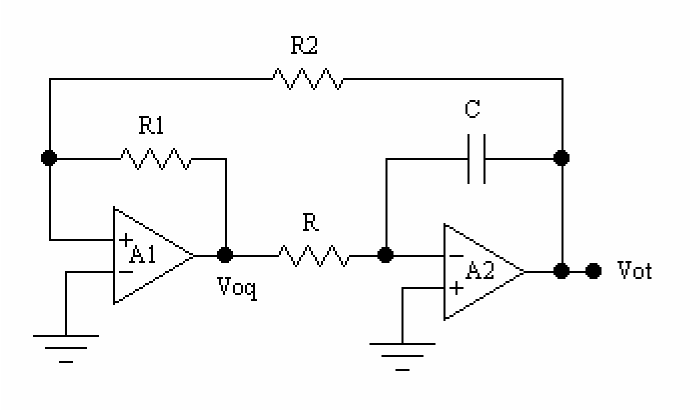
GENERATORE D'ONDA TRIANGOLARE E D'ONDA QUADRA

Un generatore di onda triangolare può essere realizzato tenendo conto che un integratore, sollecitato in ingresso con un'onda quadra, fornisce in uscita un'onda triangolare le cui rampe possono essere utilizzate per generare l'onda quadra di partenza tramite un comparatore (trigger di Schmitt non invertente).



La tensione del morsetto non invertente V_+, per il principio di sovrapposizione degli effetti, risulta:

$$V_+(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{oq} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{ot}(t)$$

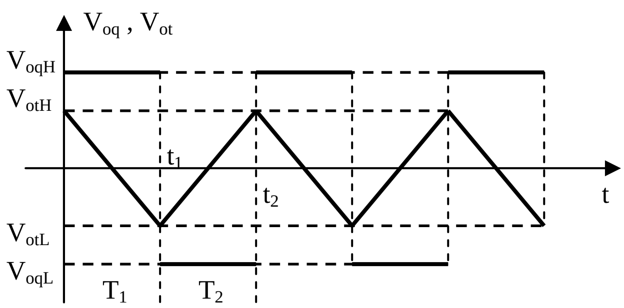
$$- \text{ se } V_{oq} = V_{oqH} \Rightarrow V_+(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{oqH} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{ot}(t) > 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{ot} \text{ rampa decrescente che parte da } V_{ot}(t) = V_{otH}$$

$$- \text{ se } V_{oq} = V_{oqL} \Rightarrow V_+(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{oqL} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{ot}(t) < 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{ot} \text{ rampa crescente che parte da } V_{ot}(t) = V_{otL}$$

Le commutazioni, che devono verificarsi prima che V_{ot} raggiunga il valore di saturazione dell'uscita (cioè la massima tensione possibile), si hanno quando le rampe crescente e decrescente raggiungono rispettivamente i valori V_{otH} e V_{otL}, in corrispondenza dei quali la tensione $V_+(t)$ uguaglia lo zero.



Se al tempo t = 0 la tensione $V_{oq} = V_{oqH}$, la tensione $V_{ot}(t)$ risulta una rampa decrescente (l'integratore è invertente), la cui equazione è:

$$V_{ot}(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t V_i(t)dt + V_o(0) = -\frac{1}{RC}\int_0^t V_{oqH}dt + V_{otH} = -\frac{V_{oqH}}{RC}t + V_{otH}$$

che raggiunge il valore minimo V_{otL} all'istante $t = t_1$. In corrispondenza di tale valore la tensione V_+ uguaglia e tende a scendere al di sotto dello zero, provocando la commutazione del comparatore da V_{oqH} a V_{oqL}. Uguagliando l'espressione $V_+(t_1)$ a zero, si ha:

$$V_+(t_1) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_{oqH} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{otL} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{otL} = -\frac{R_2}{R_1}V_{oqH}$$

In tale istante, commutando l'uscita del comparatore da V_{oqH} a V_{oqL}, si interrompe la rampa decrescente e inizia la rampa crescente con valore iniziale V_{otL}, la cui equazione è:

$$V_{ot}(t) = -\frac{1}{RC}\int_{t_1}^t V_{oqL}dt + V_{otL} = -\frac{V_{oqL}}{RC}(t - t_1) + V_{otL}$$

che raggiunge il valore massimo V_{otH} all'istante $t = t_2$. In corrispondenza di tale valore la tensione V_+ uguaglia e tende a salire al di sopra dello zero, provocando la commutazione del comparatore da V_{oqL} a V_{oqH}. Uguagliando l'espressione $V_+(t_2)$ a zero, si ha:

$$V_+(t_2) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_{oqL} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{otH} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{otH} = -\frac{R_2}{R_1}V_{oqL}$$

In tale istante, commutando l'uscita del comparatore da V_{oqL} a V_{oqH}, si interrompe la rampa crescente e inizia la rampa decrescente con valore iniziale V_{otH} e il ciclo si ripete.

Supponendo $V_{oqH} = -V_{oqL} \Rightarrow V_{otH} = -\frac{R_2}{R_1}V_{oqL} = \frac{R_2}{R_1}V_{oqH} = -V_{otL} \Rightarrow V_{otH} = -V_{otL}$

Pertanto, le due rampe hanno uguale pendenza e uguali ampiezze positiva e negativa, per cui, per simmetria, devono risultare uguali i due semiperiodi. Per ottenere il periodo è sufficiente calcolare uno dei semiperiodi e raddoppiarlo. Si calcola T_1, imponendo, nell'equazione della rampa decrescente, che al tempo $t = t_1 = T_1$ la tensione $V_{ot}(t_1)$ assuma il valore V_{otL}:

$$V_{ot}(t_1) = -\frac{V_{oqH}}{RC}t_1 + V_{otH} = V_{otL} = -V_{otH} \quad \Rightarrow \quad T_1 = \frac{2RCV_{otH}}{V_{oqH}} = \frac{2RCR_2}{R_1}$$

Raddoppiando si ottiene il periodo T: $T = 2T_1 = \frac{4RCR_2}{R_1}$

La durata del semiperiodo T_1 si può calcolare ricordando che la capacità si sta caricando a corrente costante e che, non assorbendo corrente gli ingressi, $I_R = I_C$, quindi, per la rampa decrescente si ha:

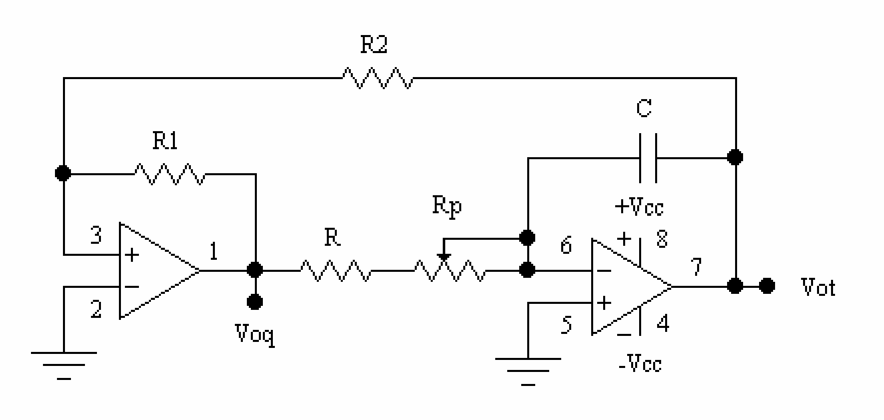
$$I_R = \frac{V_{oqH}}{R} = I_C = -C \cdot \frac{\Delta V_{ot}}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \Delta t = -RC \cdot \frac{\Delta V_{ot}}{V_{oqH}}$$

Essendo $\Delta V_{ot} = V_{otL} - V_{otH} = -2V_{otH} = 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{oqL}$ e $\Delta t = T_1$, si ottiene

$$\Delta t = -RC \cdot \frac{\Delta V_{ot}}{V_{oqH}} \quad \Rightarrow \quad T_1 = -RC \cdot 2 \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{V_{oqL}}{V_{oqH}} = 2 \cdot RC \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{-V_{oqL}}{V_{oqH}} = 2 \cdot RC \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{V_{oqH}}{V_{oqH}} = \frac{2RCR_2}{R_1}$$

PROGETTO E VERIFICA DI UN GENERATORE DI ONDA TRIANGOLARE E DI ONDA QUADRA CON FREQUENZA VARIABILE

Si vuole realizzare un generatore d'onda triangolare (e quadra) con frequenza variabile da 500Hz a 5KHz e ampiezza V_{otM} = 4V. L'onda quadra, in uscita dal comparatore con isteresi, avrà ampiezza pari alla tensione di saturazione dell'amplificatore operazionale, tipicamente V_{CC} – 2V.
Si utilizza l'integrato operazionale TL082, che contiene due amplificatori. Si alimenta il circuito con tensione duale V_{CC} = ±12V. La tensione di saturazione risulta di circa 10V (V_{oqH} = 10V).
Il circuito è il seguente.



Calcolo di R_1 e R_2: $$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{otM}}{V_{oqH}} = \frac{4}{10} = 0{,}4 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} R_1 = 82k\Omega \\ R_2 = 33k\Omega \end{cases}.$$

Calcolo di C, R e R_P:
La frequenza dovrà variare tra $f_{MIN} = 500Hz$ $f_{MAX} = 5KHz$, cui corrispondono un periodo minimo e uno massimo di:

$$T_{MAX} = \frac{1}{f_{MIN}} = \frac{1}{500} = 2ms \qquad e \qquad T_{MIN} = \frac{1}{f_{MAX}} = \frac{1}{5 \cdot 10^3} = 0{,}2ms$$

Poiché $T = \frac{4RCR_2}{R_1} = \frac{4\tau R_2}{R_1} \quad \Rightarrow \quad RC = \tau = \frac{T}{4} \cdot \frac{R_1}{R_2}$, si avrà un valore minimo e uno massimo della costante di tempo τ = RC, rispettivamente con il potenziometro R_P tutto disinserito e tutto inserito:

$$\tau_{MIN} = RC = \frac{T_{MIN}}{4} \cdot \frac{R_1}{R_2} = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot \frac{1}{0{,}4} = 125\mu s$$

$$\tau_{MAX} = (R + R_P)C = \frac{T_{MAX}}{4} \cdot \frac{R_1}{R_2} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot \frac{1}{0{,}4} = 1{,}25ms$$

Con $R_P = 10K\Omega$, dividendo membro a membro T_{MAX} e T_{MIN}, si ha:

$$\frac{T_{MAX}}{T_{MIN}} = \frac{R + R_P}{R} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0{,}2 \cdot 10^{-3}} = 10 \quad \Rightarrow \quad R + R_P = 10R \quad \Rightarrow \quad R = \frac{R_P}{9} = \frac{10 \cdot 10^3}{9} 1{,}11k\Omega$$

per il quale si utilizza il valore commerciale 1,2KΩ.

$$RC = 125\mu s \quad \Rightarrow \quad C = \frac{125 \cdot 10^{-6}}{1{,}2 \cdot 10^3} = 104\eta F \quad \rightarrow \quad 100\eta F$$

Con tali valori si otterrà:

$$T_{MAX} = \frac{4(R + R_P)CR_2}{R_1} = 4\left(1{,}2 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3\right) \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}4 \cong 1{,}792ms \quad \Rightarrow \quad f_{MIN} = 558Hz$$

$$T_{MIN} = \frac{4RCR_2}{R_1} = 4 \cdot 1{,}2 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot 0{,}4 \cong 0{,}192ms \quad \Rightarrow \quad f_{MIN} = 5{,}21KHz$$

$$V_{otM} = \frac{R_2}{R_1} V_{oqH} = \frac{33 \cdot 10^3}{82 \cdot 10^3} \cdot 10 = 4{,}02V$$

Misure effettuate e foto degli oscillogrammi

Si utilizza un oscilloscopio a doppia traccia. Sil canale CH1 viene visualizzata l'uscita triangolare, su VH2 l'uscita quadra. CH1 è posizionato a 2V/div, CH2 a 5V/div. La base tempi verrà posizionata secondo la frequenza generata.
Si rilevano ampiezze, frequenza e oscillogramma per tre valori del potenziometro R_P: 10KΩ; un valore intermedio; 0. di ogni oscillogramma viene riportata la foto.

R_P = 10KΩ La base tempi viene posizionata a 0,5ms/div.

$V_{oTM} = 4V \qquad V_{oQM} = 11V \qquad T_{MAX} = 2{,}2ms \qquad f_{MIN} = 454Hz$

R_P = valore intermedio La base tempi viene posizionata a 0,1ms/div.

$V_{oTM} = 4V \qquad V_{oQM} = 11V \qquad T = 0{,}59ms \qquad f = 1{,}69kHzK$

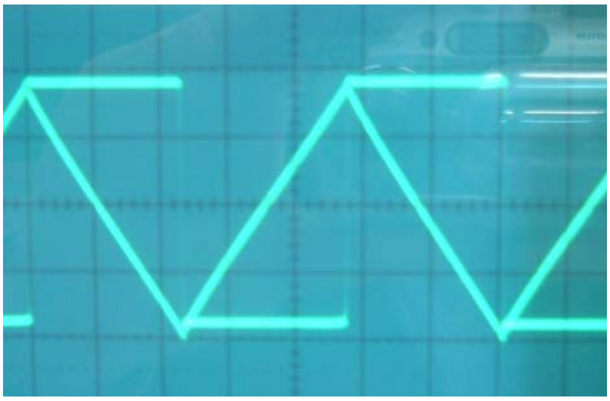
R_P = 0 La base tempi viene posizionata a 50µs/div.

$V_{oTM} = 3{,}9V \qquad V_{oQM} = 9V \qquad T_{MIN} = 0{,}192ms \qquad f_{MAX} = 4{,}255KHz$

Alle frequenze alte si nota una diminuzione delle ampiezze e la frequenza massima risulta sensibilmente inferiore al valore aspettato. Di seguito sono riportate le foto degli oscillogrammi.

R_P = 10KΩ; f_{MIN}

R_P = valore intermedio; f



R_P = 0; f_{MIN}