

## ESAME di STATO 2009

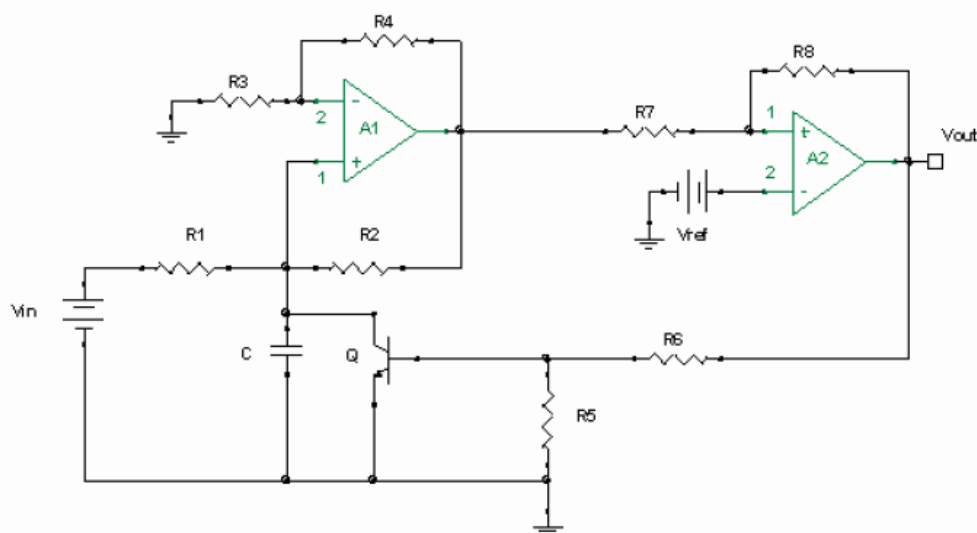
### ISTITUTO PROFESSIONALE per l'INDUSTRIA e l'ARTIGIANATO

#### Materia: ELETTRONICA TELECOMUNICAZIONI & APPLICAZIONI

Il circuito proposto appare abbastanza semplice perché si tratta di un dispositivo elettricamente oscillante, contenente un Trigger, costruito con componenti piuttosto conosciuti. In realtà, da un'analisi fatta utilizzando un software di simulazione elettronica, il dimensionamento non appare così semplice, poiché, se non viene effettuato con una certa precisione, sembrerebbe produrre condizioni di funzionamento non sempre stabili.

La simulazione effettuata con Workbench versione 4.0 (use circuit model), richiede un numero di punti per ciclo (Analysis Options dal menù Circuit) che va da 1000 a 5000 e spesso anche una tolleranza del 10%, quindi sembra piuttosto complessa (almeno per un software datato).

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



in modo che:

- si abbia un segnale d'uscita a frequenza 500 Hz quando in ingresso viene applicato un segnale pari a 5 V.
- 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  $R1 = R2 = R3 = R4 = R$

#### IPOSTESI INIZIALI SCELTE:

- Amplificatori Operazionali ideali.
- Alimentazione duale:  $V_{cc} = \pm 15$  [V];  $+V_{sat} = 15$  [V];  $-V_{sat} = -15$  [V]

- BJT: -BC107- potenziale di giunzione B-E = 0,75 [V];  $r_c + r_b + r_e \cong 60$  [ $\Omega$ ]
- Si suppone che l'onda triangolare in uscita da A1 sia presente e stabile con continuità ( $V_{tmin} = +3$  [V],  $V_{tmax} = +9$  [V]).

### SOLUZIONE

In corrispondenza del punto di minimo dell'onda triangolare  $V_{tmin}$  ( $= +3$  [V]) la tensione presente sul morsetto non invertente (punto 1) dell'Amplificatore Operazionale A2, si ottiene, supponendo che A2 si trovi in saturazione positiva ( $V_{out} = +15$  [V]), con la seguente formula applicata sul partitore formato da R7 e R8:

$$v^+ = (V_{out} - V_{tmin}) * [R7 / (R7 + R8)] + V_{tmin}$$

$$v^+ = (15 - 3) * [R7 / (R7 + R8)] + 3 = 12 * [R7 / (R7 + R8)] + 3 \quad \text{(A)}$$

Si vuole che, immediatamente prima di questo istante, A2 commuti e si porti in saturazione negativa. Questo è possibile imponendo  $v^+ = V_{ref}$ , poiché negli istanti precedenti la  $v^+$  risultava più alta (essendo  $V_t$  decrescente). Risulta infatti che non appena la tensione del morsetto non invertente di A2 diventa più piccola di quella del morsetto invertente (punto 2) l'operazionale passa in uscita da  $+V_{sat}$  a  $-V_{sat}$ .

Di conseguenza l'equazione (A) diventa:

$$v^+ = 12 * [R7 / (R7 + R8)] + 3 = V_{ref} \quad \text{(B)}$$

A partire da questo istante la tensione triangolare  $V_t$  cresce linearmente dal valore minimo di 3 [V] fino a  $V_{tmax} = +9$  [V]. A questo punto si vuole che, immediatamente prima del raggiungimento di  $V_{tmax}$ , l'Operazionale A2 commuti nuovamente passando in uscita da  $V_{out} = -V_{sat}$  a  $V_{out} = +V_{sat}$ . Quindi, stavolta, sul partitore formato da R7e R8, riapplicando la formula iniziale, si avrà:

$$v^+ = (V_{out} - V_{tmax}) * [R7 / (R7 + R8)] + V_{tmax}$$

Sostituendo i valori si ottiene:

$$v^+ = (-15 - 9) * [R7 / (R7 + R8)] + 9 = -24 * [R7 / (R7 + R8)] + 9 \quad \text{(A1)}$$

Non appena la  $v^+$ , che è crescente, diventa appena più alta di  $V_{ref}$ , A2 commuta verso la saturazione positiva. Quindi può imporre sulla formula (A1) che  $v^+$  sia uguale a  $V_{ref}$ :

$$v^+ = -24 * [R7 / (R7 + R8)] + 9 = V_{ref} \quad \text{(B1)}$$

Sottraendo l'equazione **(B1)** dalla equazione **(B)** si ricava:

$$[12 - (-24)] * [R7 / (R7 + R8)] + (3 - 9) = 0$$

e quindi:  $36 * [R7 / (R7 + R8)] - 6 = 0$

Ipotizzando che **R7** sia uguale a **10 [kΩ]** si ottiene:

$$36 * 10 / (10 + R8) = 6$$

di seguito si ricava :  $360 = 6 * (10 + R8) = 60 + 6 * R8$

da cui si ottiene :  $360 - 60 = 6 * R8$

$$300 = 6 * R8$$

$$\mathbf{R8 = 50 [kΩ]}$$

Sostituendo i valori di R7 e R8 nell'equazione **(B)** si determina:

$$12 * [10 / (10 + 50)] + 3 = V_{ref}$$

$$\mathbf{V_{ref} = 5 [V]}$$

Si veda come quest'ultimo valore verifica anche l'equazione **(B1)**.

Essendo imposto che  $R3 = R4$  l'Operazionale A1, collegato come amplificatore in configurazione non invertente, avrà guadagno a ciclo chiuso pari a  $2 = [1 + (R4/R3)]$ . Di conseguenza la tensione ai capi del condensatore (essendo anche quella sull'ingresso+ di A1) sarà di forma triangolare con valori estremi pari alla metà della tensione di uscita di A1 ( $V_t$ ). Quindi:

$$V_c = V_{in1} = V_t / 2$$

Pertanto la tensione  $V_c$  varierà tra  $V_{cmin} = 1,5 [V]$  e  $V_{cmax} = 4,5 [V]$ . Ne consegue che il condensatore dovrà caricarsi fino a  $4,5 [V]$  quando il BJT NPN si trova in interdizione ( $V_{out} = -V_{sat}$ ) e scaricarsi attraverso il BJT stesso, quando questo si trova in saturazione ( $V_{out} = +V_{sat}$ ). Essendo il potenziale di giunzione B-E del transistor pari a  $0,75 [V]$  scegliamo una tensione sulla base, per la saturazione del

BJT, di circa 2 [V]. Ipotizzando  $R6 = 10$  [k $\Omega$ ], sul partitore formato da R5 e R6, si ottiene, ai capi della R5:

$$V_b = V_{out} * R5 / (R5 + R6)$$

Sostituendo i valori si ricava :

$$2 = 15 * R5 / (R5 + 10)$$

$$2 * (R5 + 10) = 15 * R5$$

$$2 * R5 + 20 = 15 * R5$$

$$20 = 15 * R5 - 2 * R5 = 13 * R5$$

$$R5 = 1,5 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

Durante la fase di interdizione del BJT (onda triangolare  $V_t$  e  $V_c$  crescenti):

partendo dalle relazioni:  $Q = C * V$  ;  $dq = i * dt$

essendo  $i$  la corrente circolante nel condensatore in fase di carica, si ottiene

$$dq = C * dv = i * dt$$

Dato che nell'onda triangolare, durante le rampe di salita o di discesa il differenziale di tensione è costante al variare del tempo, si può ipotizzare:

$$\Delta Q = C * \Delta V = I * \Delta t$$

Se il tempo dell'impulso (durata della fase di saturazione positiva di A2 con  $V_{out} = +V_{sat}$ ) deve essere trascurabile, significa che la scarica del condensatore sarà praticamente immediata e quindi la durata della carica sarà pari all'incirca al periodo dell'oscillazione:

$$T = 1 / f = 1/500 = 0,002 \text{ [s]} = 2 \text{ [ms]} = \Delta t$$

Vuol dire che la corrente di carica sarà costante e uguale a:

$$I = C * (\Delta V / \Delta t) \quad (C)$$

con  $\Delta V = V_{cmax} - V_{cmin} = 4,5 \text{ [V]} - 1,5 \text{ [V]} = 3 \text{ [V]}$  e con  $\Delta t = 2 \text{ [ms]}$

Essendo il circuito lineare vale anche il principio di sovrapposizione degli effetti, per cui, siccome il condensatore si carica con il contributo della corrente proveniente dal generatore di ingresso  $V_{in} = 5 \text{ [V]}$  (attraverso  $R_1$ ) più quella proveniente dall'uscita di  $A_2$  (attraverso  $R_2$ ), si può scrivere, applicando la legge di Ohm:

$$(5 - V_c)/R_1 + (V_t - V_c)/R_2 = I$$

ma, essendo:  $V_t = 2 \cdot V_c$  e  $R_1 = R_2 = R$ , diventa:

$$(5 - V_c)/R + (2 \cdot V_c - V_c)/R = I$$

$$5/R - V_c/R + V_c/R = I$$

$$\mathbf{5/R = I}$$

il che conferma una corrente di carica costante.

Ipotizzando  $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$  si ottiene:

$$\mathbf{I = 5/10000 = 0,0005 \text{ [A]} = 0,5 \text{ [mA]}}$$

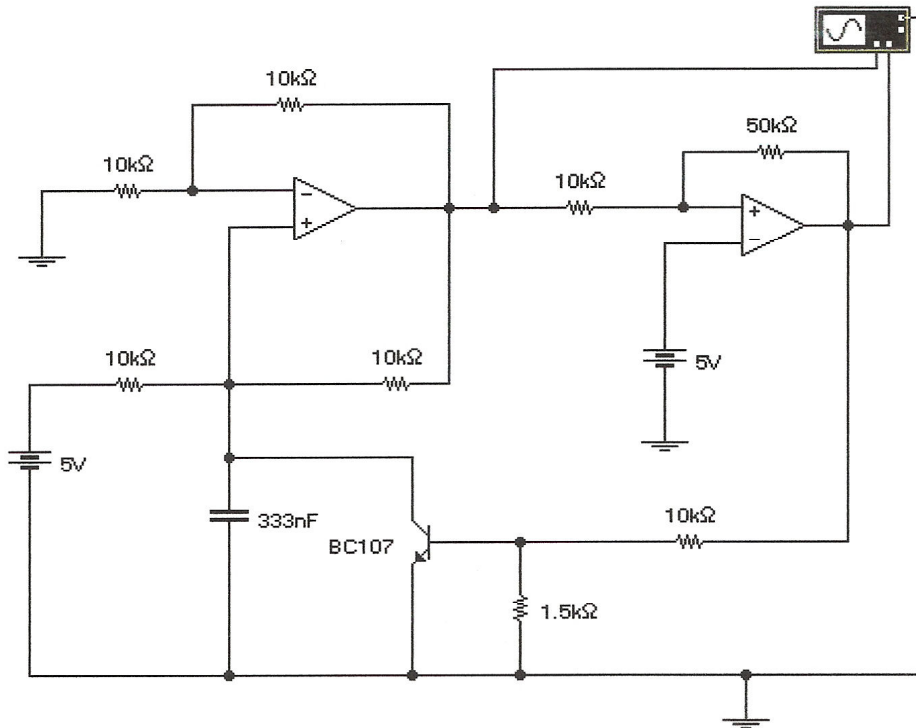
Sostituendo i valori nella equazione (C) si ricava la capacità:

$$\mathbf{I = C * (\Delta V / \Delta t) \qquad 0,0005 = C * (3 / 0,002)}$$

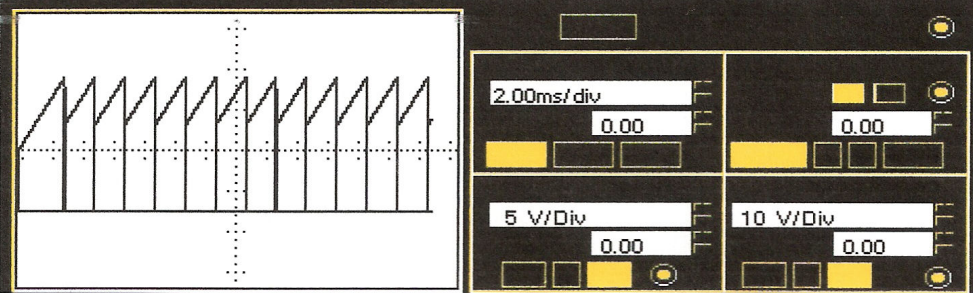
$$\mathbf{C = 0,0005 * 0,002 / 3 = 0,000000333 \text{ [F]} = 333 \text{ [nF]}}$$

Con i valori che sono stati ottenuti il circuito risultante è quello della figura seguente. Le forme d'onda sono ricavate utilizzando un oscilloscopio di tipo virtuale con uno step piuttosto forzato e una tolleranza alta, per evitare instabilità nell'algoritmo. Lievi miglioramenti si possono ottenere modificando di poco qualche parametro, ad esempio aumentando leggermente il valore della resistenza  $R_5$ . L'onda triangolare rientra nei valori richiesti e non è simmetrica, a causa della scarica brusca del condensatore, voluta anche per ottenere un impulso positivo in uscita di durata trascurabile.

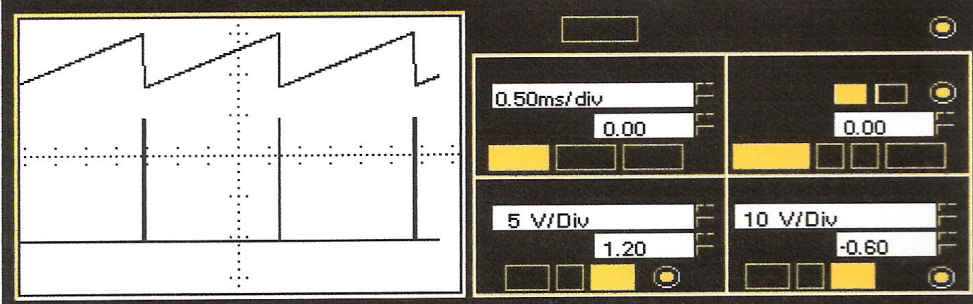
TIEN2009.CA4



Oscilloscope



Oscilloscope



Cambiando i valori di R e di C, aumentando per esempio la capacità fino a 15 [ $\mu$ F], si riesce a rendere l'onda triangolare quasi simmetrica, perché il condensatore si scaricherà comunque sulle resistenze di giunzione del BJT con una costante di tempo maggiore. Con R = 150 [ $\Omega$ ] e C = 15 [ $\mu$ F] il circuito è quello della figura seguente. Naturalmente non è più possibile avere un impulso d'uscita di durata trascurabile. Si ottiene una corrente di carica di qualche decina di mA.

