60}}{2} = \frac{-2 \pm 8}{2} \Rightarrow +3 \text{ V} \quad -5 \text{ V}$$

SBAGLIATA PERCHÉ NI DA  
 $V_{GS} < V_T$

QUINDI  $V_{GS} = 3 \text{ V}$

$$g_m = 2 \text{ K} (V_{GS} - V_T) = 2 \text{ mA}$$

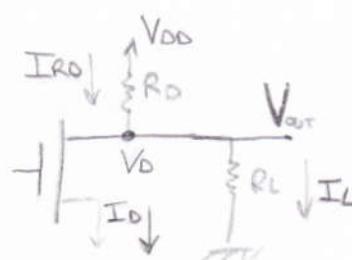
VERIFICO LA SATURAZIONE

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 = \\ = 0,5 (3-2)^2 = 2 \text{ mA}$$

TOGLIERO LA CAPACITÀ CHE HO INVERTITO PRIMA

$$V_D = V_{DD} - I_{RD} R_D$$

$$\text{DOVE } I_{RD} = I_D + I_L$$



$$V_{DS} = V_D - I_D (R_D + R_S) = \\ = 10 - 2(2,5) = 5 \text{ V}$$

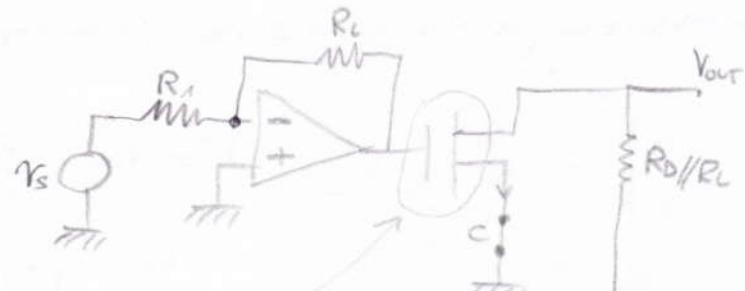
$$V_{DS} = 5 \text{ V} > V_{GS} - V_T = 2 \text{ V}$$

?

$$\frac{V_{DD}-I_D}{R_D} = \frac{V_D}{R_L} + 2 \quad \xrightarrow{\text{TROVO } V_D} \quad V_D = 5 \text{ V} = V_{out}$$

COMPONENTE  
CONTINUA  
DELL'USCITA.

• ANALIZZO LA COMPONENTE DI SECALE



$$A_1 = -\frac{R_2}{R_1} = -3$$

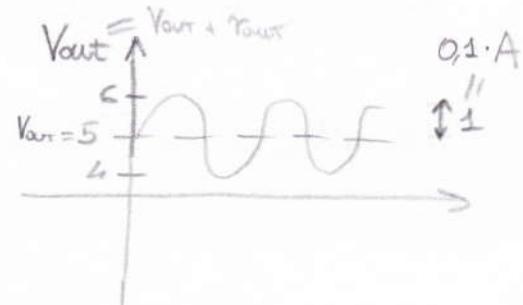
$$\frac{V_{out}}{V_x} = \frac{V_{out}}{V_x} \cdot \frac{R_3}{R_{S,i}}$$

||

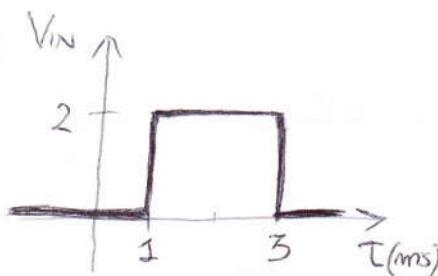
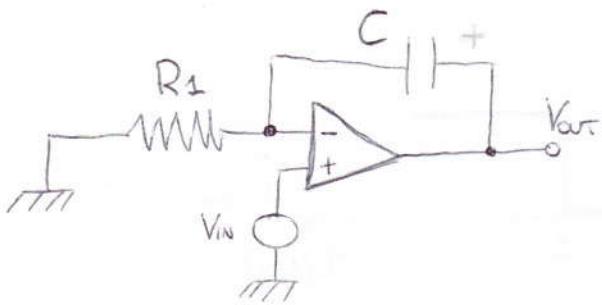
$$V_{out} = -g_m V_{GS} \frac{R_3}{R_D + R_L}$$

$$A_2 = \frac{V_{out}}{V_x} = -g_m R_D / R_L = -2 \cdot \frac{5}{3}$$

$$A = A_1 \cdot A_2 = -3 \left( 2 \cdot \frac{5}{3} \right) = 10$$



10 NOVEMBRE 2012



$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$C = 0,5 \mu\text{F}$$

φ. ideale

$$L^+ = |L^-| = 12$$

TROVARE  $V_o$  NEL TEMPO

$$V_{out} = V_e + V_R$$

EQ ALLA MAGIA

$\uparrow$

SOMMA DEL PROCESSO DI CARICA DEL CONDENSATORE  
E DI UNA TENSIONE COSTANTE  $R_i$

$t > 1$  NON INVERTENTE

IL CIRCUITO VIRTUALE CREA UNA DIFFERENZA DI POTENZIALE SU  $R_2$ , QUINDI  
INIZIA A SCORRERE UNA CORRENTE CHE COMINCIA A CARICARE IL CONDENSATORE

$$i = \frac{V_{in}}{R} = 1 \text{ mA} \rightarrow V_R = 1 \text{ mA} \cdot 2 \text{ k}\Omega = 2 \text{ V}$$

INTEGRATORE

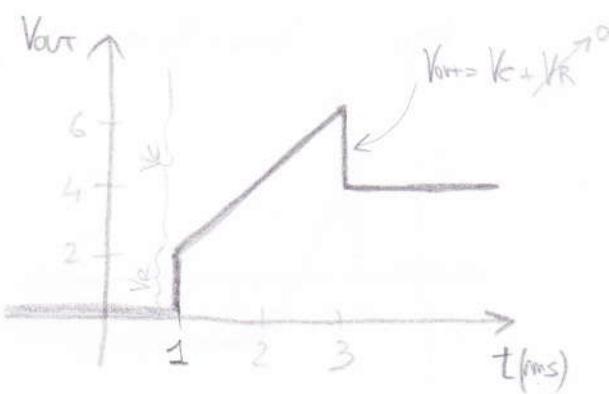
$\hookrightarrow V_c = \frac{Q}{C} = \frac{\int i dt}{C} = \frac{1 \text{ mA} \cdot t}{0,5 \mu\text{F}} = \frac{2 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot 10^3 \text{ s}}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 2 \text{ V/m s} = \frac{V_{in}}{RC} t$  FORMULA DIRETTA

NON INVERTENTE

$t > 3$

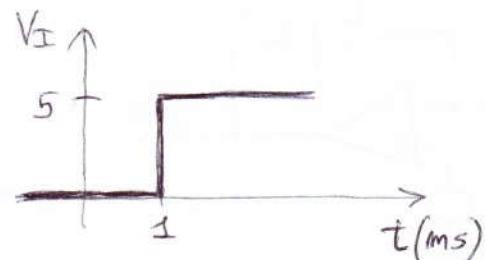
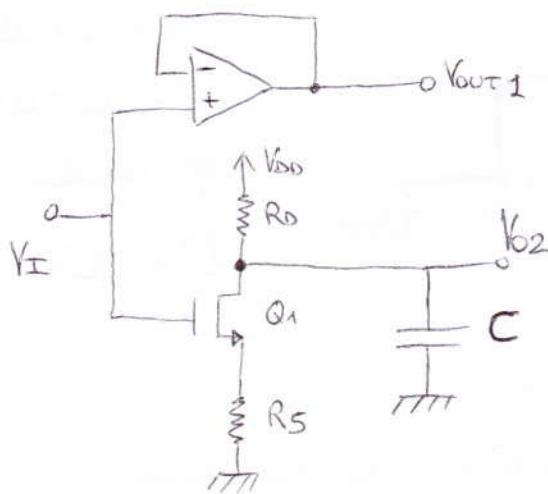
$$V_{in} \text{ TORNA A } 0 \Rightarrow i = 0 \rightarrow V_R = 0$$

A QUESTO PUNTO PERÒ IL CONDENSATORE NON SI SCARICA PERCHÉ PER IL C.C.V. SU  $V = 0 \text{ V}$  QUINDI NON C'È NESSUNA RESISTENZA SU CUI SCARICARSI



1

20 SETTEMBRE 2012



Op. ideale

$$L^+ = |L| = 10 \text{ V}$$

$$V_T = 2 \text{ V}$$

$$K = 0.5 \text{ mA/V}^2 \quad V_{DD} = 10 \text{ V}$$

$$R_D = 2 \text{ k}\Omega$$

$$C = 0.1 \mu\text{F}$$

$$R_S = 1 \text{ k}\Omega \quad \lambda = 0 \quad x = 0$$

Trovare la  $V_{out} = V_{out1} - V_{out2}$  in funzione del tempo

TNB SUL RAMO SUPERIORE HО UN INSEGUIMENTORE DI TENSIONE ( $V_N = V_{out}$ )

C SCARICO È UN COROCIRCUITO

$t < 1$   $V_G = 0 \rightarrow$  TRANSISTORE INERTZETTO (off)  $\rightarrow V_{out2} = 0$   
 $V_{IN} = 0 \hookrightarrow V_{out1} = 0$

$t > 1$   $= \infty$

$$V_G = 5 \text{ V} \quad V_S = R_S \cdot I_D$$

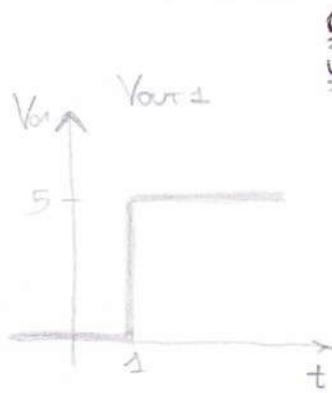
SE TRANS  
IN SAT

$$I_D = K(V_S - V_T)^2 = 0.5(4 - I_D)^2$$

$$I_D^2 - 10I_D + 16 = 0 \quad \begin{cases} I_D = 8 \text{ mA} \rightarrow V_{GS} = 5 - (1 \cdot 8) < 0 \quad \text{NO} \\ I_D = 2 \text{ mA} \rightarrow V_{GS} = 5 - (1 \cdot 2) = 3 \quad \text{SI} \end{cases}$$

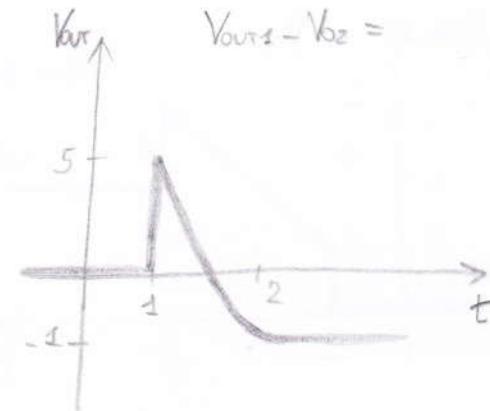
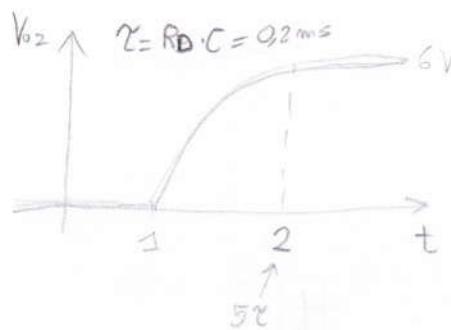
VERIFICO SAT.

$$V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D - V_S = 4 > V_{GS} - V_T = 2$$

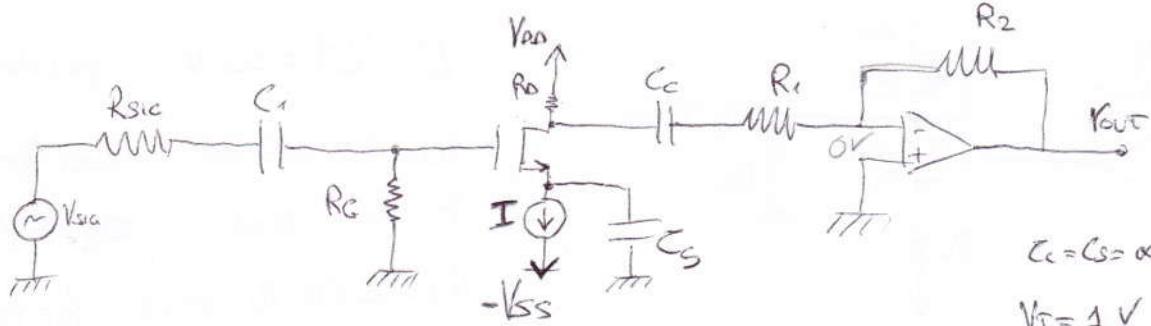


C CARICO È UN CIRCUITO APERTO

$$V_{out2} = V_D = V_{DD} - I_D R_D = 6 \text{ V}$$

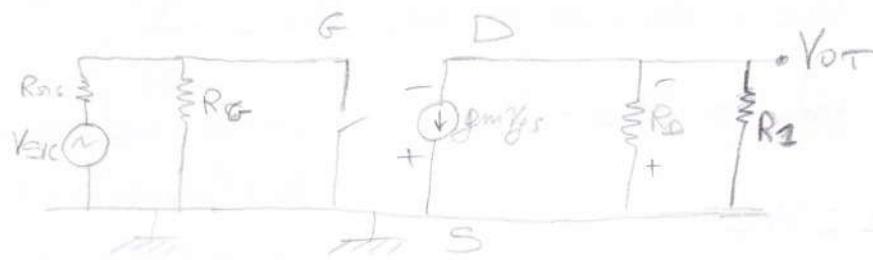


5 NOVEMBRE 2011 ✓



$$\text{Calcolare } I \text{ per avere } Av = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{sig}}} = 80$$

### SEGNALI



$$r_g = r_{\text{sig}} \cdot \frac{R_G}{R_S + R_G} = r_{\text{sig}} \cdot \frac{5 \text{ M}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 5 \text{ M}\Omega} \approx r_{\text{sig}} = r_{\text{gs}}$$

$$r_{\text{out}} = -\overline{gm} \overset{id}{r_{\text{gs}}} \cdot \frac{R_D \cdot R_S}{R_S + R_D} = -\overline{gm} r_{\text{gs}} \cdot 2 = -2 \overline{gm} r_{\text{sig}}$$

$$r_{\text{out op}} = Av \cdot r_{\text{out}} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot r_{\text{out}} = 20 \overline{gm} r_{\text{sig}}$$

$$A_{\text{TOT}} = \frac{r_{\text{out op}}}{r_{\text{sig}}} = 20 \overline{gm} = 80 \quad \Leftrightarrow \quad \overline{gm} = 4 \text{ A}^{-1}$$

$$\overline{gm} = 2K(V_{GS} - V_T) = 4 \quad \rightarrow \quad V_{GS} = 2$$

### CONTINUA

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 2 \text{ mA}$$

//

I

VERIFICA SAT

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D - V_S \geq V_{GS} \cdot V_T \\ 10 - 6 + 2 \geq 2$$

2

**NB**  $V_S = V_G - V_{GS} = -2$

oppure

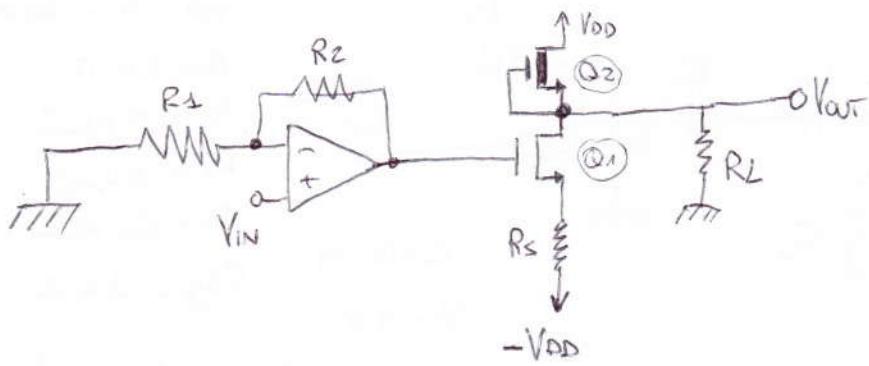
$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

$$\hookrightarrow 2 = 2(V_S - V_T)^2$$

$$1 = V_S^2 + 2V_S + 1$$

$$V_S(V_S + 2) = 0 \rightarrow V_S = -2$$

24 GIUGNO 2011 ✓



$$L^+ = |L^-| = 10 \text{ V} \quad \text{Operazione}$$

$$V_{T1} = 1 \text{ V} \quad K_1 = 0,5 \quad \lambda = 0 \quad X = 0$$

$$V_{T2} = -2 \text{ V} \quad K_2 = 0,5 \quad V_{DD} = 5 \text{ V}$$

$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega \quad R_L = 15 \text{ k}\Omega$$

CON  $V_{IN}=0$  trovare  $R_s$  tale che  $V_{OUT}=0 \text{ V}$

- $Q_2$  È IN SAT. DATO CHE  $V_{DS2} = V_{DD} = 10 \geq V_{GS2} - V_{T2} = 2$

- $Q_1$  È IN SAT. PERCHÉ  $V_{DS1} \geq V_{GS1} - V_{T1}$

$$V_{D1} - V_{S1} \geq V_{G1} - V_{S1} - V_{T1}$$

$$-V_{S1} \geq -V_{S1} - V_{T1} \quad 0 \geq -V_{T1} = -1$$

LO POSSO ANCHE VERIFICARDO

$$V_D - V_S \geq V_G - V_S - V_T$$

$$0 - (-3) \geq -3 - 1$$

$$-3 \geq -4$$

I DUE TRANSISTOR SONO IN SERIE E IN SAT.

$$i_{D1} = i_{D2}$$

$$K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2 = K_2 V_{T2}^2$$

$$K_1 (K_2 S_1 - V_{T1})^2 = 0$$

$$(V_{GS1} - V_{T1})^2 = \frac{2}{0,5} \rightarrow (V_{GS1} - 1)^2 = 4 \quad \xrightarrow{-1 \text{ NO}} \quad V_{GS1} = 3 \text{ V} \quad \boxed{S1}$$

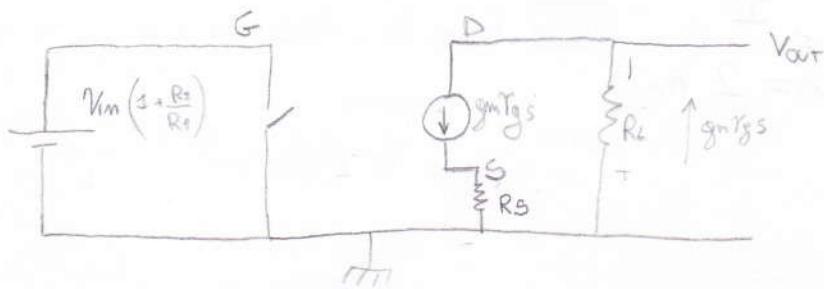
ORA

$$V_{GS2} = V_G - V_S = 0 - \left( \frac{R_s I_D - V_{DD}}{V_S} \right)$$

$$\rightarrow 3 = -R_s I_D + V_{DD} \quad R_s = 1 \text{ k}\Omega$$

NB  $V_S = V_G - V_{GS}$  oppure  $V_S = R_s I_D - V_{DD}$   
oppure  $I_D = k(V_G - V_S - V_T)^2$

CON  $R_s$  CALCOLATO, TROVARE GUADAGNO PER PICCOLI SEGNALI  $A_v = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$



$$g_m1 = 2K(K_{S1} - V_{T1}) = 2m_A/g_f$$

$$\gamma_g = \gamma_{in} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 6 \gamma_{in} \quad \gamma_s = idRs = gm \gamma_{gs} Rs$$

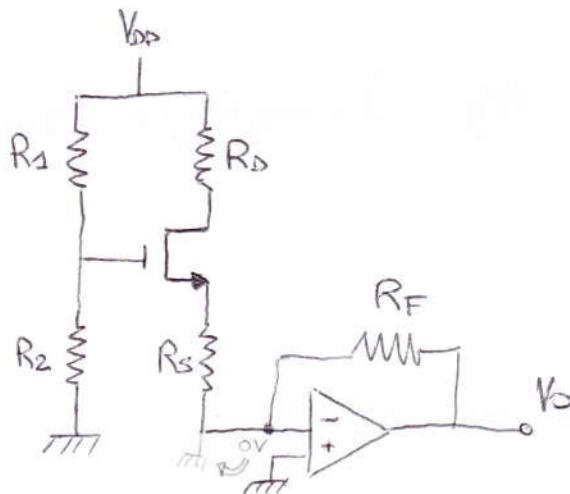
$$\gamma_{gs} = 6 \gamma_{in} - gm \gamma_{gs} Rs \quad \rightarrow \quad \gamma_{gs} (1 + gm_1 Rs) = 6 \gamma_{in}$$

$$\gamma_{gs} = \frac{6 \gamma_{in}}{3} = 2 \gamma_{in}$$

$$\gamma_{out} = -gm \gamma_{gs} R_L = -4 \gamma_{in} \cdot 15 = -60 \gamma_{gs}$$

$$A = \frac{\gamma_{out}}{\gamma_{in}} = -60$$

3 MARZO 2011



$$V_{DD} = 5 \text{ V}$$

$$R_F = 3 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 2 \text{ M}\Omega$$

$$V_T = 1 \text{ V}$$

$$R_2 = 8 \text{ M}\Omega$$

$$K = 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$R_D = 750 \Omega$$

$$R_S = 500 \Omega$$

Ampl. operaz. classe

$$L^+ = |L^-| = 15 \text{ V}$$

CALCOLARE V\_G

per il C.C.V.

$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{DD} = 4 \text{ V}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 4 - \underline{I_D R_S}$$

IPOTIZZO Q  
SATURATO

$$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$$

QUINDI

$$I_D = 0,5 \cdot (V_{GS} - 1)^2$$

$$I_D = 0,5 (V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1)$$

SOL. NUM. PRIMA

$$V_{GS} = 4 - 0,5 (V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1) \cdot 0,5 = 500 \Omega$$

$$V_{GS} = 4 - \frac{(V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1)}{4}$$

$$4V_{GS} - 16 = V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1$$

$$V_{GS}^2 + 2V_{GS} - 15 = 0$$

$$\frac{-2 \pm \sqrt{4+60}}{2}$$

SI  $3 \geq V_T$

-5 NO

$$I_D = 2 \text{ mA}$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = 1 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} &\text{oppure } I_D = K (V_G - V_S)^2 \\ &\text{oppure } V_D = I_D R_S \end{aligned}$$

VERIFICO SATURAZIONE

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$V_D - V_S \geq V_{GS} - V_T$$

$$(V_{DD} - I_D R_D) - V_S \geq V_{GS} - V_T$$

ANPL  
OPERAZ.  
INVERT.

$$V_D = -\frac{V_S}{R_S} R_F = -6$$

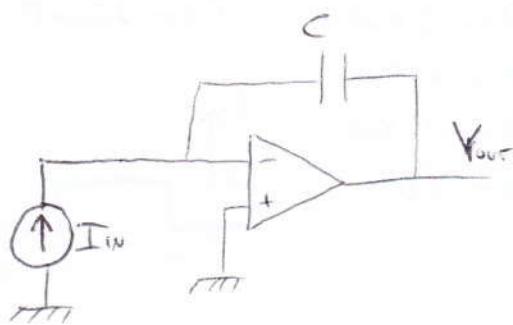
$$V_D = -I_D R_F = -6$$

$$V_D = -\frac{R_F}{R_S} \cdot V_S = -\frac{3}{0,5} = -6 \text{ V}$$

CADUTA DI POT. SU RF

PREPARETA

10 FEBBRAIO 2011

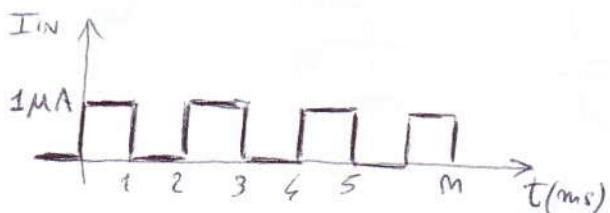


Oper. ideale

$$L^+ = |L^-| = 5V$$

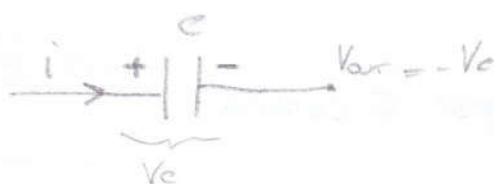
CONDENSATORE SCARICO per  $T < 0$

$$C = 1 \text{ MF}$$



DETERMINARE  $V_{out}$  NEL TEMPO E DISSEGNARE IL SUO GRAFICO

NB!

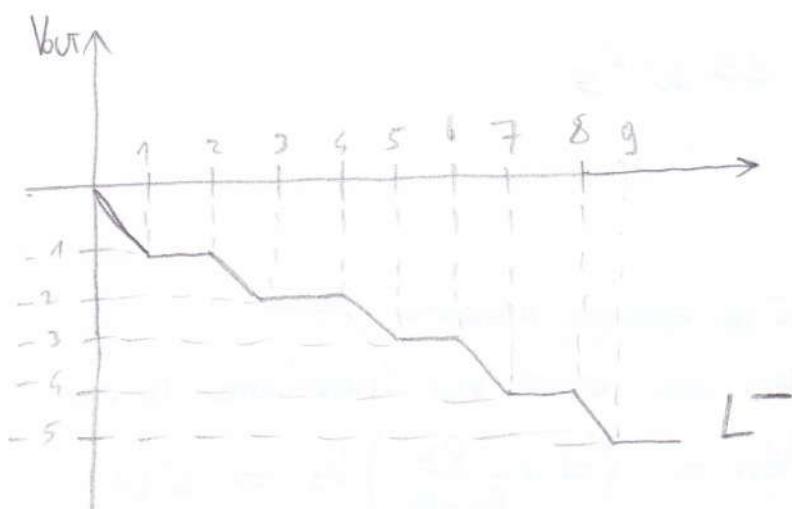


IL CIRCUITO È EQUIVALENTE  
AD UN INTEGRATORE (INVERT.)

$$V_{out} = -V_c = -\frac{1}{C} \int_0^t I dt = -\frac{I}{C} t = -\frac{10^{-6}}{10^{-9}} \cdot 10^{-3} t =$$

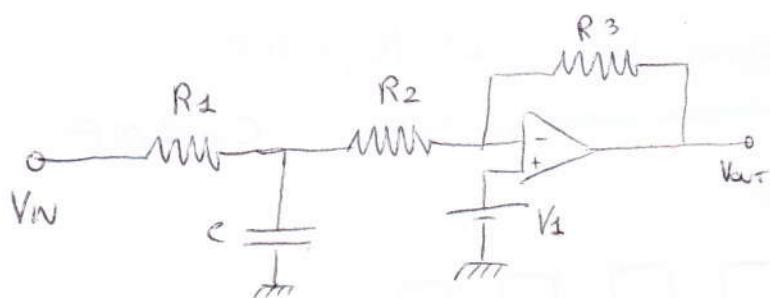
$$= -1 \text{ V}_{\text{ms}}$$

QUANDO  $I_N \neq 0$



4

10 NOVEMBRE 2010 ✓



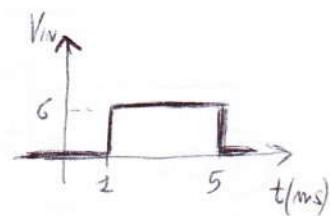
$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 4 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 12 \text{ k}\Omega$$

$$V_1 = 2 \text{ V}$$

$$C = 10 \text{ mF}$$

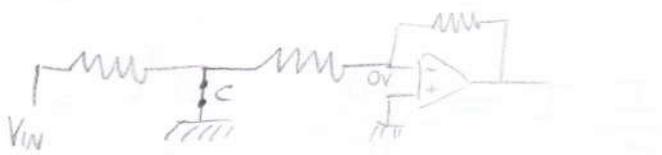


DETERMINARE  $V_o$  NEL TEMPO

DEVO UTILIZZARE LA SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI!

$V_1 = 0$  | CONSIDERO SOLO  $V_{IN}$

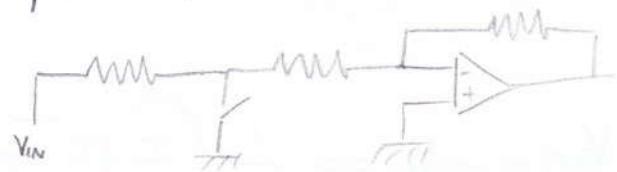
per  $C$  scarico ho



CORRENTE TUTTA VERSO MASSA

QUINDI  $V_{OUT} = 0$

per  $C$  carico



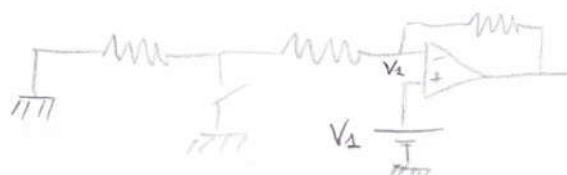
HO UNA CONF INVERTENTE IN

$$\text{cui } V_{OUT} = -\frac{R_3}{R_1+R_2} V_{IN} = -12 \text{ V}$$

$$\gamma = C \cdot R_{eq} = C \cdot (R_1 // R_2) = 13 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

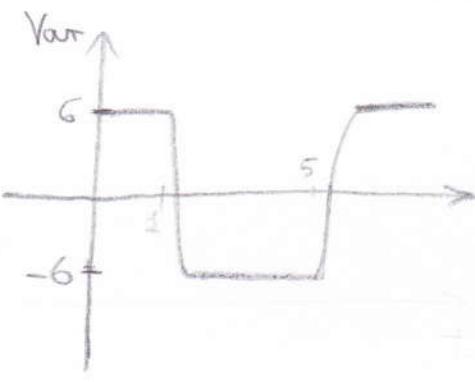
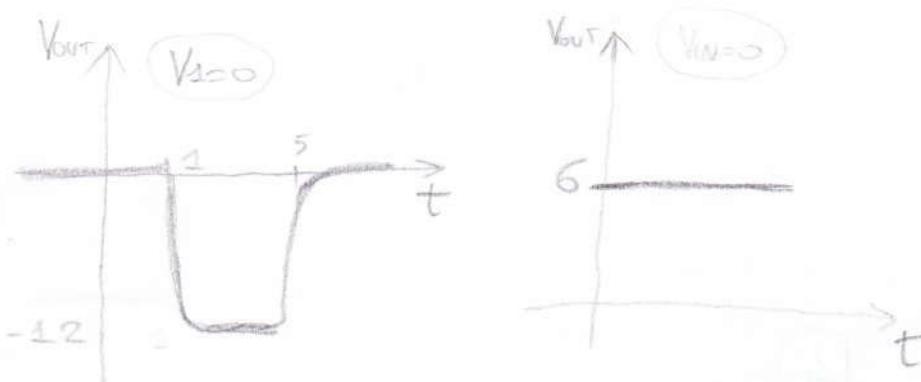
$V_{IN} = 0$  | CONSIDERO SOLO  $V_1$

$V_1$  È CONTINUA QUINDI IL CIRCUITO È UN CIRCUITO APERTO

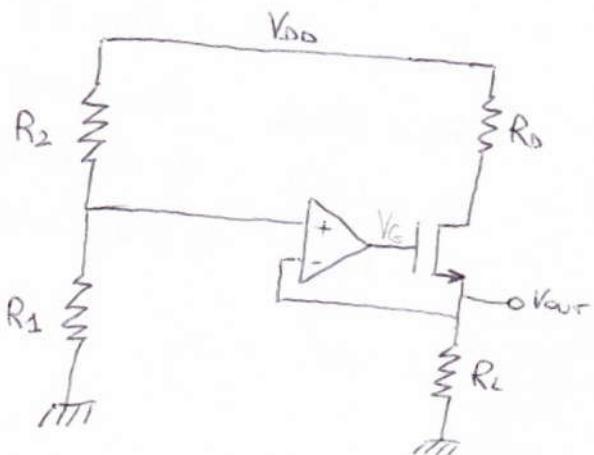


HO UNA CONF. NON INVERTENTE IN CUI

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_3}{R_1+R_2}\right) V_1 = 6 \text{ V}$$



3 FEBBRAIO 2010 ✓



$$V_{DD} = 10 \text{ V} \quad R_1 = 3 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 7 \text{ k}\Omega$$

$$R_D = R_L = 6 \text{ k}\Omega \quad K = 0,125 \quad V_t = 1$$

$$\text{Operon. ideale: } L^+ = |L^-| = 10 \text{ V}$$

- DETERMINARE IL PUNTO DI LAVORO DEL TRANSISTORE MOS ( $I_D, V_{GS}, V_{DS}$ )
- $V^+ = V_{DD} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 3 \text{ V}$

per il c.c.v. su  $V^- < e^- 3 \text{ V}$

$$V^+ - R_2 I_D = 0 \rightarrow I_D = 0,5 \text{ mA}$$

CERCHIAMO  $V_G$

$$I_D = K(V_{GS} - |L|)^2$$

$$0,5 = \frac{1}{8} (V_G - V_S - V_T)^2$$

$$4 = (V_G - 4)^2$$

$$V_G^2 - 8V_G + 12 = 0$$

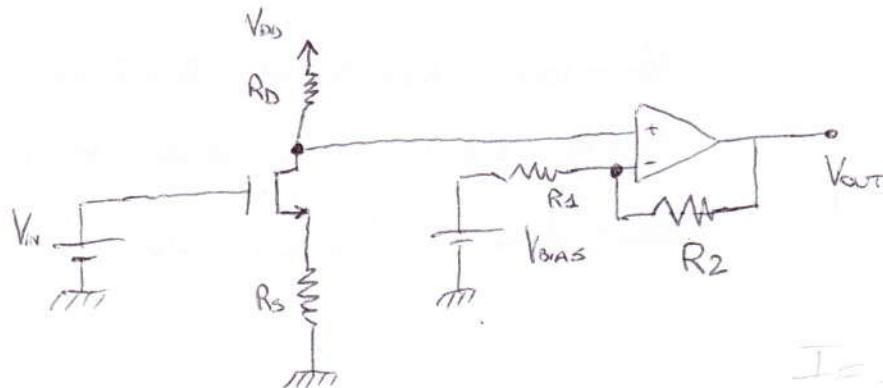
$$V_G = 4 \pm 2 \xrightarrow[2]{\substack{\text{S1} \\ \text{No}}} \boxed{6} \quad V_{GS} = V_G - V_S = 3 \text{ V}$$

$$V_{DD} - I_D R_D = 7 \text{ V} = V_D$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 7 - 3 = 4 \text{ V}$$

VERIFICO SAT

$$V_{DS} = 4 \geq V_{GS} - V_T = 2$$



$$\begin{aligned}V_{dd} &= 10 \text{ V} & V_{in} &= 5 \text{ V} \\R_d &= 2 \text{ k}\Omega & R_s &= 2 \text{ k}\Omega \\R_1 &= 1 \text{ k}\Omega & R_2 &= 4 \text{ k}\Omega \\V_t &= 1 \text{ V} & K &= 1,5 \text{ mA/V}^2\end{aligned}$$

$$I = \frac{V^+}{R_d} \quad V_{in} = I \cdot R_s$$

DETERMINARE  $V_{bias}$  TALE CHE  $V_{out} = 0$

$$I_{DTR} \text{ TRANS IN SOT} \quad I_D = K(V_{GS} - V_t)^2 \quad V_{GS} = V_G - V_S = V_{in} - I D R_s$$

$$\text{SOSTITUIRE } I_D \text{ nello } 2^{\text{a}} \quad V_{GS} = V_{in} - R_s K (V_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{GS} = 5 - 6(V_{GS}^2 - 2V_{GS} + 1) \rightarrow V_{GS} = 5 - 6V_{GS}^2 + 12V_{GS} - 6$$

$$6V_{GS}^2 - 11V_{GS} + 1 = 0$$

$$\frac{5 \pm \sqrt{25 - 24}}{6} = \frac{1}{6} \Rightarrow \frac{1}{6} = \frac{1}{6} = \frac{1}{3}$$

FA CAVI CON DATI STRAM E TROVA  $I_D = 1,5 \text{ mA}$ ,  $V_{GS} = 2 \text{ V}$

POI

MIA SOLUZIONE

$$V_D = V_{dd} - I D R_D = 10 - 1,5 \cdot 2 = 7 \text{ V}$$

$$I = \frac{V^+}{R_d} = \frac{7}{4} \text{ A}$$

$$V_{R4} = I \cdot R_d = \frac{7}{4} \text{ V}$$

$$\text{ED: } V_{bias} - \frac{7}{4} + V^+ = 0$$

$$V_{bias} = \frac{7}{4} + 7 = \frac{35}{4} \text{ V}$$

LUI USA LA SOVRAPP. DEGLI EFFETTI

$$V_{bias} = 0$$

$$V_{out} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) V^+ = 5 \cdot 7 = 35 \text{ V}$$

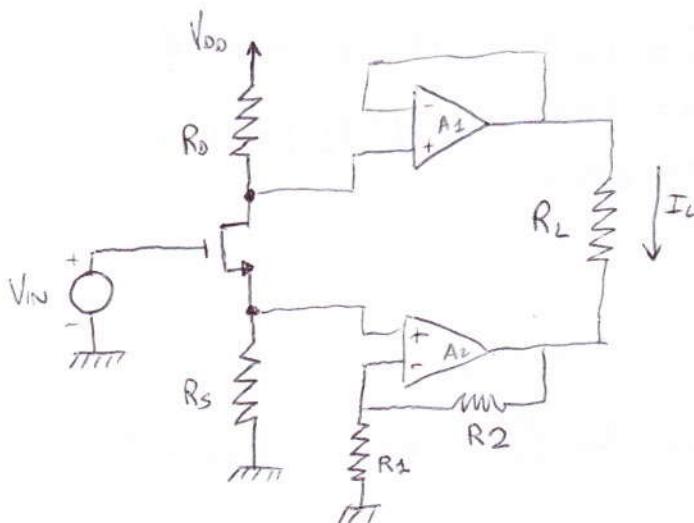
$$V_{in} = 0$$

$$V_{out} = - \frac{R_2}{R_1} V_{bias} = -4 V_{bias}$$

$$V_{out} = V_{out}^{(1)} + V_{out}^{(2)} = 35 - 4 V_{bias}$$

$$0 = 35 - 4 V_{bias} \quad V_{bias} = \frac{35}{4} \text{ V}$$

3 GIUGNO 2014



$$V_T = 2 \text{ V} \quad K = 0,5$$

$$\lambda = 0 \quad X = 0 \quad \text{Oper. ideale}$$

$$L^+ = |L^-| = 12 \text{ V} \quad V_{DD} = 10 \text{ V}$$

$$R_L = 2 \text{ k}\Omega \quad R_D = 2 \text{ k}\Omega \quad R_S = 0,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 2 \text{ k}\Omega \quad R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$



Determinare e graficare la  $I_L$  nel tempo

(t < 0)  $V_I^+ = V_{DD} \quad I_L = \frac{V_{DD}}{R_L} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mA}$

(t > 0)  $I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \quad V_{GS} = V_G - V_S = V_{IN} - (I_D R_S)$

$$V_{GS} = V_{IN} - R_S K (V_{GS} - V_T)^2 \rightarrow V_{GS} = 5 - \frac{1}{4} (V_{GS}^2 - 4V_{GS} + 4)$$

$$V_{GS} = 5 - \frac{V_{GS}^2}{4} + V_{GS} - 1 \rightarrow \frac{V_{GS}^2}{4} - 4 = 0$$

$$V_{GS} = 4 \text{ V} \quad I_D = 2 \text{ mA}$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 10 - 4 = 6 \text{ V}$$

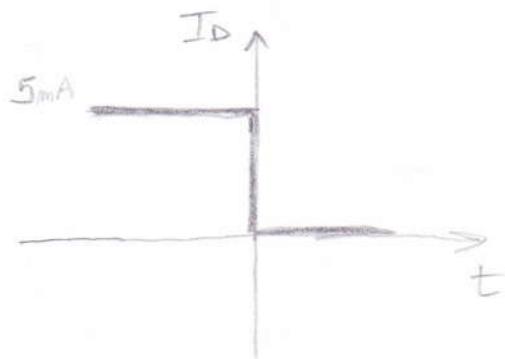
$$V_S = V_G - V_{GS} = 5 - 4 = 1 \text{ V} \quad \text{VERIFICA SAT} \quad V_{GS} = 5 \geq V_{GS} - V_T = 2$$

AMPL  
OPER NON  
INVERT

$$V_{O2} = i_1 (R_2 + R_1) = \frac{V_I}{R_1} (R_1 + R_2) = 6 \text{ V} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Tempo libe} \\ \text{serve} \end{array} \right\}$$

$$V_{OUT2} = V_{R1} + V_{R2} = V_{R1} + \frac{V_I}{R_1} \cdot R_2 = 6 \text{ V} \quad \left. \begin{array}{l} \text{eg. olo} \\ \text{meglio} \end{array} \right\}$$

$$V_{OUT2} = \text{Av. } V_{IN} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_S = 6 \text{ V}$$



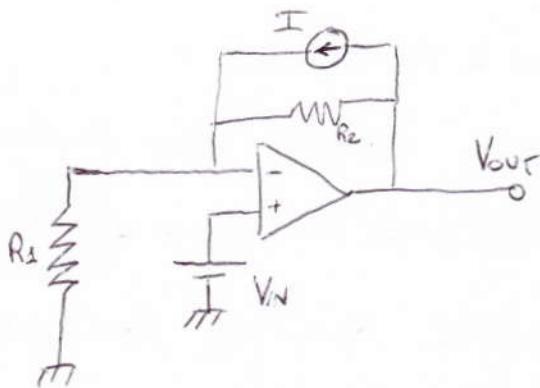
$$V_{R1} = 6 \text{ V} \quad I_L = \frac{0}{R_L} = 0$$

6

ATTENZIONE

NEL NON INVERTER  $V_{OUT}$  NON È LA CADUTA DI POTENZIALE SU  $R_2$

17 GENNAIO 2013 ✓



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

$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega$$

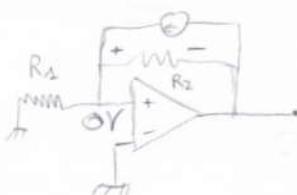
$$R_2 = 6 \text{ k}\Omega$$

$$L^+ | L^- = 10 \text{ V}$$

CALCOLARE E GRAFIFICARE LA TRANSCARATTERISTICA  $V_{out} = f(V_{in})$  per  $0 \text{ V} \leq V_{in} \leq 5 \text{ V}$

UTILIZZO SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI

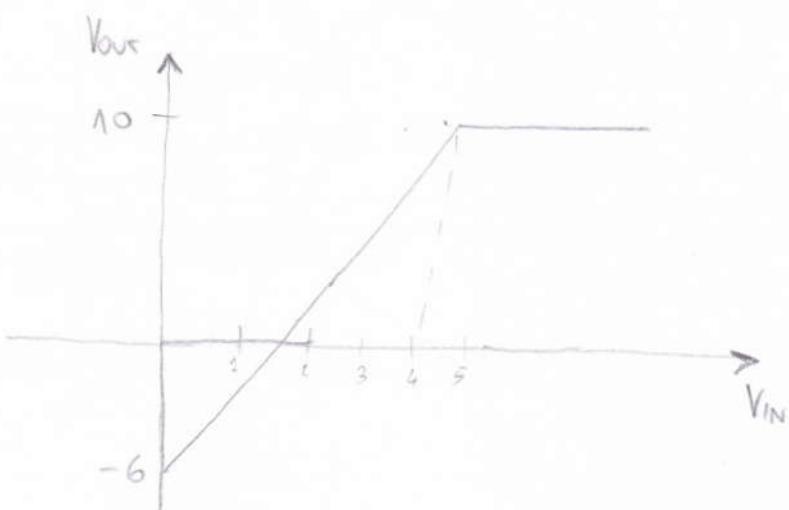
( $V_{in}=0$ )



PER IL CCV SU  $V_t = 0 \text{ V}$  QUINDI  $I$   
PUÒ SCORRERE SINO A  $R_2$  (VEDI PAG 2)

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_{in}=0 & V_{out}=-6 \\ V_{in}=1 & V_{out}=-2 \\ V_{in}=2 & V_{out}=2 \\ V_{in}=3 & V_{out}=6 \\ V_{in}=4 & V_{out}=10 \\ V_{in}=5 & V_{out}=16 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} V_{out} = -6 \\ V_{out} = -2 \\ V_{out} = 2 \\ V_{out} = 6 \\ V_{out} = 10 \\ V_{out} = 16 \end{array} \quad +4 \text{ Vout per ogni } V_{in}$$

$= 10 \text{ (cm)}$



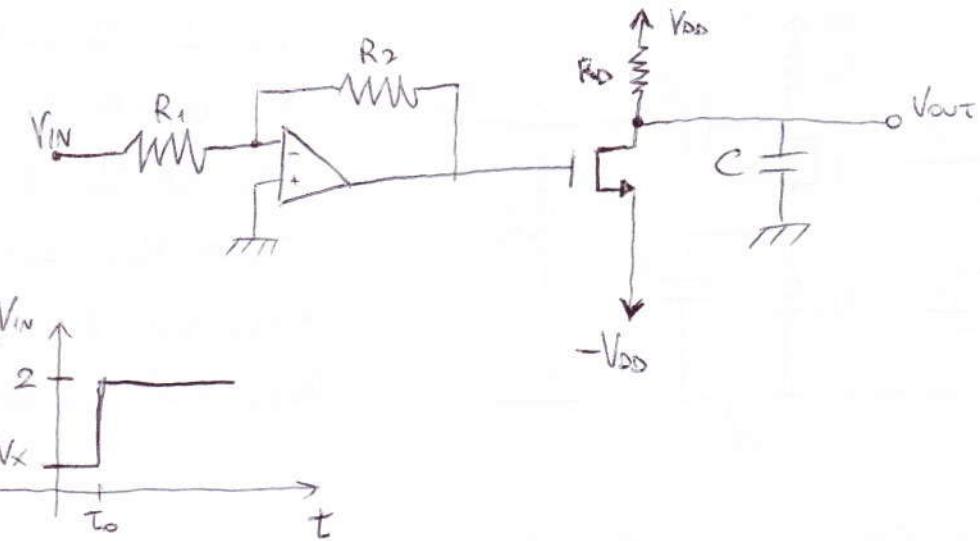
( $I=0$ )

$$V_{out2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in}$$

$$= 4 V_{in}$$

$$V_{out} = V_{o1} + V_{o2} = 4 V_{in} - 6$$

19 APRILE 2012



Operaz. classe

$$L^+ = |L^-| = 5 \text{ V}$$

$$V_T = 2 \text{ V} \quad K = 0,25$$

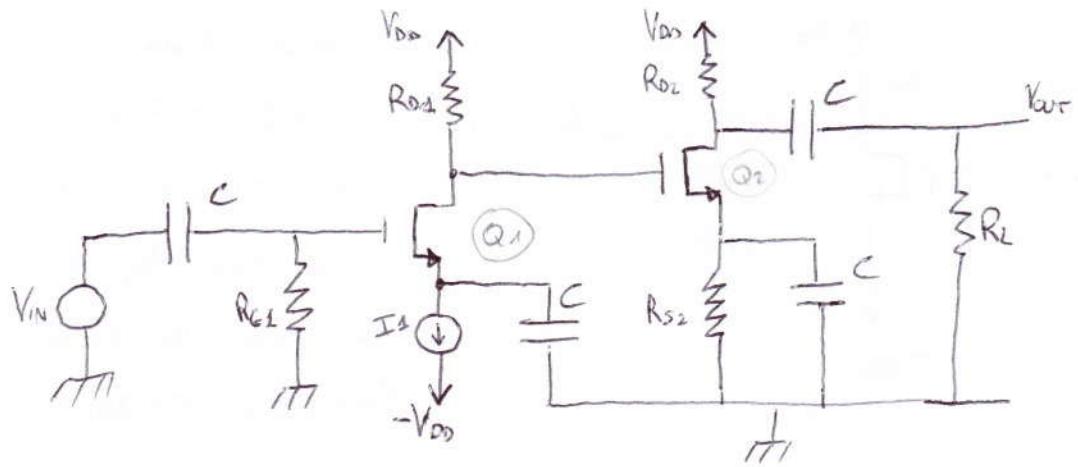
$$\lambda = 0 \quad X = 0 \quad V_{BD} = 5$$

$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 8 \text{ k}\Omega$$

$$R_D = 5 \text{ k}\Omega \quad C = 2 \mu\text{F}$$

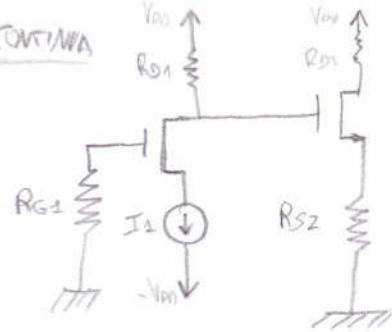
CALCOLARE  $V_X$  PER  $t < t_0$  CHE DA  $V_{out} = 0 \text{ V}$

23 FEBBRAIO 2012 ✓



$$\begin{aligned}
 V_{T1} &= 1V \quad V_{T2} = 1V \\
 K_1 &= 0.5 \quad K_2 = 1 \\
 I_1 &= 2mA \quad V_{DD} = 5V \\
 C &= \infty \quad R_{G1} = 10k\Omega \\
 R_{D1} &= 1k\Omega \quad R_{S2} = 1k\Omega \\
 R_{D2} &= 2k\Omega \quad R_L = 2k\Omega
 \end{aligned}$$

CALCOLARE  $V_{GS}$ ,  $I_{D1}$  e  $V_{DS}$  DI  $Q_1$  e  $Q_2$  e  $A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$



$$V_{GS1} = V_G - V_S$$

NB  $V_{GS}$  NON È  $-V_{DD}$  !!  
È  $I_D \in I_L$  !!

$$\begin{aligned}
 I_{D1} &= K_1(-V_S - V_{T1})^2 = \\
 &= 0.5(V_S^2 + 2V_S + 1)
 \end{aligned}$$

$$V_S^2 + 2V_S - 3 = 0 \quad \frac{-2 \pm \sqrt{4 + 12}}{2} = \boxed{-3} \quad \boxed{1} \quad \boxed{51}$$

$$\text{OBTIENI } V_{GS1} = 3V$$

$$V_{DS1} = V_D - V_S = V_{DD} - I_D R_{D1} - V_S = 5 - 2 + 3 = 6V$$

$$V_{D1} = 3V$$

$$V_{G2} = V_{D1} = 3V \quad I_{D2} = K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2 \quad V_S = I_{D2} R_{S2}$$

$$\text{SOSTITUISCO} \quad V_{S2} = K_2 R_{S2} (V_G - V_{S2} - V_{T2})^2 \quad V_{S2} = (K_2 + 2)^2$$

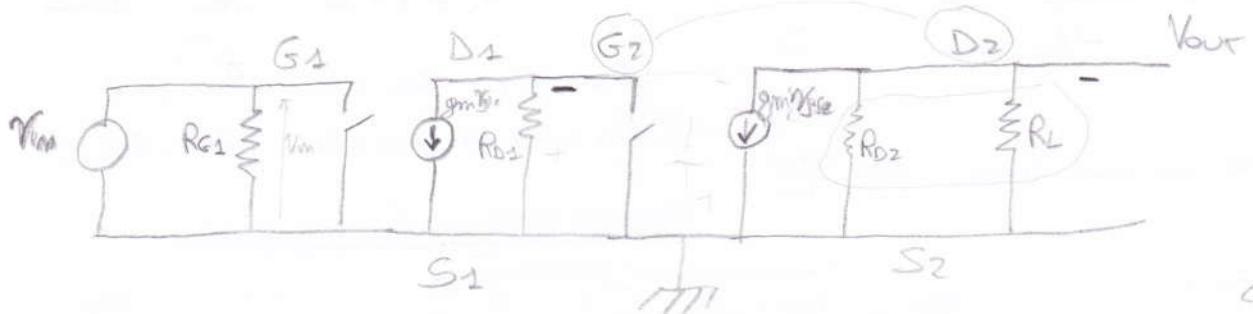
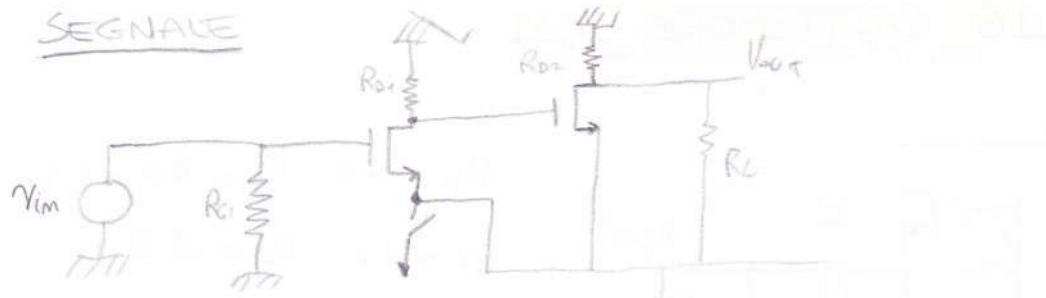
$$V_{S2}^2 - 4V_{S2} + 4 = V_{S2} \rightarrow V_{S2}^2 - 5V_{S2} + 4 = 0$$

$$\frac{5 \pm \sqrt{25 - 16}}{2} = \frac{5 \pm 3}{2} = \boxed{\begin{matrix} 4 \\ 1 \end{matrix}} \quad \boxed{\begin{matrix} \text{No} \\ \text{SI} \end{matrix}} \quad V_{S2} = 1 \quad V_{GS2} = 2$$

$$I_{D2} = 1(2 - 1)^2 = 1mA$$

$$V_{DS2} = V_{DD} - I_{D2} R_{D2} - V_{S2} = 5 - 2 \cdot 1 = 2V$$

### SEGNALI



$$g_m = ek(V_{GS} - V_t)$$

$$g_{m1} = 2k_1(V_{GS1} - V_t) = 2 \cdot 0.5 (3 - 1) = 2 \text{ A}^{-1}$$

$$i_{D1} = 2 V_{in}$$

$$V_{GS2} = -R_{D1} \cdot i_{D1} = -1 \cdot 2 V_{in} = -2 V_{in}$$

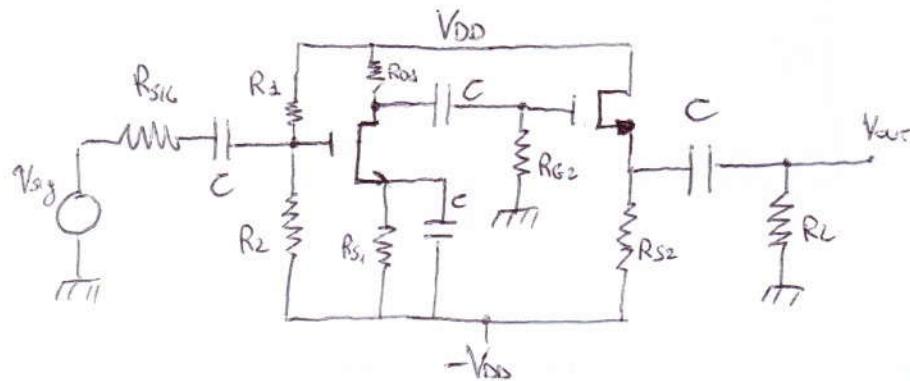
$$g_{m2} = 2k_2(V_{GS2} - V_t) = 2 \text{ A}^{-1}$$

$$i_{D2} = 2 V_{GS2} = -4 R_{D1} V_{in} = -4 V_{in}$$

$$V_{out} = -i_{D2} \cdot \frac{R_L R_{D2}}{R_{D1} R_{D2}} = +4 V_{in} \frac{4}{4} = +4 V_{in}$$

$$Av = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 4$$

16 SETTEMBRE 2011 ✓



$$V_{T1} = 1V \quad K_1 = 0.5 \text{ mA/V}^2$$

$$V_{T2} = 1V \quad K_2 = 0.5$$

$$C = \infty \quad V_{DD} = 5V \quad R_{sig} = 50\Omega$$

$$R_L = 3k\Omega \quad d=0 \quad X=0$$

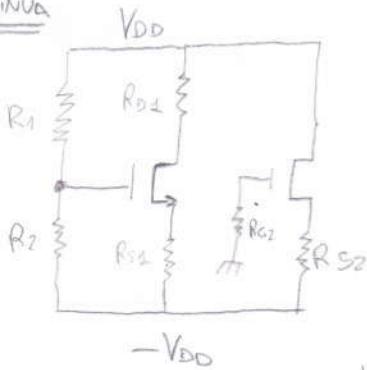
$$R_1 = 20k\Omega \quad R_2 = 30k\Omega \quad R_{D1} = 2k\Omega$$

$$R_{S2} = 1.5k\Omega \quad R_{S1} = 6k\Omega \quad R_{G2} = 8k\Omega$$

CALCOLARE IL GUADAGNO PER PRIMI SEGNALI  $A_v = \frac{r_{out}}{r_{in}}$

PARTITORE DI TENSIONE SENZA MASSA

CONTINUA



$$V_{GS1} = \frac{V_{DD} \cdot R_2}{R_1 + R_2} - \frac{V_{DD} R_1}{R_1 + R_2} = 5 \cdot \frac{30}{50} - 5 \cdot \frac{20}{50}$$

$$= 3 - 2 = 1V$$

$$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2$$

$$V_{GS2} = V_{GS1} - (I_{D1} R_{S2} - V_{DD})$$

$$V_{GS1} = 1 - 0.75(V_{GS1} - 1)^2 + 5$$

$$V_{GS} = 1 - 0.75V_{GS}^2 + 1.5V_{GS} - 0.75 + 5$$

$$0.75V_{GS1}^2 - 0.5V_{GS1} - 5.25 = 0$$

$$\frac{0.5 \pm \sqrt{0.25 + 15.75}}{1.5} = \begin{cases} 3 \\ -2.3 \end{cases}$$

S1  
No1

$$I_D = 0.5(3-1)^2 = 2 \text{ mA}$$

VERIFICA S1

$V_{GS} - V_T$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_{D1} - V_S = 5 - 4 + 2 = 3 \geq 2$$

$$V_{S1} = V_G - V_{GS1} = 1 - 3 = -2V$$

$$V_{G2} = 0$$

$$I_{D2} = K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2$$

$$V_{GS2} = V_G - V_{S1} = -I_D R_{S2} - (-V_{DD})$$

$$V_{GS2} = -3(V_{GS2} - 1)^2 + 5$$

$$V_{GS2} = -3V_{GS2}^2 + 6V_{GS2} - 3 + 5$$

$$3V_{GS2}^2 - 5V_{GS2} - 2 = 0$$

$$\frac{5 \pm \sqrt{25+24}}{6} = \frac{5 \pm 7}{6} = \begin{cases} 2 \\ -\frac{1}{3} \end{cases}$$

S1  
No1

$$I_{D2} = 0.5(2-1)^2 = 0.5 \text{ mA}$$

VERIFICA S2

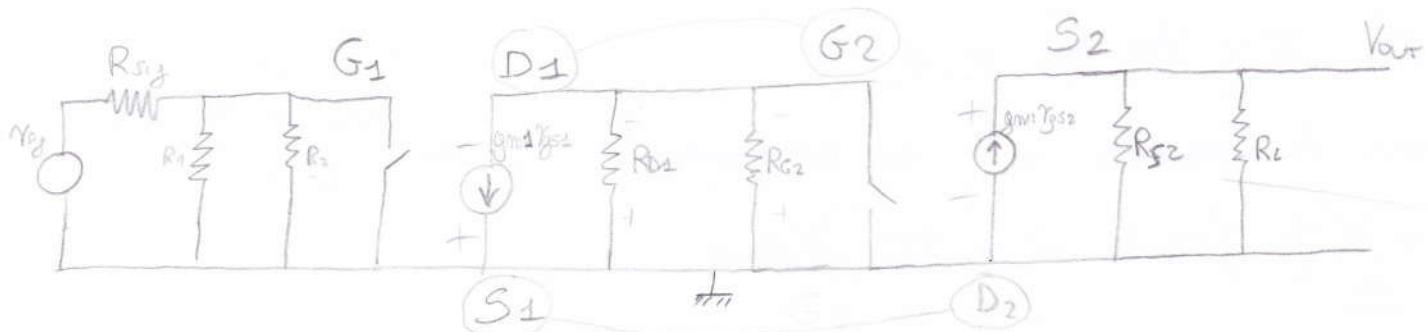
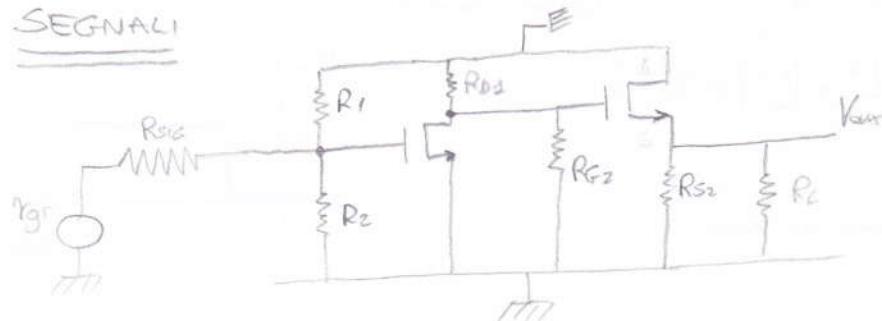
$$V_{S2} = V_G - V_{GS2} = -2V$$

$$V_{GS2} = V_{DD} - V_{S2} = 5 + 2 = 7V \geq V_{GS} - V_T = 1$$

$$g_{m1} = 2k_2 (V_{GS1} - V_{T1}) = 2 (3-1) = 2 \text{ A/V}$$

$$g_{m2} = 2k_2 (V_{GS2} - V_{T2}) = 1 \text{ A/V}$$

SEGNALI



ATTENZIONE PARIMENTE DEL PAGANICO

$$\gamma_{gS1} = \gamma_{sig} \cdot \frac{R_1/R_2}{R_{sig} + R_1/R_2} = \gamma_{sig} \cdot \frac{12}{12+200} \approx \gamma_{sig}$$

$$i_{D1} = g_{m1} \gamma_{gS1} = -2 \gamma_{sig}$$

$$\gamma_{g2} = -i_{D1} \cdot \frac{R_{D1} R_{C1}}{R_{D1} + R_{G2}} = -2 \gamma_{sig} \cdot \frac{16}{10} = -\frac{16}{5} \gamma_{sig}$$

$$\gamma_{gS2} = \gamma_{g2} - \gamma_{S2} \quad \text{ATTENZIONE} \quad \gamma_{S2} \neq 0 \quad \text{QUINDI LO DEVO CALCOLARE}$$

$$i_{D2} = g_{m2} \gamma_{gS2} = \gamma_{gS2}$$

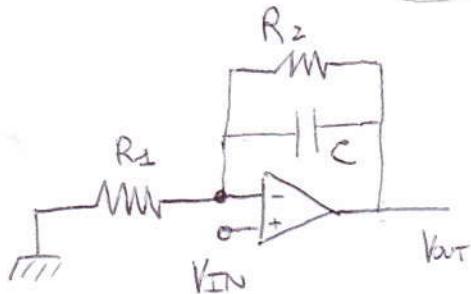
$$\gamma_{S2} = i_{D2} \cdot \frac{R_{S2} R_C}{R_{S2} + R_C} = \gamma_{gS2} \cdot \frac{18}{9} = 2 \gamma_{gS2}$$

$$\gamma_{gS2} = -\frac{16}{5} \gamma_{sig} - 2 \gamma_{gS2} \rightarrow \gamma_{gS2} = -\frac{16}{15} \gamma_{sig} = -1,06 \gamma_{sig}$$

$$\text{ORA POSSO CALCOLARE} \quad \gamma_{S2} = -2,13 \gamma_{sig} \quad A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\gamma_{S2}}{\gamma_{sig}} = -2,13$$

7 MAGGIO 2011

NO



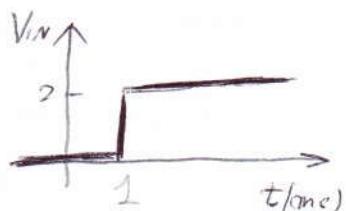
$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 6 \text{ k}\Omega$$

$$L^+ = |L^-| = 12 \text{ V}$$

$$C = 0.1 \text{ nF}$$

oper. ideale



CALCOLARE E GRAFICARE (ANDAMENTO TEMPO-VO) Vout

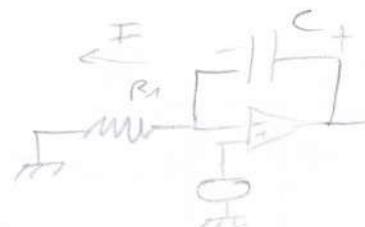
$t < 1$   $V_{out} = 0$

$t > 1$   $I = V_{in} \cdot R_1 = 2 \text{ mA}$

APPENA  $V_{in}$  SCATTA +12 IN INTEGRATORE

$$V_c = \frac{1}{C} \int I dt = +20 \text{ V/ms}$$

NON  
INVERT.



$$\tau = C \cdot R_{eq} = C \cdot R_2 = 0.6 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{TEMPO CARICA} = 5\tau = 2 \text{ ms}$$

$$\tau = C \cdot R_{eq} = C \cdot R_1 = 0.1 \text{ ms}$$

$$\text{TEMPO CAR} 5\tau = 0.5 \text{ ms}$$

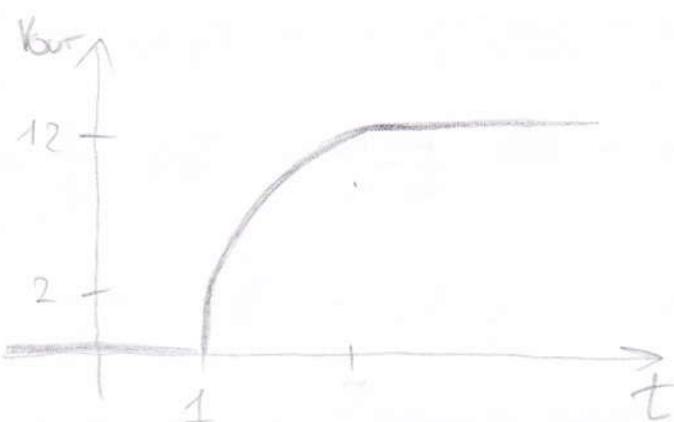
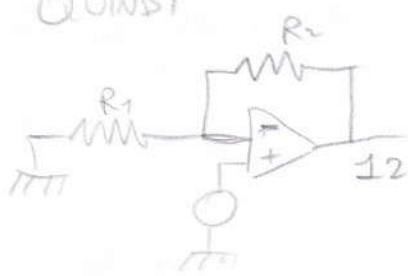
$t >$

OP. VA IN SAT  $\rightarrow$  NON VALE PIÙ

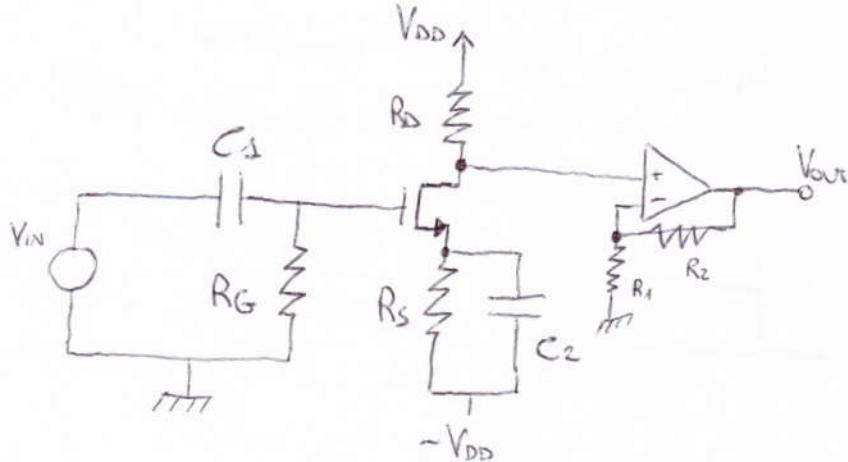
IL C.C.V.

INOLTRE IL CONDENSATORE DIVENTA UN CIRCUITO APERTO (CARICO)

QUINDI



20 SETTEMBRE 2010 ✓



$$\begin{aligned}
 R_G &= 10 \text{ k}\Omega & R_D &= 2.5 \text{ k}\Omega & R_A &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 4 \text{ k}\Omega & V_{DD} &= 5V & V_T &= 1V \\
 K &= 0.5 & \lambda &= 0 & \text{Oper. mode} \\
 L^+ &= |L^-| \approx 5V
 \end{aligned}$$

DETERMINARE  $R_S$  TALE CHE  $V_{out} = 0$

CONTINUA

$$V_{out} = 0 \Rightarrow V_o = 0$$

$$V_{DD} - I_D R_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} = \frac{5}{2.5} = 2 \text{ mA}$$

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \rightarrow$$

$$I_D = K \left( \frac{V_S}{I_D R_S - V_{DD}} - V_T \right)^2$$

$$2 = 0.5 (-2R_S + 4)^2$$

$$4 = 4R_S^2 - 16R_S + 16$$

$$R_S^2 - 4R_S + 3 = 0$$

$$4R_S^2 - 16R_S + 12 = 0$$

$$\frac{4 \pm \sqrt{16 - 12}}{2} = \frac{3}{2}$$

3  
1

$$V_{GS} > V_T$$

$$-V_S > V_T$$

$$-I_D R_S + V_{DD} > V_T$$

$$-2R_S + 5 > 1$$

$$2R_S < 4$$

$$R_S < 2$$

$$\text{QUINDI } R_S = 1$$

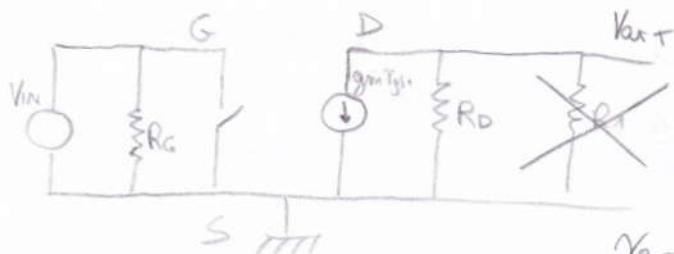
VERIFICA SOTTO

$$V_{GS} > V_{GS} - V_T$$

$$-V_S > -V_S - V_T$$

$$0 > -1 \text{ ok!}$$

DETERMINARE IL GUADAGNO DI TENSIONE PER PICCOLI SEGNAZIONI



NON VA INSERITO R\_1 PERCHÉ HA UN OPERAZ. NON INVERT.  
con  $R_{in} = \infty$

$$Y_g = Y_m \quad i_D = g_m V_{GS} = 2Y_m$$

$$\begin{aligned}
 V_{GS} &= -V_S = -(I_D R_S - V_{DD}) \\
 &= -(2 \cdot 1 - 5) = 3V
 \end{aligned}$$

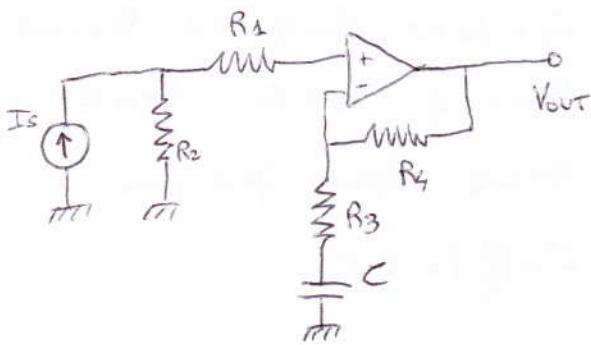
$$g_m = 2K(V_{GS} - V_T) = 2(3 - 1) = 2$$

$$Y_{out,op} = -R_D \cdot i_D = -2.5 \cdot 2Y_m = -5Y_m$$

$$Y_{out} = -5Y_m \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = -25Y_m$$

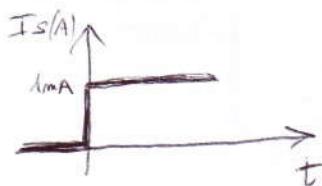
$$A_V = -25$$

12 LUGLIO 2010 ✓



$$R_1 = 2 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 2 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 4 \text{ k}\Omega \quad C = 1 \mu\text{F} \quad L^+ = |L^-| = 10 \text{ V}$$



Oscillazione

DETERMINARE V\_{out} NEL TEMPO E DISSEGLIARE IL GRADICO

$$t < 0 \quad V_{out} = 0$$

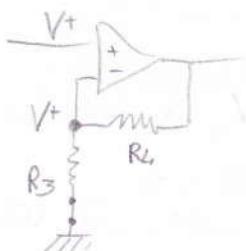
$$t > 0 \quad \gamma = C \cdot (R_3 + R_4) = 5 \text{ ms}$$

$$V^+ = I \cdot R_2 = 2 \text{ V}$$

Concetto via A che se  $R_3$   
su  $R_3$  non c'è carica  
di potenziale

NON ENTRA CORRENTE NELL'  
OPERAZIONALE

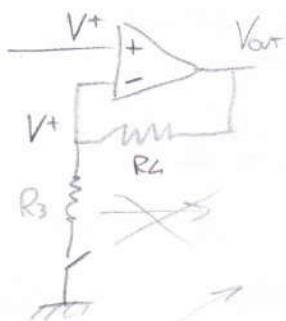
PER C SCARICO



È UN OPERAZ. CONF.  
NON INVERTENTE

$$V_{out} = V^+ \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) = 10 \text{ V}$$

PER C CARICO



NON HO CADUTA  
DI POTENZIALE SU  
R\_4 PERCHÉ NON  
HO MASSA

quindi non sono  
connesse

[NB] O meglio:

SUL NON INVERTENTE LA CORRENTE  
CHE SCORRE SULLE 2 RESISTENZE  
E QUELLA DATA  $R_3$

