

17/12/2020

Considerare il circuito mostrato in figura. Fino al tempo $t=0s$ l'interruttore INT_2 è chiuso mentre INT_1 è aperto. Al tempo $t=0s$ l'interruttore INT_2 si apre e l'interruttore INT_1 si chiude. Al tempo t_x l'interruttore INT_1 si apre, INT_2 rimane aperto e l'ADC esegue la conversione analogico-digitale.

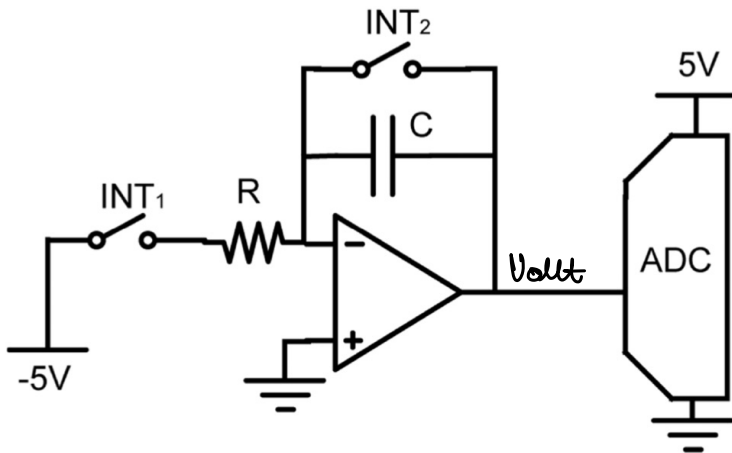
a) Disegnare la forma d'onda del segnale V_{out} in uscita dall'operazionale nell'intervallo temporale 0-60ns assumendo $t_x=50ns$;

b) Determinare il massimo valore di t_x misurabile, compatibilmente con la dinamica di ingresso dell'ADC;

c) Scegliere il numero di bit dell'ADC per poter distinguere tempi t_x differenti tra loro di 50ps;

d) Calcolare l'effetto sul codice di uscita dell'ADC di una corrente di bias entrante negli ingressi dell'AO di $100\mu A$, assumendo un tempo $t_x=50ns$;

e) Calcolare il margine di fase del circuito con INT_1 chiuso e INT_2 aperto considerando l'operazionale a singolo polo a 10Hz e $GBWP=100MHz$.

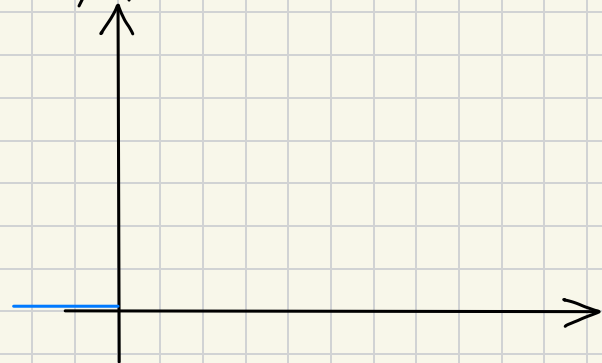
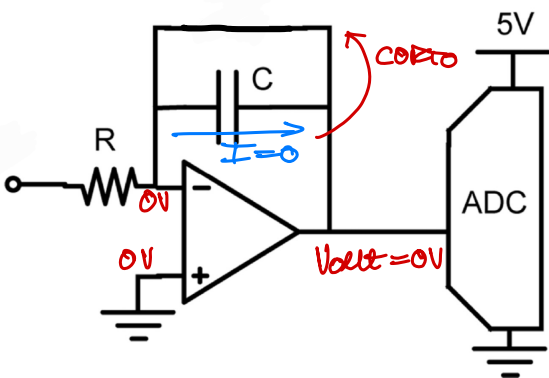


DATI:

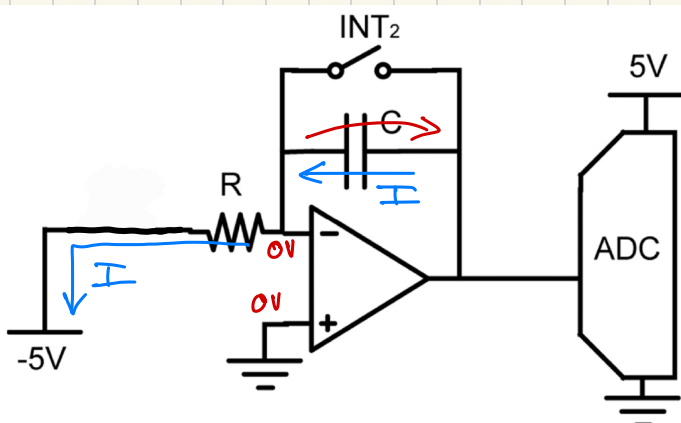
$$R = 1k\Omega$$

$$C = 100pF$$

a) ALL'INIZIO INT_2 È CHIUSO, INT_1 APERTO:



A 0 SECONDI APPO INT_2 (CHE DA SOLO NON CAMBIA LO STATO DI C (ISTANTANEAMENTE NON PUÒ)) MA INT_1 SI CHIUDE:

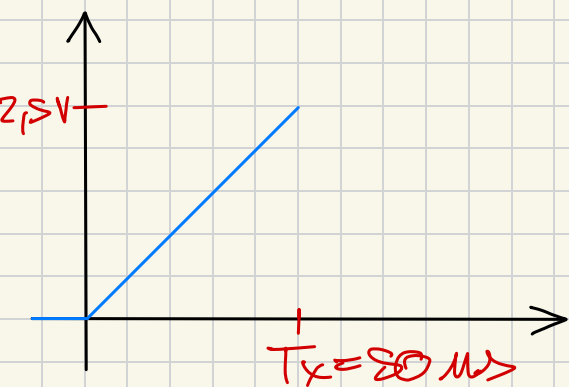


$$I = + \frac{5V}{R} = 5\mu A$$

MA QUINDI IL CONDENSATORE È ATTRAVERATO DA CORRENTE COSTANTE

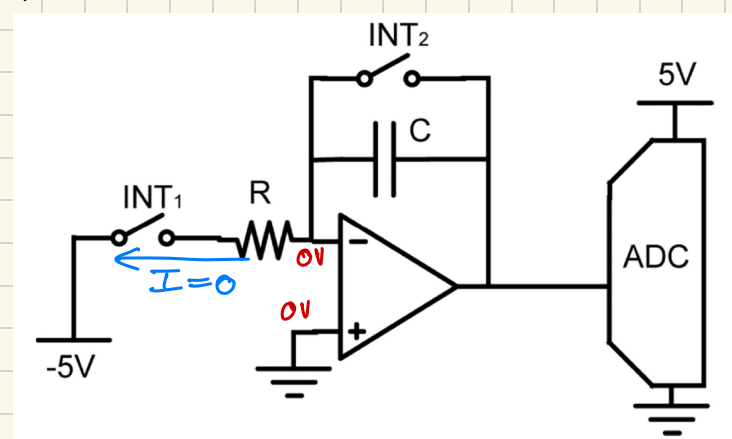
$$\Rightarrow V_{out} = \frac{I}{C} t$$

CHE CONTINUA FINO A 50ms

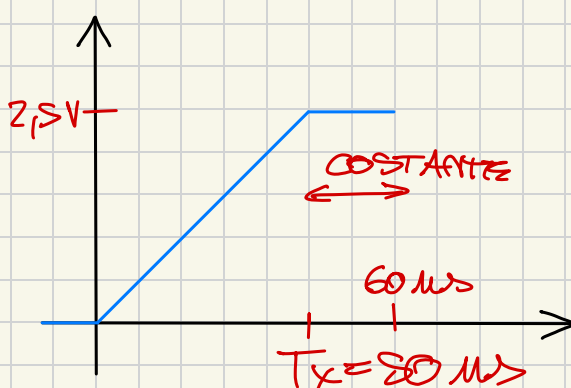


$$\Rightarrow V_{out}(50ms) = \frac{I}{C} 50ms = 2.5V$$

A 50ms APPRO INT1:



NON VI È PIÙ PASSAGGIO DI UN CORRENTE:



È UN MISURATORE DI TEMPO, VERrà CONVERTITA DALL'ADC

b) SE CONTINUO A SALIRE, PRIMA O POI RAGGIUNGERÒ I 5V DELL'ADC
VALLE LA STESSA DI PRIMA:

$$V_{out} = \frac{I}{C} t \Rightarrow t = \frac{C V_{out(max)}}{I} = 100ms \text{ (MASSIMO)}$$

$\uparrow$ 5V $\rightarrow$ 5mA $\rightarrow$ 100pF

c) VOGLIO UNA PRECISIONE DI 50pS

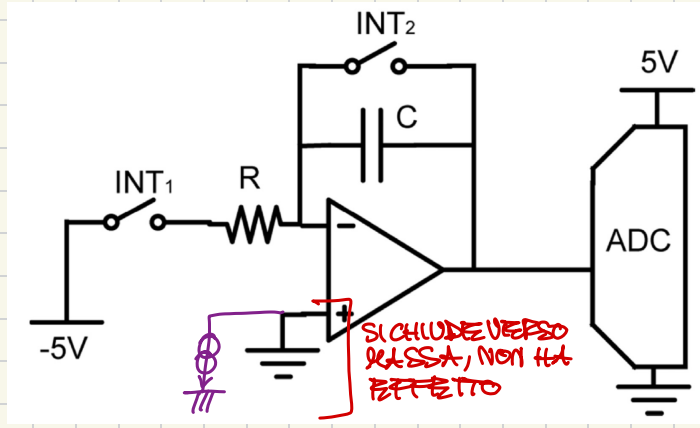
$$\Delta V_{out} = \frac{I}{C} \Delta t \rightarrow 50pS \text{ (VOGLIO DISTINGUERLI SULL'ADC)}$$

$\rightarrow$ 5mA $\rightarrow$ 50pS $\rightarrow$ 100pF

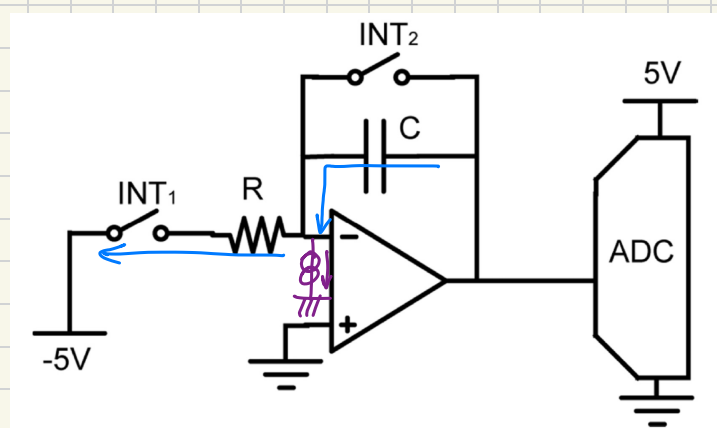
$$\Rightarrow \Delta V_{out} = 2.5mV \geq 1LSB \text{ PER POTERLI DISTINGUERE}$$

$$\Rightarrow 1LSB = \frac{5V}{2^n} \Rightarrow n \geq 11$$

d)



AL NODO -:



HA ESATTAMENTE LO STESSO EFFETTO DI PRIMA:

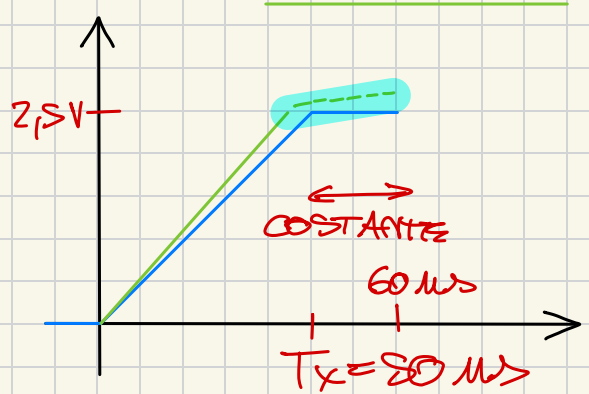
$$\Delta V_{out} \Big|_{I_B^-} : \frac{I_{BIAS} \Delta t}{C} \rightarrow 50mV$$

$\rightarrow 100 \mu A$
 $\rightarrow 50ms$
 $\rightarrow 100pF$

CI RICORDIAMO $LSB = \frac{5V}{2^N} = 20,5LSB \rightarrow$ CHE È TANTISSIMO!

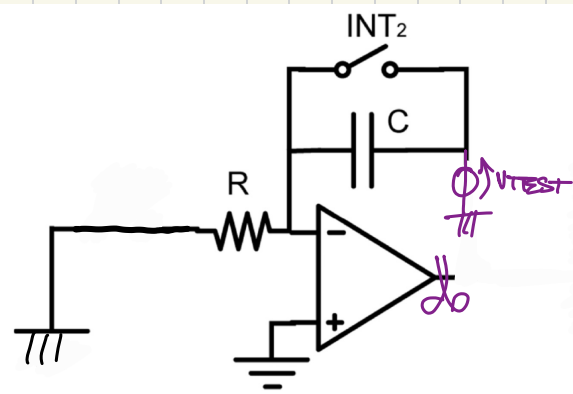
QUINDI L'EFFETTO È CHE CARICO CON $\frac{5V}{R} + 100 \mu A$

$\underbrace{\frac{5V}{R}}_{PRIMA} \underbrace{+ 100 \mu A}_{ORA}$



MA CONTINUO ANCHE UN PO' A SALIRE, ANCHE SE VOI PIU' MANTENE COSTANTE

e)



$$f_0 = 10Hz$$

$$GBWP = 100kHz$$

CI SERVE IL GLOOP:

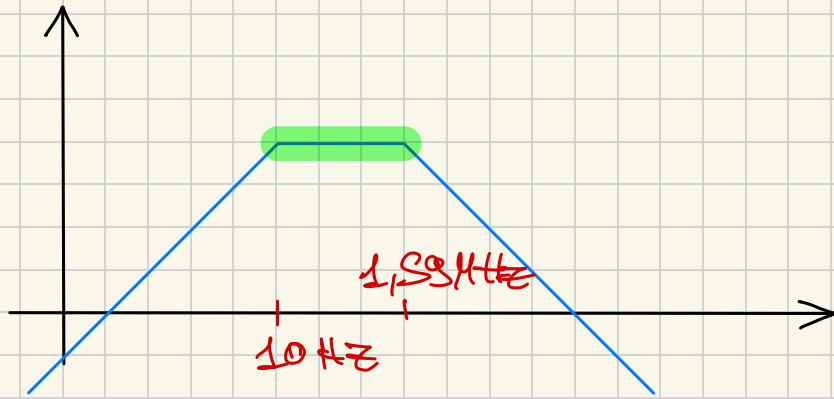
$$G_{loop} = - \underbrace{A(s)}_{\substack{A_0 \\ 1+s\omega_0}} \frac{R}{R + \frac{1}{sC}} = -A(s) \frac{sCR}{1+sCR}$$

VERIFICO: $\frac{A_0}{1+s\omega_0}$

CONDENSATORE: MI ASPETTO UN POLO, LA CUI ω È QUELLO CHE VEDE IL CONDENSATORE: $R \parallel \infty = R$

↓
GAIN

HO UNO ZERO NELL'ORIGINE: LO POSSO VERIFICARE NOTANDO CHE A 0 (ORIGINE) C È APERTO E NON PASSA IL SEGNALE

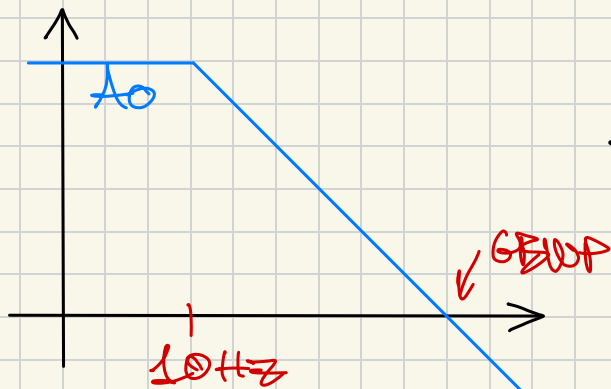


L'ATTUAZIONE È A -20dB: È SICURAMENTE STABILE

PER IL MARGINE DI FASE HO BISOGNO DELLA ϕ^* (E QUINDI DEL GUADAGNO QUI)

POSSO PRENDERE UNA FREQUENZA E RISOLVERE (ES: 1 kHz)

MA NON MI PIACE



$$\Rightarrow A_0 = \frac{G_{loop}}{\omega_0} = 10^7$$

MA SE CI PONIAMO A METÀ DI ●, SIAMO MOLTO PRIMA DEL POLO DEL CONDENSATORE E MOLTO

($sCR \ll 1$)

DOPO IL POLO DELL'OPAMP $\rightarrow \omega_{p0} \gg 1$

$$\Rightarrow G_{loop} = - \frac{A_0}{\cancel{\omega_{p0}}} \cdot \frac{\cancel{SCR}}{1} = A_0 \cdot \frac{CP}{\tau_0} = A_0 \cdot \frac{10 \text{ Hz}}{1,59 \text{ MHz}}$$

HO SEMPLICEMENTE APPLICATO $\frac{1}{2\pi f}$

$$= 62,8$$

→ GUADAGNO SULL'ATTEVERAMENTO

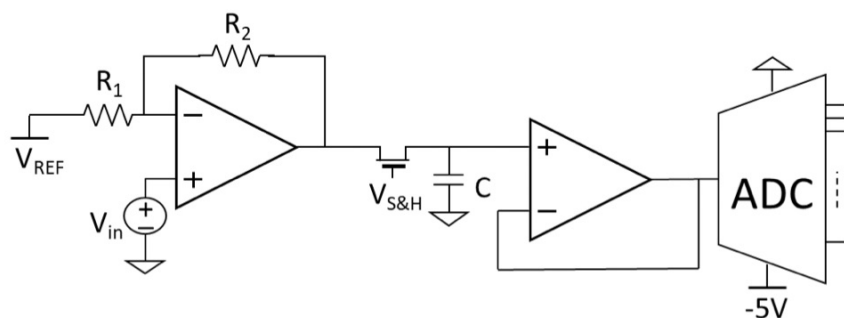
$$\Rightarrow \cancel{k} \cdot 1 = 62,8 \cdot 1,59 \text{ MHz} = 100 \text{ MHz} \rightarrow \text{IL POLO È MOLTO DISTANTE}$$

$$\Rightarrow \varphi_m = 180^\circ + 90^\circ - 90^\circ - 90^\circ = 90^\circ$$

2)

Dato il circuito in figura:

- Determinare V_{REF} per sfruttare tutta la dinamica dell'ADC con un segnale di ingresso V_{in} compreso tra $\pm 500 \text{ mV}$;
- Calcolare l'errore statico di guadagno dovuto al buffer con $A_0 = 10^3$;
- Calcolare l'errore in LSB dovuto alla tensione di offset $V_{os} = \pm 1 \text{ mV}$ dei due amplificatori operazionali;
- Determinare la minima capacità C compatibile con un errore inferiore a 1LSB dovuto alla corrente di bias uscente $I_{BIAS} = 100 \text{ nA}$ con $T_H = 20 \mu\text{s}$;
- Determinare le tensioni di comando $V_{S\&H}$ del Sample&Hold per garantire un corretto funzionamento del circuito;
- Sia ora $C = 50 \text{ nF}$ e $V_{S\&H}$ un'onda quadra di ampiezza 12V picco-picco e valor medio nullo. Calcolare l'errore di charge injection in LSB considerando una capacità parassita del mos $C_{PAR} = 10 \text{ pF}$.



DATI:

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

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

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

$$n_{BIT} = 10$$

a) LA DINAMICA È SOLO NEGATIVA (0 → -SV) SULL'ADC

IL BUFFER E IL S&H OVVIAMENTE NON LA MODIFICANO, IL PRIMO OPAMP SÌ

$$GID|_{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + 4 = 5$$

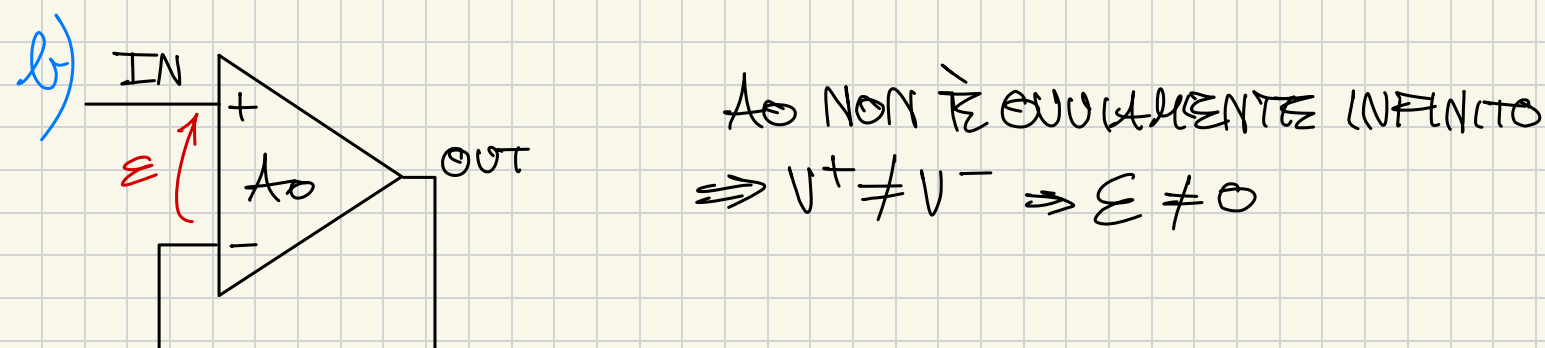
$$GID|_{V_{REF}} = - \frac{R_2}{R_1} = -4$$

$$\text{CON SOLO } V_{in} \text{ FARREI } [-500 \text{ mV} \cdot 5; 500 \text{ mV} \cdot 5] = [-2,5 \text{ V}; 2,5 \text{ V}]$$

⇒ DEVO "ABBASSARLA":

DI QUANTO LA ABBASSO

$$[-2,5 \text{ V}] = -4 V_{REF} \Rightarrow V_{REF} = 0,625 \text{ mV}$$



$\Rightarrow \varepsilon$ È LA DIFFERENZA TRA INGRESSO E USCITA
(È UN ERRORE)

$$OUT = A \cdot \varepsilon = A_0 \cdot (IN - OUT) = A_0 IN - A OUT$$

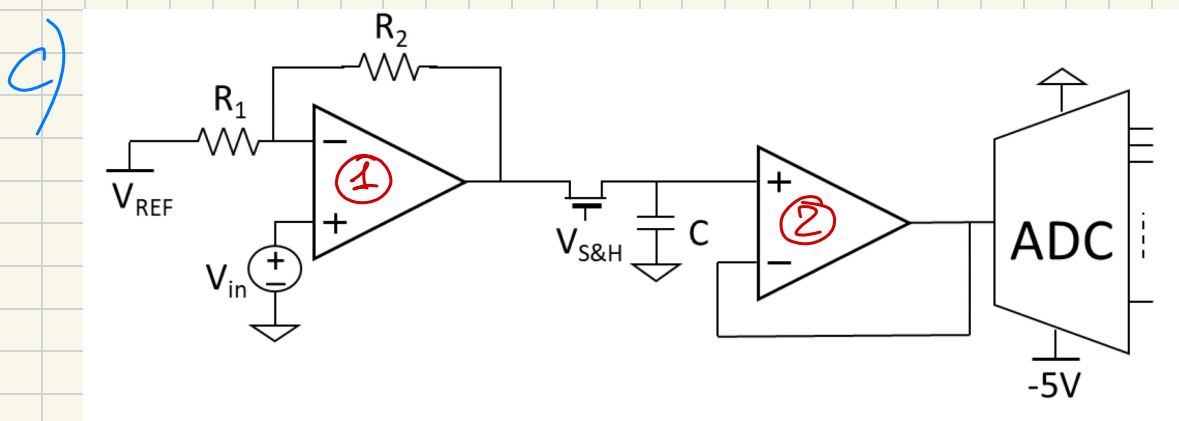
$\downarrow$
 V^-

$$\Rightarrow OUT = \frac{A}{A+1} IN \rightarrow \text{CASO PESSIMO CON } -5V$$

$$= -4,999999999V$$

$$\Rightarrow |\varepsilon| = OUT - IN = 4,999999999mV \approx 1LSB = \frac{5V}{2^{10}} = 5mV$$

$\Rightarrow$ 81 VOLTA BENE



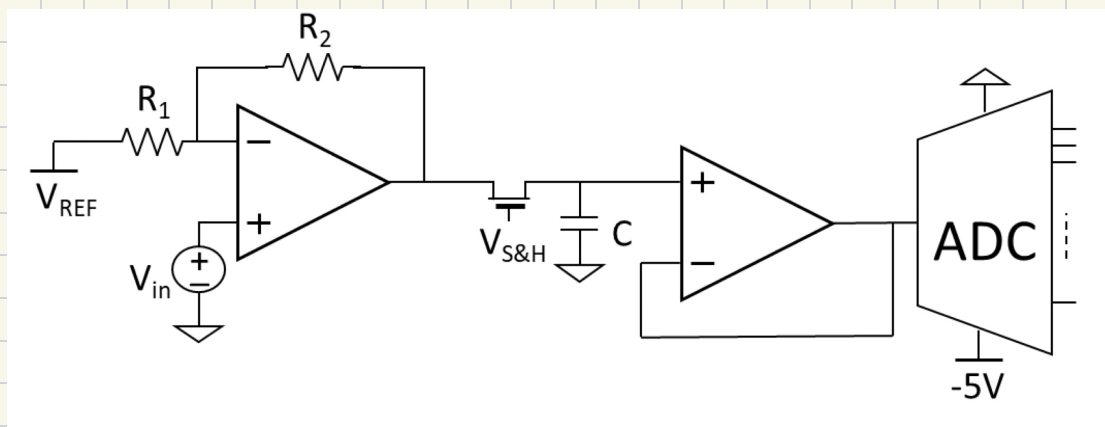
$$Volt_2 = Vos = \pm 1mV \rightarrow \text{NON BUFFER, TANTO ENTRA, TANTO ESCE}$$

$$Volt_1 = Vos \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \pm 5mV$$

$\downarrow$
NESSO AD ESEMPIO SU +

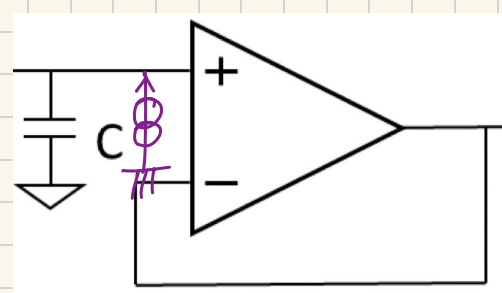
$$\Rightarrow Volt = \pm 6mV \approx 1,2LSB \quad \text{BENE MA NON BENISSIMO}$$

d)



IL PROBLEMA È OVVIAMENTE IN FASE DI HOLD SUL SECONDO OPAMP (IN FASE DI HOLD IL PRIMO È SCOLLEGATO DALL'INTERDUTTORE)

SUL NODO - SI CHIUDE SULL'USCITA (NESSUN PROBLEMA) È UNA SUL +:



CARICO LA CAPACITÀ A CORRENTE COSTANTE:

$$\Delta V = \frac{I}{C} \Delta t \Rightarrow C \geq 0,4 \mu F$$

$\Delta V \rightarrow 1 \text{ LSB}$
 $I \rightarrow 100 \mu A$
 $\Delta t \rightarrow 20 \mu s$
 $\Rightarrow$ PIÙ È GRANDE, PIÙ ΔV È PICCOLO

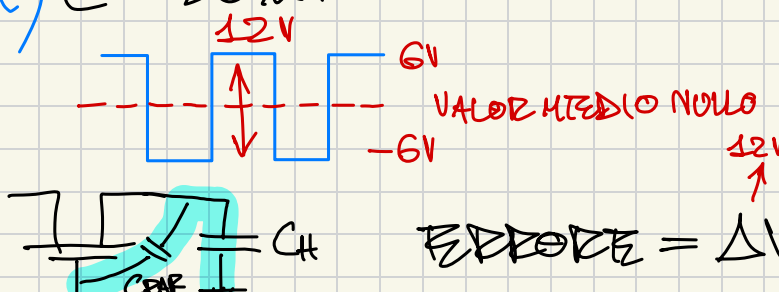
e) MOS CHIUSO IN SAMPLE, APERTO IN HOLD, È UN MOSN:

-SAMPLE: $V_{GS} > V_T \Rightarrow V_G \geq V_{in}|_{MAX} + V_T = V_T = 1V$

$[-5, 0] \rightarrow 0V$

-HOLD: $V_{GS} < V_T \Rightarrow V_G \leq V_{in}|_{MIN} = -5V + 1V = -4V$

f) $C = 50 \mu F$



PARTITORE CAPACITIVO

$$\frac{C_{PAR}}{C_{PAR} + C_H} = 2,4 \text{ mV} \approx 0,5 \text{ LSB}$$

$\rightarrow 50 \mu F \Rightarrow$ TRASCURABILE

3) Il segnale di ingresso I_{in} è una corrente variabile tra $-1\mu A$ e $+1\mu A$. L'amplificatore operazionale è ideale se non diversamente specificato.

a) Determinare il numero minimo di bit dell'ADC affinché il segnale di ingresso I_{in} venga convertito con almeno 1000 livelli.

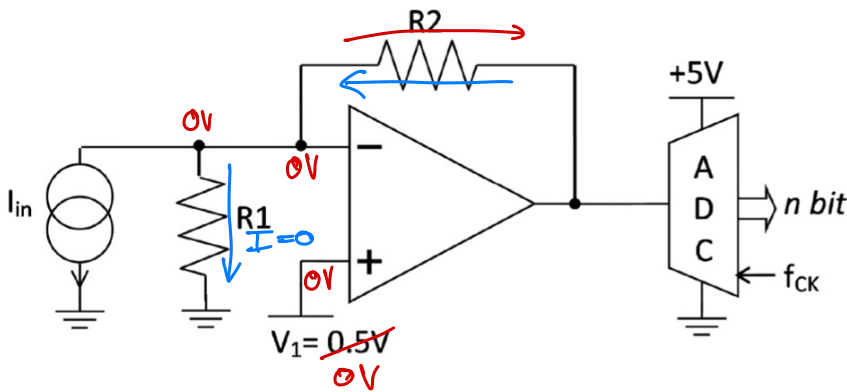
Si assuma nel seguito un ADC ad approssimazioni successive (SAR) con $n = 16$ bit e $f_{CK} = 100\text{MHz}$.

b) Se la resistenza R_1 cambiasse con la temperatura di $\alpha = 5\Omega/^\circ C$, di quanto dovrebbe aumentare la temperatura per modificare la codifica digitale di 1LSB?

c) Sia $I_{in} = 1\mu A \sin(2\pi ft)$. Determinare la massima frequenza f per avere un errore di conversione inferiore a 1LSB.

d) Si assuma ora un AO reale con un guadagno di $A(s) = 10^5$. Determinare il massimo errore di conversione rispetto al caso ideale $A(s) = \infty$.

e) Si assuma infine un guadagno $A(s) = 10^5 / (1 + s\tau_0)$ con $\tau_0 = 1\text{ms}$ e un segnale I_{in} a gradino che all'istante $t=0$ passa da $-1\mu A$ a $1\mu A$. Tracciare l'andamento della tensione in ingresso all'ADC e calcolare il tempo da attendere prima di iniziare la conversione volendo avere un errore inferiore a 1LSB.



DATI:

$$R_1 = 250k\Omega$$

$$R_2 = 1M\Omega$$

a) SAREBBE SBAGLIATO DIRE 10 bit DI

ADC, PERCHÉ AVREBBE SOLO SE L'INGRESSO COPRISSE TUTTA LA DINAMICA, VERIFICHIAMO:

OPAMP: CONF. INVERTENTE (SPENGO V_1)

$$\Rightarrow V_{out} = -I_{in} R_2$$

PER V_1 :

$$V_{out} = V_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = V_1 \cdot 5 = 2.5V$$

$$\Rightarrow V_{out} = 2.5V \pm 1\mu A \cdot 1M\Omega = [1.5V; 3.5V] \Rightarrow \text{AMPIEZZA DELL'USCITA È } 2V$$

VOGLIO UNA RISOLUZIONE $\frac{1}{1000} \Rightarrow \frac{1}{1000} \cdot 2V = 2mV =$

$$\Rightarrow n \geq 12 \text{ bit}$$

CERCO IL NOSTRO n (LSB LO HO)

$$\left[\frac{FSR}{2^n} = \text{LSB} \right]$$

b) CI INTERESSA VALUTARE UN CASO REALE: IL CAMBIAMENTO DI VALORI DEI COMPONENTI DOWUTO ALLA TEMPERATURA: MAGARI CAMBIA L'USCITA! QUANTO NE TOLERIAMO?

SU I_{in} NON HO EFFETTO: DIPENDE SOLO DA R_2 MA V_1 NO!

$$\Rightarrow \Delta V_{ADC} = V_1 R_2 \left(\frac{1}{R_1 + \alpha \Delta T} - \frac{1}{R_1} \right) = \text{LSB}$$

R_1 MODIFICATA CASO STANDARD

$\Rightarrow$ L'UNICO DATO CHE CI MANCA È ΔT (CHE È LA RICHIESTA)

SONO UN PO' DI CONTI, MA $\Delta T = \frac{1\text{LSB} \cdot R_1}{V_1 \frac{R_2}{R_1} - 1\text{LSB}} \cdot \frac{1}{\alpha} = 1.9^\circ C$

c) CHI CI DÀ IL PROBLEMA?

IL FATTO DI NON AVERE UN S&H: DURANTE LA CONVERSIONE IL SEGNALE CAMBIA E SE CAMBIA PER PIÙ DI 1LSB, È UN PROBLEMA:

$$\left[\frac{\Delta V}{\Delta t} \right]_{\text{MAX}} \quad \Delta t \quad \left[\begin{array}{l} \text{MI HANNO DETTO CHE È UN ADC SAR, 16 bit, 100 MHz} \\ \Rightarrow T_{\text{CONV}} = \frac{M+1}{f_{\text{clk}}} = \frac{17}{100 \text{ MHz}} = 170 \text{ ns} \end{array} \right]$$

$$\left. \frac{dV}{dt} \right|_{\text{MAX}} = R_2 \cdot 1 \mu\text{A} \cdot 2\pi f \cdot \cancel{\cos(\dots)}$$

NECESSARIO PER POTER RAGIONARE CON L'LSB, LO POTREI CONUNQUETE RIPORTARE ALL'INGRESSO (E USARE $\frac{1\text{LSB}}{R_2}$) → GAIN DA NO RISPETTO A IN

⇒ f È CIÒ CHE DOBBIAMO TROVARE

$$\Rightarrow f = 714 \text{ Hz}$$

È NORMALE? SÌ, È IL MOTIVO PER CUI CI SERVE UN S&H

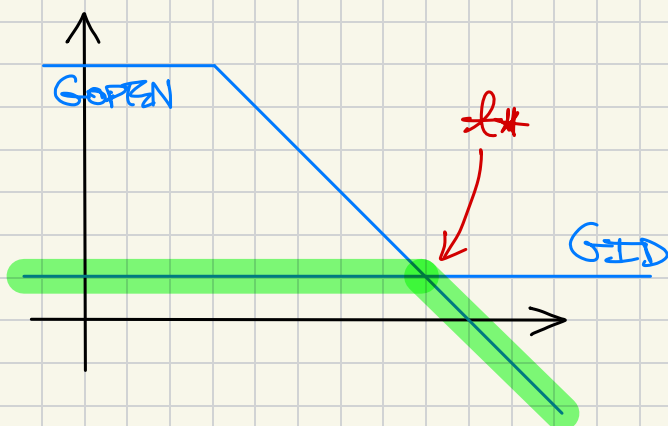
e) L'INGRESSO È UN GRADINO DA $-1 \mu\text{A}$ A $+1 \mu\text{A}$

$$A(s) = \frac{A_0 \rightarrow 10^3}{1 + s\tau_0} \quad \rightarrow 1 \mu\text{s}$$

MA COME SARÀ L'USCITA, UN GRADINO? LO SAPREBBE SE FOSSE IDEALE, MA NON LO È:

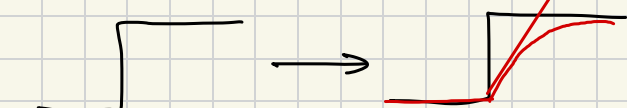
$$G_{\text{OPEN}} = G_{\text{ID}} \cdot G_{\text{LOOP}} = R_2 \frac{A_0}{1 + s\tau_0}$$

$$G_{\text{ID}} = R_2$$

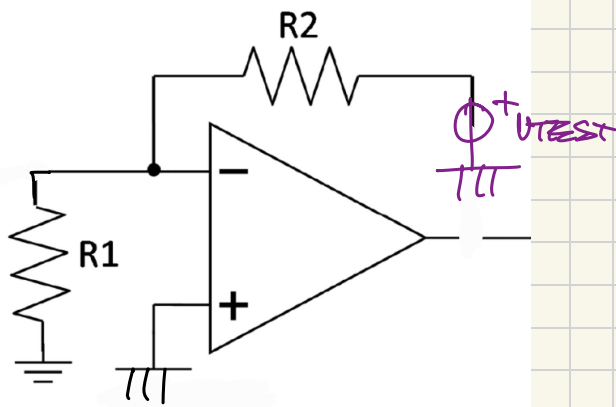


G_ID

⇒ È UN PASSA BASSO

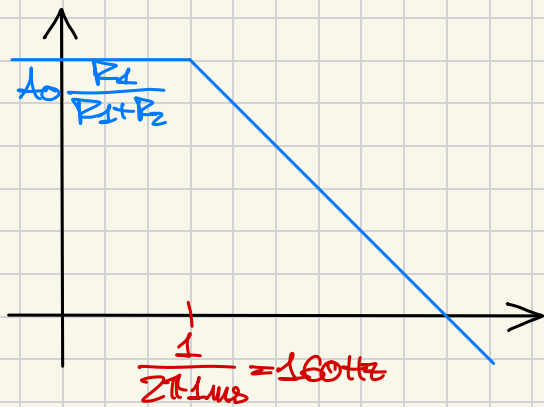


MI INTERESSA f_p , CHE MI DÀ IL POLO: CALCOLARE IL G_{LOOP}



$$G_{loop} = -A(\omega) \frac{R_1}{R_1 + R_2} =$$

$$= -\frac{A_0}{1 + s\tau_0} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



MA ALLORA (PRODOTTO GUADAGNO-BANDA COSTANTE):

$$A_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot 160 \text{ kHz} = 1 \cdot f^*$$

$$\Rightarrow f^* = 3.18 \text{ MHz} \quad (\tau = 50 \text{ ns})$$

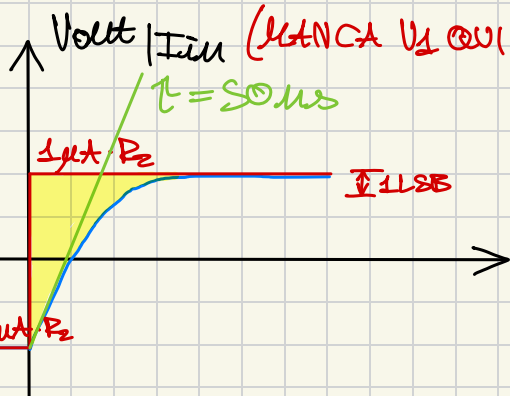
$\Rightarrow$ L'USCITA SARÀ:

$\rightarrow$ VADO DA 1,5V A 3,5V

MA QUANTO DEVO ASPETTARE PER CAMPIONARE? DEVO ASPETTARE CHE L'ERRORE SIA $< 1 \text{ LSB}$

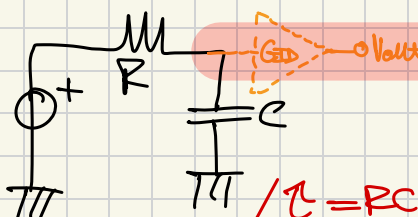
$$\Rightarrow \varepsilon = \underbrace{2V}_{\text{AMPIEZZA}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \leq 1 \text{ LSB} \leftarrow \frac{5V}{2^{16}}$$

(ESPONENZIALE DECRESCENTE) $\tau = 50 \text{ ns}$



$\Rightarrow$ CI MANCA $t = 50 \text{ ns}$ PERCHÉ PROPRIO f^* ?

SI COMPORTA COME UN RC:



CHE HA DIAGRAMMA DI BODE:



L'UNICA COSA CHE CAMBIA QUI È CHE HO UN GUADAGNO $\neq 1$