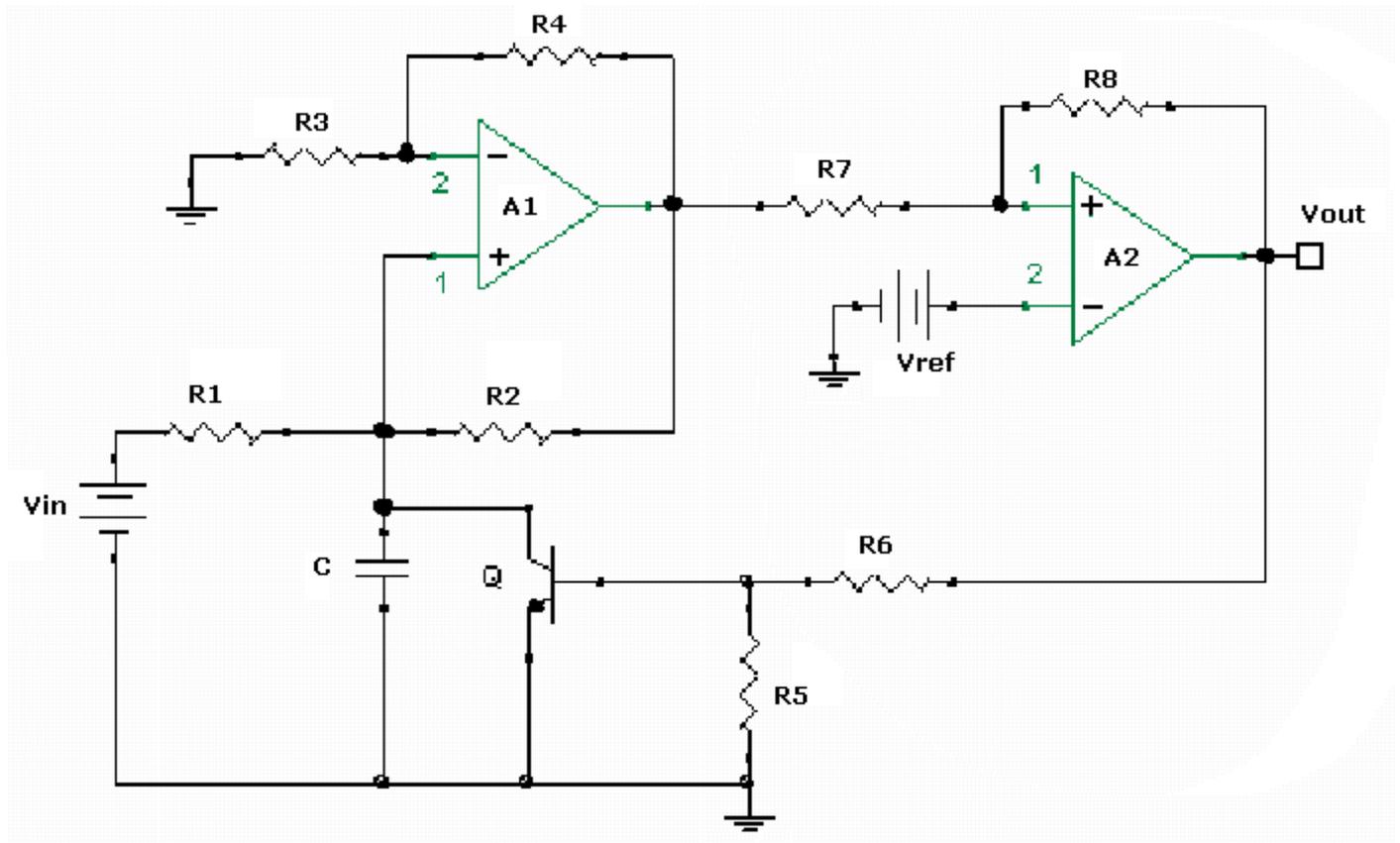


Il candidato, formulando eventuali ipotesi aggiuntive, dimensiona il circuito di figura:



in modo che:

- Si abbia un segnale d'uscita a frequenza 500Hz quando in ingresso viene applicato un segnale pari a 5V.
- All'uscita del primo amplificatore si abbia un segnale triangolare con ampiezza variabile tra +3 v e +9 V.
- Gli impulsi ottenuti all'uscita del secondo amplificatore abbiano durata trascurabile rispetto al periodo del segnale.

Calcoli inoltre i valori estremi della tensione in corrispondenza dell'ingresso non invertente del secondo Amplificatore operazionale.

Si consideri  $R1 = R2 = R3 = R4$ .

## IPOTESI AGGIUNTIVE

Premesso che gli amplificatori operazionali debbano essere alimentati con tensioni duali affinché possano funzionare nelle configurazioni di integratore A1 e di trigger di Schmitt A2, ritengo tali tensione duali di  $V_{cc} = +12V$  e  $-12V$  garantendo così adeguato margine affinché il segnale triangolare sull'uscita di A1 possa raggiungere i previsti  $+9V$ .

## FUNZIONAMENTO D'INSIEME

Considerando  $V_{in} = 5V$  e C scarico alla partenza avrò all'uscita di A1 tensione  $0V$ . Sarà pertanto l'ingresso non invertente di A2 meno positivo dell'invertente fisso a  $V_{ref}$ , ne consegue che  $V_{out}$  di A2 sarà teoricamente a  $-V_{cc}$  (che possiamo chiamare  $V_{OL}$  ai fini dello studio di A2).

In queste condizioni il BJT Q è interdetto ed ininfluenza sulla carica di C che può caricarsi a corrente costante fornita da  $V_{in}$  attraverso R1.

La corrente è costante per l'effetto di A1 con retroazione positiva attraverso R2. Si ha pertanto su C e sul pin non invertente di A1 una rampa di tensione in salita che forza l'uscita di A1 pure a salire con la stessa forma d'onda con guadagno pari a  $1 + R4/R3$  essendo  $R4 = R3$  il guadagno  $A = 2$ .

Teoricamente la rampa in uscita di A1 potrebbe salire fino a  $V_{in} \times 2 = 10V$ , in realtà si dovrà fermare a  $+9V$  come da specifiche richieste.

Quando la rampa raggiunge  $+9V$ , corrispondente a  $V_H$  (soglia di commutazione alta) di A2 configurato come trigger di Schmitt, l'ingresso non invertente di A2 supera la tensione  $V_{ref}$  del pin invertente di A2 e l'uscita  $V_{out}$  sale di colpo a  $+V_{cc}$  che possiamo chiamare anche  $V_{OH}$  (nella pratica sarà un poco meno di  $V_{cc}$  in quanto l'OP non riesce mai a saturare fino a  $V_{cc}$ ).

Attraverso R6 il BJT viene polarizzato e va in saturazione cortocircuitando a massa la capacità C che si scaricherà in un tempo brevissimo (come da traccia trascurabile). Ne consegue che la rampa scende bruscamente sotto la soglia  $V_L$  di A2 e di nuovo  $V_{out}$  va al negativo  $-V_{cc} = V_{OL}$  e il BJT si interdice e così la C può ripetere un nuovo ciclo di carica.

## INTEGRATORE A1

Al nodo R1, R2, C e pin non invertente di A1 possiamo scrivere che:

$$I_{R1} = I_C + I_{R2} \quad I_{R1} = \text{corrente in R1} \quad I_C = \text{corrente in C} \quad I_{R2} = \text{corrente in R2}$$

La tensione sul condensatore  $V_C$  è = a  $V_+$  del pin non invertente di A1, anche  $V_-$  dovrà essere = a  $V_+$  ma  $V_-$  proviene dal partitore R4 e R3 alimentato dalla tensione d'uscita  $V_{oA1}$  dell'amplificatore A1, essendo le due R uguali avrò  $V_- = V_{oA1} / 2$

Pertanto:

$$I_{R2} = (V_{oA1} - V_+) / R2$$

$$I_{R1} = (V_{in} - V_+) / R1$$

La IC del condensatore essendo costante è data  $IC = t \times C \times V_+$

Sostituendo nella formula delle correnti sapendo che le R sono uguali si avrà

$$(V_{in} - V_+) / R = (t C V_+) - (V_{oA1} - V_+) / R$$

essendo  $V_+ = V_- = V_{oA1} / 2$  si avrà

$$\left( V_{in} - \frac{V_{oA1}}{2} \right) \cdot \frac{1}{R} = t \cdot C \cdot \frac{V_{oA1}}{2} - \left( V_{oA1} - \frac{V_{oA1}}{2} \right) \cdot \frac{1}{R}$$

$$\frac{V_{in}}{R} - \frac{V_{oA1}}{2R} = \frac{t \cdot C \cdot V_{oA1}}{2} - \frac{2 \cdot V_{oA1} - V_{oA1}}{2R}$$

$$\frac{V_{in}}{R} - \frac{V_{oA1}}{2R} = \frac{t \cdot C \cdot V_{oA1}}{2} - \frac{V_{oA1}}{2R}$$

$$\frac{V_{in}}{R} = \frac{t \cdot C \cdot V_{oA1}}{2}$$

da cui  $V_{oA1} = 2 V_{in} / t R C$

nel dominio del tempo sarà

$$V_{oA1} = \frac{2}{R \cdot C} \int_0^t v_{in}(t) dt$$

se  $V_{in} = 5V$   $v_{oA1}$  è una rampa

$$V_{oA1} = \frac{2 \cdot V_{in}}{R \cdot C} t \quad (1)$$

Trascurando il tempo di scarica di C per avere la frequenza di 500 Hz in uscita  $V_{out}$ ,avrò che la tensione di uscita di A1 va da +3V a +9V nel tempo  $T = 1/F$

Cioè  $T = 1/500 = 2 \text{ mS}$

Sostituendo nella 1 si ha  $\Delta V_{oA1} = 9 - 3 = 6 \text{ V}$  in un tempo  $\Delta t = 2 \text{ mS}$

$$\Delta V_{oA1} / \Delta t = 2 V_{in} / R C$$

$6V / 2 \text{ mS} = 2 \times 5 / R C$  da cui  $R C = 20 / 6 \text{ mS} = 3,333 \text{ mS}$   
fissando  $R = 10 \text{ KOhm}$  posso trovare C

$C = 3,333 \text{ mS} / 10 \text{ K} = 0,333 \text{ uF}$  valore commerciale 330 nF

## TRIGGER INVERTENTE A2

Sarà  $V_L = V_{ref} ( 1 + R7/ R8 ) - V_{OH} \times R7/ R8$

$V_H = V_{ref} ( 1 + R7/ R8 ) - V_{OL} \times R7/ R8$

Dove  $V_{OH} = +12V$  e  $V_{OL} = -12V$

$V_H - V_L = V_{ref} ( 1 + R7/ R8 ) - V_{OH} \times R7/ R8 - ( V_{ref} ( 1 + R7/ R8 ) - V_{OL} \times R7/ R8$

$V_H - V_L = R7/ R8 ( V_{OH} - V_{OL} ) \quad [ - V_{OL} = - -12 = +12V ]$

$V_H - V_L = R7/ R8 \times 24$  ricordando che  $V_H = 9V$  e  $V_L = 3V$

$6 = R7/ R8 \times 24$  fissando **R8 ad esempio a 33 KOhm**

si avrà  **$R7 = 6 \times R8 / 24 = 8,25 KOhm$**  valore commerciale 8,2 K

da quanto scritto sopra riferito ad una soglia  $V_H$  o  $V_L$  posso ricavare  $V_{ref}$

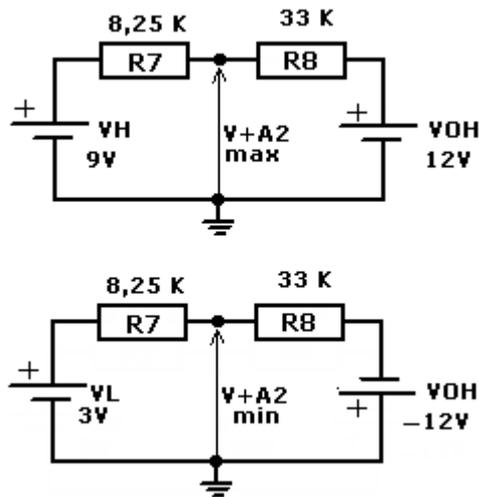
$R7/R8 = 0,25$

$$V_{ref} = \frac{V_L + V_{OH} \cdot \frac{R7}{R8}}{1 + \frac{R7}{R8}}$$

$$V_{ref} = \frac{V_L + V_{OH} \cdot 0,25}{1,25}$$

$$V_{ref} = (3 + 3) / 1,25 = 6 / 1,25 = 4,8 V$$

I valori estremi della tensione sul pin non invertente di A2, che chiamo  $V_{+A2}$  si trova applicando la legge di Ohm ai due circuiti equivalenti qui di seguito raffigurati:



La  $V_{+A2}$  massima sarà =  $V_H + V_{R7}$  ma  $V_{R7} = (V_{OH} - V_H) \times R_7 / R_7 + R_8$

$$V_{R7} = (12 - 9) \times 8,25 / (8,25 + 33) = 3 \times 8,25 / 41,25 = 0,6 \text{ V}$$

**Tensione massima  $V_{+A2} = 9 + 0,6 = 9,6 \text{ V}$**

La  $V_{+A2}$  minima sarà =  $V_L + V_{R7}$  ma  $V_{R7} = (V_{OL} - V_L) \times R_7 / R_7 + R_8$

$$V_{R7} = (-12 - 9) \times 8,25 / (8,25 + 33) = -15 \times 8,25 / 41,25 = -3 \text{ V}$$

**Tensione minima  $V_{+A2} = 3 - 3 = 0 \text{ V}$**

## CIRCUITO DI SCARICA CON BJT

Per poter trascurare il tempo di scarica dovrà essere questo molto piccolo rispetto al periodo del segnale di  $V_{out}$ .

Ipotesizzo sia sufficiente 20 volte più piccolo e allora il tempo di scarica

$$T_s = T / 20 = 2 \text{ mS} / 20 = 0,1 \text{ mS}$$

Considerando ancora la scarica a corrente costante attraverso la corrente di collettore  $I_c$  del BJT del tipo BC547 si può scrivere che la variazione di tensione sul condensatore sia:

$$\Delta V_c = I_c \times \Delta t / C \text{ da cui } I_c = \Delta V_c \times C / \Delta t \text{ ma}$$

$$\Delta V_c = (9 - 3) / A = 6 / 2 = 3 \text{ V} \text{ dove } A = \text{guadagno di } A_1$$

$$\text{sostituendo } I_c = 3 \times 0,33 \text{ uF} / 0,1 \text{ mS} = 9,9 \text{ mA}$$

Ipotesizzando il guadagno di corrente  $H_{fe}$  del BJT pari a 100 si avrà che la corrente di base  $I_b = 9,9 \text{ mA} / 100 = 0,099 \text{ mA} = 99 \text{ uA}$  fissando  $R_5$  non critica ad un valore di 12 K

e fissando la tensione  $V_{be}$  tra base emettitore del BJT a 0,7V, si avrà  $I_{R5} = V_{be} / 12 \text{ K} = 0,7 / 12 = 58 \text{ uA}$  (micro ampere).

Ne consegue che  $I_{R6} = I_{R5} + I_b = 58 + 99 = 157 \text{ uA}$  pertanto

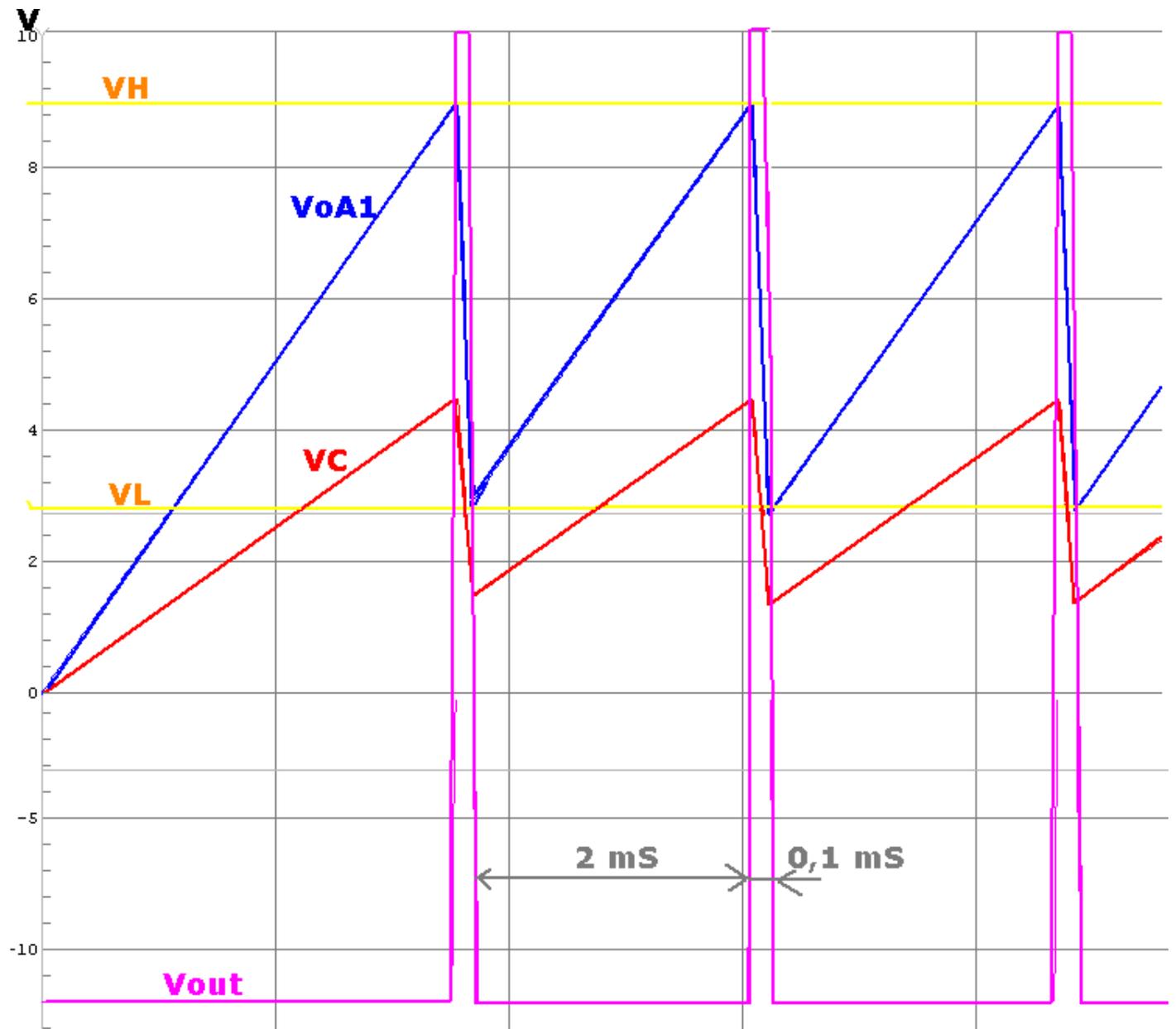
$$R6 = (V_{OH} - V_{be}) / I_{R6} = (12 - 0,7) \text{ V} / 157 \text{ uA} = 0,072 \text{ MOhm}$$

$$R6 = 72 \text{ KOhm}$$

Valore commerciale 68 KOhm

La determinazione di R6 con il ragionamento di cui sopra è indispensabile per poter rispettare le specifiche della traccia che impone il segnale a dente di sega che oscilla tra +3V e +9V. Se R6 fosse più basso di valore il transistor entrerebbe in saturazione con una  $I_c$  molto più alta da scaricare C verso zero V prima che il tempo di intervento del trigger possa interdire il BJT e la soglia dei 3 V si abbasserebbe arrivando anche a 0V.

## ANDAMENTO SEGNALI



PS: Rivalutando la soluzione su richiesta di un lettore che mi chiedeva del perché fosse necessaria l'alimentazione duale mi sono accorto che basta una singola alimentazione a +12V ovviamente cambiano i calcoli inerenti il trigger dove  $V_{ref}$  diventa 6 V e R8 sarà il doppio di R7.