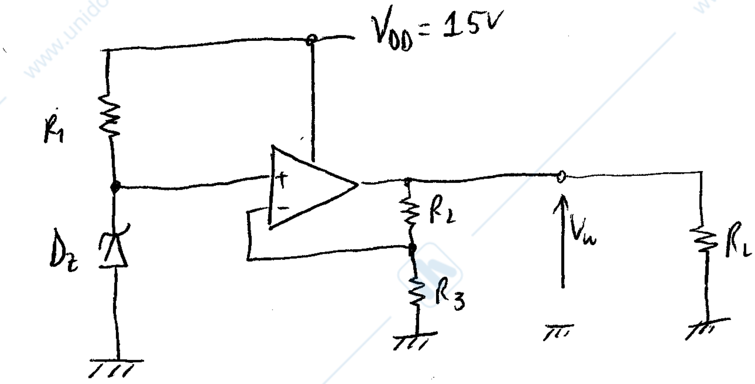
ESERCITAZIONE DEL 17/12/01



D_z: $V_z = 3{,}3V$
$I_z = 5mA$
$r_{dz} = 10\Omega$

$R_3 = 1k\Omega$

OPERAZIONALE:
$PSRR = 50dB$
$I_{MAX} = 40mA$

CALCOLARE:

1) CALCOLARE R_1 PER POLARIZZARE LO ZENER D_z ALLA CORRENTE I_z

2) CALCOLARE R_2 PER AVERE $V_u = 12V$

3) SE L'ALIMENTAZIONE È INTERESSATA DA UNA TENSIONE DI RIPPLE DI 0,1V, CALCOLARE IL RIPPLE IN USCITA

4) CALCOLARE LA MINIMA RESISTENZA DI CARICO R_L PILOTABILE DAL CIRCUITO (I_{MAX} OPERAZIONALE $= 40mA$)

SOLUZIONE

1) Una volta polarizzato, ai capi dello zener cadono $V_Z = 3{,}3V$, perciò:

$$\left.\begin{array}{l} V_{R_1} = V_{DD} - V_Z = 15V - 3{,}3V = 11{,}7V \\ I_Z = I_{R_1} = 5\,mA \end{array}\right\} \Rightarrow R_1 = \frac{V_{R1}}{I_{R1}} = \frac{11{,}7V}{5mA} = 2\,340\,\Omega$$

2) La retroazione tende a realizzare $V^+ = V^-$, perciò:

$$V^+ = V_Z = 3{,}3V \Rightarrow V^- = 3{,}3V \Rightarrow V_{R_3} = 3{,}3V$$

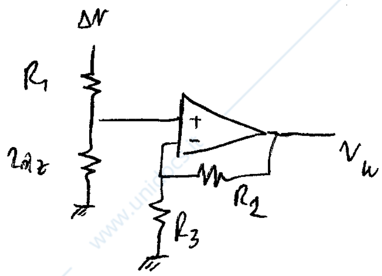
$$I_{R_3} = \frac{3{,}3V}{R_3} = 3{,}3mA \qquad \text{ma } I_{R_2} = I_{R_3} \Rightarrow V_u = I_{R_3}(R_2 + R_3)$$

$$R_2 = \frac{V_u}{I_{R_3}} - R_3 = \frac{12V}{3{,}3mA} - 1k\Omega = 2636\,\Omega$$

3) I percorsi possibili del ripple verso l'uscita sono due:

a) attraverso lo zener:

il ripple su V_{DD} viene attenuato dal partitore $R_1 - r_{dz}$ per venire poi amplificato dall'operazionale

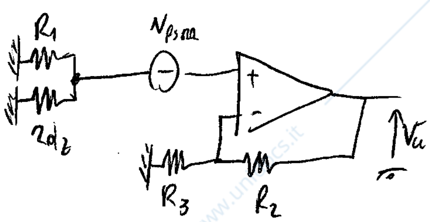


$$V_u\Big|_Z = \Delta V \cdot \frac{r_{dz}}{r_{dz} + R_1} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) =$$

$$= 0{,}1V \cdot \frac{10\Omega}{10\Omega + 2340\,\Omega}\left(1 + \frac{2\,636}{1000}\right) = 1{,}53\,mV$$

b) attraverso il PSRR dell'operazionale:

Il PSRR dell'operazionale può essere modellizzato come un generatore comandato posto in serie all'ingresso non invertente



$$V_{PSRR} = \pm\frac{\Delta V}{PSRR} = \pm\frac{0{,}1V}{316} = \pm 0{,}316\,mV$$

$$V_u\Big|_{PSRR} = \pm\frac{\Delta V}{PSRR} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) = \pm 1{,}15\,mV$$

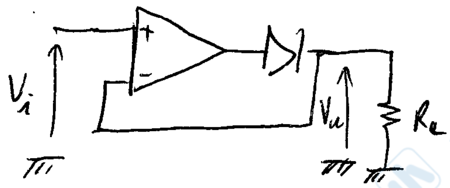
$\Delta V_u = \Delta V_u|_z + \Delta V_u|_{PSRR} = 2{,}68\,mV$ nel caso peggiore.

4) L'operazionale può fornire in uscita al massimo $I_{MAX} = 40mA$.

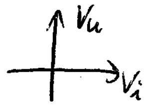
La corrente che è chiamato a fornire vale:

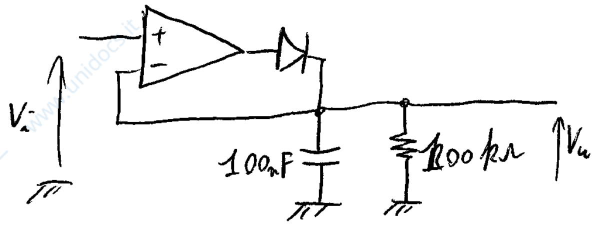
$$I_o = \frac{V_u}{R_L} + \frac{V_u}{R_2+R_3} \leq I_{MAX} \Rightarrow \quad R_L \geq \frac{V_u}{I_{MAX} - \frac{V_u}{R_2+R_3}} = \frac{12V}{40mA - 3{,}3mA} = 327\Omega$$

DATO IL CIRCUITO:



1) TRACCIARE IL DIAGRAMMA





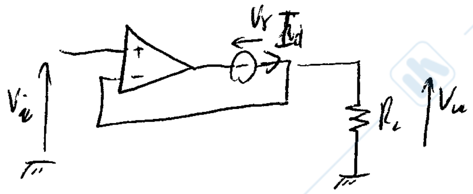
$V_i = 1V \sin(2\pi \cdot 1kHz \cdot t)$

2) CALCOLARE V_u

SOLUZIONE

1) Il circuito contiene 1 diodo. Cerco la condizione di apertura di tale diodo:

Hp. Diodo acceso, perciò:

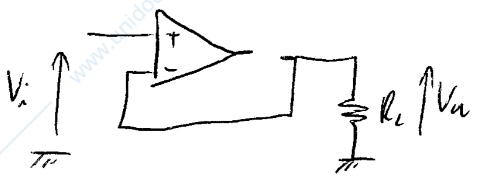


La retroazione negativa cercherà di avere

$$V^+ = V^- \Rightarrow V_u = V_i \quad e \quad I_d = \frac{V_u}{R_L} = \frac{V_i}{R_L}$$

Il diodo rimarrà acceso (polarizzato direttamente) finché $V_i > 0$.

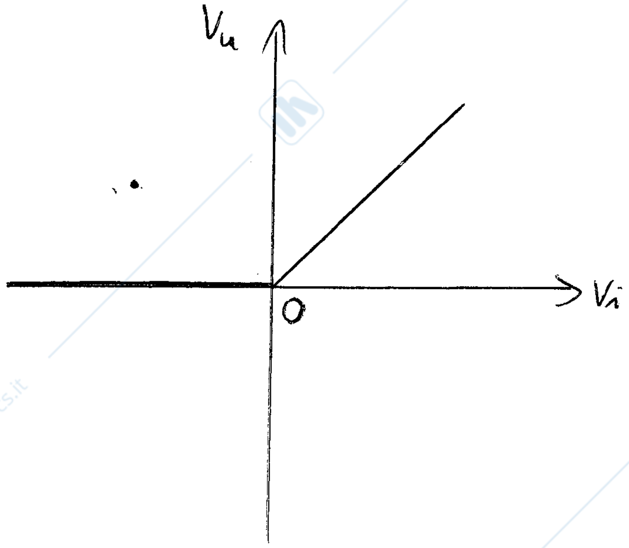
Quando $V_i < 0$, il diodo si apre. La retroazione viene aperta.



$V_u = 0V$ perché nessuno fornisce corrente a R_L

e $V^+ = V_i < 0$, $V^- = 0V$ $\Rightarrow$ l'operazionale saturerà verso l'alimentazione negativa.

Perciò:

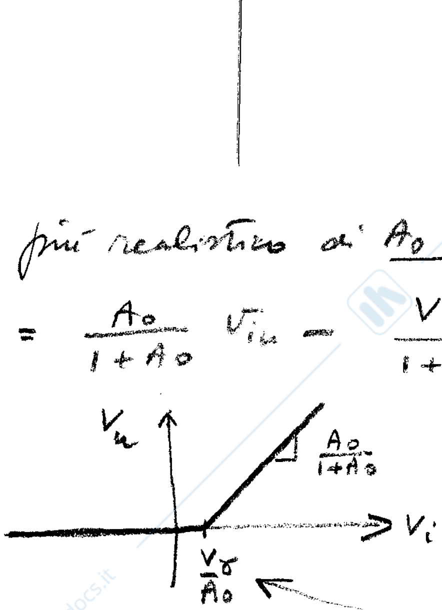


In pratica il circuito è un "diodo ideale" se $A_0 = \infty$

Nel caso più realistico di A_0 finito, verificare che:

$$V_u = \frac{A_0}{1+A_0} v_{in} - \frac{V_\gamma}{1+A_0} \quad \text{(ad. es. con la sovrapp. effetti)}$$

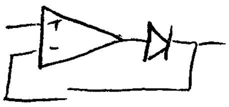
$\Rightarrow$



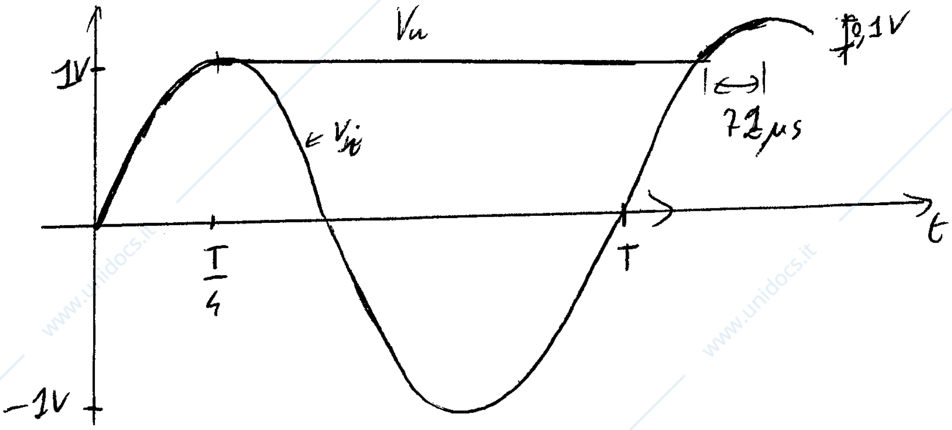
cond. diodo ON:

$I_d > 0 \rightarrow V_u > 0$

$\rightarrow \frac{A_0 v_{in}}{\cancel{1+A_0}} - \frac{V_\gamma}{\cancel{1+A_0}} > 0 \rightarrow \boxed{v_{in} > \frac{V_\gamma}{A_0}}$

2) Il circuito  si comporta come un diodo ideale

la capacità verrà, quindi, inizialmente caricata dalla tensione di ingresso fino al massimo a $t = \frac{T}{4}$, poi si scaricherà lentamente su C.



Supponendo che la scarica sia lenta $(RC = 10ms << T = 1ms)$, la scarica avverrà quasi a corrente costante:

$$i_c \simeq \frac{V_c}{R_a} \simeq \frac{1V}{100k\Omega} = 10\mu A$$

Perciò in un periodo la capacità perderà:

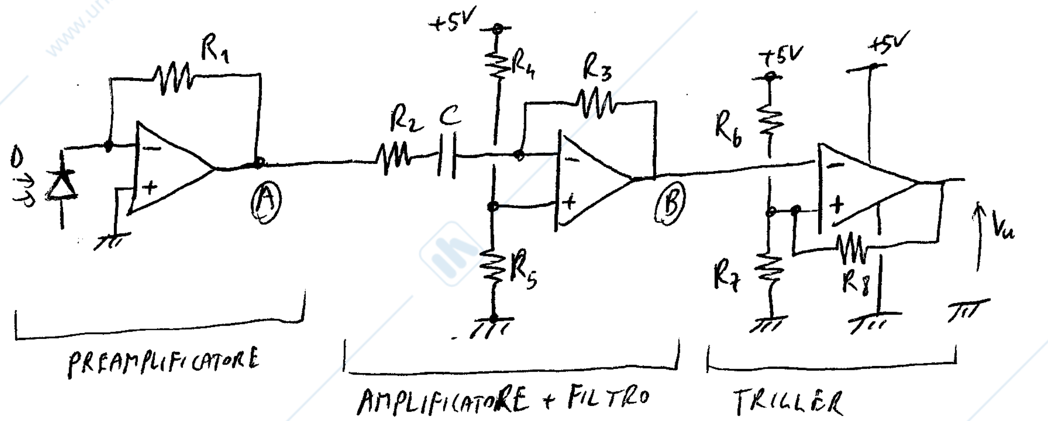
$$\Delta V = \frac{1}{C} i_c \cdot T = \frac{10\mu A \; 1ms}{100nF} = 0,1V$$

Successivamente il "diodo" si riaccende $(V_i > V_u)$ per ripristinare la tensione su C.

Il tempo di accensione vale:

$$T_{on} = \frac{T}{2\pi} \arccos\left(1 - \frac{\Delta v}{V_p}\right) = \frac{1ms}{2\pi} \arccos\left(1 - \frac{0,1V}{1V}\right) = 72\mu s$$

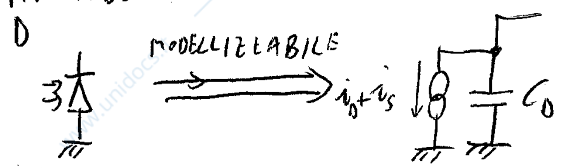
RICEVITORE PER TELECOMANDO I.R.



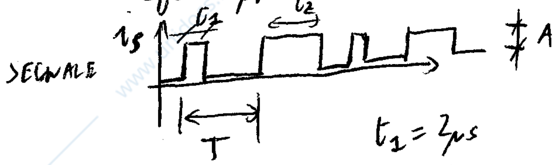
$R_3 = 47k\Omega$

$R_6 = 10k\Omega$

FOTODIODO:



$C_D = 20pF$



$t_1 = 2\mu s$

$t_2 = 5\mu s$

$T = 10\mu s$

$A = 0{,}3\mu A \div 30\mu A$

DISTURBO

$$i_D = 20\mu A \cdot \sin(2\pi \cdot 100Hz\, t)$$

1) PREAMPLIFICATORE
CALCOLARE R_1 E GBWP DELL'OPAMP PERCHÉ IL PREAMPLIFICATORE RISULTI STABILE E ABBIA UNA BANDA SUFFICIENTE PER IL SEGNALE.

2) AMPLIFICATORE + FILTRO
DIMENSIONARE R_2, R_4, R_5 e C E LE CARATTERISTICHE DELL'OPERAZIONALE (GBWP, SR) IN MODO CHE LA TENSIONE DI POLARIZZAZIONE IN B SIA $\frac{V_{cc}}{2} = 2{,}5V$, CHE L'AMPIEZZA DEL SEGNALE IN B SIA DI ALMENO 0,1V NON DISTORTO E CHE L'AMPIEZZA DEL DISTURBO IN B SIA INFERIORE A 20mV (SI CONSIDERI UNA FREQUENZA MINIMA DEL SEGNALE DI 100kHz)

3) TRIGGER

DIMENSIONARE R_7, R_8 e L'OPERAZIONALE (SLEW-RATE) PER FAR COMMUTARE CORRETTAMENTE IL TRIGGER SUL SEGNALE E NON SUL DISTURBO

4) INDICARE BREVEMENTE CHE EFFETTI AVREBBERO LE CORRENTI DI BIAS, L'OFFSET SUL TRIGGER

SOLUZIONE:

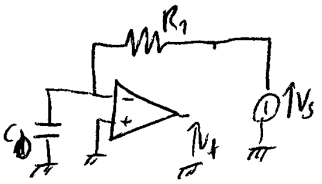
1) Il segnale è composto da impulsi di durata $2\mu s$ e $5\mu s$. La banda dei singoli stadi dovrà essere tale da non ridurre l'ampiezza e/o la durata di tali impulsi.

In un amplificatore di banda B, il tempo di salita della risposta al gradino è:

$$\tau = \frac{1}{2\pi B} \qquad t_{rise} = 2{,}2\,\tau = \frac{2{,}2}{2\pi B} << 2\mu s \quad \Rightarrow B >> \frac{2{,}2}{2\pi\, 2\mu s} = 175\,kHz$$

Calcolo tutti gli stadi perché abbiano banda $B = 1{,}75\,MHz$.

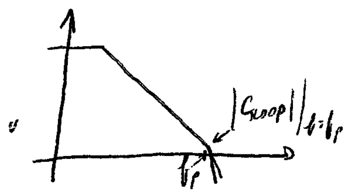
Il preamplificatore ha un G_{LOOP}:



$$G_{LOOP} \simeq -\frac{A_0}{1+s\tau_0}\cdot\frac{\frac{1}{sC_D}}{R_1+\frac{1}{sC_D}} = -\frac{A_0}{1+s\tau_0}\,\frac{1}{1+sR_1C_D}$$

$$\tau_p = R_1 C_D \qquad f_p = \frac{1}{2\pi R_1 C_D}$$

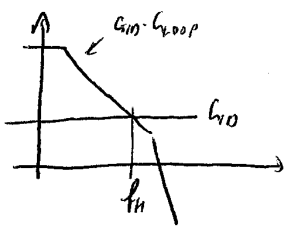
Perché sia stabile, ...



$$|G_{LOOP}|\Big|_{f=f_p} \leq 1 \quad \Rightarrow |G_{LOOP}| \approx \frac{A_0}{2\pi f_p \tau_0} \leq 1$$

$$\frac{A_0 R_1 C_D}{\tau_0} \leq 1 \quad \Rightarrow \frac{A_0}{2\pi\tau_0} = GBWP \leq \frac{1}{2\pi R_1 C_D}$$

La banda dell'amplificatore è pari a:



$$G_{ID} \simeq -R_1$$

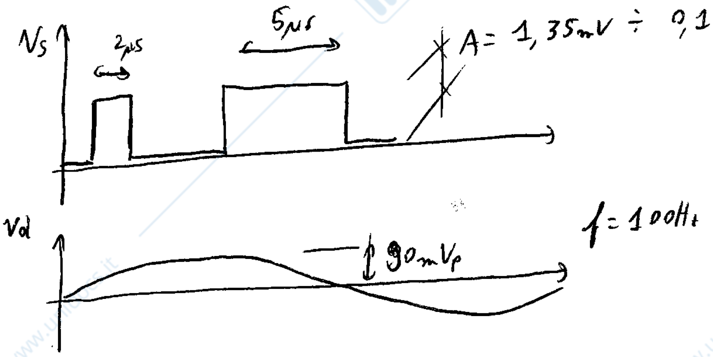
$$G_{LOOP}\cdot G_{ID} \simeq +\frac{A_0}{1+s\tau_0}\,\frac{R_1}{1+s\tau_p}$$

$$|G_{ID}| = |G_{LOOP}\,G_{ID}| \Rightarrow \cancel{R_1} = \frac{A_0}{2\pi f_H \tau_0}\cancel{R_1} \quad \Rightarrow f_H = \frac{A_0}{2\pi\,\tau_0} \qquad se\ f_H < \frac{1}{2\pi\tau_p}$$

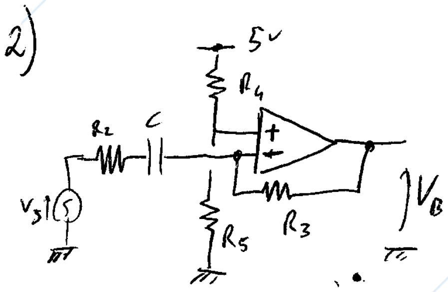
BANDA = $f_H \geq 1,75\ MHz$ $\Rightarrow$ $GBWP = 1,75 MHz$

$$R_1 \leq \frac{1}{2\pi\, GBWP\, C_D} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,75 MHz \cdot 20 pF} = 4,5\,k\Omega$$

Segnali in (A):



2)



Polarizzazione:

In polarizzazione la capacità C è un circuito aperto $\Rightarrow I_{R_2} = 0 \Rightarrow I_{R_3} = 0$

Perciò $V^- = V_B$

Grazie alla retroazione, $V^+ = V^- \Rightarrow V^+ = V_B$. Per avere $V_B = \frac{V_{cc}}{2} = 2,5V$, $V^+ = 2,5V$

ovvero

$$V^+ = \frac{R_5}{R_4 + R_5} V_{cc} = \frac{V_{cc}}{2} \Rightarrow \boxed{R_4 = R_5}$$

Per annullare l'effetto di possibili correnti di bias dell'operazionale, si deve porre $R_3 = R_4 // R_5 = \frac{R_4}{2}$ $\Rightarrow$ $\boxed{R_4 = R_5 = 2R_3}$

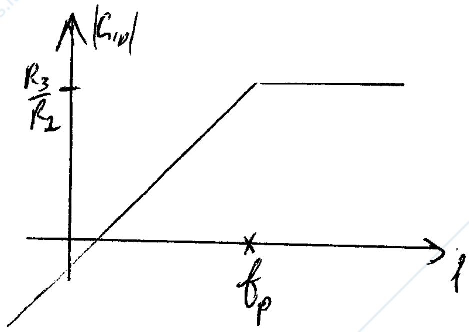
$\boxed{R_4 = R_5 = 94\,k\Omega}$

Sul segnale e sul disturbo

Il guadagno ideale dello stadio (polarizzazione esclusa) vale:

$$i_{R_2} = \frac{V_s}{R_2 + \frac{1}{sC}} \Rightarrow V_B = -R_3\, i_{R_2} = -\frac{R_3}{R_2 + \frac{1}{sC}} V_s$$

$$G_{10} = -\frac{sR_3C}{1+sR_2C} = -\frac{R_3}{R_2}\frac{sR_2C}{1+sR_2C}$$



$$f_p = \frac{1}{2\pi\tau_p}$$

$$\tau_p = R_2 C$$

Ad "alta frequenza", cioè sul segnale, il circuito guadagna $|G_{10}| \simeq \frac{R_3}{R_2}$, volendo che

$$V_B\big|_{SEGNALE} > 0{,}1V \Rightarrow |G_{10}| \geq \frac{0{,}1V}{V_S\big|_{MIN}} = \frac{0{,}1V}{1{,}35mV} = 74$$

$$R_2 = \frac{R_3}{|G_{10}|} = \frac{10k\Omega}{74} = 635\Omega$$

Per garantire che il segnale venga amplificato correttamente, $f_p << f_L = 100kHz$

$$\tau_p >> \frac{1}{2\pi f_L} = 1{,}59\mu s \Rightarrow C >> \frac{\tau_p}{R_2} = 2{,}5nF$$

A "bassa frequenza", cioè sul disturbo, il circuito guadagna

$$|G_{10}| \simeq \frac{R_3}{R_2} 2\pi f R_2 C = 2\pi f R_3 C$$

Per avere un disturbo in uscita pari a $20mV$, $|G_{10}| = \frac{20mV}{90mV} = 0{,}222$

$$|G_{10}| = 2\pi f_0 R_3 C < 0{,}222 \Rightarrow C < \frac{0{,}222}{2\pi f_0 R_3} = \frac{0{,}222}{2\pi \cdot 100Hz \cdot 47k\Omega} = 7{,}52nF$$

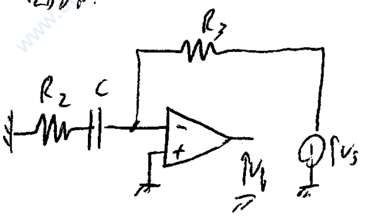
Perciò:

$$2{,}5nF < C < 7{,}5nF \Rightarrow \boxed{C = 4{,}3nF}$$

valore intermedio ottenuto con media geometrica

Calcolo della banda:

G_{LOOP}:



$$G_{LOOP} = \frac{R_2 + \frac{1}{sC}}{R_2 + \frac{1}{sC} + R_3} \cdot \frac{-A_0}{1+s\tau_0} =$$

$$= -\frac{A_0}{1+s\tau_0} \cdot \frac{1+sR_2C}{1+s(R_2+R_3)C}$$

$$G_{LOOP} \cdot G_{ID} = \frac{A_0}{1+s\tau_0} \cdot \frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{sR_2C}{1+s(R_2+R_3)C}$$

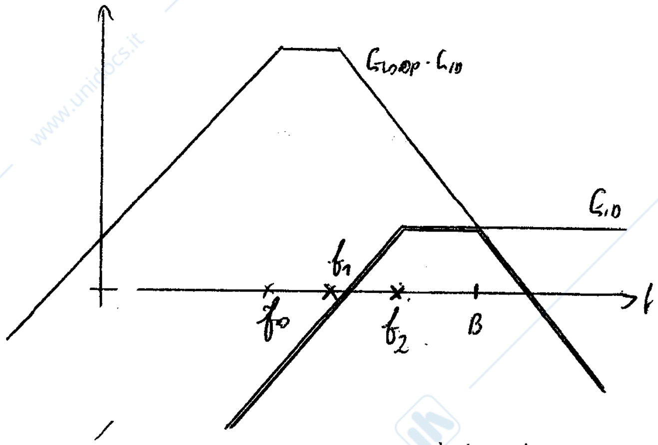
$$\tau_1 = (R_2+R_3)C = 45{,}7\,\mu s$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 3480\,Hz$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi f_0}$$

$$\tau_2 = R_2 C = 2{,}73\,\mu s$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 58{,}3\,kHz$$



La banda B del circuito è data da:

$$|G_{LOOP} \cdot G_{ID}| \simeq \frac{A_0}{2\pi B\tau_0} \cdot \frac{R_3}{R_2} \cdot \frac{R_2 C}{(R_2+R_3)C} = |G_{ID}| \approx \frac{R_3}{\cancel{R_2}} \cdot \frac{\cancel{R_2 C}}{\cancel{R_2 C}}$$

$$GBWP = \frac{A_0}{2\pi\tau_0} = \frac{R_2+R_3}{R_2} \cdot B = \frac{635\Omega + 47k\Omega}{635\Omega} \cdot 1{,}75\,MHz = 131\,MHz$$

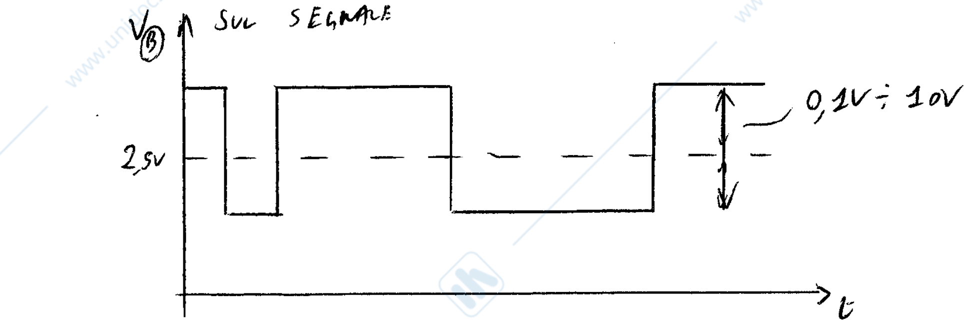
Il massimo segnale in uscita da questo stadio è:

$$V_B|_{max} = V_A|_{max} \cdot |G_{ID}|_{SIG.} = 0{,}135V \cdot 74 \simeq 10V$$

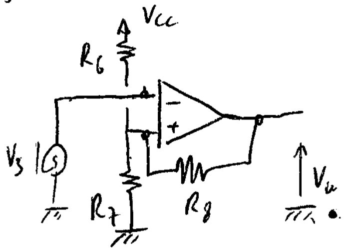
Per evitare la degradazione degli impulsi, lo slew rate dovrà essere

$$SR \gg \frac{V_B|_{max}}{2\mu s} = \frac{10V}{2\mu s} = 5\frac{V}{\mu s} \Rightarrow \boxed{SR = 50\frac{V}{\mu s}}$$

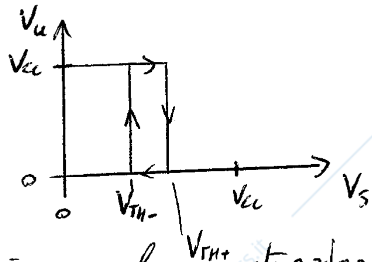
I segnali in (B) sono:



3) Questo stadio:



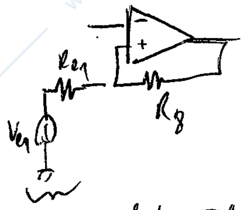
Presenta retroazione POSITIVA e realizza la funzione di TRIGGER DI SCHMITT, cioè di un comparatore con isteresi.



Un trigger di schmitt funziona quasi sempre con l'operazionale saturato, cioè con la retroazione spenta.
Quando si raggiunge la tensione di soglia, l'operazionale esce dalla saturazione, si riaccende la reazione che, essendo positiva, porta alla commutazione rapida del trigger riportando l'operazionale ... saturazione opposta.

Per calcolare le due tensioni di soglia, si deve cercare il valore della tensione di ingresso che realizzi la condizione $V^+=V^-$.
Tale tensione dipende dal valore dell'uscita dell'operazionale che può avere solo due valori: Vcc o GND (in questo caso con l'OP.AMP alimentato tra GND e Vcc)

Calcolo delle soglie:



equivalente Thevenin

$$V_{eq} = \frac{V_{cc}}{2}$$
$$R_{eq} = R_6 // R_7$$

1° SOGLIA: CASO CON $V_u = GND$

$V_u = 0V$

$$V^+ = \frac{(V_u - V_{eq})}{R_8 + R_{eq}} R_{eq} + V_{eq}$$

Il trigger commuta da $V_u = 0V$ a $V_u = V_{cc}$ per

$$V_{TH-} = V_{in} = V^- = V^+ = \frac{-V_{eq}}{R_8 + R_{eq}} R_{eq} + V_{eq}$$

$$V_{TH-} = V_{eq}\left(1 - \frac{R_{eq}}{R_8 + R_{eq}}\right)$$

2° SOGLIA:
CASO CON $V_u = V_{cc}$

$V_u = 5V$
$$V^+ = \frac{V_u - V_{eq}}{R_8 + R_{eq}} + V_{eq}$$

$$V_{TH+} = V^- = V^+ = \frac{V_{cc} - V_{eq}}{R_8 + R_{eq}} R_{eq} + V_{eq} = V_{eq}\left(1 + \frac{V_{cc} - V_{eq}}{V_{eq}} \frac{R_{eq}}{R_8 + R_{eq}}\right)$$

Nel nostro caso vogliamo che il trigger commuti sul segnale e non sul disturbo. Dato che il segnale (e il disturbo) si trova nell'intorno di $\frac{V_{cc}}{2} = 2{,}5V$, le soglie del trigger dovranno essere nell'intorno di $\frac{V_{cc}}{2}$, cioè:

$$\frac{V_{TH+} + V_{TH-}}{2} = \frac{V_{cc}}{2}$$

ed equidistanti:

$$V_{TH+} = \frac{V_{cc}}{2} + \frac{\Delta V_{TH}}{2}$$
$$V_{TH-} = \frac{V_{cc}}{2} - \frac{\Delta V_{TH}}{2}$$

Da queste tre condizioni, insieme alle espressioni di V_{TH+} e V_{TH-}, si trova che:

$$V_{eq} = \frac{V_{cc}}{2}$$
$$\Downarrow$$
$$V_{TH+} = \frac{V_{cc}}{2}\left(1 + \frac{R_{eq}}{R_8 + R_{eq}}\right)$$
$$V_{TH-} = \frac{V_{cc}}{2}\left(1 - \frac{R_{eq}}{R_8 + R_{eq}}\right)$$

Essendo $R_{eq} = R_6 // R_7$ e $R_6 = 10k\Omega$:

$$V_{eq} = \frac{V_{cc}}{2} = V_{cc} \frac{R_7}{R_6+R_7} \Rightarrow R_7 = R_6 = 10k\Omega$$

$$R_{eq} = 5k\Omega$$

$$\Delta V_{TH} = 2 \frac{R_{eq}}{R_8+R_{eq}} \frac{V_{cc}}{2} \Rightarrow R_8 = R_{eq} \frac{V_{cc}}{\Delta V_{TH}} - R_{eq}$$

Per evitare che il trigger commuti sul disturbo, $\Delta V_{TH} > V_{IN}|_{\substack{DISTURBO \\ PICCO-PICCO}} = 2 \cdot 20mV$

$$\Delta V_{TH} > 40mV$$

Inoltre, per essere certi che commuti sul segnale, $\Delta V_{TH} < V_{IN}|_{\substack{SEGNALE \\ PICCO-PICCO}} = 0{,}1V$

$$\Delta V_{TH} < 0{,}1V$$

Tuttavia, per essere sicuri che il trigger commuti sul segnale in presenza del segnale E del disturbo contemporaneamente, $\therefore$ $\Delta V_{TH} < 0{,}1V - 40mV = 60mV$

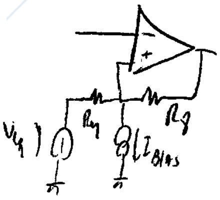
Scelto, pertanto, $\Delta V_{TH} = 50mV \Rightarrow R_8 = 990k\Omega$

Alla commutazione, l'uscita dell'operazionale passa da 0V a 5V o viceversa nel più breve tempo possibile. Verrà, pertanto, interessata dallo SLEW-RATE.

Per evitare la degradazione del segnale,

$$SR \gg \frac{5V}{2\mu s} = 2{,}5\frac{V}{\mu s} \Rightarrow SR = 25\frac{V}{\mu s}$$

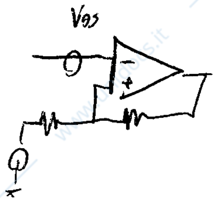
4) Le correnti di BIAS, sul trigger di schmitt, creano solo uno spostamento dei valori delle soglie. In questo caso le soglie si sposteranno di



$$dV_{TH}\Big|_{I_{BIAS}} \simeq -(R_1 // R_2)\, I_{BIAS}$$

$$V_{TH_+} = V_{TH_{+0}} + dV_{TH}$$
$$V_{TH_-} = V_{TH_{-0}} + dV_{TH}$$

La tensione di offset sposterà le tensioni di soglia del suo stesso valore:



$$V_{TH_+} = V_{TH_{+0}} \mp V_{OS}$$
$$V_{TH_-} = V_{TH_{-0}} \pm V_{OS}$$