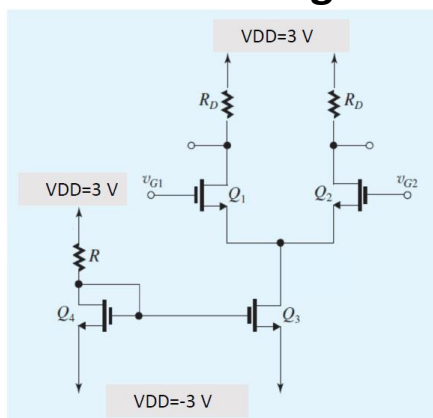


## Terza esercitazione Spice

### Amplificatore differenziale con generatore di corrente



#### 1) Punto di lavoro dei transistor

Dati:  $V_t = 0.5$ ,  $k'_n = 200 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\lambda = 0$ ,  $\left(\frac{W}{L}\right)_3 = \left(\frac{W}{L}\right)_4 = 5$ ,  $\left(\frac{W}{L}\right)_1 = \left(\frac{W}{L}\right)_2 = 20$ ,  $R_D = 20\text{k}\Omega$

$$R = 1114017 * \frac{30}{1000} = 33420.51 \Omega$$

#### Transistor $Q_4$ :

- $$\begin{cases} V_{GSQ4} = V_{DSQ4} = V_{D4} - V_{S4} = V_{DD} - R * I_{DQ4} - V_{SS} \\ I_{DQ4} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_4 (V_{GSQ4} - V_t)^2 \end{cases}$$
- $$\Rightarrow I_{DQ4,1,2} = 1.483 * 10^{-4} \text{ A} \Rightarrow V_{GSQ4} = V_{DSQ4} = 1.04 \text{ V} \text{ che è } > V_t \Rightarrow \text{ok}$$
- $$\Rightarrow I_{DQ4,1,2} = 1.827 * 10^{-4} \text{ A} \Rightarrow V_{GSQ4} = V_{DSQ4} = -0.1 \text{ V} \text{ che è } < V_t \Rightarrow \text{no}$$
- $V_{GDQ4} = 0$  che è  $< V_t \Rightarrow$  soddisfa le condizioni di saturazione

#### Transistor $Q_3$ :

- $V_{GSQ3} = V_{GSQ4} = 1.04 \text{ V}$
  - $I_{DQ3} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_3 (V_{GSQ3} - V_t)^2 = 1.483 * 10^{-4} \text{ A}$
- Notiamo che  $I_{DQ3} = I_{DQ4}$  perché i transistor dello specchio di corrente sono identici.

#### Transistor $Q_1$ e $Q_2$ :

- Siccome sono simmetrici possiamo considerare sole metà circuito.
- $I_{DQ1} = I_{DQ2} = \frac{I_{DQ3}}{2} = 7.415 * 10^{-5} \text{ A}$
- $$I_{DQ1} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GSQ1} - V_t)^2 \Rightarrow V_{GSQ1} = V_{GSQ2} = \sqrt{\frac{2I_{DQ1}}{k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_1}} + V_t = 0.69 \text{ V}$$
- che è  $> V_t \Rightarrow \text{ok}$
- $V_{GDQ1} = V_{GDQ2} = -(V_{DD} - R_D * I_{DQ1}) = -1.57 \text{ V}$  che è  $< V_t \Rightarrow$  soddisfa la saturazione
- $V_{SQ1} = V_{SQ2} = V_{DQ3} = V_{GQ1} - V_{GSQ1} = -V_{GSQ1} = -0.69 \text{ V}$
- $V_{DSQ1} = V_{DSQ2} = V_{DD} - R_D * I_{DQ1} - V_{SQ1} = -0.88 \text{ V}$

$$V_{DSQ3} = V_{DQ3} - V_{SQ3} = V_{SQ1} - V_{SS} = 2.31 \text{ V}$$

## 2) Calcolo $g_m$

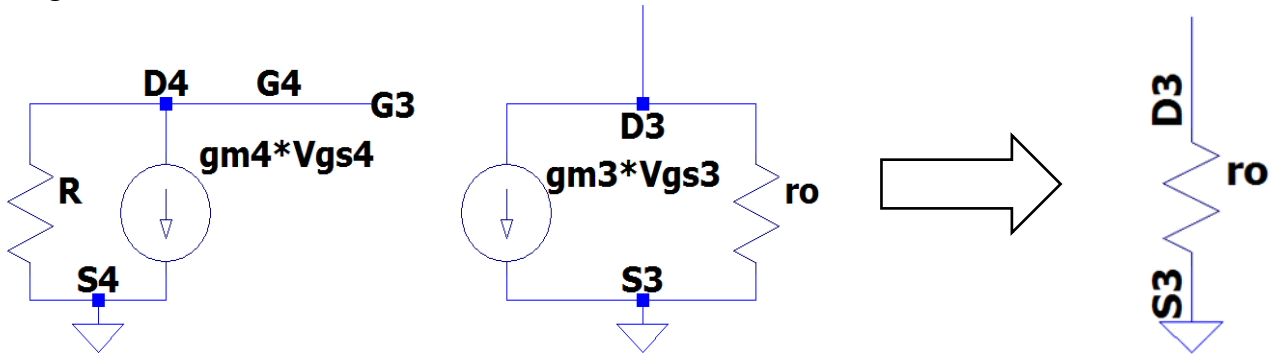
Siccome  $Q_1$  e  $Q_2$  sono simmetrici:  $g_m = g_{m1} = g_{m2} = k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_1 (V_{GSQ1} - V_t) = 7.6 * 10^{-4}$

## 3) $\lambda_{Q3} = 0.02$ e Piccolo segnale per lo specchio di corrente

Abbiamo quindi:

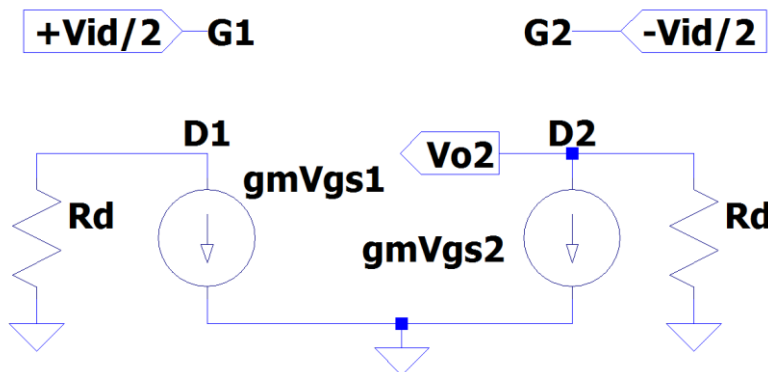
- $r_o = \frac{1}{\lambda_{DQ3}} = 337 \text{ k}\Omega$
- $v_{gsq4} = -g_{m4}v_{gsq4} \Rightarrow v_{g4} = v_{g3} = 0 \Rightarrow v_{gsq3} = 0$

Quindi lo specchio di corrente nel piccolo segnale viene rappresentato dalla singola resistenza  $r_o$  collegata a massa.



## 4) Guadagno differenziale single ended

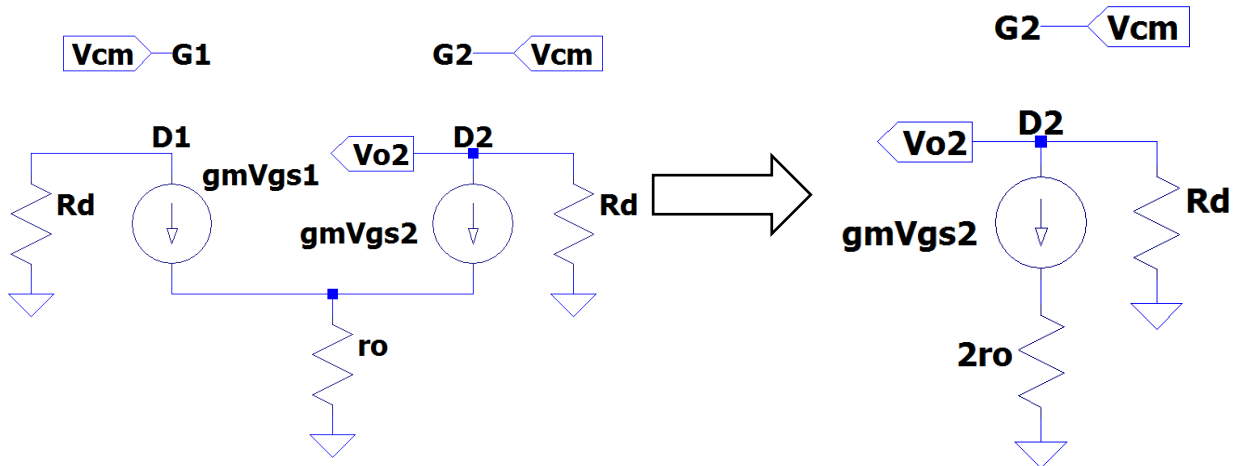
Piccolo segnale:



- $v_{o2} = -g_m v_{gs2} R_D = g_m R_D v_{id} / 2$
- $A_d = \frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{g_m R_D}{2} = 7.6 \text{ V/V}$

## 5) Guadagno di modo comune single ended

Piccolo segnale:



Siccome i circuiti sono simmetrici posso considerare solo metà.

- $v_{gs2} = \frac{v_{cm}}{1+2r_o g_m}$
- $v_{o2} = -R_D g_m v_{gs2} = -R_D g_m \frac{v_{cm}}{1+2r_o g_m}$
- $A_{cm} = \frac{v_{o2}}{v_{cm}} = \frac{-R_D g_m}{1+2r_o g_m} = -0.0296 \text{ V/V}$

## 6) Massima tensione $V_{CM}$

La massima tensione si ottiene ponendo il transistor al limite della saturazione, quindi

$$V_{CM} = V_D + V_t = V_{DD} - R_D I_{DSQ1} + V_t = 2.017 \text{ V}$$

## 7) $A_{cm}$ con $\lambda_{Q3} = 0$

- $r_o = \frac{1}{\lambda I_{DQ3}} = +\infty$
- $A_{cm} = \frac{v_{o2}}{v_{cm}} = \frac{-R_D g_m}{1+2r_o g_m} = 0 \text{ V/V}$

## 8) Simulazione Spice

Listato:

```
M1 vo1 Vin1 Vs Vs NMOS L=1 W=20
M2 vo2 Vin2 Vs Vs NMOS L=1 W=20
M3 Vs Vg2 VSS VSS NMOS L=1 W=5
M4 Vg2 Vg2 VSS VSS NMOS L=1 W=5
R1 VDD vo1 20K
R2 VDD vo2 20K
R3 VDD Vg2 33.42K
Vg1 Vin1 0 DC 0 AC 10mV sin(0 10mV 10khz 0 0 0)
Vg2 0 Vin2 DC 0 AC 10mV sin(0 10mV 10khz 0 0 0)
VSS VSS 0 -3V
VDD VDD 0 3V
.model NMOS NMOS VTO=0.5 KP=200u LAMBDA=0
.TRAN 0u 250u 0 1u
#.op
.backanno
.end
```

La verifica del punto operativo in dc conferma tutti i calcoli fatti precedentemente:

--- Operating Point ---

```

V(vo1) :      1.51723      voltage
V(vin1) :      0          voltage
V(vs) :      -0.692534    voltage
V(vo2) :      1.51723    voltage
V(vin2) :      0          voltage
V(vg2) :      -1.95543    voltage
V(vss) :      -3          voltage
V(vdd) :      3           voltage
Id(M4) :      0.000148277 device_current
Ig(M4) :      0           device_current
Ib(M4) :      -1.05457e-012 device_current
Is(M4) :      -0.000148277 device_current
Id(M3) :      0.000148277 device_current
Ig(M3) :      0           device_current
Ib(M3) :      -2.31747e-012 device_current
Is(M3) :      -0.000148277 device_current
Id(M2) :      7.41387e-005 device_current
Ig(M2) :      0           device_current
Ib(M2) :      -2.21976e-012 device_current
Is(M2) :      -7.41387e-005 device_current
Id(M1) :      7.41387e-005 device_current
Ig(M1) :      0           device_current
Ib(M1) :      -2.21976e-012 device_current
Is(M1) :      -7.41387e-005 device_current
I(R3) :      0.000148277 device_current
I(R2) :      7.41387e-005 device_current
I(R1) :      7.41387e-005 device_current
I(Vdd) :      -0.000296555 device_current
I(Vss) :      0.000296555 device_current
I(Vg2) :      0           device_current
I(Vg1) :      0           device_current

```

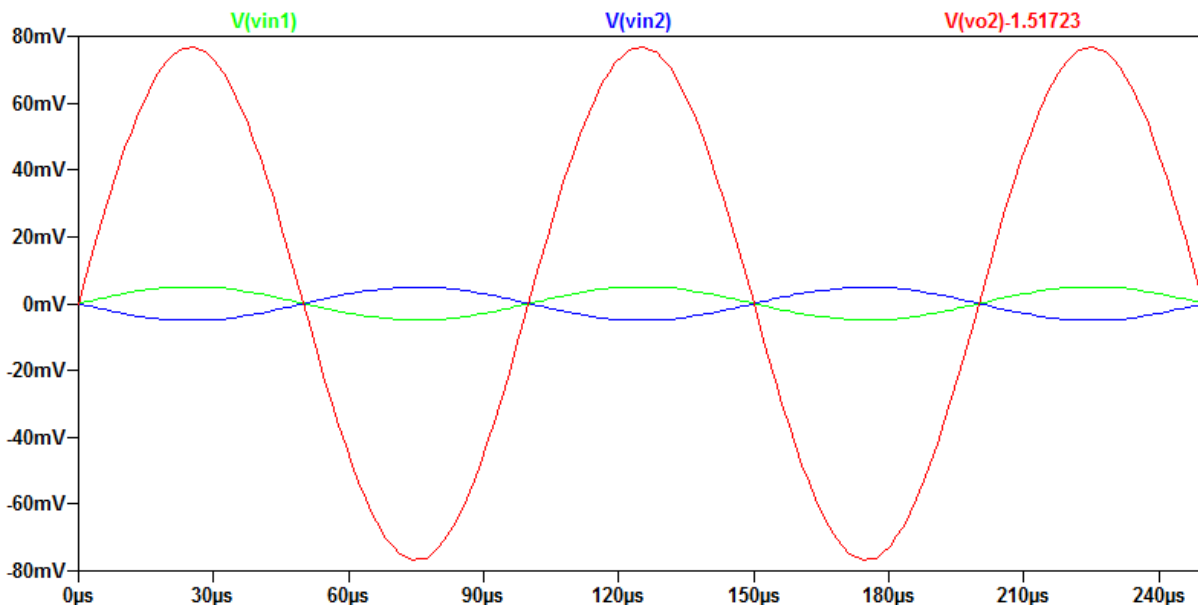
Per la seguente simulazione si è dato come ingresso  $v_{id} = 10mV$ , quindi  $\pm \frac{v_{id}}{2} = 5mV$ :

```
Vg1 Vin1 0 DC 0 AC 5mV sin(0 5mV 10khz 0 0 0)
```

```
Vg2 0 Vin2 DC 0 AC 5mV sin(0 5mV 10khz 0 0 0)
```

e si è usato il comando

```
.TRAN 0u 250u 0 1u
```



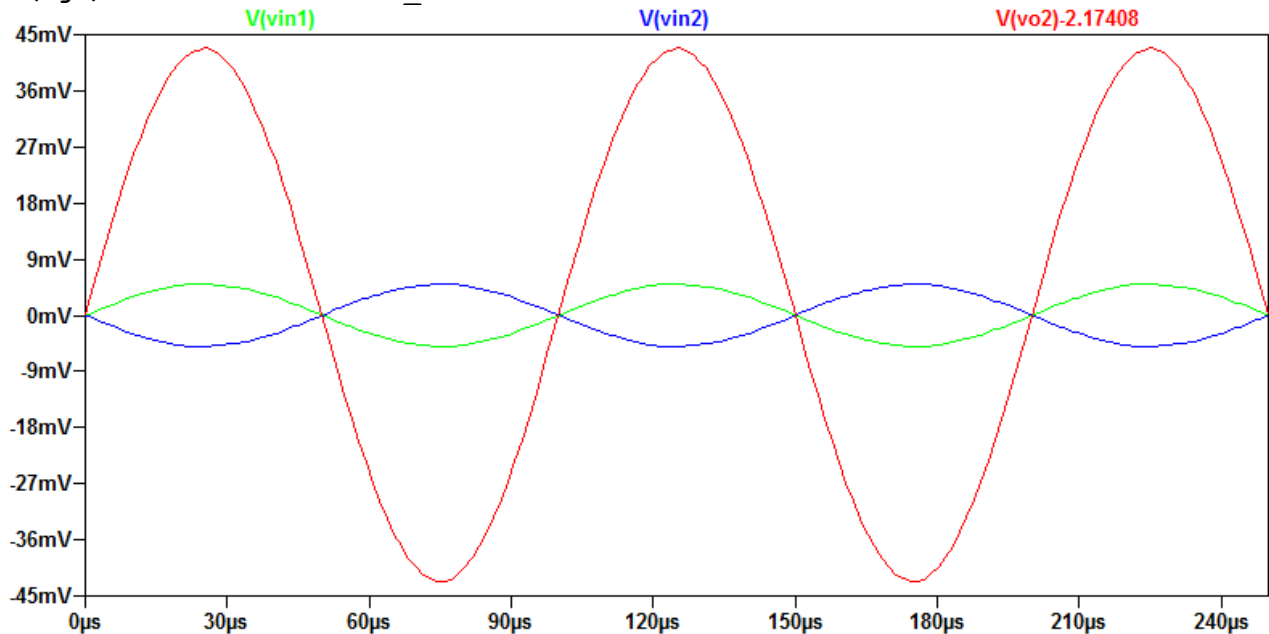
9) Con  $R_D = \frac{111417}{100}$

--- Operating Point ---

```

V(vo1) :      2.17408      voltage
V(vin1) :      0          voltage
V(vs) :      -0.692534    voltage
V(vo2) :      2.17408    voltage
V(vin2) :      0          voltage
V(vg2) :     -1.95543     voltage
V(vss) :      -3          voltage
V(vdd) :      3          voltage
Id(M4) :      0.000148277 device_current
Ig(M4) :      0          device_current
Ib(M4) :     -1.05457e-012 device_current
Is(M4) :     -0.000148277 device_current
Id(M3) :      0.000148277 device_current
Ig(M3) :      0          device_current
Ib(M3) :     -2.31747e-012 device_current
Is(M3) :     -0.000148277 device_current
Id(M2) :      7.41387e-005 device_current
Ig(M2) :      0          device_current
Ib(M2) :     -2.87662e-012 device_current
Is(M2) :     -7.41387e-005 device_current
Id(M1) :      7.41387e-005 device_current
Ig(M1) :      0          device_current
Ib(M1) :     -2.87662e-012 device_current
Is(M1) :     -7.41387e-005 device_current
I(R3) :      0.000148277 device_current
I(R2) :      7.41387e-005 device_current
I(R1) :      7.41387e-005 device_current
I(Vdd) :     -0.000296555 device_current
I(Vss) :      0.000296555 device_current
I(Vg2) :      0          device_current
I(Vg1) :      0          device_current

```



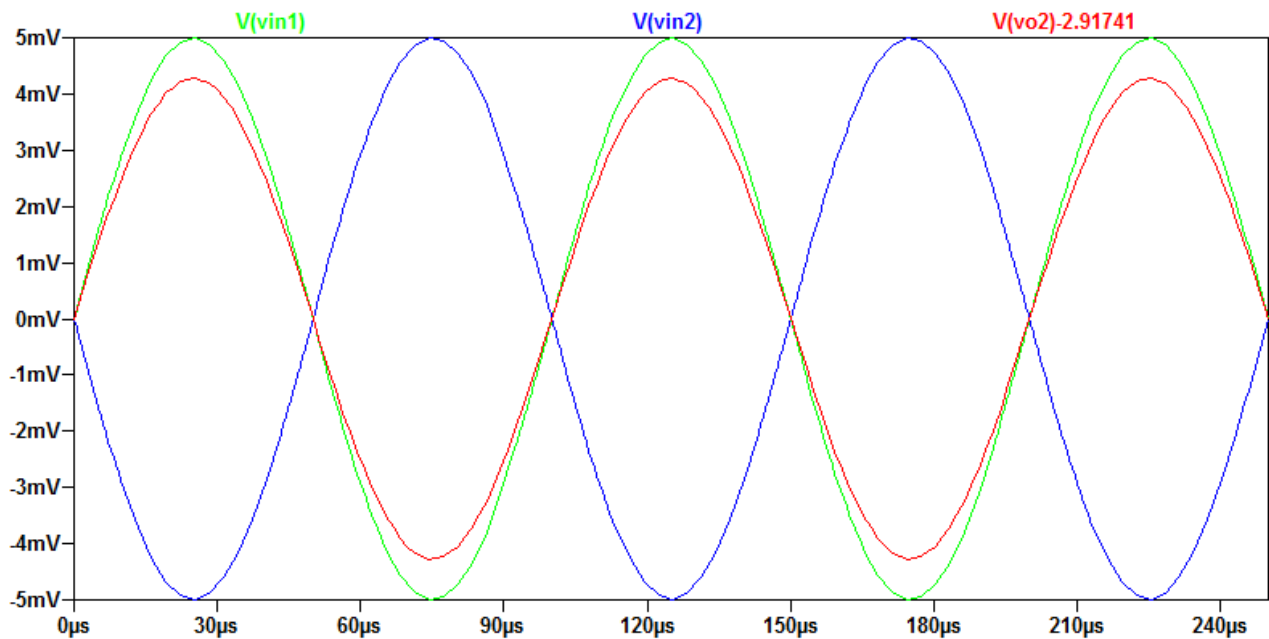
$$\text{Con } R_D = \frac{111417}{1000}$$

--- Operating Point ---

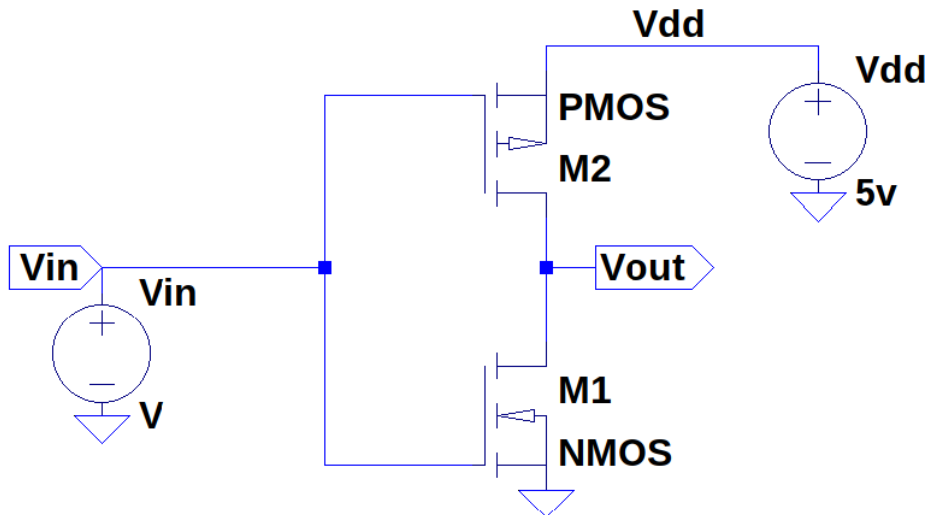
```

V(vo1) :      2.91741      voltage
V(vin1) :      0          voltage
V(vs) :      -0.692534    voltage
V(vo2) :      2.91741    voltage
V(vin2) :      0          voltage
V(vg2) :      -1.95543    voltage
V(vss) :      -3          voltage
V(vdd) :      3           voltage
Id(M4) :      0.000148277  device_current
Ig(M4) :      0           device_current
Ib(M4) :      -1.05457e-012 device_current
Is(M4) :      -0.000148277 device_current
Id(M3) :      0.000148277  device_current
Ig(M3) :      0           device_current
Ib(M3) :      -2.31747e-012 device_current
Is(M3) :      -0.000148277 device_current
Id(M2) :      7.41387e-005  device_current
Ig(M2) :      0           device_current
Ib(M2) :      -3.61994e-012 device_current
Is(M2) :      -7.41387e-005 device_current
Id(M1) :      7.41387e-005  device_current
Ig(M1) :      0           device_current
Ib(M1) :      -3.61994e-012 device_current
Is(M1) :      -7.41387e-005 device_current
I(R3) :      0.000148277  device_current
I(R2) :      7.41387e-005  device_current
I(R1) :      7.41387e-005  device_current
I(Vdd) :      -0.000296555  device_current
I(Vss) :      0.000296555  device_current
I(Vg2) :      0            device_current
I(Vg1) :      0            device_current

```



# Inverter CMOS



Dati:  $V_{DD} = 5V$ ,  $V_{tn} = -V_{tp} = 0.7V$ ,  $k'_n = 48\mu A/V^2$ ,  $k'_p = 12\mu A/V^2$ ,  $\lambda = 0.01$ ,  $L = 1\mu m$

## 1) Calcolo $W_p$ e $W_n$

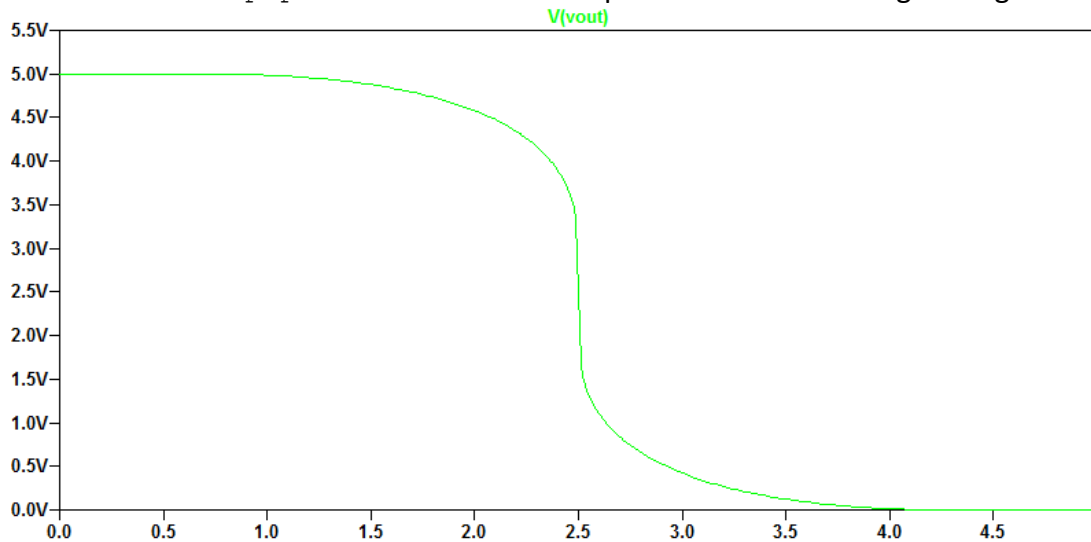
- $k_n = k_p \Rightarrow k'_n C_{ox} W_n / L = k'_p C_{ox} W_p / L \Rightarrow \frac{W_p}{W_n} = 4$
- Scelgo  $W_n = L = 1\mu m \Rightarrow W_p = 4\mu m$

## 2) Simulazione spice $V_o/V_i$ con $V_i=0-5$

Listato:

```
M1 Vout Vin 0 0 NMOS L=1u W=1u
M2 Vout Vin Vdd Vdd PMOS L=1u W=4u
Vin Vin 0 {Vin}
Vdd Vdd 0 5v
.model NMOS NMOS VTO=0.7v KP=48u LAMBDA=0.01
.model PMOS PMOS VTO=-0.7v KP=12u LAMBDA=0.01
.step param Vin 0 5 0.01
.backanno
.end
```

Usando il comando `.step param Vin 0 5 0.01` possiamo ricavare il seguente grafico:



### 3) Simulazione con Onda quadra 1MHz

Possiamo dare in ingresso un'onda quadra grazie al comando

```
Vin Vin 0 pulse(0 5 0 0 0 0.5u 1u)
```

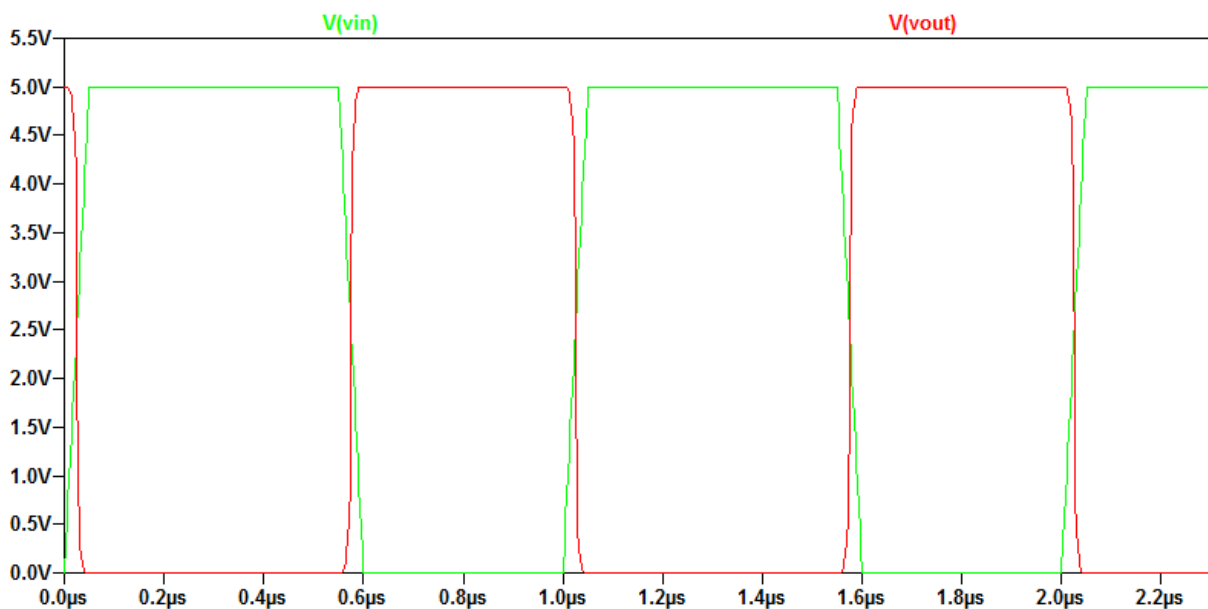
E vederne l'effetto grazie a: `.tran 0 5u 0`

I quali parametri sono:

- Vmin
- Vmax
- Delay,tempo di salita, tempo di discesa
- Tempo on
- Periodo

Dato che siamo in cerca di una sinusoide con duty-cycle del 50% a 1MHz si sono settati i parametri di conseguenza.

```
M1 Vout Vin 0 0 NMOS L=1u W=1u
M2 Vout Vin Vdd Vdd PMOS L=1u W=4u
Vin Vin 0 pulse(0 5 0 0 0 0.5u 1u)
Vdd Vdd 0 5v
.model NMOS NMOS VTO=0.7v KP=48u LAMBDA=0.01
.model PMOS PMOS VTO=-0.7v KP=12u LAMBDA=0.01
.tran 0 2.3u 0
.op
.backanno
.end
```

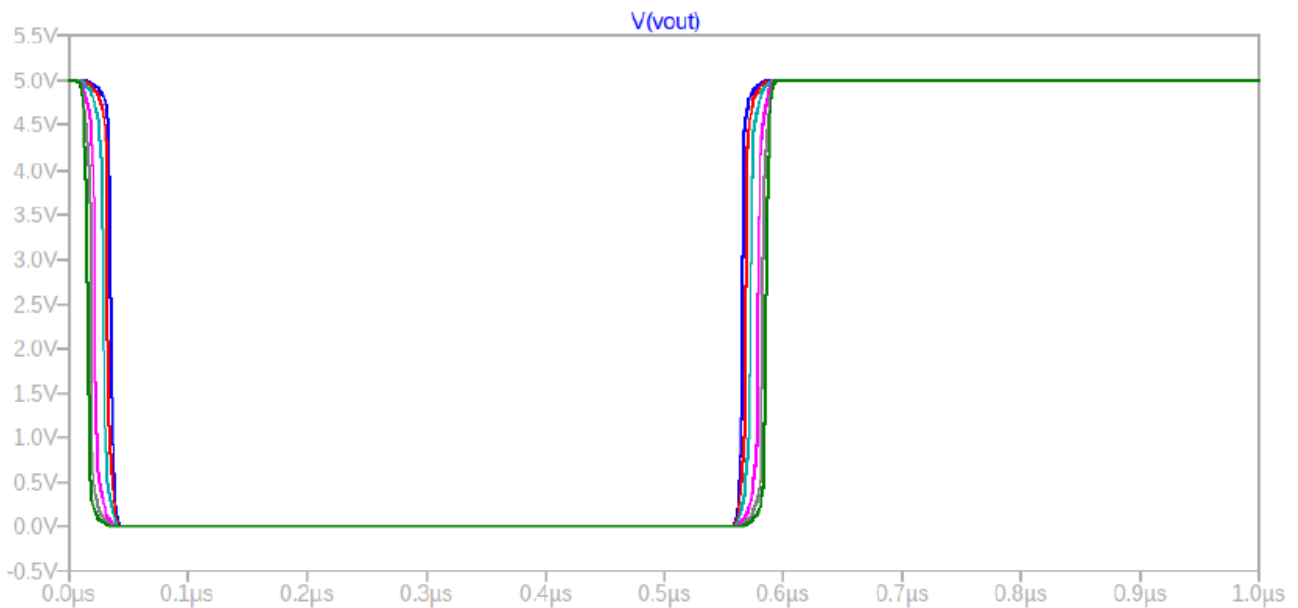




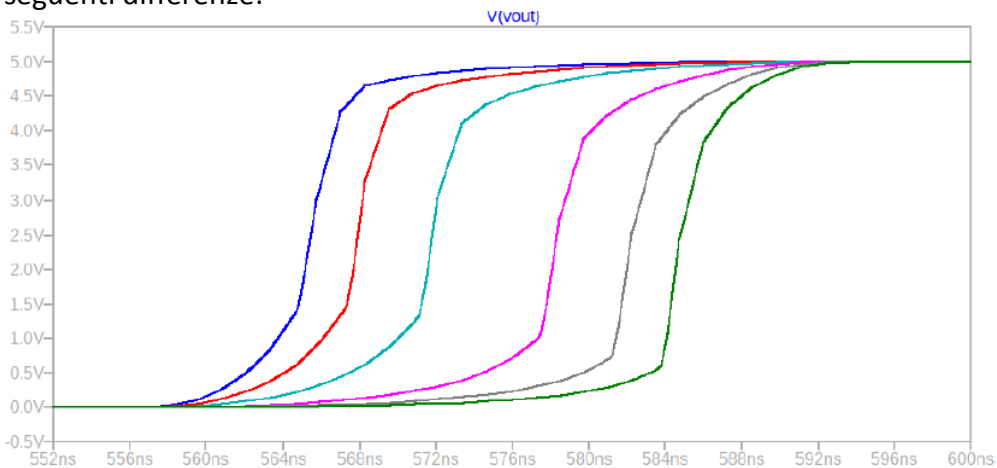
#### 4) Analisi al variare delle proporzioni del transistor NMOS

Grazie al comando `.step param WN list 1u 2u 5u 20u 50u 100u` possiamo far variare selettivamente un parametro tra quelli inseriti in una lista predefinita. Lasciando il transistor PMOS invariato, e modificando l'NMOS come segue: `M1 Vout Vin 0 0 NMOS L=10u W=WN` sarà possibile ricavare il seguente grafico:

```
M1 Vout Vin 0 0 NMOS L=10u W=WN
M2 Vout Vin Vdd Vdd PMOS L=1u W=4u
Vin Vin 0 pulse(0 5 0 0 0 0.5u 1u)
Vdd Vdd 0 5v
.model NMOS NMOS VTO=0.7v KP=48u LAMBDA=0.01
.model PMOS PMOS VTO=-0.7v KP=12u LAMBDA=0.01
.tran 0 1.3u 0
.step param WN list 1u 2u 5u 20u 50u 100u
.op
.backanno
.end
```



Facendo un ingrandimento nella zona in cui l'onda quadra commuta potremo osservare le seguenti differenze:



Per quanto riguarda le diverse funzioni di trasferimento al variare delle proporzioni si ricava il seguente grafico:

