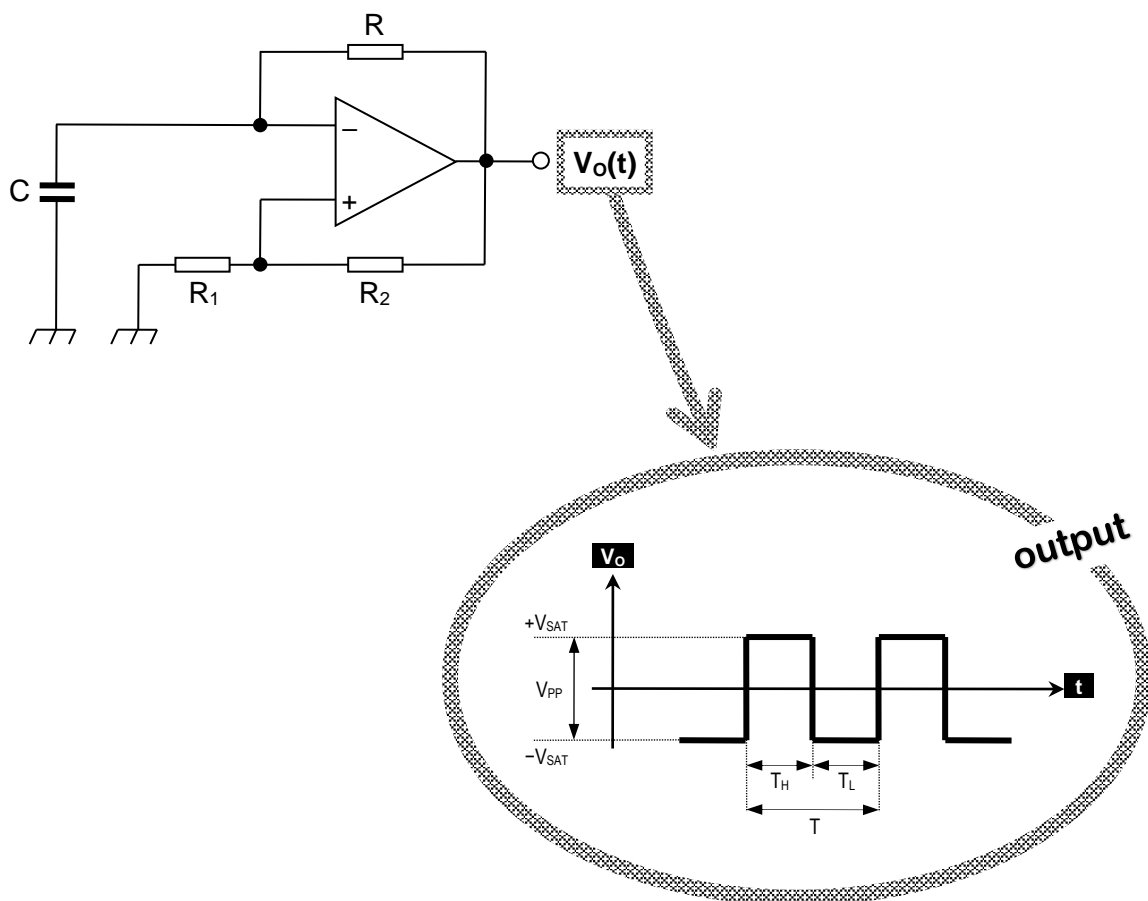


Elettronica analogica 5

Capitolo 3

I generatori di forme d'onda con AO



Prof. Giuseppe Di Michele --- fascicolo di 40 pagine --- febbraio 2022

I generatori di forme d'onda con AO

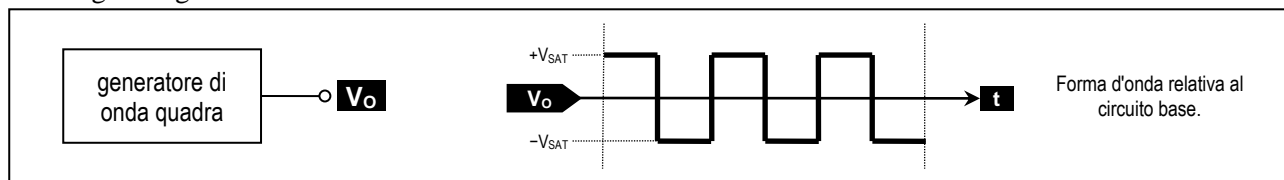
<u>Introduzione</u>	3
<u>3.1 -- Generatore di onda quadra</u>	4
<ul style="list-style-type: none">> Circuito base: periodo fisso e duty-cycle fisso (di valore 0,5)> Variante 1: periodo fisso e duty-cycle fisso (di valore qualsiasi)> Variante 2: periodo regolabile e duty-cycle regolabile> Esercizi	
<u>3.2 -- Generatore di onda triangolare</u>	14
<ul style="list-style-type: none">> Circuito base: periodo fisso e duty-cycle fisso (di valore 0,5)> Variante 1: periodo fisso e duty-cycle fisso (di valore qualsiasi)> Variante 2: periodo regolabile e duty-cycle regolabile> Esercizi	
<u>3.3 -- Generatore di impulso</u>	24
<ul style="list-style-type: none">> Circuito base: durata impulso di uscita fisso> Variante 1: durata impulso di uscita regolabile> Esercizi	
<u>Dimostrazioni</u>	36
<u>Quadri riassuntivi</u>	38

Introduzione

I generatori di forme d'onda sono circuiti in grado di produrre una tensione d'uscita $V_O(t)$ oscillante. Esistono molti generatori di forme d'onda, in questo capitolo ne presenteremo alcuni, tutti realizzati con l'uso dell'amplificatore operazionale.

Generatore di onda quadra.

Il generatore di onda quadra, detto più comunemente *multivibratore astabile*, è un circuito avente una sola tensione di uscita $V_O(t)$ che ha la forma di un'onda quadra simmetrica, come rappresentato schematicamente nella figura seguente.

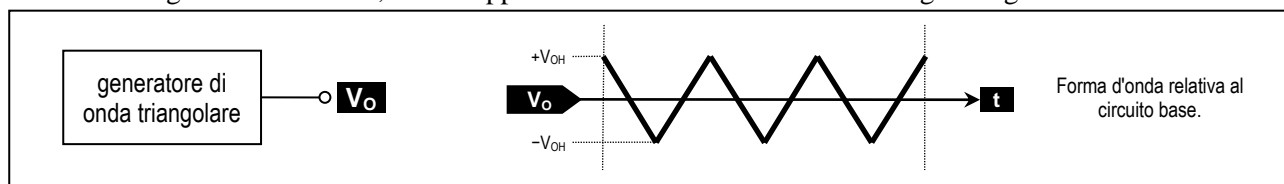


Presenteremo il multivibratore astabile nelle versioni seguenti.

- Circuito base:..... ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore 0,5);
- Variante 1: ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore qualsiasi);
- Variante 2: ➔ periodo regolabile ➔ duty-cycle regolabile.

Generatore di onda triangolare.

Il generatore di onda triangolare è un circuito avente una sola tensione di uscita $V_O(t)$ che ha la forma di un'onda triangolare simmetrica, come rappresentato schematicamente nella figura seguente.

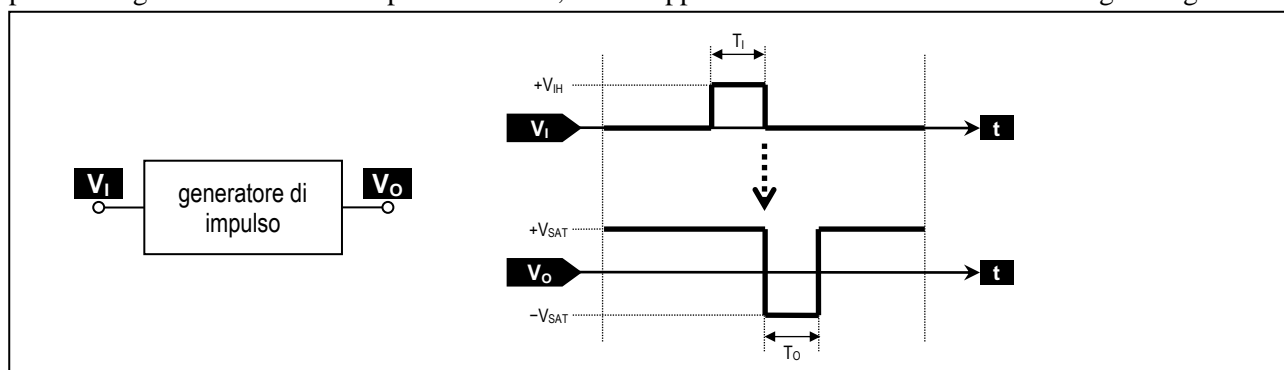


Presenteremo il generatore di onda triangolare nelle versioni seguenti.

- Circuito base:..... ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore 0,5);
- Variante 1: ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore qualsiasi);
- Variante 2: ➔ periodo regolabile ➔ duty-cycle regolabile.

Generatore di impulso.

Il generatore di impulso, detto più comunemente *multivibratore monostabile* oppure *one-shot*, è un circuito avente un ingresso $V_I(t)$ e un'uscita $V_O(t)$. La relazione ingresso/uscita è la seguente: il fronte di discesa dell'impulso di ingresso dà il via all'impulso di uscita, come rappresentato schematicamente nella figura seguente.



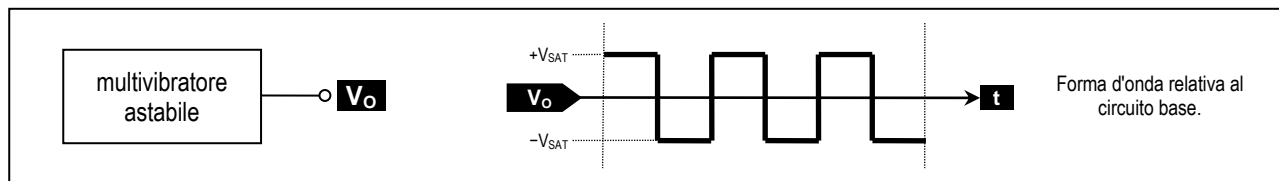
Presenteremo il multivibratore monostabile nelle versioni seguenti.

- Circuito base:..... ➔ T_O fisso;
- Variante 1: ➔ T_O regolabile.

Alla fine del capitolo si trovano alcune dimostrazioni tralasciate durante le trattazioni teoriche, e un quadro sinottico dove sono riassunti tutti i circuiti presentati con le relative formule di dimensionamento.

3.1 – Generatore di onda quadra

Il generatore di onda quadra, detto più comunemente *multivibratore astabile*, è un circuito in grado di produrre una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di onda quadra simmetrica, come rappresentato nella figura seguente.

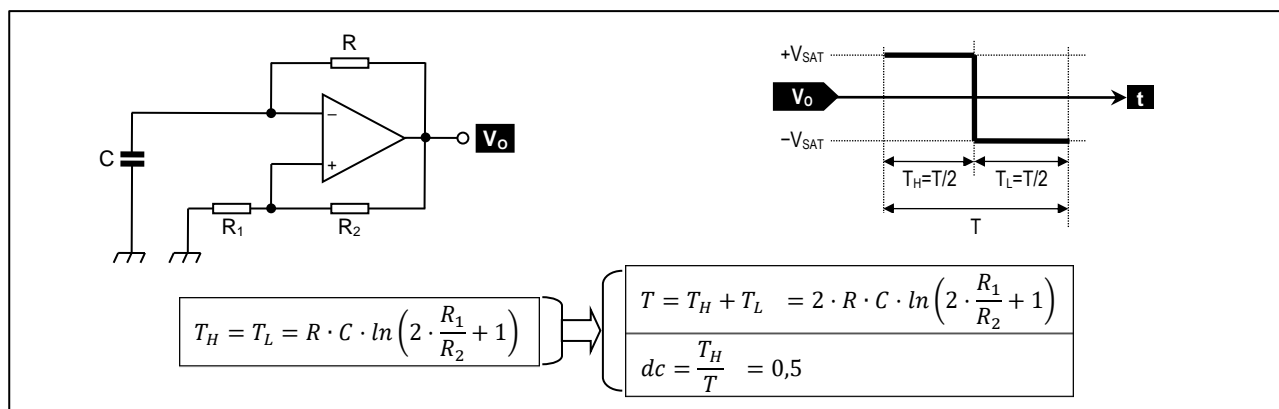


Presenteremo il multivibratore astabile nelle versioni seguenti.

- Circuito base:..... ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore 0,5);
- Variante 1:..... ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore qualsiasi);
- Variante 2:..... ➔ periodo regolabile ➔ duty-cycle regolabile.

Circuito base (T fisso, dc fisso di valore 0,5)

Il multivibratore astabile, nel suo circuito base; produce una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di un'onda quadra simmetrica con periodo fisso e duty-cycle fisso di valore 0,5. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità, la sua forma d'onda d'uscita, e le sue formule di dimensionamento.



Analisi del circuito. Partendo dalla condizione iniziale di condensatore scarico, si succedono nel tempo i seguenti fenomeni.

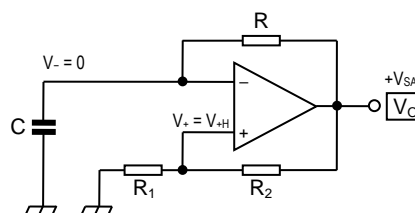
Istante 0

➤ **Tensione V_O** Ipotizziamo l'AO in saturazione positiva ($V_O = +V_{SAT}$).

➤ **Tensione V_+** Applicando la regola del partitore a R_1 e R_2 si ha:

$$V_+ = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad [= V_{+H}]$$

➤ **Tensione V_-** Ipotizziamo il condensatore scarico ($V_- = 0$).

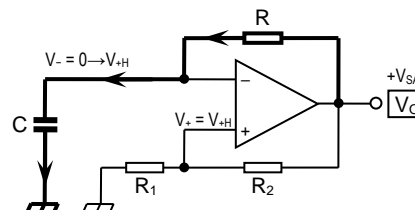


Intervallo 0-1

1. **Tensione V_O** Si mantiene al valore $+V_{SAT}$.

2. **Tensione V_+** Si mantiene al valore V_{+H} .

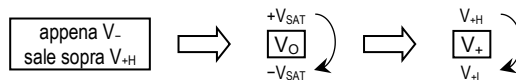
3. **Tensione V_-** La tensione V_- è più bassa della tensione $V_O = +V_{SAT}$, pertanto V_- sale esponenzialmente verso $+V_{SAT}$.



Istante 1

4. **Tensione V_-** Appena la V_- sale sopra V_{+H} , si ha la commutazione di V_O e di V_+ .
5. **Tensione V_O** Questa tensione commuta in saturazione negativa ($V_O = -V_{SAT}$).
6. **Tensione V_+** Applichiamo la regola del partitore a R_1 e R_2 :

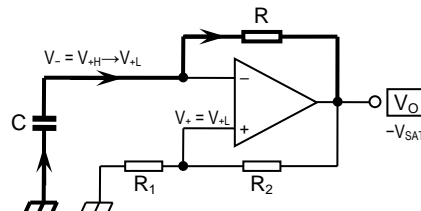
$$V_+ = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad [= V_{+L}]$$



Intervallo 1-2

7. **Tensione V_O** Si mantiene al valore $-V_{SAT}$.
8. **Tensione V_+** Si mantiene al valore V_{+L} .
9. **Tensione V_-** La tensione V_- è più alta della tensione $V_O = -V_{SAT}$, pertanto V_- scende esponenzialmente verso $-V_{SAT}$. La tensione V_- raggiunge V_{+L} dopo il tempo T_L :

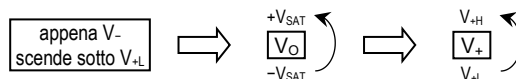
$$T_L = RC \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (\text{pag. 36, dim. 1}).$$



Istante 2

10. **Tensione V_-** Appena la tensione V_- scende sotto V_{+L} , si ha la commutazione di V_O e V_+ .
11. **Tensione V_O** Questa tensione commuta da $-V_{SAT}$ a $+V_{SAT}$.
12. **Tensione V_+** Questa tensione commuta da V_{+L} a V_{+H} , ossia:

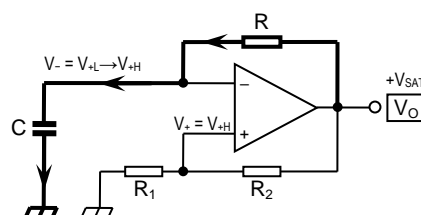
$$V_{+L} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \xrightarrow{\text{commuta}} V_{+H} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



Intervallo 2-3

13. **Tensione V_O** Si mantiene al valore $+V_{SAT}$.
14. **Tensione V_+** Si mantiene al valore V_{+H} .
15. **Tensione V_-** La tensione V_- è più bassa della tensione $V_O = +V_{SAT}$, pertanto V_- sale esponenzialmente verso $+V_{SAT}$. La tensione V_- raggiunge V_{+H} dopo il tempo T_H :

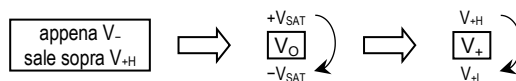
$$T_H = RC \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (\text{pag. 36, dim. 2}).$$



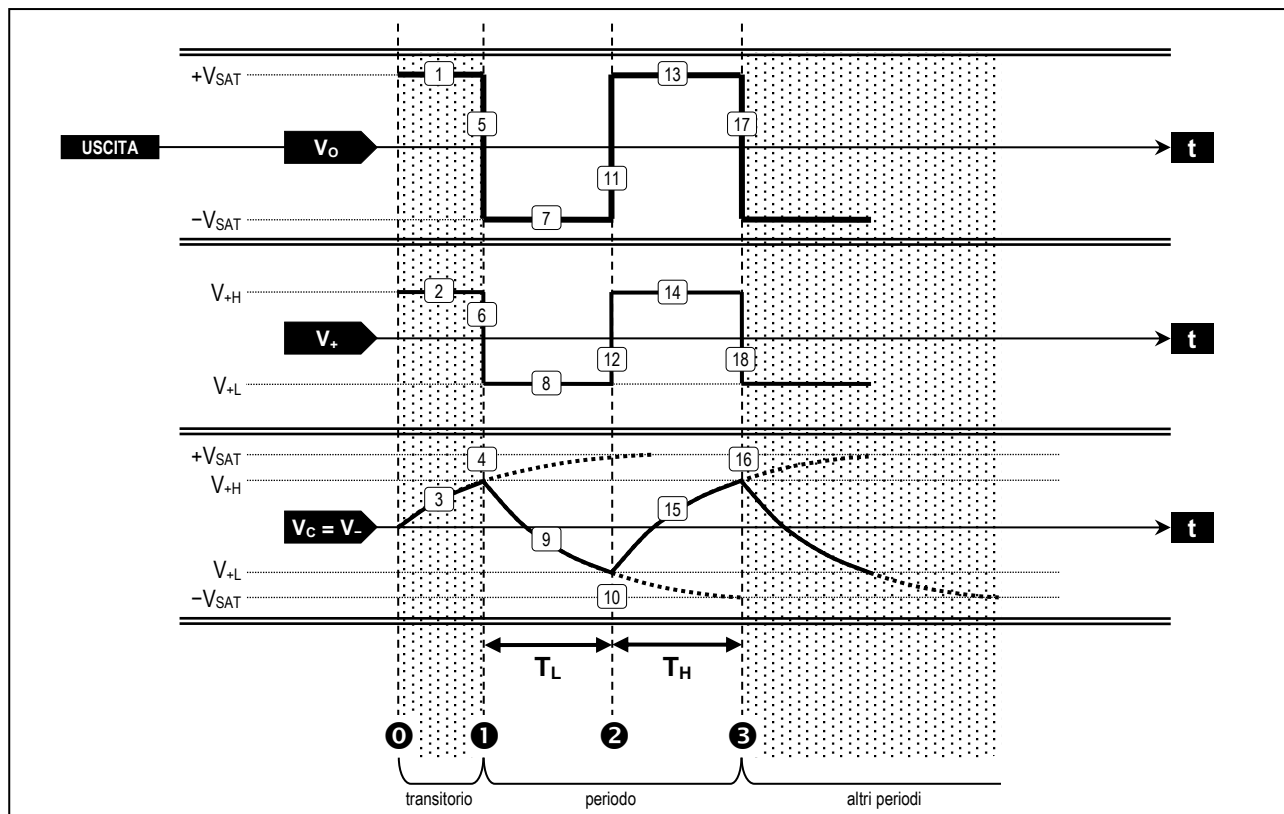
Istante 3

16. **Tensione V_-** Appena la tensione V_- sale sopra V_{+H} , si ha la commutazione di V_O e V_+ .
17. **Tensione V_O** Questa tensione commuta da $+V_{SAT}$ a $-V_{SAT}$.
18. **Tensione V_+** Questa tensione commuta da V_{+H} a V_{+L} , ossia:

$$V_{+H} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \xrightarrow{\text{commuta}} V_{+L} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

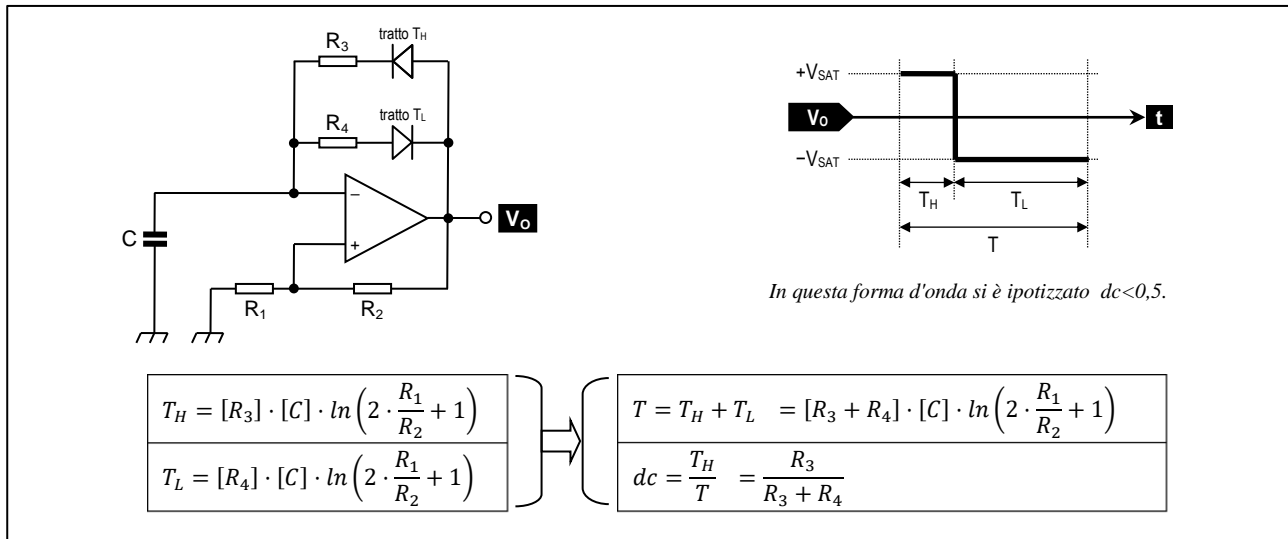


A questo punto inizia un nuovo periodo.



Variente 1 (T fisso, dc fisso di valore qualsiasi)

Il multivibratore astabile, nella sua variante 1, produce una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di un'onda quadra simmetrica con periodo fisso e duty-cycle fisso di valore qualsiasi. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità, la sua forma d'onda di uscita e le sue formule di dimensionamento.

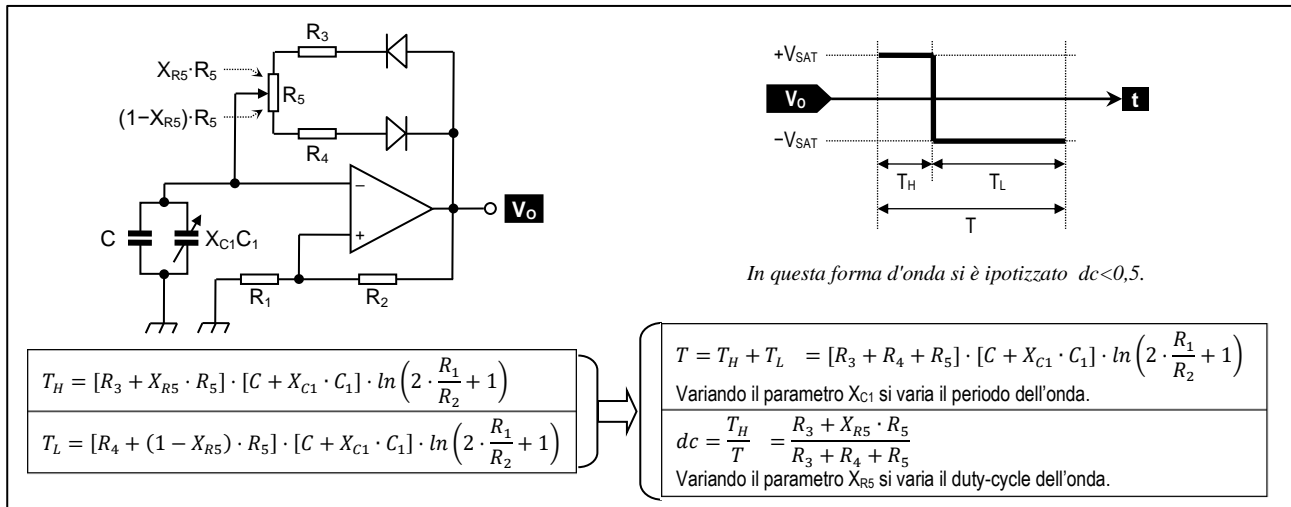


Analisi del circuito. Analizziamo la variante 1 come una modifica del circuito base.

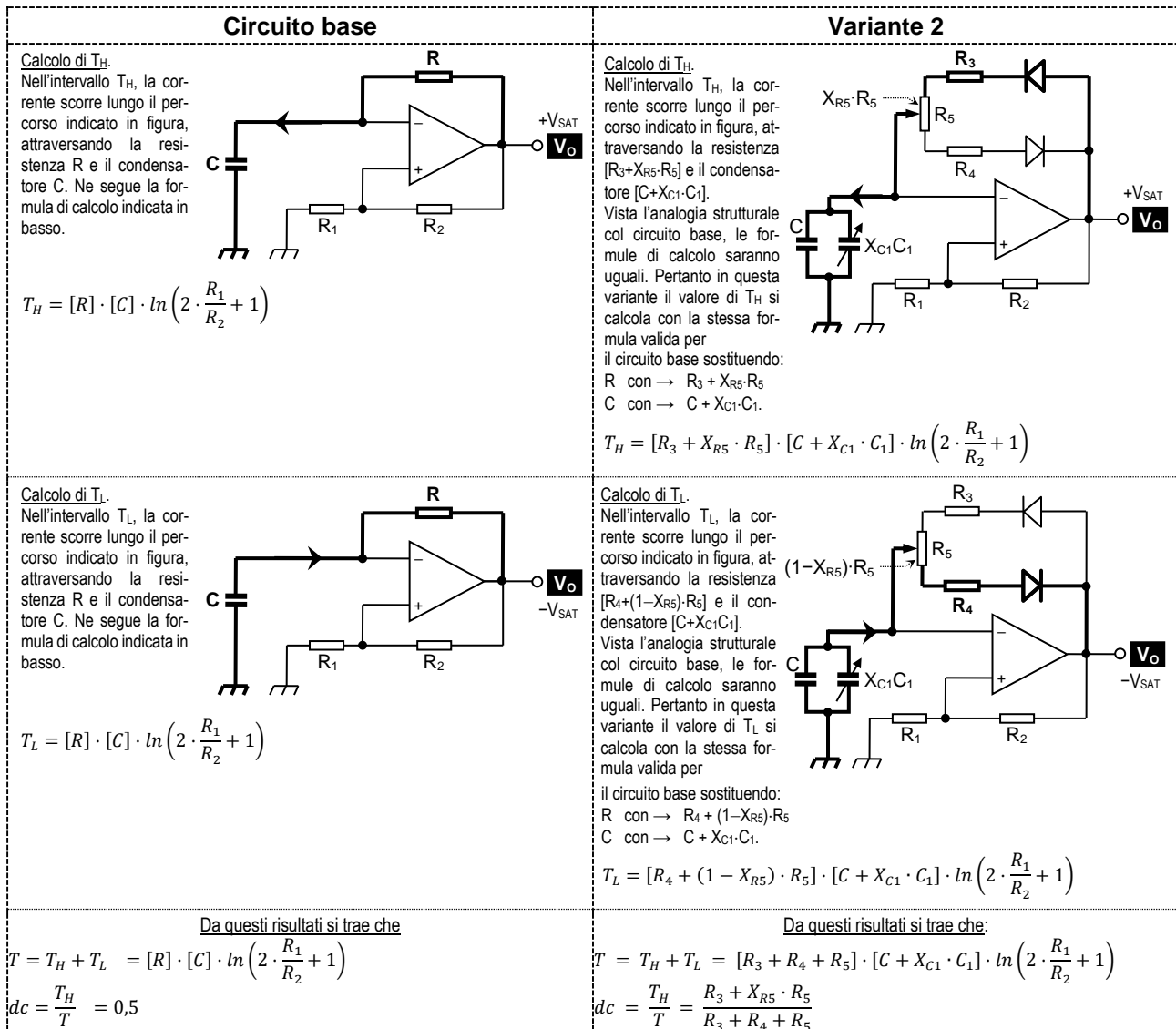
Circuito base	Variente 1
<p>Calcolo di T_H. Nell'intervallo T_H la corrente scorre lungo il percorso indicato in figura, attraversando la resistenza R e il condensatore C. Ne segue la formula di calcolo indicata in basso.</p> $T_H = [R] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$	<p>Calcolo di T_H. Nell'intervallo T_H, la corrente scorre lungo il percorso indicato in figura, attraversando la resistenza R_3 e il condensatore C. Vista l'analogia strutturale tra il circuito base, e la variante 1, le formule di calcolo saranno uguali. Pertanto nella variante 1 il valore di T_H si calcola con la stessa formula valida per la versione 1 sostituendo: R con $\rightarrow R_3$.</p> $T_H = [R_3] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$
<p>Calcolo di T_L. Nell'intervallo T_L, la corrente scorre lungo il percorso indicato in figura, attraversando la resistenza R e il condensatore C. Ne segue la formula di calcolo indicata in basso.</p> $T_L = [R] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$	<p>Calcolo di T_L. Nell'intervallo T_L, la corrente scorre lungo il percorso indicato in figura, attraversando la resistenza R_4 e il condensatore C. Vista l'analogia strutturale tra il circuito base e la variante 1, le formule di calcolo saranno uguali. Pertanto nella variante 1 il valore di T_L si calcola con la stessa formula valida per la versione 1 sostituendo: R con $\rightarrow R_4$.</p> $T_L = [R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$
<p>Da questi risultati si trae che:</p> $T = T_H + T_L = [R] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$ $dc = \frac{T_H}{T} = 0,5$	<p>Da questi risultati si trae che:</p> $T = T_H + T_L = [R_3 + R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$ $dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$

Variante 2 (T regolabile, dc regolabile)

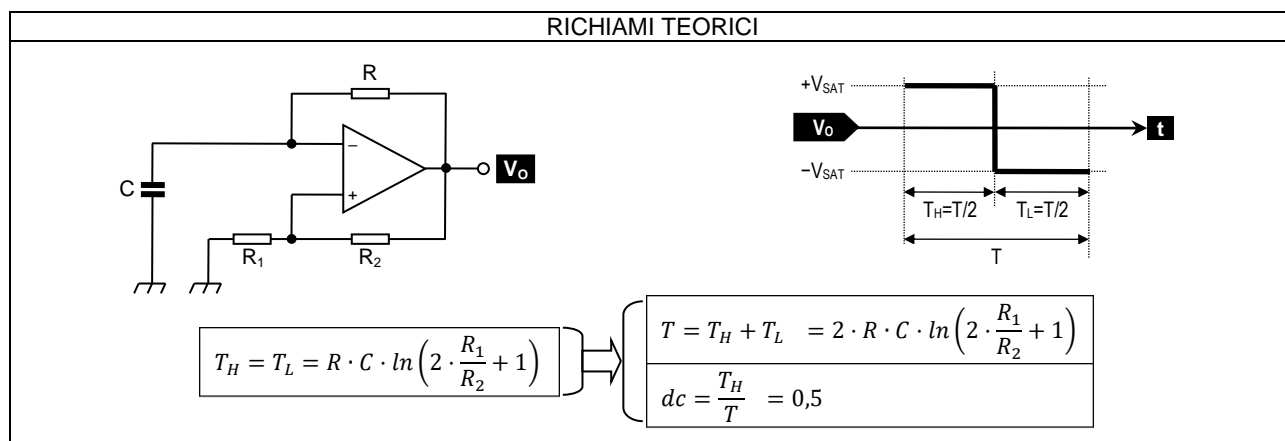
Il multivibratore astabile, nella sua variante 2, produce una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di un'onda quadra simmetrica con periodo regolabile e duty-cycle regolabile. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità, la sua forma d'onda di uscita e le sue formule di dimensionamento.



Analisi del circuito. Analizziamo la variante 2 come una modifica del circuito base.



Esercizio -- Multivibratore astabile, circuito base (T fisso; dc fisso di valore 0,5)



Problema di analisi

Analizzare il seguente multivibratore astabile, disegnare inoltre la sua forma d'onda di uscita $V_o(t)$.	<u>Dati dell'AO</u>	<u>Dati del circuito</u>	$R = 3 \cdot 10^3$
	$V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	$R_1 = 1 \cdot 10^3$ $R_2 = 2 \cdot 10^3$	$C = 5 \cdot 10^{-9}$

1) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

$[V_{CC} = 15 \text{ dato}]$

$\rightarrow V_{SAT} = 12$

2) $T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1\right)$

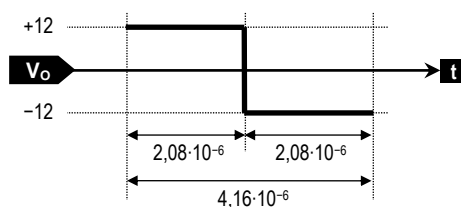
$R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $R_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $R = 3 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $C = 1 \cdot 10^{-9} \text{ dato}$

$\rightarrow T = 4,16 \cdot 10^{-6}$

3) $T_H = T_L = \frac{T}{2}$

$[T = 4,16 \cdot 10^{-6}]$

$\rightarrow T_H = T_L = 2,08 \cdot 10^{-6}$



Problema di sintesi

Progettare un multivibratore astabile che produca la seguente forma d'onda di uscita $V_O(t)$.

Dati dell'AO

$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$$

Dati della forma d'onda

$$V_{OH} = +V_{SAT}$$

$$V_{OL} = -V_{SAT}$$

$$f = 1 \cdot 10^3$$

$$dc = 0,5$$

$$1) \quad T = \frac{1}{f}$$

$$[f = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}]$$



$$T = 1 \cdot 10^{-3}$$

$$2) \quad T_H = \frac{T}{2}$$

$$[T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 1}]$$



$$T_H = 0,5 \cdot 10^{-3}$$

$$3) \quad T_H = R \cdot C \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

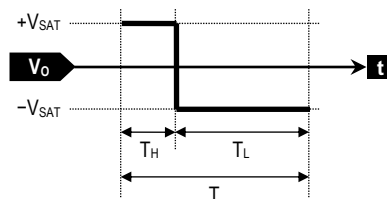
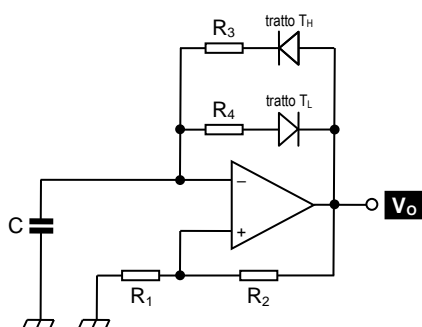
$$[T_H = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 2}]$$



$$\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 & \text{scelta} \\ R_2 = 1 \cdot 10^3 & \text{scelta} \\ R = 1 \cdot 10^3 & \text{scelta} \\ C = 455 \cdot 10^{-9} \end{cases}$$

Esercizio -- Multivibratore astabile, variante 1 (T fisso; dc fisso di valore qualsiasi)

RICHIAMI TEORICI



In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

$$\left. \begin{aligned} T_H &= [R_3] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \\ T_L &= [R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} T &= T_H + T_L = [R_3 + R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \\ dc &= \frac{T_H}{T} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \end{aligned} \right.$$

Problema di analisi

Analizzare il seguente multivibratore astabile, disegnare inoltre la sua forma d'onda di uscita $V_O(t)$.

Dati dell'AO

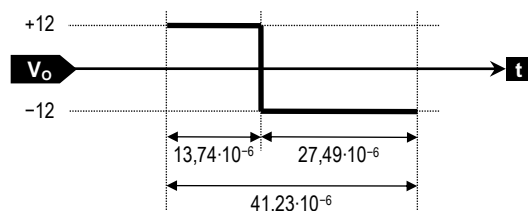
$V_{CC} = \pm 15$
 $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

Dati del circuito

$R_1 = 1,5 \cdot 10^3$
 $R_2 = 2 \cdot 10^3$
 $R_3 = 3 \cdot 10^3$

$R_4 = 6 \cdot 10^3$
 $C = 5 \cdot 10^{-9}$

$$\begin{aligned} 1) \quad T_H &= R_3 C \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) & \left[\begin{array}{l} R_1 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_3 = 3 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ C = 5 \cdot 10^{-9} \text{ dato} \end{array} \right. & \Rightarrow T_H = 13,74 \cdot 10^{-6} \\ 2) \quad T_L &= R_4 C \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) & \left[\begin{array}{l} R_1 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_4 = 6 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ C = 5 \cdot 10^{-9} \text{ dato} \end{array} \right. & \Rightarrow T_L = 27,49 \cdot 10^{-6} \\ 3) \quad T &= T_H + T_L & \left[\begin{array}{l} T_H = 13,74 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 1} \\ T_L = 27,49 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 2} \end{array} \right. & \Rightarrow T = 41,23 \cdot 10^{-6} \\ 4) \quad dc &= \frac{T_H}{T} & \left[\begin{array}{l} T_H = 13,74 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 1} \\ T = 41,23 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 3} \end{array} \right. & \Rightarrow dc = 0,33 \end{aligned}$$



Problema di sintesi

Progettare un multivibratore astabile che produca la seguente forma d'onda di uscita $V_O(t)$.

Dati dell'AO

$V_{CC} = \pm 15$

$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

Dati della forma d'onda

$V_{OH} = +V_{SAT}$

$V_{OL} = -V_{SAT}$

$f = 2 \cdot 10^3$

$dc = 0,8$

$$1) \quad T = \frac{1}{f}$$

$$[f = 2 \cdot 10^3 \text{ dato}]$$

$$\rightarrow T = 0,5 \cdot 10^{-3}$$

$$2) \quad dc = \frac{T_H}{T}$$

$$\left[\begin{array}{l} T = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 1} \\ dc = 0,8 \text{ dato} \end{array} \right]$$

$$\rightarrow T_H = 0,4 \cdot 10^{-3}$$

$$3) \quad T_L = T - T_H$$

$$\left[\begin{array}{l} T = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 1} \\ T_H = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 2} \end{array} \right]$$

$$\rightarrow T_L = 0,1 \cdot 10^{-3}$$

$$4) \quad T_H = R_3 \cdot C \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$[T_H = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 2}]$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ scelta} \\ R_3 = 57,71 \cdot 10^3 \end{array} \right.$$

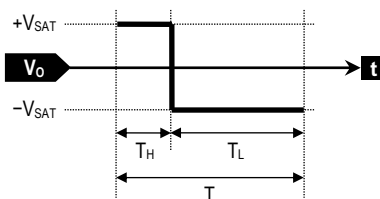
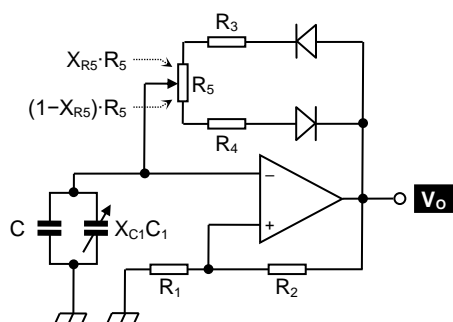
$$5) \quad T_L = R_4 \cdot C \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$\left[\begin{array}{l} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 4} \\ R_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ scelta 4} \\ C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ scelta 4} \\ T_L = 0,1 \text{ calcolo 3} \end{array} \right]$$

$$\rightarrow R_4 = 14,43 \cdot 10^3$$

Esercizio -- Multivibratore astabile, variante 2 (T regolabile; dc regolabile)

RICHIAMI TEORICI



In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

$$T_H = [R_3 + X_{R5} \cdot R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T_L = [R_4 + (1 - X_{R5}) \cdot R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T = T_H + T_L = [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

Variando il parametro X_{C1} si varia il periodo T dell'onda.

$$dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5}$$

Variando il parametro X_{R5} si varia il duty-cycle dc dell'onda.

Problema di analisi

Analizzare il seguente multivibratore astabile, disegnare inoltre la sua forma d'onda di uscita $V_o(t)$.

Dati dell'AO

$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$$

Dati del circuito

$$R_1 = 4 \cdot 10^3$$

$$R_2 = 2 \cdot 10^3$$

$$R_3 = 1 \cdot 10^3$$

$$R_4 = 1 \cdot 10$$

$$R_5 = 6 \cdot 10^3$$

$$X_{R5} = 25\%$$

$$C = 20 \cdot 10^{-9}$$

$$C_1 = 30 \cdot 10^{-9}$$

$$X_{C1} = 50\%$$

1) $V_{SAT} = 0,8 \cdot V_{CC}$

$[V_{CC} = 15 \text{ dato}]$

$\rightarrow V_{SAT} = 12$

2) $T = [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$

$\begin{cases} X_{C1} = 1 & \rightarrow T_{MAX} \\ X_{C1} = 0,5 \text{ dato} & \rightarrow T \\ X_{C1} = 0 & \rightarrow T_{min} \end{cases}$

$\rightarrow \begin{cases} T_{MAX} = 644 \cdot 10^{-6} \\ T = 451 \cdot 10^{-6} \\ T_{min} = 275,5 \cdot 10^{-6} \end{cases}$

3) $dc = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5}$

$\begin{cases} X_{R5} = 1 & \rightarrow dc_{MAX} \\ X_{R5} = 0,25 \text{ dato} & \rightarrow dc \\ X_{R5} = 0 & \rightarrow dc_{min} \end{cases}$

$\rightarrow \begin{cases} dc_{MAX} = 0,875 \\ dc = 0,3125 \\ dc_{min} = 0,125 \end{cases}$

4) $T_H = T \cdot dc$

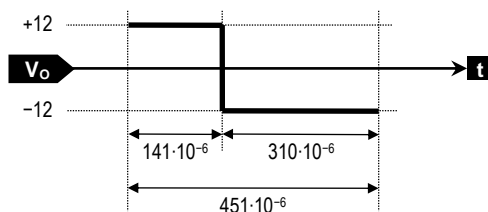
$\begin{cases} T = 451 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 2} \\ dc = 0,3125 \text{ calcolo 3} \end{cases}$

$\rightarrow T_H = 141 \cdot 10^{-6}$

5) $T_L = T - T_H$

$\begin{cases} T = 451 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 2} \\ T_H = 141 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 4} \end{cases}$

$\rightarrow T_L = 310 \cdot 10^{-6}$



Problema di sintesi

Progettare un multivibratore astabile che produca la seguente forma d'onda di uscita $V_O(t)$.

Dati dell'AO

$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$$

Dati della forma d'onda

$$V_{OH} = +V_{SAT}$$

$$V_{OL} = -V_{SAT}$$

$$f_{MAX} = 5 \cdot 10^3$$

$$f_{min} = 1 \cdot 10^3$$

$$dc_{MAX} = 0,8$$

$$dc_{min} = 0,2$$

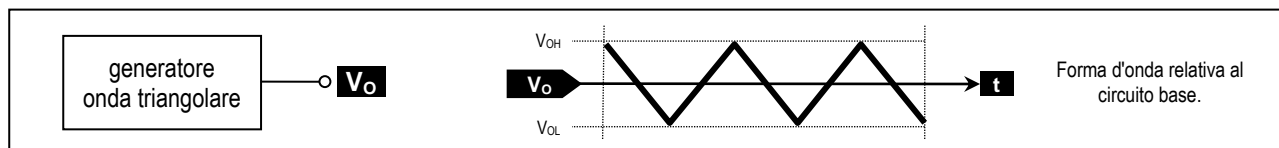
$$1) \begin{cases} dc_{min} = \frac{R_3}{R_3 + R_4 + R_5} \\ dc_{MAX} = \frac{R_3 + R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \end{cases} \quad \begin{cases} dc_{MAX} = 0,8 \text{ dato} \\ dc_{min} = 0,2 \text{ dato} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_3 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_4 = 1 \cdot 10^3 \\ R_5 = 3 \cdot 10^3 \end{cases}$$

$$2) T = \frac{1}{f} \quad \begin{cases} f_{MAX} = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \rightarrow T_{min} \\ f_{min} = 1 \cdot 10^3 \text{ dato} \rightarrow T_{MAX} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} T_{min} = 0,2 \cdot 10^{-3} \\ T_{MAX} = 1 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

$$3) \begin{cases} T_{min} = (R_3 + R_4 + R_5) \cdot (C) \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \\ T_{MAX} = (R_3 + R_4 + R_5) \cdot (C + C_1) \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \end{cases} \quad \begin{cases} R_3 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 1} \\ R_4 = 1 \cdot 10^3 \text{ calcolo 1} \\ R_5 = 3 \cdot 10^3 \text{ calcolo 1} \\ T_{MAX} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 2} \\ T_{min} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ C = 24,8 \cdot 10^{-9} \\ C_1 = 100 \cdot 10^{-9} \end{cases}$$

3.3 -- Generatore di onda triangolare

Il generatore di onda triangolare è un circuito in grado di produrre una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di onda triangolare simmetrica, come rappresentato nella figura seguente.

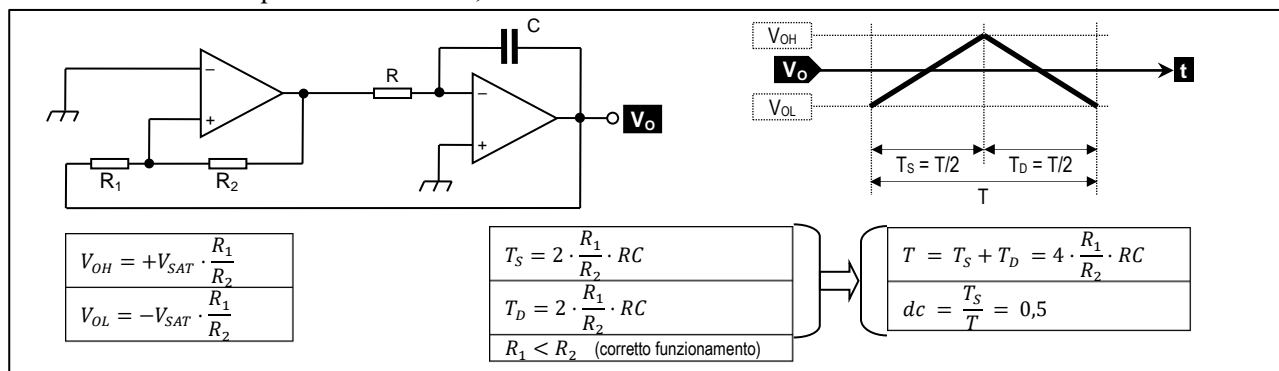


Presenteremo il generatore di onda triangolare nelle versioni seguenti.

- Circuito base:..... ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore 0,5);
- Variante 1:..... ➔ periodo fisso ➔ duty-cycle fisso (di valore qualsiasi);
- Variante 2:..... ➔ periodo regolabile ➔ duty-cycle regolabile.

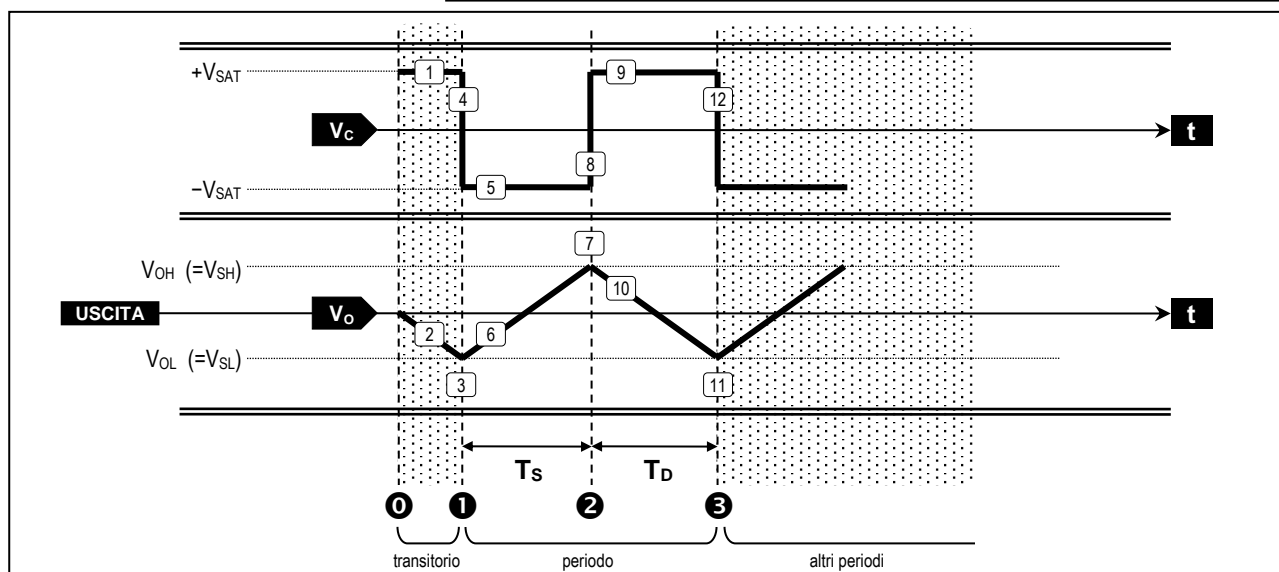
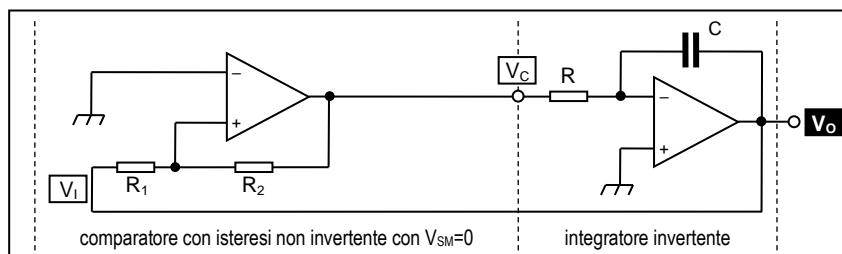
Circuito base (T fisso, dc fisso di valore 0,5)

Il generatore di onda triangolare, nel suo circuito base, produce una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di un'onda triangolare simmetrica con periodo fisso e duty-cycle fisso di valore 0,5. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità, la sua forma d'onda di uscita e le sue formule di dimensionamento.



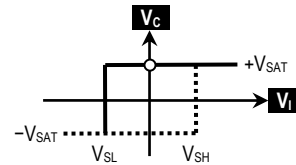
Analisi del circuito.

Questo circuito è composto da un comparatore con isteresi non invertente avente V_{SM} nulla, seguito da un integratore invertente. L'uscita dell'integratore invertente è riportata all'ingresso del comparatore tramite un collegamento di retroazione. L'uscita dell'integratore $[V_O]$ rappresenta anche l'uscita dell'intero circuito, quindi qui è presente l'onda triangolare desiderata. Analizziamo questo schema.



Istante 0 (situazione iniziale)

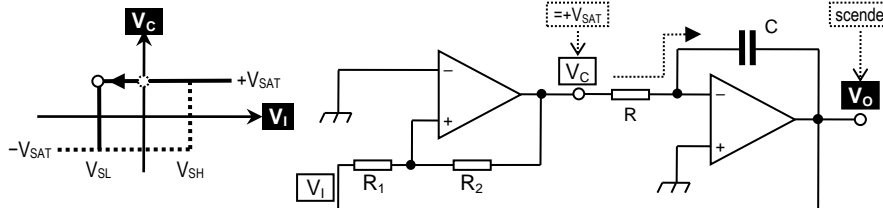
- **Tensione V_C** Ipotezziamo che il comparatore sia in saturazione positiva ($V_C = +V_{SAT}$).
- **Tensione V_O** Ipotezziamo che il condensatore sia scarico ($V_O = 0$). Questa situazione è rappresentata sulla funzione di trasferimento del comparatore riportata a lato.

**Intervallo 0-1**

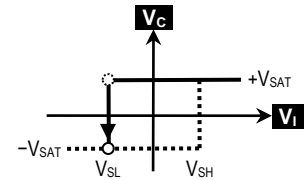
- Tensione V_C** Il comparatore è in saturazione positiva ($V_C = +V_{SAT}$).
- Tensione V_O** L'integratore ha in ingresso la tensione costante $V_C = +V_{SAT}$, pertanto esegue l'integrale di tale funzione:

$$V_O = -\frac{1}{RC} \cdot \int (+V_{SAT}) \cdot dt = -\frac{1}{RC} \cdot V_{SAT} \cdot t$$

Questa tensione, inizialmente uguale a 0 (istante 0), scende in maniera lineare fino al valore V_{SL} .

**Istante 1**

- Tensione V_O** In questo istante la tensione V_O scende sotto V_{SL} .
- Tensione V_C** Se la tensione V_O scende sotto V_{SL} , la stessa cosa accade anche alla tensione V_I (si ricordi che $V_I = V_O$), quindi in questo istante il comparatore commuta in saturazione negativa.

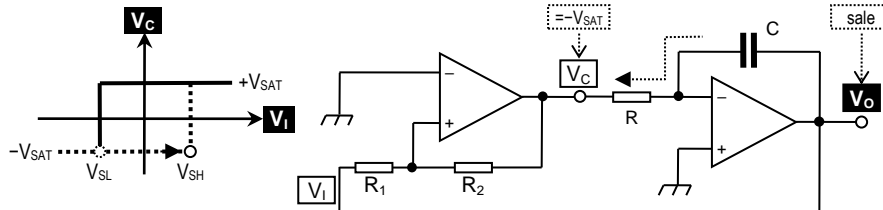
**Intervallo 1-2**

- Tensione V_C** Il comparatore è in saturazione negativa ($V_C = -V_{SAT}$).
- Tensione V_O** L'integratore ha in ingresso la tensione costante $V_C = -V_{SAT}$, pertanto esegue l'integrale di tale funzione:

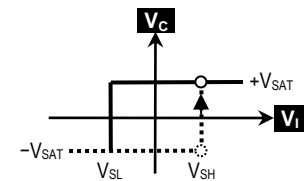
$$V_O = -\frac{1}{RC} \cdot \int (-V_{SAT}) \cdot dt = +\frac{1}{RC} \cdot V_{SAT} \cdot t + V_{SL}$$

Questa tensione, inizialmente uguale a V_{SL} (istante 1), sale in maniera lineare fino al valore V_{SH} che viene raggiunto dopo il tempo T_S calcolabile con l'equazione:

$$+\frac{1}{RC} \cdot V_{SAT} \cdot T_S + V_{SL} = V_{SH} \xrightarrow{\text{da cui si calcola}} T_S = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC$$

**Istante 2**

- Tensione V_O** In questo istante la tensione V_O sale sopra V_{SH} .
- Tensione V_C** Se la tensione V_O sale sopra V_{SH} , lo stesso cosa accade anche alla tensione V_I (si ricordi che $V_I = V_O$), quindi in questo istante il comparatore commuta in saturazione positiva.

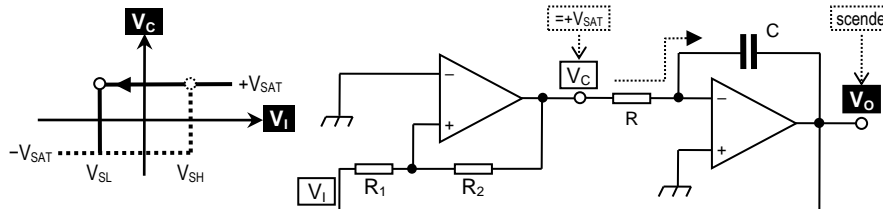
**Intervallo 2-3**

- Tensione V_C** Il comparatore è in saturazione positiva ($V_C = +V_{SAT}$).
- Tensione V_O** L'integratore ha in ingresso la tensione costante $V_C = +V_{SAT}$, pertanto esegue l'integrale di tale funzione:

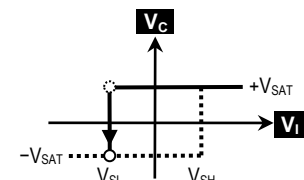
$$V_O = -\frac{1}{RC} \cdot \int (+V_{SAT}) \cdot dt = -\frac{1}{RC} \cdot V_{SAT} \cdot t + V_{SH}$$

Questa tensione, inizialmente uguale a V_{SH} (istante 2), al passare del tempo scende in maniera lineare fino al valore V_{SL} che viene raggiunto dopo il tempo T_D calcolabile con l'equazione:

$$-\frac{1}{RC} \cdot V_{SAT} \cdot T_D + V_{SH} = V_{SL} \xrightarrow{\text{da cui si calcola}} T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC$$

**Istante 3**

- Tensione V_O** In questo istante la tensione V_O scende sotto V_{SL} .
- Tensione V_C** Se la tensione V_O scende sotto V_{SL} , la stessa cosa accade anche alla tensione V_I (si ricordi che $V_I = V_O$), quindi in questo istante il comparatore commuta in saturazione negativa.



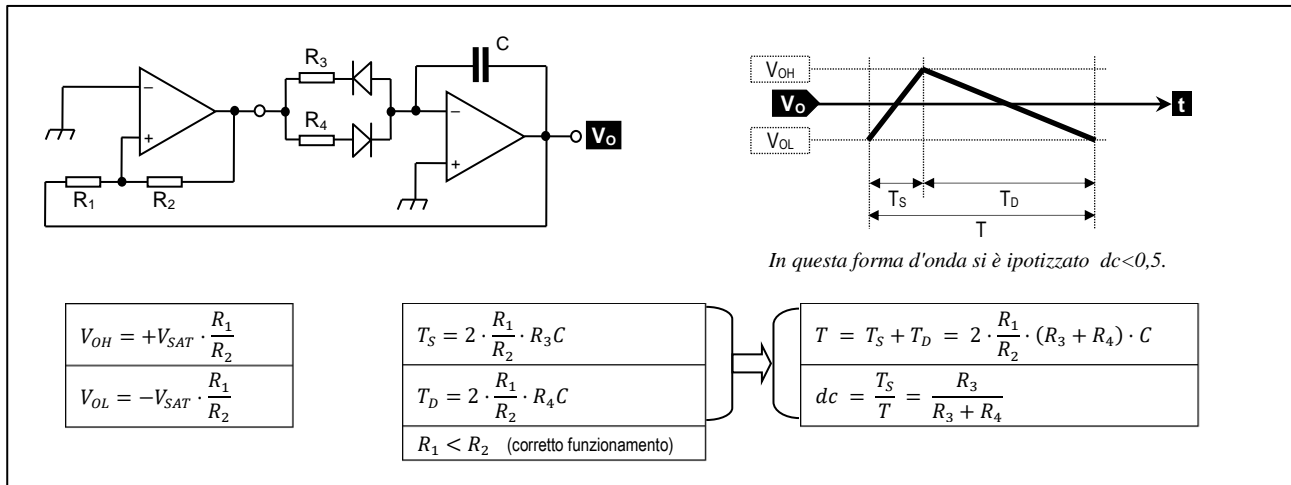
Da questo istante in poi si sviluppa un nuovo periodo.

NOTA. Vincoli sui valori di V_{SH} e V_{SL} . I valori delle tensioni di soglia V_{SH} e V_{SL} del comparatore con isteresi rappresentano anche i valori massimo e minimo della forma d'onda triangolare di uscita. Entrambi questi valori devono essere inferiori alla tensione di saturazione degli AO presenti nel circuito. Si deve avere, quindi:

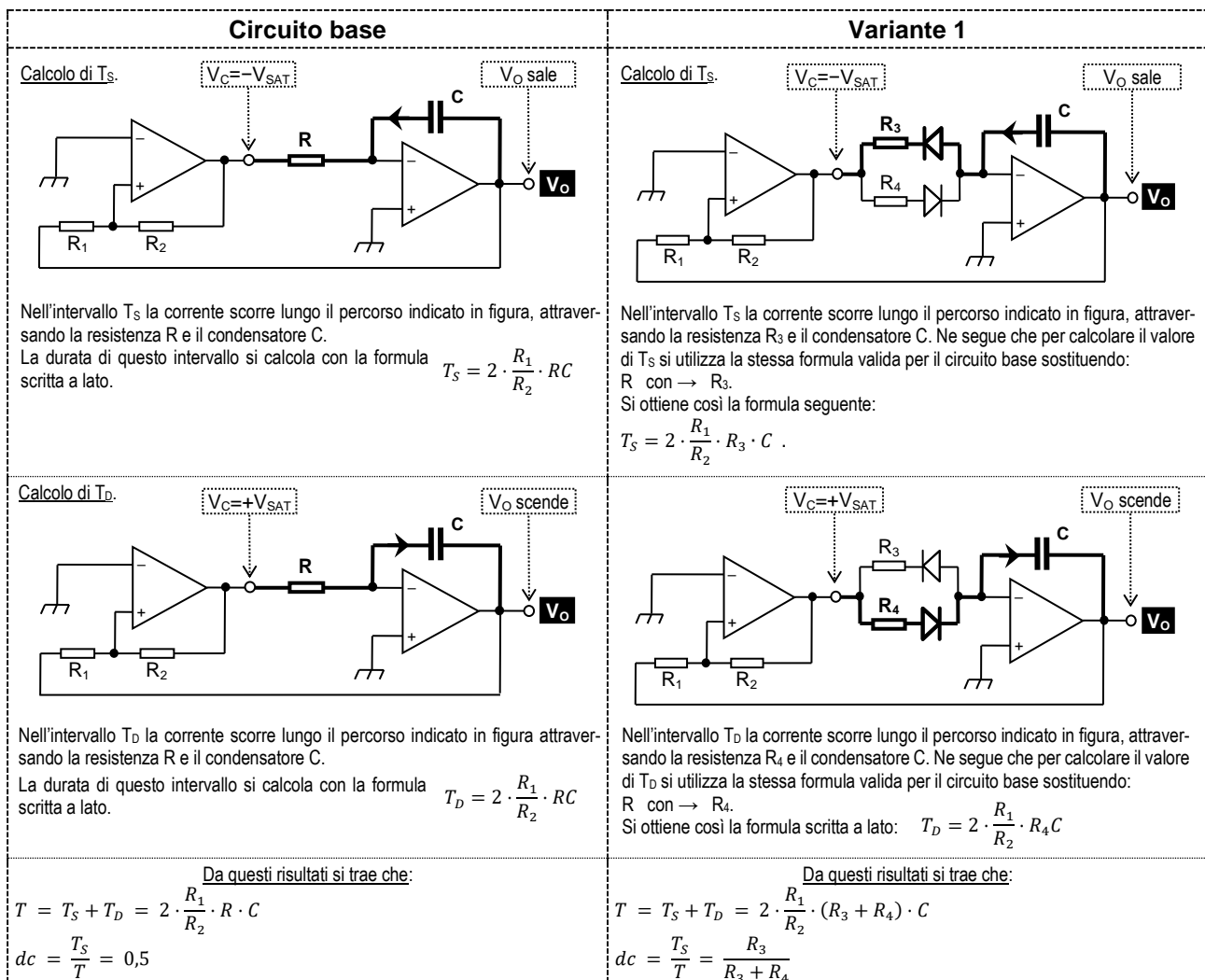
$$|V_{SH}| = |V_{SL}| = V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2} < V_{SAT} \xrightarrow{\text{quindi}} R_1 < R_2$$

Variante 1 (T fisso, dc fisso di valore qualsiasi)

Il generatore di onda triangolare, nella sua variante 1, produce una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di un'onda triangolare simmetrica con periodo fisso e duty-cycle fisso di valore qualsiasi. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità, la sua forma d'onda di uscita e le sue formule di dimensionamento.

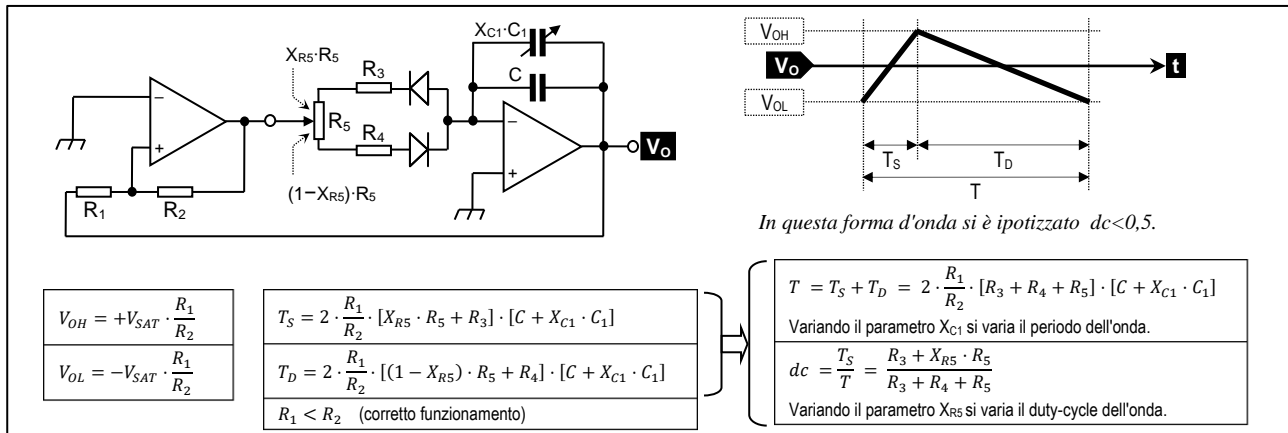


Analisi del circuito. Analizziamo la variante 1 come una modifica del circuito base.

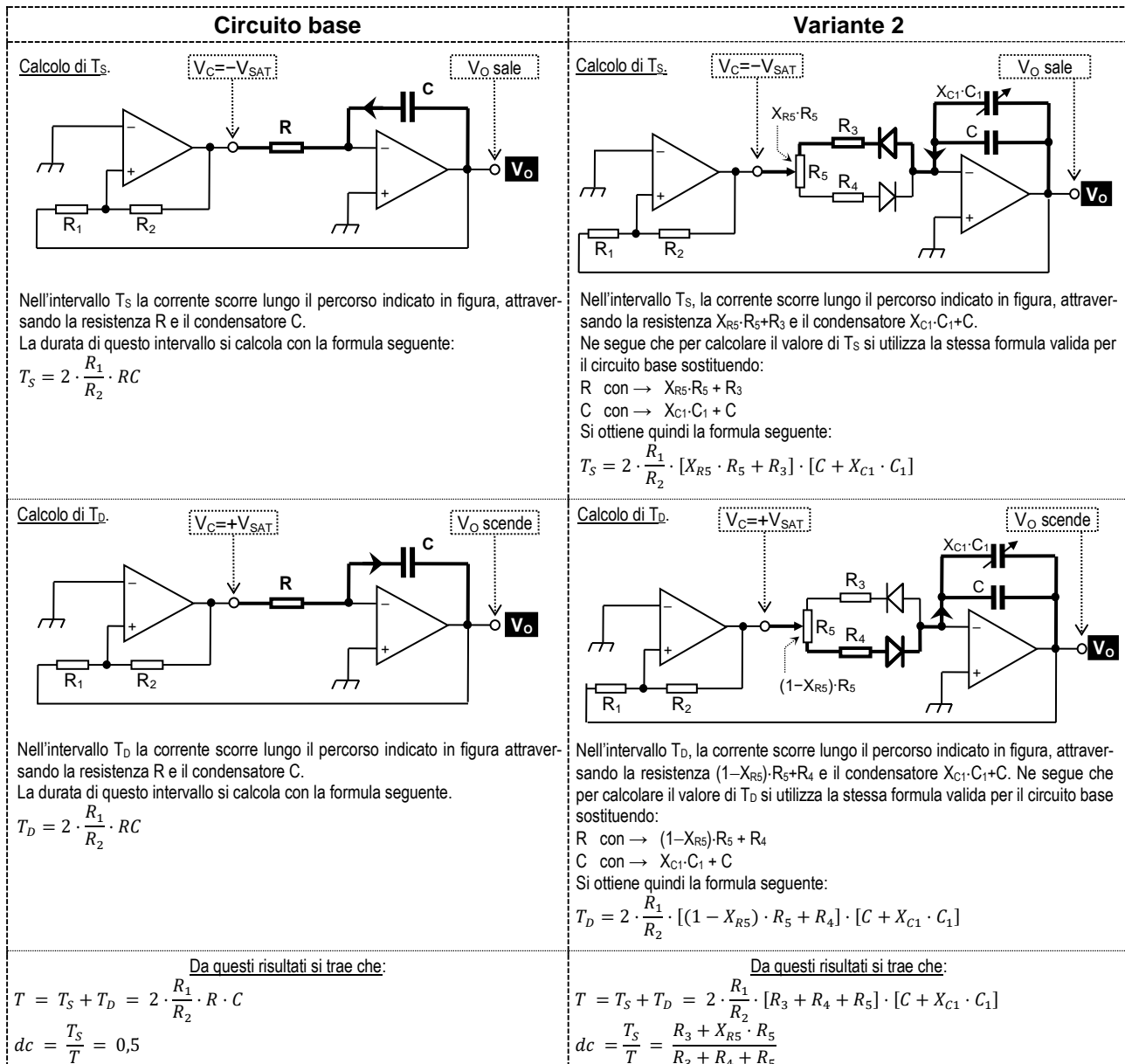


Variante 2 (T variabile, dc variabile)

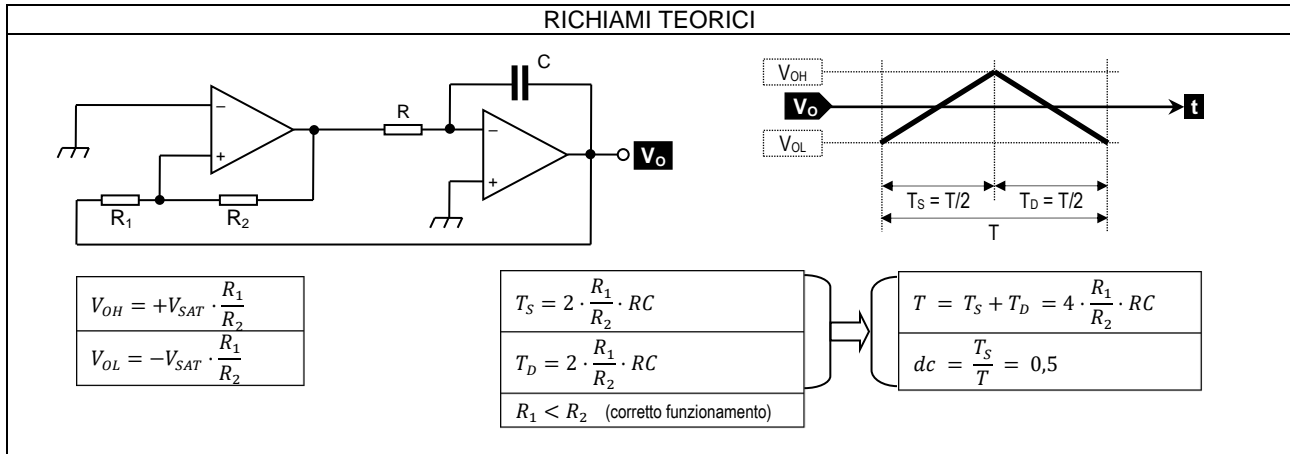
Il generatore di onda triangolare, nella sua variante 2, produce una tensione di uscita $V_O(t)$ avente la forma di un'onda triangolare simmetrica con periodo regolabile e duty-cycle regolabile. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità, la sua forma d'onda di uscita, e le sue formule di dimensionamento.



Analisi del circuito. Analizziamo la variante 2 come una modifica del circuito base.



Esercizio -- Generatore di onda triangolare, circuito base (T fisso, dc fisso di valore 0,5)



Problema di analisi

Analizzare il seguente generatore di onda triangolare simmetrica, e disegnare la forma d'onda di uscita $V_O(t)$.

Dati dell'AO

$V_{CC} = \pm 15$

$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

Dati del circuito

$R_1 = 1 \cdot 10^3$

$R_2 = 12 \cdot 10^3$

$R = 10 \cdot 10^3$

$C = 20 \cdot 10^{-6}$

1) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

$[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \rightarrow V_{SAT} = 12$

2) $V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$

$V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 1}$
 $R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato}$

$\rightarrow V_{OH} = +1$

3) $V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$

$V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 1}$
 $R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato}$

$\rightarrow V_{OL} = -1$

4) $T = 4 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R \cdot C$

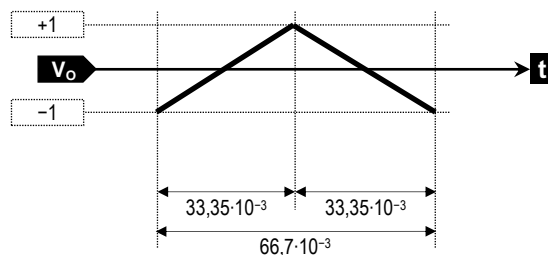
$R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $R = 10 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ dato}$

$\rightarrow T = 66,7 \cdot 10^{-3}$

5) $T_S = T_D = \frac{T}{2}$

$[T = 66,7 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 4}] \rightarrow T_S = T_D = 33,35 \cdot 10^{-3}$

$\rightarrow T_S = T_D = 33,35 \cdot 10^{-3}$



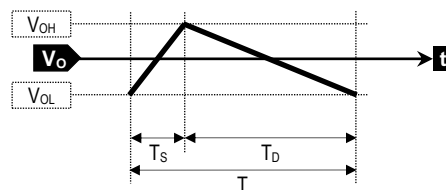
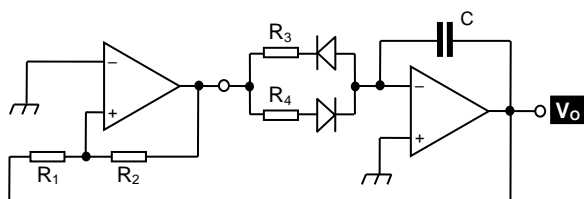
Problema di sintesi

Progettare un generatore di onda triangolare simmetrica con le seguenti specifiche.	<u>Dati dell'AO</u>	<u>Dati della forma d'onda</u>	$f = 4 \cdot 10^3$
	$V_{CC} = \pm 15$	$V_{OH} = +0,5$	$dc = 0,5$
	$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	$V_{OL} = -0,5$	

- 1) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ $[V_{CC} = 15 \text{ dato}]$ $\rightarrow V_{SAT} = 12$
- 2) $T = \frac{1}{f}$ $[f = 4 \cdot 10^3 \text{ dato}]$ $\rightarrow T = 0,25 \cdot 10^{-3}$
- 3) $V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ $\begin{cases} V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 1} \\ V_{OH} = 0,5 \text{ dato} \end{cases}$ $\rightarrow \begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_2 = 24 \cdot 10^3 \end{cases}$
- 4) $T = 4 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 3} \\ R_2 = 24 \cdot 10^3 \text{ calcolo 3} \\ T = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 2} \end{cases}$ $\rightarrow \begin{cases} C = 20 \cdot 10^{-9} \text{ scelta} \\ R = 75 \cdot 10^3 \end{cases}$

Esercizio -- Generatore di onda triangolare, variante 1 (T fisso, dc fisso di valore qualsiasi)

RICHIAMI TEORICI



In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

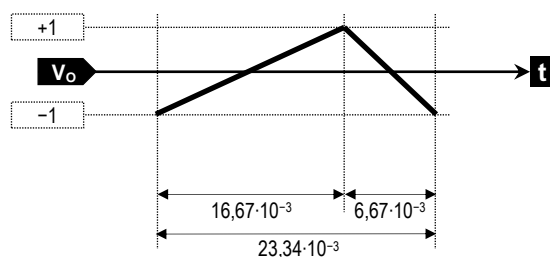
$V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$	$T_S = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 C$	\Rightarrow	$T = T_S + T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot (R_3 + R_4) \cdot C$
$V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$	$T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 C$		$dc = \frac{T_S}{T} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$
$R_1 < R_2$ (corretto funzionamento)			

Problema di analisi

Analizzare il seguente generatore di onda triangolare simmetrica, e disegnare la forma d'onda di uscita $V_O(t)$.

Dati dell'AO	Dati del circuito	
$V_{CC} = \pm 15$	$R_1 = 1 \cdot 10^3$	$R_3 = 5 \cdot 10^3$
$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	$R_2 = 12 \cdot 10^3$	$R_4 = 2 \cdot 10^3$
		$C = 20 \cdot 10^{-6}$

- $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ $[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \rightarrow V_{SAT} = 12$
- $V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ $\left[\begin{array}{l} V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 1} \\ R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato} \end{array} \right] \rightarrow V_{OH} = +1$
- $V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ $[stessi dati di sopra] \rightarrow V_{OL} = -1$
- $T_S = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 C$ $\left[\begin{array}{l} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_3 = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ dato} \end{array} \right] \rightarrow T_S = 16,67 \cdot 10^{-3}$
- $T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 C$ $\left[\begin{array}{l} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ R_4 = 2 \cdot 10^3 \text{ dato} \\ C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ dato} \end{array} \right] \rightarrow T_D = 6,67 \cdot 10^{-3}$
- $T = T_S + T_D$ $\left[\begin{array}{l} T_S = 16,67 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 4} \\ T_D = 6,67 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 5} \end{array} \right] \rightarrow T = 23,34 \cdot 10^{-3}$



Problema di sintesi

Progettare un generatore di onda triangolare simmetrica con le seguenti specifiche.

Dati dell'AO

$$\begin{aligned} V_{CC} &= \pm 15 \\ V_{SAT} &= 80\% \text{ di } V_{CC} \end{aligned}$$

Dati della forma d'onda

$$\begin{aligned} V_{OH} &= +0,5 \\ V_{OL} &= -0,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f &= 4 \cdot 10^3 \\ T_s &= 0,2 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

- 1) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ $[V_{CC} = 15 \text{ dato}]$ $\rightarrow V_{SAT} = 12$
- 2) $T = \frac{1}{f}$ $[f = 4 \cdot 10^3 \text{ dato}]$ $\rightarrow T = 0,25 \cdot 10^{-3}$
- 3) $T_D = T - T_s$ $\begin{cases} T = 0,25 \cdot 10^{-3} & \text{calcolo 2} \\ T_s = 0,2 \cdot 10^{-3} & \text{dato} \end{cases}$ $\rightarrow T_D = 0,05 \cdot 10^{-3}$
- 4) $V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ $\begin{cases} V_{SAT} = 12 & \text{calcolo 1} \\ V_{OH} = 0,5 & \text{dato} \end{cases}$ $\rightarrow \begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 & \text{scelta} \\ R_2 = 24 \cdot 10^3 \end{cases}$
- 5) $T_s = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 C$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 & \text{scelta 4} \\ R_2 = 24 \cdot 10^3 & \text{calcolo 4} \\ T_s = 0,2 \cdot 10^{-3} & \text{dato} \end{cases}$ $\rightarrow \begin{cases} C = 100 \cdot 10^{-9} & \text{scelta} \\ R_3 = 24 \cdot 10^3 \end{cases}$
- 6) $T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 C$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 & \text{scelta 4} \\ R_2 = 24 \cdot 10^3 & \text{calcolo 4} \\ T_D = 0,05 \cdot 10^{-3} & \text{calcolo 3} \\ C = 100 \cdot 10^{-9} & \text{scelta 5} \end{cases}$ $\rightarrow R_4 = 6 \cdot 10^3$
- 7) $R_1 < R_2$ $\begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 & \text{scelta 4} \\ R_2 = 24 \cdot 10^3 & \text{calcolo 4} \end{cases}$ $\rightarrow \text{OK (verifica con esito positivo)}$

Esercizio -- Generatore di onda triangolare, variante 2 (T variabile, dc variabile)

RICHIAMI TEORICI

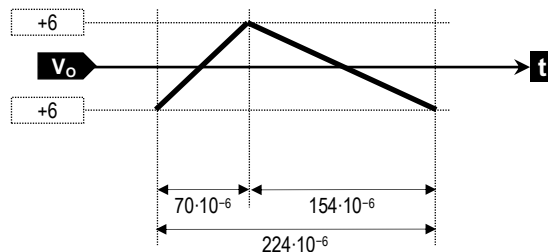
In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

$V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$	$T_S = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [X_{R5} \cdot R_5 + R_3] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1]$	$\left\{ \begin{array}{l} T = T_S + T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \\ \text{Variando il parametro } X_{C1} \text{ si varia il periodo dell'onda.} \\ dc = \frac{T_S}{T} = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \\ \text{Variando il parametro } X_{R5} \text{ si varia il duty-cycle dell'onda.} \end{array} \right.$
$V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$	$T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [(1 - X_{R5}) \cdot R_5 + R_4] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1]$	
$R_1 < R_2$ (corretto funzionamento)		

Problema di analisi

Analizzare il seguente generatore di onda triangolare simmetrica, disegnare inoltre la sua forma d'onda di uscita $V_O(t)$.	Dati dell'AO $V_{CC} = \pm 15$ $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	Dati del circuito $R_1 = 1 \cdot 10^3$ $R_2 = 2 \cdot 10^3$ $R_3 = 1 \cdot 10^3$ $R_4 = 1 \cdot 10^3$	$R_5 = 6 \cdot 10^3$ $X_{R5} = 25\%$ $C = 20 \cdot 10^{-9}$ $C_1 = 40 \cdot 10^{-9}$ $X_{C1} = 20\%$
--	---	--	--

- | | | |
|---|---|---|
| 1) $V_{SAT} = 0,8 \cdot V_{CC}$ | [$V_{CC} = 15$ dato | → $V_{SAT} = 12$ |
| 2) $V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ | [$V_{SAT} = 12$ calcolo 1
$R_1 = 1 \cdot 10^3$ dato
$R_2 = 2 \cdot 10^3$ dato | → $V_{OH} = +6$ |
| 3) $V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ | [stessi dati di sopra | → $V_{OL} = -6$ |
| 4) $T = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1]$ | [$X_{C1} = 1 \rightarrow T_{MAX}$
$X_{C1} = 0,2$ dato → T
$X_{C1} = 0 \rightarrow T_{min}$ | → $\begin{cases} T_{MAX} = 480 \cdot 10^{-6} \\ T = 224 \cdot 10^{-6} \\ T_{min} = 160 \cdot 10^{-6} \end{cases}$ |
| 5) $dc = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5}$ | [$X_{R5} = 1 \rightarrow dc_{MAX}$
$X_{R5} = 0,25$ dato → dc
$X_{R5} = 0 \rightarrow dc_{min}$ | → $\begin{cases} dc_{MAX} = 0,875 \\ dc = 0,3125 \\ dc_{min} = 0,125 \end{cases}$ |
| 6) $T_S = T \cdot dc$ | [$T = 224 \cdot 10^{-6}$ calcolo 4
$dc = 0,3125$ calcolo 5 | → $T_S = 70 \cdot 10^{-6}$ |
| 7) $T_D = T - T_S$ | [$T = 224 \cdot 10^{-6}$ calcolo 4
$T_S = 70$ calcolo 5 | → $T_D = 154 \cdot 10^{-6}$ |
| 8) $f = \frac{1}{T}$ | [$T = 224 \cdot 10^{-6}$ calcolo 4 | → $f = 4,46 \cdot 10^3$ |



Problema di sintesi

Progettare un generatore di onda triangolare che produca la seguente forma d'onda di uscita $V_O(t)$.

Dati dell'AO

$$\begin{aligned} V_{CC} &= \pm 15 \\ V_{SAT} &= 80\% \text{ di } V_{CC} \end{aligned}$$

Dati della forma d'onda

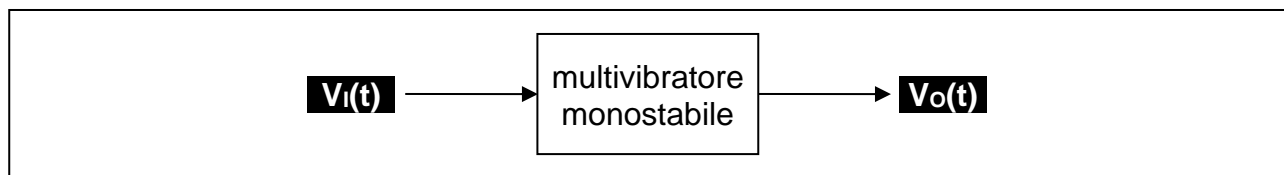
$$\begin{aligned} V_{OH} &= +10 \\ V_{OL} &= -10 \\ f_{MAX} &= 5 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{min} &= 1 \cdot 10^3 \\ dc_{MAX} &= 0,8 \\ dc_{min} &= 0,2 \end{aligned}$$

- 1) $V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$ $[V_{SAT} = 12 \text{ dato}]$ $\rightarrow \begin{cases} R_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \end{cases}$
- 2) $\begin{cases} dc_{min} = \frac{R_3}{R_3 + R_4 + R_5} \\ dc_{MAX} = \frac{R_3 + R_5}{R_3 + R_4 + R_5} \end{cases}$ $\begin{cases} dc_{MAX} = 0,8 \text{ dato} \\ dc_{min} = 0,2 \text{ dato} \end{cases}$ $\rightarrow \begin{cases} R_3 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_4 = 1 \cdot 10^3 \\ R_5 = 3 \cdot 10^3 \end{cases}$
- 3) $T = \frac{1}{f}$ $\begin{cases} f_{MAX} = 5 \cdot 10^3 \text{ dato} \rightarrow T_{min} \\ f_{min} = 1 \cdot 10^3 \text{ dato} \rightarrow T_{MAX} \end{cases}$ $\rightarrow \begin{cases} T_{min} = 0,2 \cdot 10^{-3} \\ T_{MAX} = 1 \cdot 10^{-3} \end{cases}$
- 4) $\begin{cases} T_{min} = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot (R_3 + R_4 + R_5) \cdot (C) \\ T_{MAX} = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot (R_3 + R_4 + R_5) \cdot (C + C_1) \end{cases}$ $\begin{cases} R_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ scelta 1} \\ R_2 = 12 \cdot 10^3 \text{ calcolo 1} \\ R_3 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 2} \\ R_4 = 1 \cdot 10^3 \text{ calcolo 2} \\ R_5 = 3 \cdot 10^3 \text{ calcolo 2} \\ T_{MAX} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 3} \\ T_{min} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 3} \end{cases}$ $\rightarrow \begin{cases} C = 24 \cdot 10^{-9} \\ C_1 = 96 \cdot 10^{-9} \end{cases}$

3.2 – Generatore di impulso

Il generatore di impulso, detto più comunemente *multivibratore monostabile* oppure *one-shot*, è un circuito con un'ingresso e un'uscita, rappresentato schematicamente nella figura che segue.



Definiamo il funzionamento del circuito analizzando le forme d'onda di ingresso $V_I(t)$ e di uscita $V_O(t)$.

- **Impulso di ingresso $V_I(t)$.** Questa tensione vale normalmente zero, poi, in un certo istante assume il valore positivo V_{IH} (fronte di salita), rimane su tale valore per il tempo T_I , e infine torna al valore zero (fronte di discesa).

Affinchè il circuito funzioni correttamente, l'impulso di ingresso deve soddisfare le due condizioni seguenti, chiamate *condizioni di innesco*:

1. l'ampiezza dell'impulso di ingresso (V_{IH}) deve superare un certo valore minimo (ossia $V_{IH} > V_{IH_min}$);
2. la durata dell'impulso di ingresso (T_I) deve superare un certo valore minimo (ossia $T_I > T_{I_min}$).

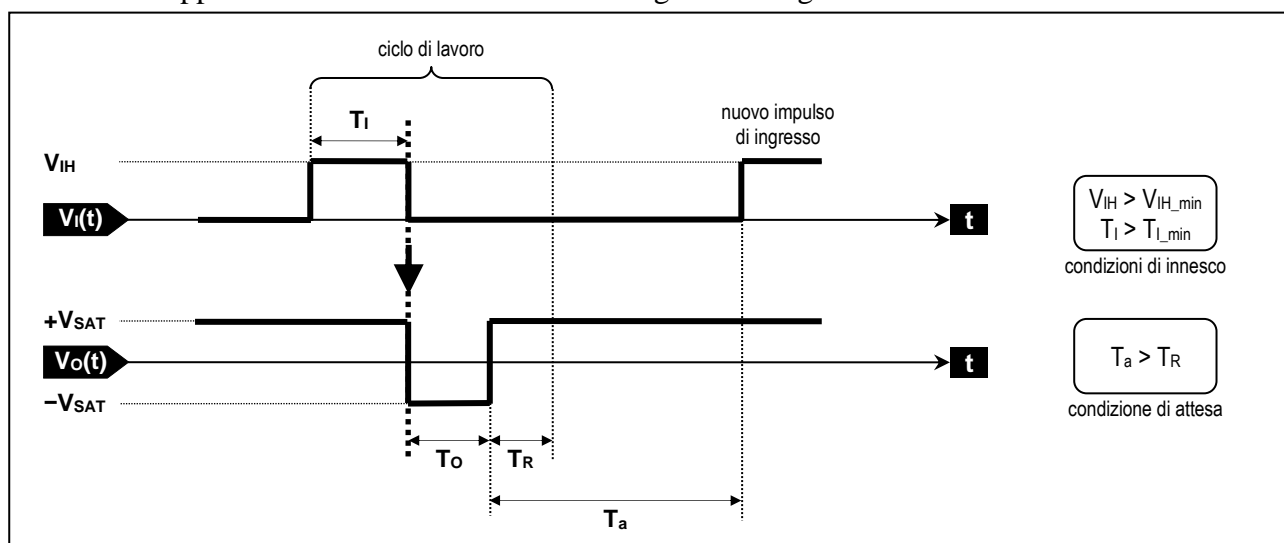
- **Impulso di uscita $V_O(t)$.** Questa tensione vale normalmente $+V_{SAT}$. Nell'istante in cui si presenta il fronte di discesa dell'impulso d'ingresso, $V_O(t)$ lascia il valore di riposo $+V_{SAT}$ e scende al valore $-V_{SAT}$, rimane su $-V_{SAT}$ per il tempo T_O , e poi torna al valore di riposo $+V_{SAT}$.

Si ha, dunque, che l'impulso di ingresso $V_I(t)$, soddisfatte le 2 condizioni di innesco, provoca l'impulso di uscita $V_O(t)$.

Si definiscono, inoltre i seguenti parametri:

- **Tempo di ripristino (T_R).** Questo è il tempo che il circuito impiega per tornare allo stato di riposo dopo che sia terminato l'impulso di uscita.
- **Ciclo di lavoro.** Questo è il tempo intercorrente tra l'arrivo dell'impulso di ingresso e il termine del tempo di ripristino.
- **Tempo di attesa (T_a).** Questo è il tempo intercorrente tra la fine dell'impulso di uscita e l'arrivo di un nuovo impulso di ingresso. Poiché la gestione dell'impulso di ingresso è fatta correttamente solo se il circuito si trova in condizioni di riposo, allora occorre che sia soddisfatta la condizione $T_a > T_R$.

Tutto ciò è rappresentato schematicamente nella figura che segue.

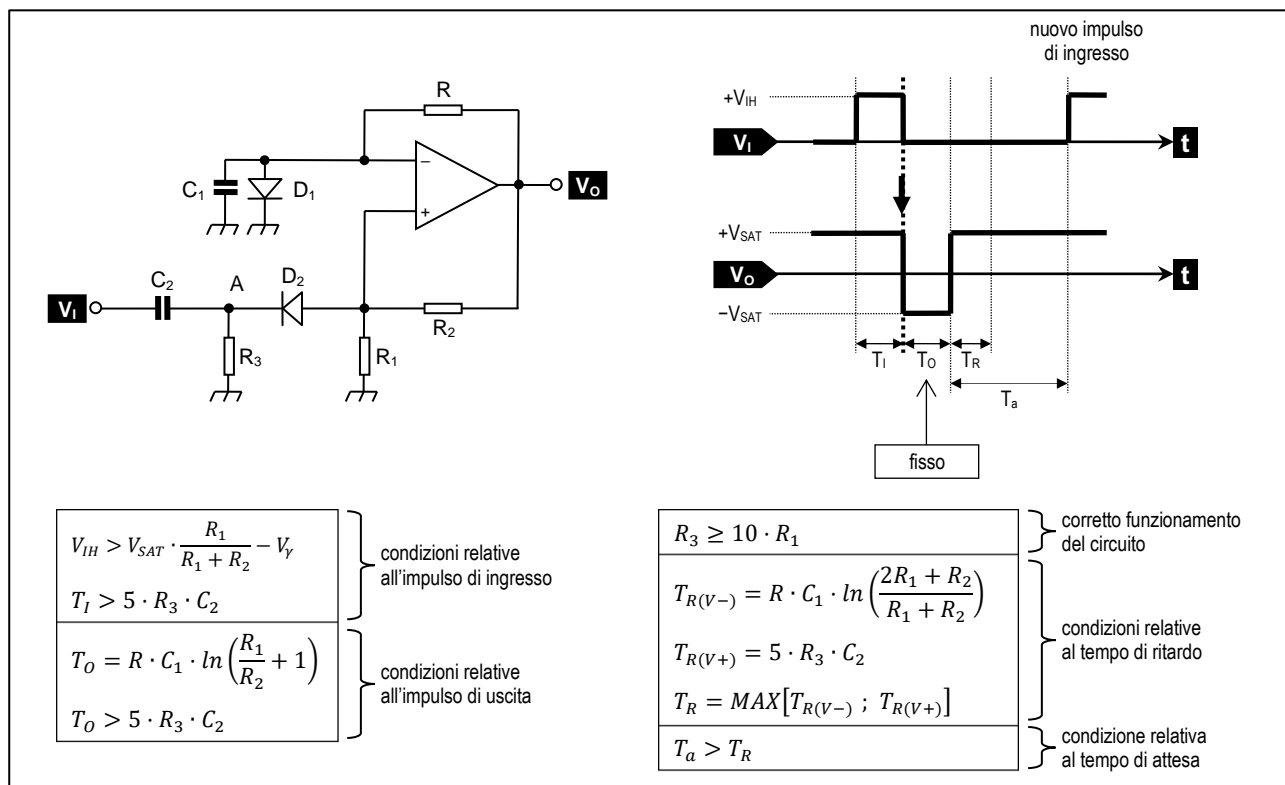


Presenteremo il multivibratore monostabile nelle versioni seguenti.

- Circuito base:..... ➔ T_O fisso;
- Variante 1: ➔ T_O regolabile.

Circuito base (T_O fisso)

La figura seguente mostra il circuito base che realizza il multivibratore monostabile. Dopo il circuito sono riportate le sue formule di dimensionamento.



Analisi del circuito.

Prima dell'istante ① (situazione di riposo iniziale)

- **Tensione V_O** Ipotizziamo che l'AO sia in saturazione positiva.
- **Tensione V_-** Poichè D1 è in conduzione, $V_- = V_Y$.
- **Tensione V_+** Applicando il partitore alle resistenze R_1 e R_2 si ha:

$$V_+ = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad [V_{+H}]$$

Notiamo che questa formula è approssimata. Essa vale solo se si ha $R_3 \gg R_1$ (si accetta la condizione $R_3 \geq 10 \cdot R_1$).

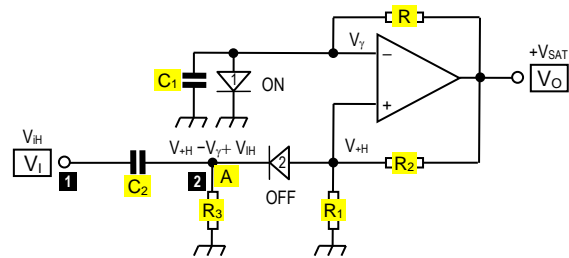
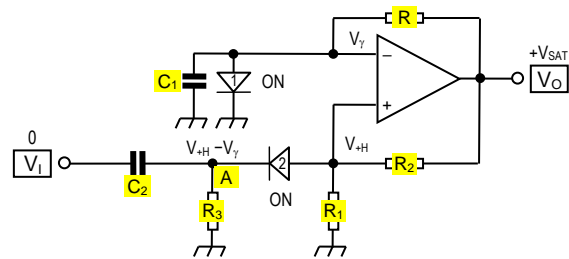
Poichè in questo intervallo si ha la situazione $V_+ > V_-$, è giustificata la saturazione positiva dell'AO.

- **Tensione V_I** La tensione V_I è 0.
- **Tensione V_A** Questa tensione vale $V_A = V_{+H} - V_Y$.

Istante ① (salita ingresso)

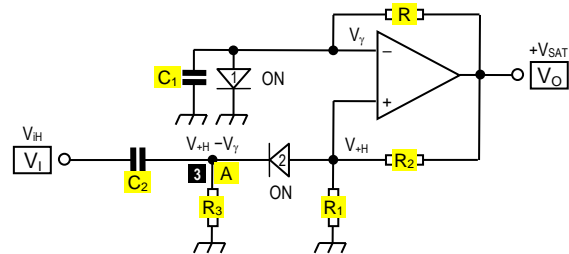
- Tensione V_I** V_I passa da (0) \xrightarrow{a} (V_{IH}).
- Tensione V_A** La tensione V_A , seguendo V_I (V_{C2} rimane costante), sale anch'essa di V_{IH} :

$$V_A \xrightarrow{\text{passa da}} (V_{+H} - V_Y) \xrightarrow{a} (V_{+H} - V_Y + V_{IH})$$
di conseguenza D2 diventa OFF.



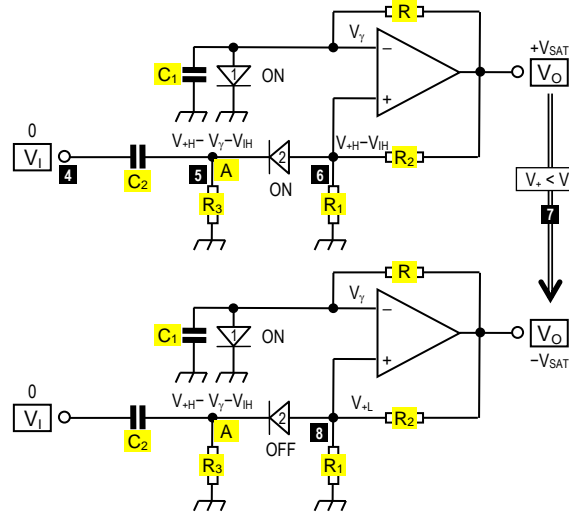
Intervallo ①-②

- Tensione V_A** Questa tensione, partendo dal valore iniziale $V_A = V_{+H} - V_Y + V_{IH}$, scende esponenzialmente fino a raggiungere, dopo il tempo $5 \cdot \tau_2$, il valore finale $V_A = V_{+H} - V_Y$.
Nella progettazione del circuito occorre che la durata dell'impulso di ingresso T_I sia:
 $T_I > 5 \cdot \tau_2$
in modo che il transitorio di V_A finisca prima della fine dell'impulso di ingresso.
- Alla fine del transitorio il circuito ha la stessa configurazione che aveva prima dell'istante 1 (riposo iniziale). Cambia solo la tensione di ingresso e quella ai capi del condensatore C_2 .



Istante ② (discesa ingresso e discesa uscita)

- Tensione V_I** La tensione di ingresso scende improvvisamente di V_{IH} e così raggiunge il valore 0.
- Tensione V_A** Questa tensione, seguendo V_I (V_{C2} rimane costante), scende anch'essa di V_{IH} e così raggiunge il valore $V_A = V_{+H} - V_Y - V_{IH}$.
Poichè si è ipotizzato che l'ampiezza dell'impulso di ingresso soddisfi la condizione ($V_{+H} - V_Y < V_{IH} < 2V_{+H} - V_Y$), ciò porta a scrivere anche la relazione ($V_{+L} < V_A < 0$).
- Tensione V_+** La tensione V_+ , abbassandosi, trascina con sé la tensione V_+ (a causa del diodo D2 in conduzione), quindi V_+ si abbassa anch'essa di V_{IH} e così assume il valore $V_+ = V_{+H} - V_{IH}$.
Poichè abbiamo ipotizzato la condizione $V_{IH} > V_{+H} - V_Y$, allora si verifica anche $V_+ < V_-$.
- Tensione V_O** Poichè la tensione V_+ scende sotto V_- (che nell'istante 2 vale $V_- = V_Y$), accade che l'AO commuta in saturazione negativa, e così va a ($-V_{SAT}$).
- Tensione V_+** Poichè V_O scende al valore $-V_{SAT}$, allora V_+ si abbassa ulteriormente (partitore R_1 - R_2) e così va a (V_{+L}).
➤ Poichè al punto 5 si è ottenuta la relazione ($V_{+L} < V_A < 0$), ciò porta a alla considerazione che D2=OFF.



Intervallo ②-③

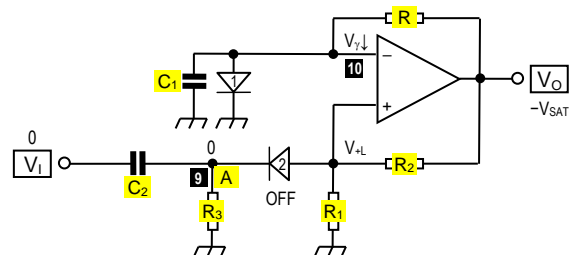
- Tensione V_A** Sale esponenzialmente fino a raggiungere, dopo il tempo $5 \cdot \tau_2$, il valore finale 0.
- Tensione V_-** La tensione V_- scende esponenzialmente verso la tensione $-V_{SAT}$ e raggiunge la tensione V_{+L} dopo il tempo:

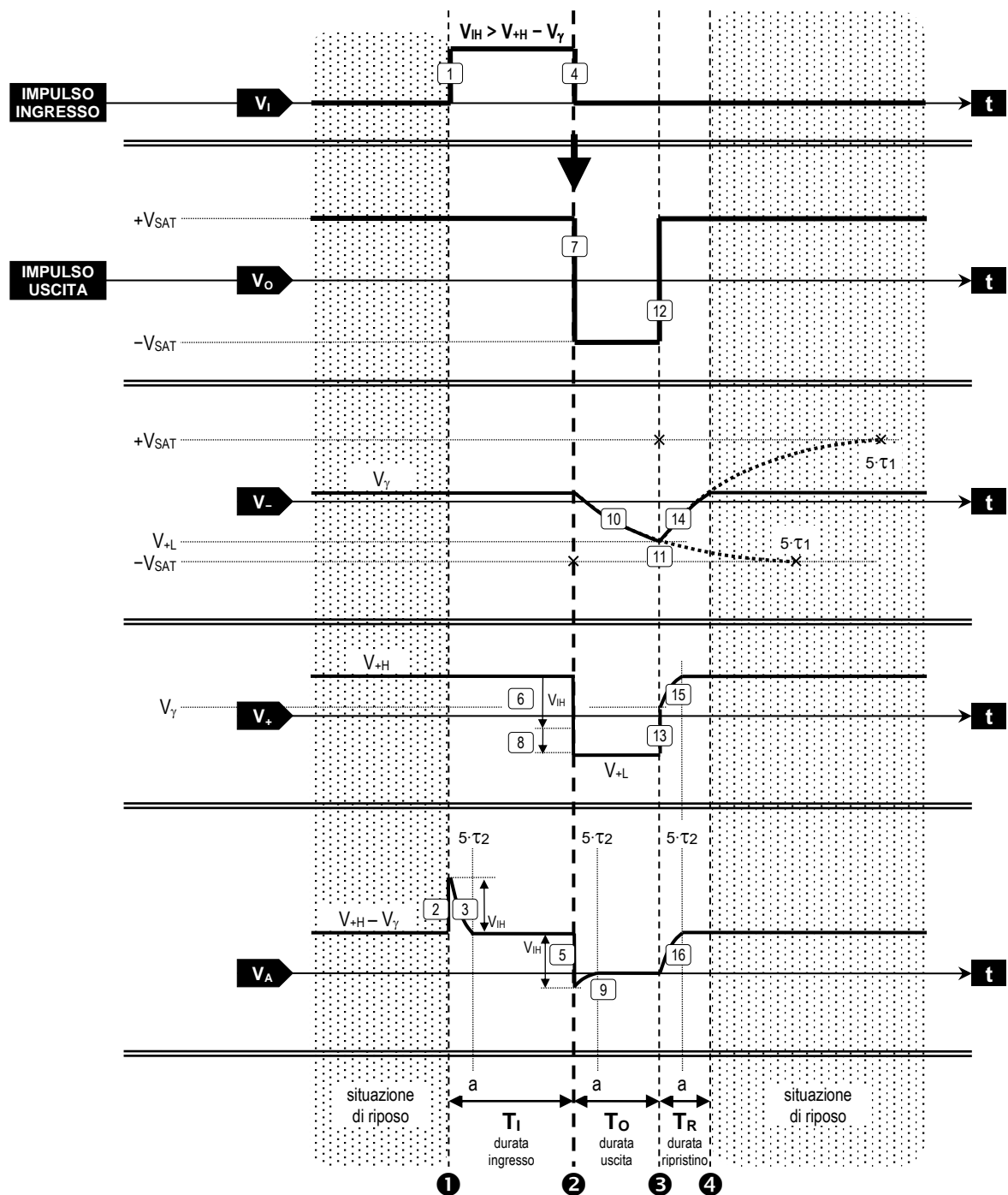
$$T_O = RC_1 \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) \quad (\text{pag. 37, dim. 3}).$$

Nella progettazione del circuito occorre che sia

$$T_O > 5 \cdot \tau_2$$

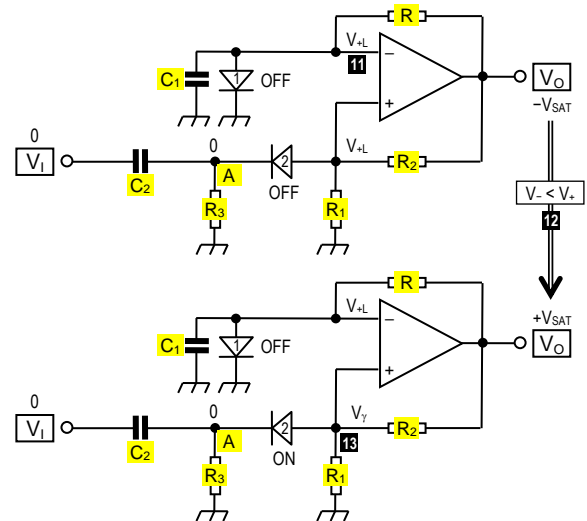
in modo che questo transitorio sia completato prima della fine dell'impulso di uscita.





Istante 3 (salita uscita)

11. **Tensione V_-** Appena la tensione V_- scende sotto V_{+L} , si verifica la situazione $V_- < V_+$.
12. **Tensione V_O** La tensione di uscita V_O passa da $-V_{SAT}$ a $+V_{SAT}$.
13. **Tensione V_+** Poichè V_O si trova al valore $+V_{SAT}$, allora V_+ passa al valore V_γ , e il diodo D2 diventa ON.

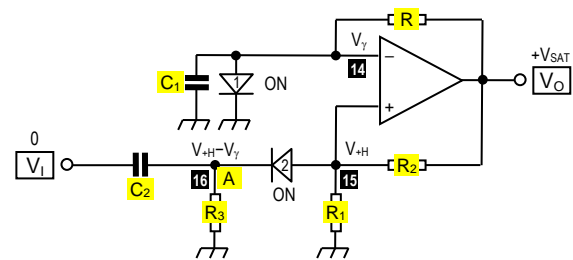
**Intervallo 3-4 (ripristino dei valori iniziali)**

14. **Tensione V_-** La tensione V_- sale esponenzialmente verso $+V_{SAT}$ e raggiunge la tensione V_γ dopo il tempo:

$$T_{R(V-)} = RC_1 \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right) \quad (\text{pag. 37, dim. 4}).$$
15. **Tensione V_+** La tensione V_+ parte dal valore iniziale V_γ e sale in forma esponenziale verso il valore finale V_{+H} che raggiunge dopo il tempo:

$$T_{R(V+)} = 5 \cdot \tau_2 = 5 \cdot R_3 C_2.$$
16. **Tensione V_A** La tensione V_A segue le sorti di V_+ quindi parte dal valore iniziale 0 e sale in forma esponenziale verso il valore finale $(V_{+H} - V_\gamma)$ che raggiunge dopo il tempo:

$$T_{R(VA)} = T_{R(V+)} = 5 \cdot \tau_2 = 5 \cdot R_3 C_2.$$



Nota 1. Il tempo di ripristino T_R . Il tempo di ripristino è il tempo necessario al circuito per riassumere la configurazione iniziale. Si ha:

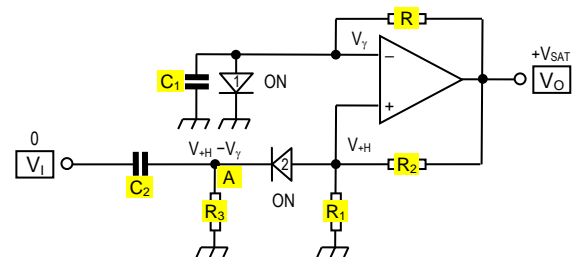
$$T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}].$$

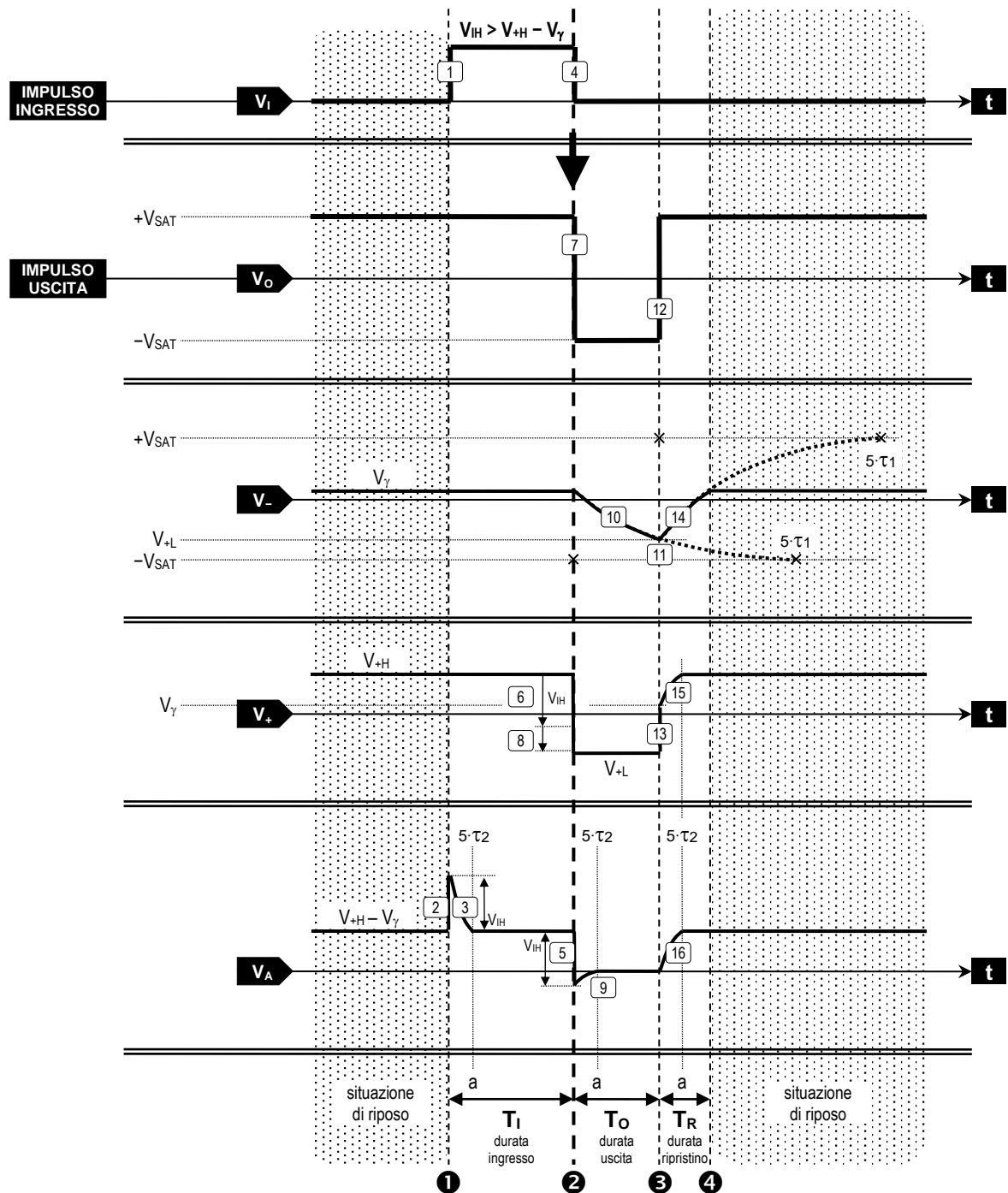
Nota 2. Il tempo di attesa T_a . Il tempo di attesa è il tempo che occorre lasciar passare tra la fine dell'impulso di uscita e l'arrivo di un nuovo impulso di ingresso. Occorre che sia:

$$T_a > T_R.$$

Dopo l'istante 4 (situazione di riposo finale)

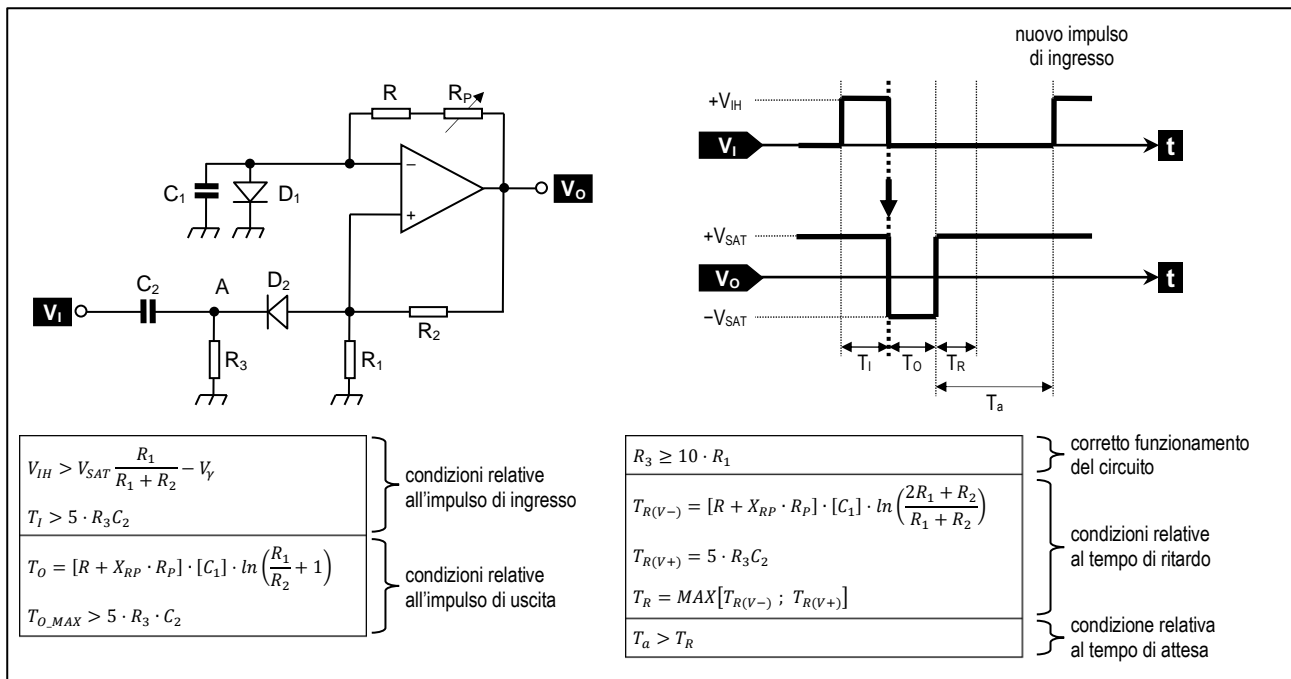
Nell'istante 4 la tensione V_- raggiunge la tensione V_γ e qui si stabilizza. Si ha quindi la stessa situazione presente nel circuito prima dell'istante 1 (riposo iniziale).



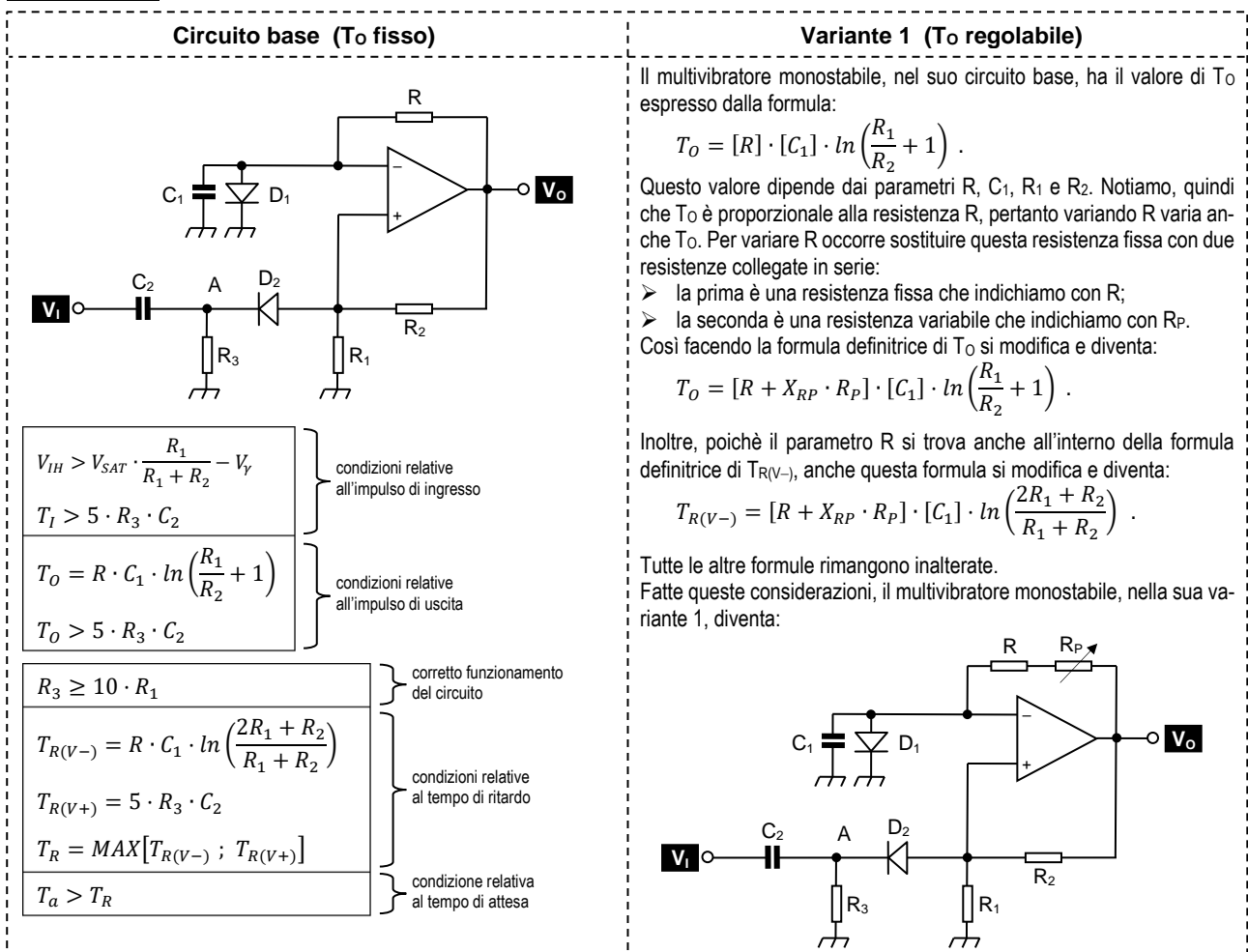


Variante 1 (T_O regolabile)

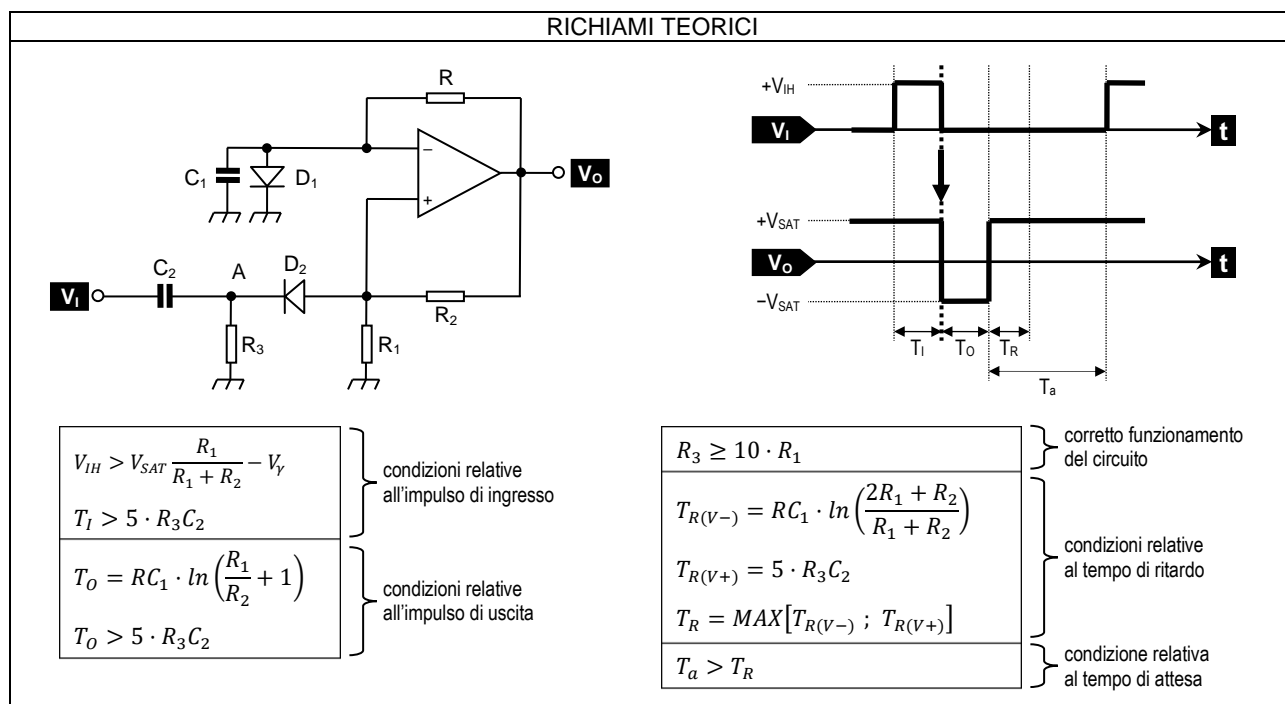
Il multivibratore monostabile, nella sua variante 1, fornisce un impulso di uscita di durata regolabile. La figura seguente mostra il circuito che realizza questa funzionalità, le sue forme d'onda di ingresso e uscita, e le sue formule di dimensionamento.



Analisi del circuito. Analizziamo la variante 1 come una modifica del circuito base.



Esercizio -- Multivibratore monostabile, circuito base (T_0 fisso)



Problema di analisi

Analizzare il seguente multivibratore monostabile, indicare inoltre l'ampiezza minima dell'impulso di ingresso $V_I(t)$ sufficiente a garantirne l'innescio.

Dati dell'AO

$$V_{CC} = \pm 15$$

$$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$$

Dati del circuito

$$R_1 = 1 \cdot 10^3$$

$$R_2 = 5 \cdot 10^3$$

$$R_3 = 15 \cdot 10^3$$

$$R = 10 \cdot 10^3$$

$$C_1 = 200 \cdot 10^{-9}$$

$$C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$$

1) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$

$[V_{CC} = 15 \text{ dato}]$

$\rightarrow V_{SAT} = 12$

2) $V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_Y$

$[V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 1}]$
 $R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $R_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $V_Y = 0,6 \text{ ipotesi}$

$\rightarrow V_{IH} > 1,4$
condizione 1 per il sicuro innescio

3) $T_I > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$

$[R_3 = 15 \cdot 10^3 \text{ dato}]$
 $[C_2 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ dato}]$

$\rightarrow T_I > 150 \cdot 10^{-6}$
condizione 2 per il sicuro innescio

4) $T_O = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$

$[R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}]$
 $[R_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ dato}]$
 $[R = 10 \cdot 10^3 \text{ dato}]$
 $[C_1 = 200 \cdot 10^{-9} \text{ dato}]$

$\rightarrow T_O = 365 \cdot 10^{-6}$

5) $T_O > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$

$[T_O = 365 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 4}]$
 $R_3 = 15 \cdot 10^3 \text{ dato}$
 $C_2 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ dato}$

$\rightarrow 365 \cdot 10^{-6} > 150 \cdot 10^{-6}$
corretto funzionamento del circuito: OK

6) $R_3 \geq 10 \cdot R_1$

$[R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ dato}]$
 $[R_3 = 15 \cdot 10^3 \text{ dato}]$

$\rightarrow 15 \cdot 10^3 \geq 10 \cdot 10^3$
corretto funzionamento del circuito: OK

7) $T_{R(V-)} = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right)$ [dati tutti disponibili]

$\rightarrow T_{R(V-)} = 308 \cdot 10^{-6}$

8) $T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2$

[dati tutti disponibili]

$\rightarrow T_{R(V+)} = 150 \cdot 10^{-6}$

9) $T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}]$

$[T_{R(V-)} = 308 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 7}]$
 $[T_{R(V+)} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 8}]$

$\rightarrow T_R = 308 \cdot 10^{-6}$

10) $T_a > T_R$

$[T_R = 308 \cdot 10^{-6} \text{ calcolo 9}]$

$\rightarrow T_a > 308 \cdot 10^{-6}$

Problema di sintesi

Progettare un multivibratore monostabile con le seguenti specifiche.

Dati dell'AO

$$\begin{aligned} V_{CC} &= \pm 15 \\ V_{SAT} &= 80\% \text{ di } V_{CC} \end{aligned}$$

Dati impulso di ingresso

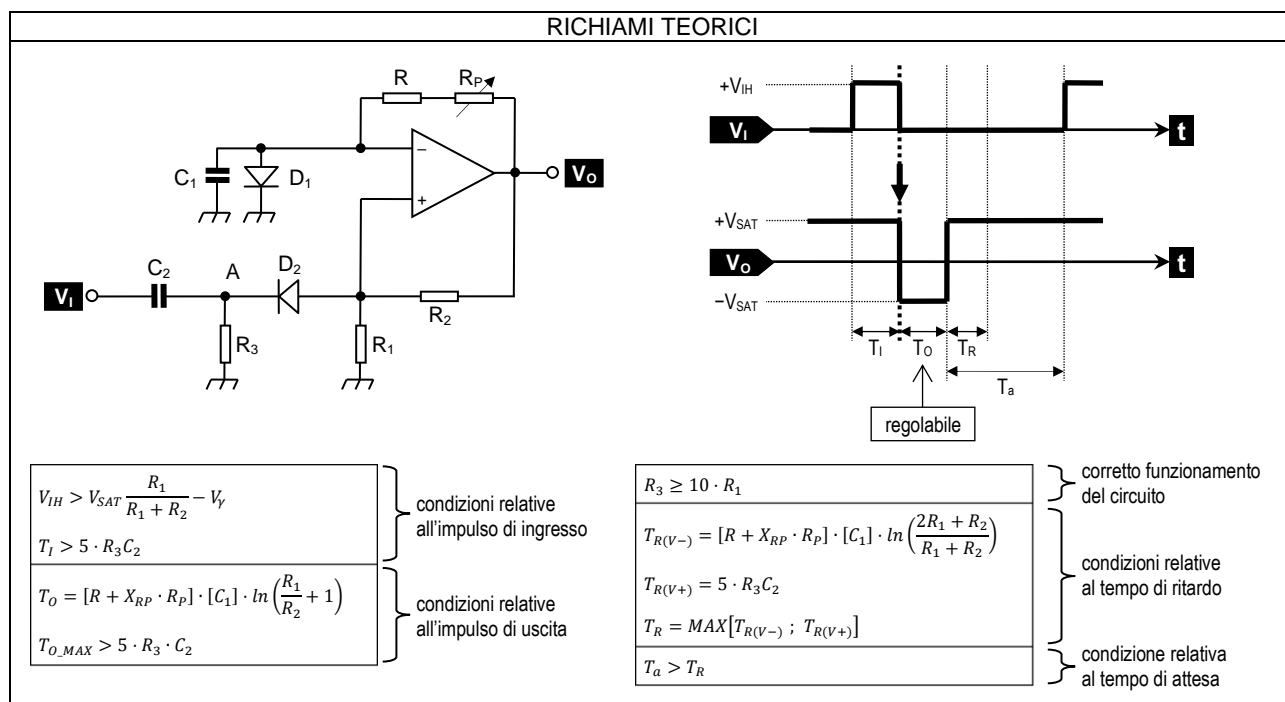
$$\begin{aligned} V_{IH} &= 5,8 \\ T_i &= 15 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Dati impulso di uscita

$$T_o = 10 \cdot 10^{-3}$$

- 1) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ $[V_{CC} = 15 \text{ dato}] \rightarrow V_{SAT} = 12$
- 2) $V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_T$ $\left[\begin{array}{l} V_{IH} = 5,8 \text{ dato} \\ V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 1} \\ V_T = 0,6 \text{ ipotesi} \end{array} \right] \rightarrow \begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_2 > 875 \rightarrow R_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \end{cases}$
- 3) $T_o = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$ $\left[\begin{array}{l} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 2} \\ R_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ calcolo 2} \\ T_o = 10 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \end{array} \right] \rightarrow \begin{cases} C_1 = 500 \cdot 10^{-9} \text{ scelta} \\ R = 28,85 \cdot 10^3 \end{cases}$
- 4) $R_3 \geq 10 \cdot R_1$ $[R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 2}] \rightarrow R_3 \geq 10 \cdot 10^3 \rightarrow R_3 = 10 \cdot 10^3 \text{ scelta}$
- 5) $T_o > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ $\left[\begin{array}{l} T_o = 10 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ R_3 = 10 \cdot 10^3 \text{ calcolo 4} \end{array} \right] \rightarrow C_2 < 200 \cdot 10^{-9} \rightarrow C_2 = 100 \cdot 10^{-9} \text{ scelta}$
- 6) $T_i > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ $\left[\begin{array}{l} T_i = 15 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ R_3 = 10 \cdot 10^3 \text{ calcolo 4} \\ C_2 = 100 \cdot 10^{-9} \text{ calcolo 5} \end{array} \right] \rightarrow 15 \cdot 10^{-3} > 5 \cdot 10^{-3} \text{ OK}$
- 7) $T_{R(V-)} = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right)$ $[dati tutti disponibili] \rightarrow T_{R(V-)} = 5,85 \cdot 10^{-3}$
- 8) $T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ $[dati tutti disponibili] \rightarrow T_{R(V+)} = 5,00 \cdot 10^{-3}$
- 9) $T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}]$ $\left[\begin{array}{l} T_{R(V-)} = 5,85 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 7} \\ T_{R(V+)} = 5,00 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 8} \end{array} \right] \rightarrow T_R = 5,85 \cdot 10^{-3}$
- 10) $T_a > T_R$ $[T_R = 5,85 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 9}] \rightarrow T_a > 5,85 \cdot 10^{-3}$

Esercizio -- Multivibratore monostabile, variante 1 (T_O regolabile)



Problema di analisi

<p>Analizzare il seguente multivibratore monostabile, indicare inoltre l'ampiezza minima dell'impulso di ingresso $V_I(t)$ sufficiente a garantirne l'innescò.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><tr><th style="text-align: left; padding: 2px;"><u>Dati dell'AO</u></th><th style="text-align: left; padding: 2px;"><u>Dati del circuito</u></th></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{CC} = \pm 15$</td><td style="padding: 2px;">$R_1 = 1 \cdot 10^3$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$</td><td style="padding: 2px;">$R_2 = 5 \cdot 10^3$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;"></td><td style="padding: 2px;">$R_3 = 15 \cdot 10^3$</td></tr></table>	<u>Dati dell'AO</u>	<u>Dati del circuito</u>	$V_{CC} = \pm 15$	$R_1 = 1 \cdot 10^3$	$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	$R_2 = 5 \cdot 10^3$		$R_3 = 15 \cdot 10^3$	<table style="width: 100%;"><tr><td style="padding: 2px;">$R = 10 \cdot 10^3$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$R_P = 8 \cdot 10^3$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$X_{RP} = 0,6$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$C_1 = 200 \cdot 10^{-9}$</td></tr><tr><td style="padding: 2px;">$C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$</td></tr></table>	$R = 10 \cdot 10^3$	$R_P = 8 \cdot 10^3$	$X_{RP} = 0,6$	$C_1 = 200 \cdot 10^{-9}$	$C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$
<u>Dati dell'AO</u>	<u>Dati del circuito</u>														
$V_{CC} = \pm 15$	$R_1 = 1 \cdot 10^3$														
$V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$	$R_2 = 5 \cdot 10^3$														
	$R_3 = 15 \cdot 10^3$														
$R = 10 \cdot 10^3$															
$R_P = 8 \cdot 10^3$															
$X_{RP} = 0,6$															
$C_1 = 200 \cdot 10^{-9}$															
$C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$															

- | | | |
|--|--|--|
| 1) $V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC}$ | [$V_{CC} = 15$ dato | → $V_{SAT} = 12$ |
| 2) $V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_Y$ | [$V_{SAT} = 12$ calcolo 1
$R_1 = 1 \cdot 10^3$ dato
$R_2 = 5 \cdot 10^3$ dato
$V_Y = 0,6$ ipotesi | → $V_{IH} > 1,4$
condizione 1 per il sicuro innescò |
| 3) $T_I > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ | [$R_3 = 15 \cdot 10^3$ dato
$C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$ dato | → $T_I > 150 \cdot 10^{-6}$
condizione 2 per il sicuro innescò |
| 4) $T_O = [R + X_{RP} \cdot R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$ | [$R_1 = 1 \cdot 10^3$ dato
$R_2 = 5 \cdot 10^3$ dato
$R = 10 \cdot 10^3$ dato
$R_P = 8 \cdot 10^3$ dato
$X_{RP} = 0,6$ dato
$C_1 = 200 \cdot 10^{-9}$ dato | → $\begin{cases} T_{O_MAX} = 0,65 \cdot 10^{-3} \\ T_O = 0,54 \cdot 10^{-3} \\ T_{O_min} = 0,36 \cdot 10^{-3} \end{cases}$ |
| 5) $T_{O_min} > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ | [$T_{O_min} = 0,36 \cdot 10^{-3}$ calcolo 4
$R_3 = 15 \cdot 10^3$ dato
$C_2 = 2 \cdot 10^{-9}$ dato | → $0,36 \cdot 10^{-3} > 0,15 \cdot 10^{-3}$
corretto funzionamento del circuito: OK |
| 6) $R_3 \geq 10 \cdot R_1$ | [$R_1 = 1 \cdot 10^3$ dato
$R_3 = 15 \cdot 10^3$ dato | → $15 \cdot 10^3 \geq 10 \cdot 10^3$
corretto funzionamento del circuito: OK |
| 7) $T_{R(V-)} = [R + X_{RP} \cdot R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right)$ | [dati tutti disponibili | → $T_{R(V-)} = 0,46 \cdot 10^{-3}$
$T_{R(V-)} = 0,31 \cdot 10^{-3}$ |
| 8) $T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ | [dati tutti disponibili | → $T_{R(V+)} = 0,15 \cdot 10^{-3}$ |

$$9) T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}] \quad \begin{cases} T_{R(V-)} = 0,55 \cdot 10^{-3} & \text{calcolo 7} \\ T_{R(V+)} = 0,15 \cdot 10^{-3} & \text{calcolo 8} \end{cases} \rightarrow T_R = 0,55 \cdot 10^{-3}$$

$$10) T_a > T_R \quad [T_R = 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 9}] \rightarrow T_a > 0,55 \cdot 10^{-3}$$

Problema di sintesi

Progettare un multivibratore monostabile con le seguenti specifiche.

Dati dell'AO

$$\begin{cases} V_{CC} = \pm 15 \\ V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC} \end{cases}$$

Dati impulso di ingresso

$$\begin{cases} V_{IH} = 5,8 \\ T_I = 15 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

Dati impulso di uscita

$$\begin{cases} T_{O_MAX} = 10 \cdot 10^{-3} \\ T_{O_min} = 5 \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

$$1) V_{SAT} = 80\% \text{ di } V_{CC} \quad [V_{CC} = 15 \text{ dato}] \rightarrow V_{SAT} = 12$$

$$2) V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_Y \quad \begin{cases} V_{IH} = 5,8 \text{ dato} \\ V_{SAT} = 12 \text{ calcolo 1} \\ V_Y = 0,6 \text{ ipotesi} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \\ R_2 > 875 \rightarrow R_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta} \end{cases}$$

$$3) T_{O_min} = [R] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) \quad \begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 2} \\ R_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ calcolo 2} \\ T_{O_min} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} C_1 = 500 \cdot 10^{-9} \text{ scelta} \\ R = 14,4 \cdot 10^3 \end{cases}$$

$$4) T_{O_MAX} = [R + R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) \quad \begin{cases} R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 2} \\ R_2 = 1 \cdot 10^3 \text{ calcolo 2} \\ T_{O_MAX} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ R = 14,4 \cdot 10^3 \text{ calcolo 3} \\ C_1 = 500 \cdot 10^{-9} \text{ scelta 3} \end{cases} \rightarrow R_P = 14,4 \cdot 10^3$$

$$5) R_3 \geq 10 \cdot R_1 \quad [R_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ scelta 2}] \rightarrow R_3 \geq 10 \cdot 10^3 \rightarrow R_3 = 10 \cdot 10^3 \text{ scelta}$$

$$6) T_{O_min} > 5 \cdot R_3 \cdot C_2 \quad \begin{cases} T_{O_min} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ R_3 = 10 \cdot 10^3 \text{ calcolo 5} \end{cases} \rightarrow C_2 < 1 \cdot 10^{-6} \rightarrow C_2 = 100 \cdot 10^{-9} \text{ scelta}$$

$$7) T_I > 5 \cdot R_3 \cdot C_2 \quad \begin{cases} T_I = 15 \cdot 10^{-3} \text{ dato} \\ R_3 = 10 \cdot 10^3 \text{ calcolo 5} \\ C_2 = 100 \cdot 10^{-9} \text{ calcolo 6} \end{cases} \rightarrow 15 \cdot 10^{-3} > 5 \cdot 10^{-3} \quad OK$$

$$8) T_{R(V-),MAX} = [R + R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right) \quad [\text{dati tutti disponibili}] \rightarrow T_{R(V-),MAX} = 1,15 \cdot 10^{-3}$$

$$9) T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2 \quad [\text{dati tutti disponibili}] \rightarrow T_{R(V+)} = 5,00 \cdot 10^{-3}$$

$$10) T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}] \quad \begin{cases} T_{R(V-)} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 8} \\ T_{R(V+)} = 5,00 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 9} \end{cases} \rightarrow T_R = 5,00 \cdot 10^{-3}$$

$$11) T_a > T_R \quad [T_R = 5,00 \cdot 10^{-3} \text{ calcolo 10}] \rightarrow T_a > 5,00 \cdot 10^{-3}$$

Dimostrazioni

Dimostrazione 1 (pag.5)

L'equazione della $V_-(t)$ è:

$$V_-(t) = V_{FIN} - (V_{FIN} - V_{IN}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)}.$$

Sostituendo i valori $V_{IN}=V_{+H}$ e $V_{FIN}=-V_{SAT}$ si ottiene:

$$V_-(t) = -V_{SAT} - (-V_{SAT} - V_{+H}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)}.$$

Questa funzione raggiunge il valore $V_-=V_{+L}$ al tempo t che soddisfa l'equazione:

$$V_{+L} = -V_{SAT} - (-V_{SAT} - V_{+H}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)}.$$

Ricordando i valori:

$$\begin{cases} V_{+H} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ V_{+L} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

si ottiene il risultato:

$$T_L = RC \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right).$$

Dimostrazione 2 (pag.5)

L'equazione della $V_-(t)$ è:

$$V_-(t) = V_{FIN} - (V_{FIN} - V_{IN}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)}.$$

Sostituendo i valori $V_{IN}=V_{+L}$ e $V_{FIN}=+V_{SAT}$ si ottiene:

$$V_-(t) = V_{SAT} - (V_{SAT} - V_{+L}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)}.$$

Questa funzione raggiunge il valore $V_-=V_{+H}$ al tempo t che soddisfa l'equazione:

$$V_{+H} = V_{SAT} - (V_{SAT} - V_{+L}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC}\right)}.$$

Ricordando i valori:

$$\begin{cases} V_{+H} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ V_{+L} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

si ottiene il risultato:

$$T_H = RC \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right).$$

Dimostrazione 3 (pag.26)

L'equazione della $V_-(t)$ è:

$$V_-(t) = V_{FIN} - (V_{FIN} - V_{IN}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC_1}\right)}.$$

Sostituendo i valori $V_{IN}=V_Y$ e $V_{FIN}=-V_{SAT}$ si ottiene:

$$V_-(t) = -V_{SAT} - (-V_{SAT} - V_Y) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC_1}\right)}.$$

Questa funzione raggiunge il valore $V_-=V_{+L}$ al tempo t che soddisfa l'equazione:

$$V_{+L} = -V_{SAT} - (-V_{SAT} - V_Y) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC_1}\right)}.$$

Considerando i valori:

$$\begin{cases} V_{+L} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ V_Y = 0 \text{ (condizione semplificativa)} \end{cases}$$

si ottiene il risultato:

$$T_O = RC_1 \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right).$$

Dimostrazione 4 (pag.28)

L'equazione della $V_-(t)$ è:

$$V_-(t) = V_{FIN} - (V_{FIN} - V_{IN}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC_1}\right)}.$$

Sostituendo i valori $V_{IN}=V_{+L}$ e $V_{FIN}=+V_{SAT}$ si ottiene:

$$V_-(t) = +V_{SAT} - (+V_{SAT} - V_{+L}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC_1}\right)}.$$

Questa funzione raggiunge il valore $V_-=V_Y$ al tempo t che soddisfa l'equazione:

$$V_Y = +V_{SAT} - (+V_{SAT} - V_{+L}) \cdot e^{-\left(\frac{t}{RC_1}\right)}.$$

Considerando:

$$\begin{cases} V_{+L} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\ V_Y = 0 \text{ (ipotesi semplificativa)} \end{cases}$$

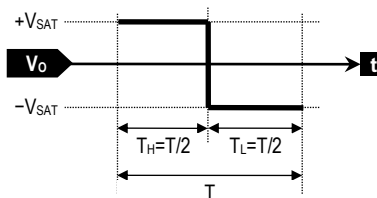
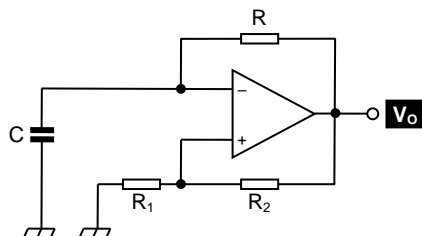
si ottiene il risultato:

$$T_R = RC_1 \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right).$$

Quadri riassuntivi

Multivibratore astabile

Circuito base (onda quadra simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore 0,5)

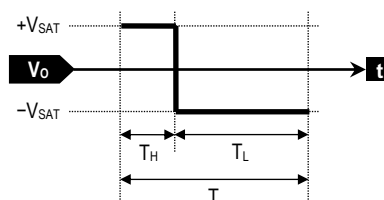
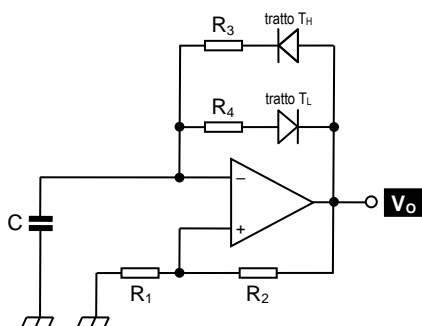


$$T_H = T_L = R \cdot C \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T = T_H + T_L = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$dc = \frac{T_H}{T} = 0,5$$

Variante 1 (onda quadra simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore qualsiasi)



In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

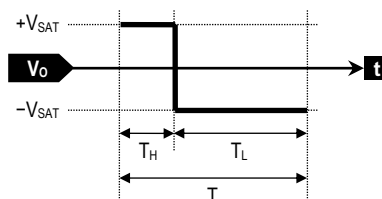
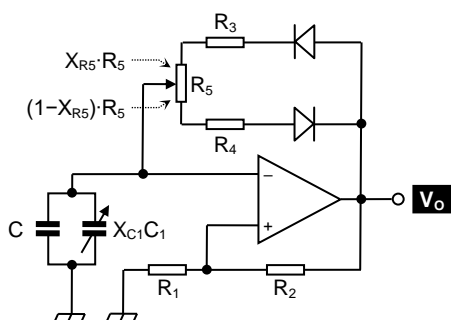
$$T_H = [R_3] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T_L = [R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T = T_H + T_L = [R_3 + R_4] \cdot [C] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Variante 2 (onda quadra simmetrica con: T regolabile, dc regolabile)



In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

$$T_H = [R_3 + X_{R5} \cdot R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T_L = [R_4 + (1 - X_{R5}) \cdot R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

$$T = T_H + T_L = [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1] \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + 1 \right)$$

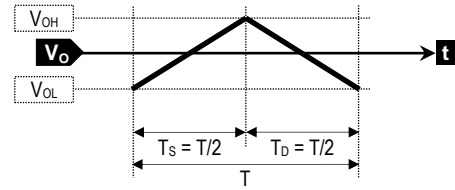
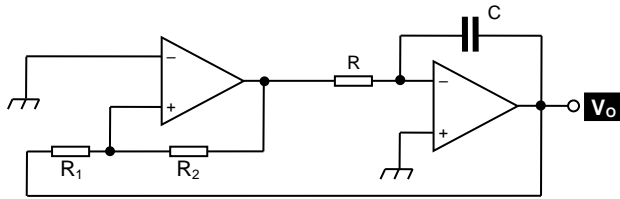
Variando il parametro X_{C1} si varia il periodo T dell'onda.

$$dc = \frac{T_H}{T} = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5}$$

Variando il parametro X_{R5} si varia il duty-cycle dc dell'onda.

Generatore di onda triangolare

Circuito base (onda triangolare simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore 0,5)



$$V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$T_S = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC$$

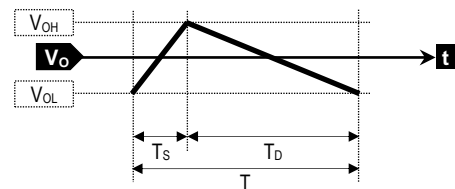
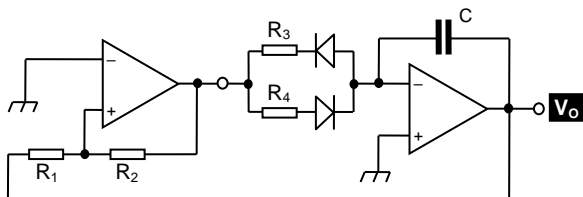
$$T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC$$

$$R_1 < R_2 \text{ (corretto funzionamento)}$$

$$T = T_S + T_D = 4 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot RC$$

$$dc = \frac{T_S}{T} = 0,5$$

Variante 1 (onda triangolare simmetrica con: T fisso, dc fisso di valore qualsiasi)



In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

$$V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$T_S = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3 C$$

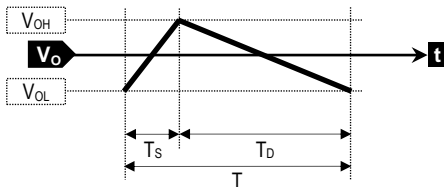
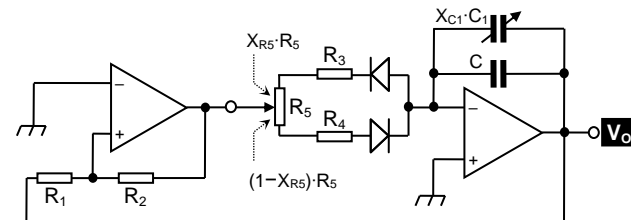
$$T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 C$$

$$R_1 < R_2 \text{ (corretto funzionamento)}$$

$$T = T_S + T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot (R_3 + R_4) \cdot C$$

$$dc = \frac{T_S}{T} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Variante 2 (onda triangolare simmetrica con: T regolabile, dc regolabile)



In questa forma d'onda si è ipotizzato $dc < 0,5$.

$$V_{OH} = +V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_{OL} = -V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

$$T_S = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [X_{R5} \cdot R_5 + R_3] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1]$$

$$T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [(1 - X_{R5}) \cdot R_5 + R_4] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1]$$

$$R_1 < R_2 \text{ (corretto funzionamento)}$$

$$T = T_S + T_D = 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot [R_3 + R_4 + R_5] \cdot [C + X_{C1} \cdot C_1]$$

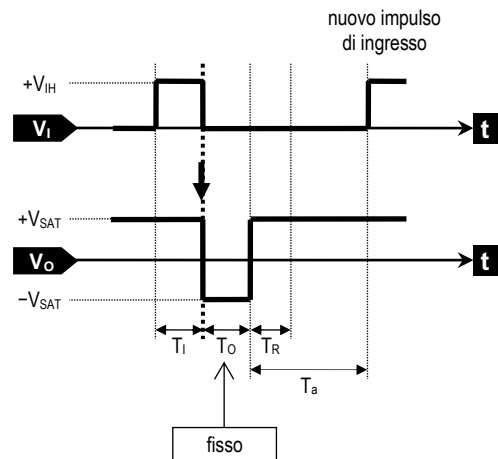
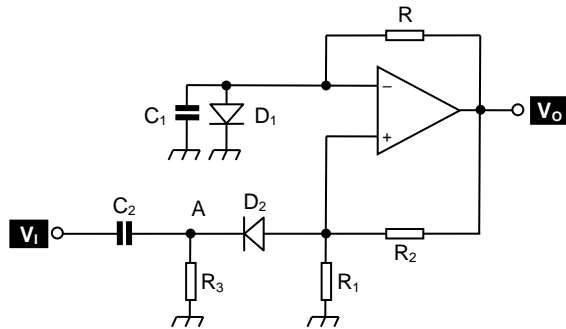
Variando il parametro X_{C1} si varia il periodo dell'onda.

$$dc = \frac{T_S}{T} = \frac{R_3 + X_{R5} \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5}$$

Variando il parametro X_{R5} si varia il duty-cycle dell'onda.

Multivibratore monostabile

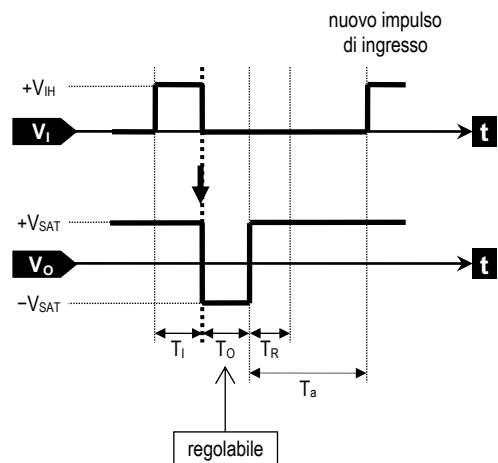
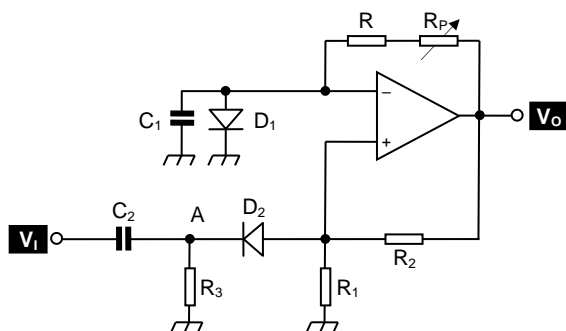
Circuito base (T_O fisso)



$V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_T$ $T_I > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	condizioni relative all'impulso di ingresso
$T_O = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$ $T_O > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	

$R_3 \geq 10 \cdot R_1$	condizioni relative al tempo di ritardo
$T_{R(V-)} = R \cdot C_1 \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right)$ $T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ $T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}]$	
$T_a > T_R$	condizione relativa al tempo di attesa

Variante 1 (T_O regolabile)



$V_{IH} > V_{SAT} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_T$ $T_I > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	condizioni relative all'impulso di ingresso
$T_O = [R + X_{RP} \cdot R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right)$ $T_{O_MAX} > 5 \cdot R_3 \cdot C_2$	

$R_3 \geq 10 \cdot R_1$	condizioni relative al tempo di ritardo
$T_{R(V-)} = [R + X_{RP} \cdot R_P] \cdot [C_1] \cdot \ln\left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2}\right)$ $T_{R(V+)} = 5 \cdot R_3 \cdot C_2$ $T_R = \text{MAX}[T_{R(V-)} ; T_{R(V+)}]$	
$T_a > T_R$	condizione relativa al tempo di attesa