I. T. I. S.

"G. GALILEI" - ALBENGA

Prof. MURGOLO VITO

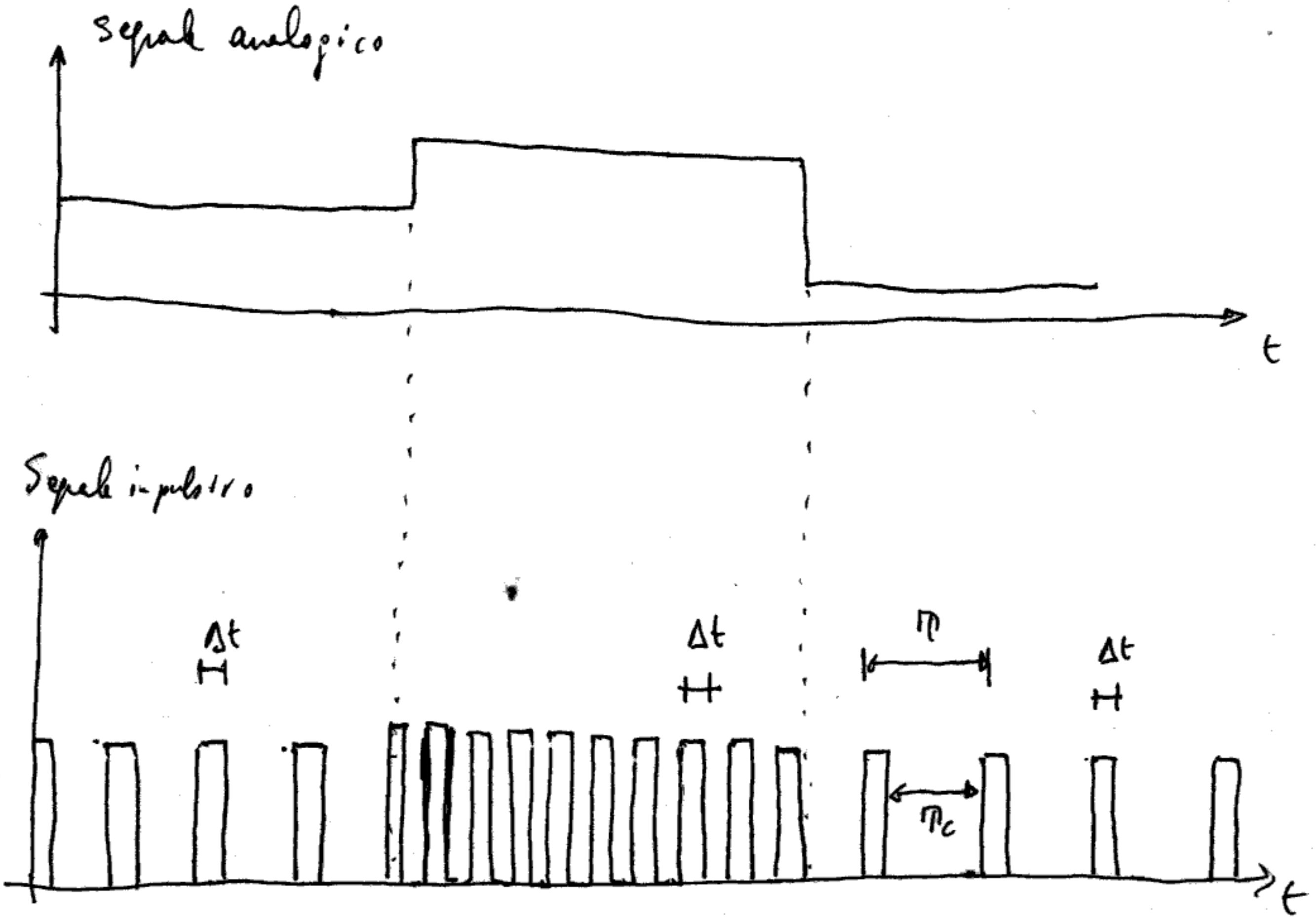
PROF. CIRIO GIOVANNI

CONVERSIONE TENSIONE - FREQUENZA

Un segnale analogico trasmesso lungo una linea, anche di ridotte estensione, può essere degradato a causa di disturbi, di origine anche elettromagnetica, perdendo così parte dell'informazione originaria.

Un metodo per ovviare a tale inconveniente, consiste nella conversione del segnale analogico in uno digitale, la cui frequenza sia strettamente agganciata al valore istantaneo del segnale analogico stesso.

La durata "Ton" del segnale impulsivo, deve essere opportunamente minore del più piccolo periodo previsto.

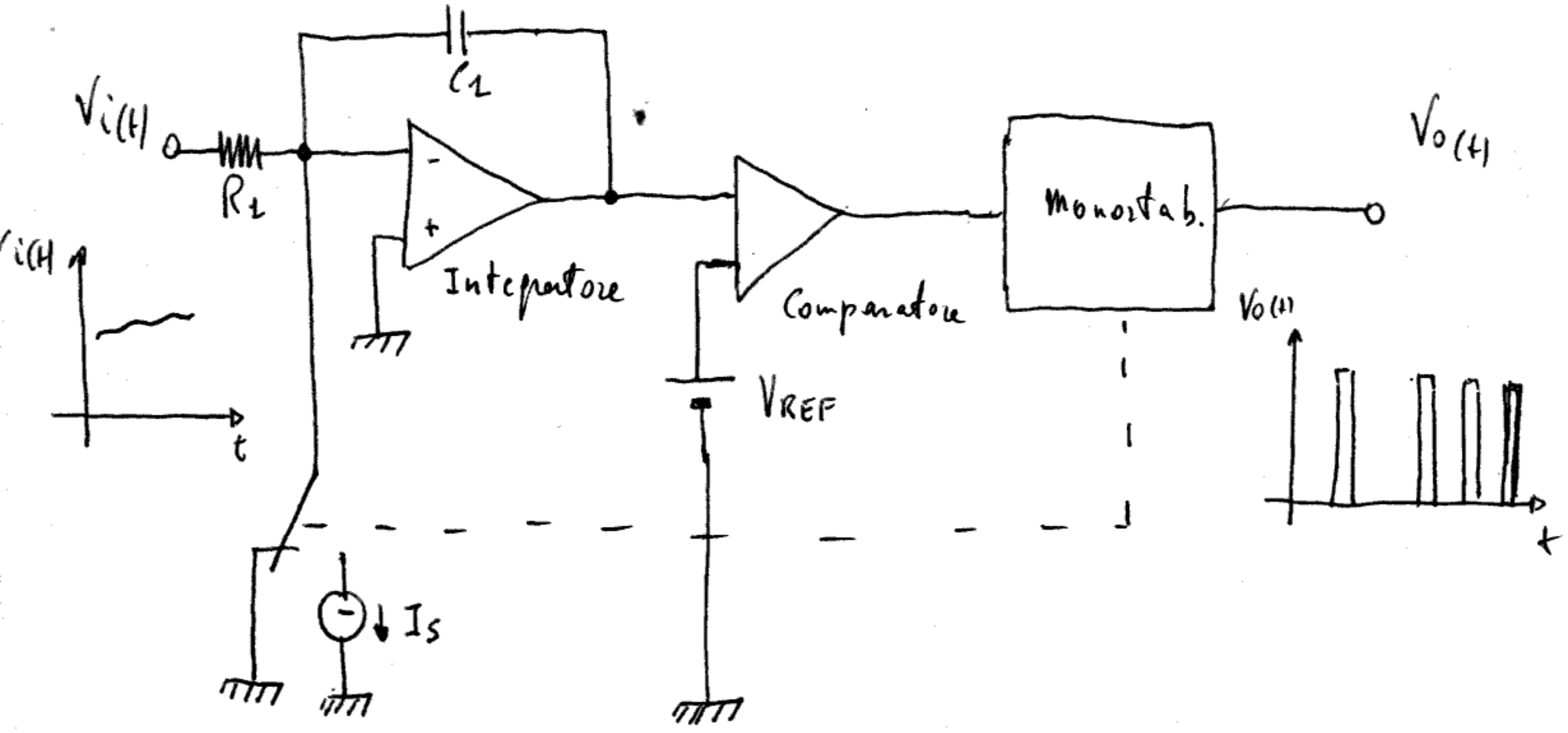


$T_{ON} = \Delta t$ costante

T proporzionale, inversamente, al valore del segnale analogico

T è somma di Tc, variabile, e Δt, costante.

L'obiettivo può essere raggiunto ricorrendo quindi ad un convertitore tensione-frequenza (VCF: Voltage to Frequency Converter), quale quello rappresentato nel seguente schema a blocchi:



Il sistema descritto costituisce una applicazione della tecnica del bilanciamento di carica.

Si compone di:

- un integratore (invertente, costituito con A.O.);
- un comparatore, provvisto di opportuna tensione di riferimento V_{REF};
- un multivibratore monostabile, la cui uscita determina l'azionamento di un generatore di corrente.

Occorre preliminarmente precisare che il segnale analogico di ingresso, $Vi(t)$, deve presentare tempi di variazione molto più ampi del maggiore periodo della corrispondente tensione impulsiva; in tal modo, in corrispondenza degli intervalli di conversione, $Vi(t)$ può essere considerata una grandezza continua.

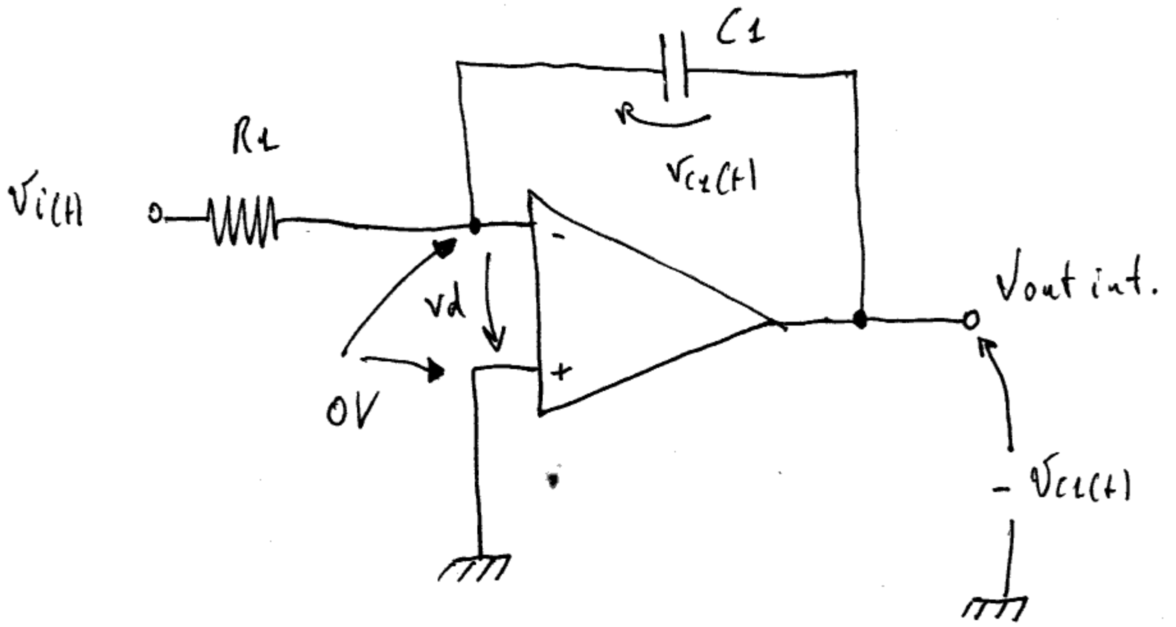
Il sistema è dotato di regolazione attuata mediante retroazione negativa non lineare.

Principio di funzionamento

Il cuore del circuito è costituito da un integratore invertente, realizzato con un amplificatore operazionale.

La connessione invertente presenta una importante caratteristica: nell'ipotesi che la retroazione sia pienamente efficace, per cui la tensione in uscita risulti lontana dal valore della tensione di saturazione, è noto che il potenziale all'ingresso invertente copia quello applicato all'ingresso non invertente. Si parla di CORTO CIRCUITO VIRTUALE. Nel caso in specie, di MASSA VIRTUALE.

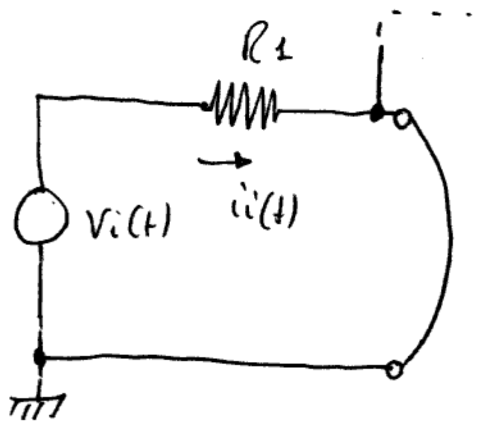
CIRCUITO INTEGRATORE INVERTENTE



$v_d = v_{(+)} - v_{(-)}$

Posto quindi $v_d = 0$, e $v_{(+)} = 0$, allora $v_{(-)} = 0$.

Ciò implica che il circuito in ingresso è costituito dal generatore $v_i(t)$ e dalla resistenza R_1, che ha un capo al potenziale di massa (0V.) virtuale.



La corrente $i_i(t)$ è allora data da:

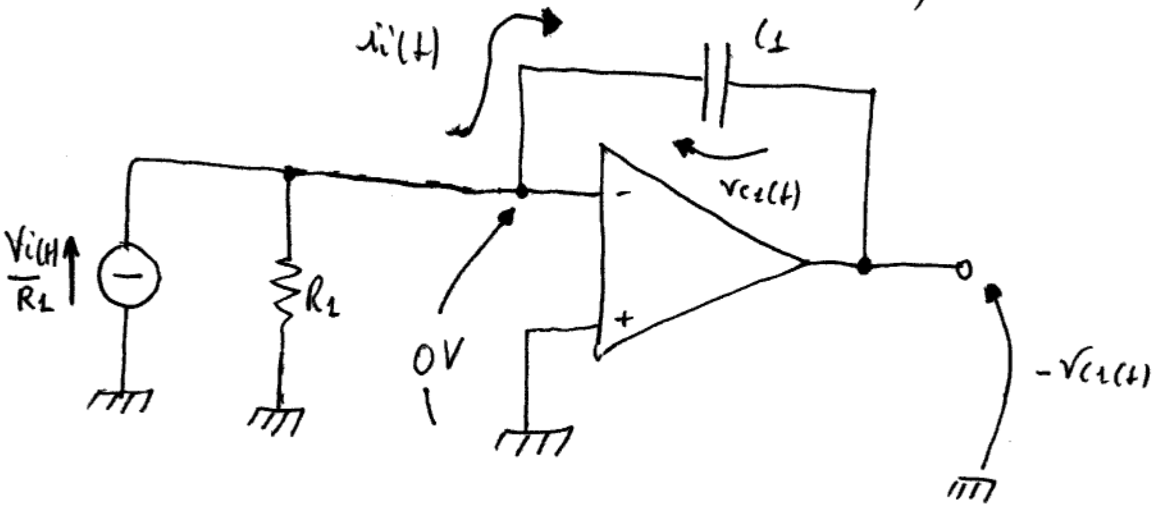
$$\boxed{i_i(t) = \frac{v_i(t)}{R}}$$

Se, come detto, $v_i(t)$ è molto lentamente variabile, si può considerare come tensione continua, quindi $i_i(t)$ è di conseguenza, una corrente continua.

Tale corrente prosegue nel ramo di reazione, connesso tra l'uscita e l'ingresso invertente dell'operazionale.

Si deve osservare che il circuito di ingresso ha convertito la <u>tensione</u> $v_i(t)$, in una <u>corrente</u> $i_i(t) = \frac{V_i(t)}{R_1}$, <u>indipendente</u> dal carico posto nel ramo di reazione: si parla infatti di <u>convertitore</u> <u>tensione - corrente</u>:
risulta conveniente trasformare il generatore di ingresso con NORTON.

Ora, posto che $i_i(t)$ si può considerare <u>costante</u>, e che la stessa viene "forzata" nel condensatore C_1,



si è in grado di predire l'evoluzione della tensione in uscita.

La tensione in uscita é l'opposto della tensione localizzata ai capi del condensatore C_1, $V_{C1(t)}$

La tensione $V_{C1(t)}$ é funzione della carica accumulata,

$$v_{C1(t)} = \frac{1}{C_1} q_{C1(t)} ;$$

ora, la carica é l'integrale della corrente istantanea che interessa il condensatore, per cui:

$$q_{C1(t)} = \int i_{i(t)} dt \quad , \text{ e posto } i_{i(t)} = \frac{V_{i(t)}}{R_1} \quad , \text{ si ha}$$

$$q_{C1(t)} = \int \frac{V_{i(t)}}{R_1} dt \quad , \text{ ed infine}$$

$$V_{C1(t)} = \frac{1}{R_1 C_1} \int v_{i(t)} dt .$$

Se, come detto, $V_{i(t)}$ é di fatto considerabile <u>costante</u>, si ha:

$V_{C1(t)} = \frac{1}{R_1 C_1} V_{i(t)} t + V_0$, che é l'espressione di una rampa crescente.

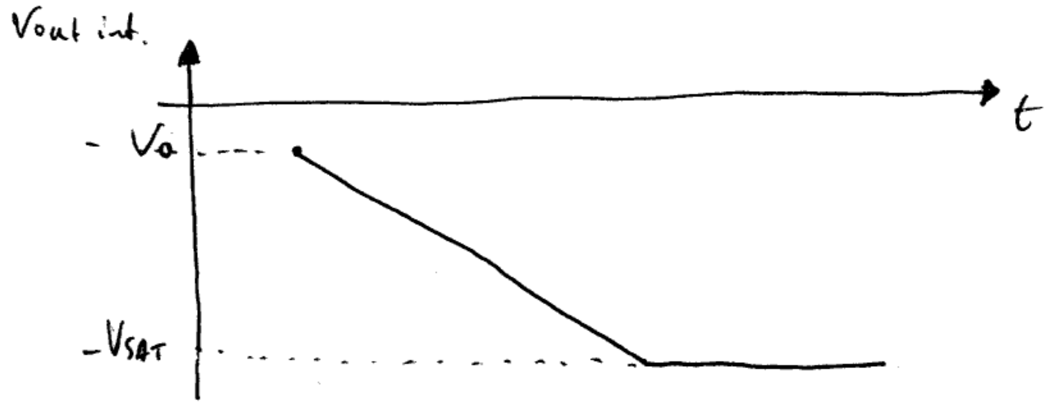
La tensione in uscita é opposta in segno: $V_{out(t)} = -\frac{1}{R_1 C_1} V_{i(t)} t - V_0$

dove V_0 è la tensione iniziale presente ai capi di C_1.

Riassumendo:

$$\boxed{V_{out\,int.} = -V_{C_1}(t) = -\left(\frac{1}{R_1 C_1} V_i(t) + V_0\right)}$$

Se il processo di carica proseguisse indefinitamente, la tensione raggiungerebbe il valore $-V_{SAT}$, ed il processo si arresterebbe e non avrebbe, inoltre, alcuna validità.

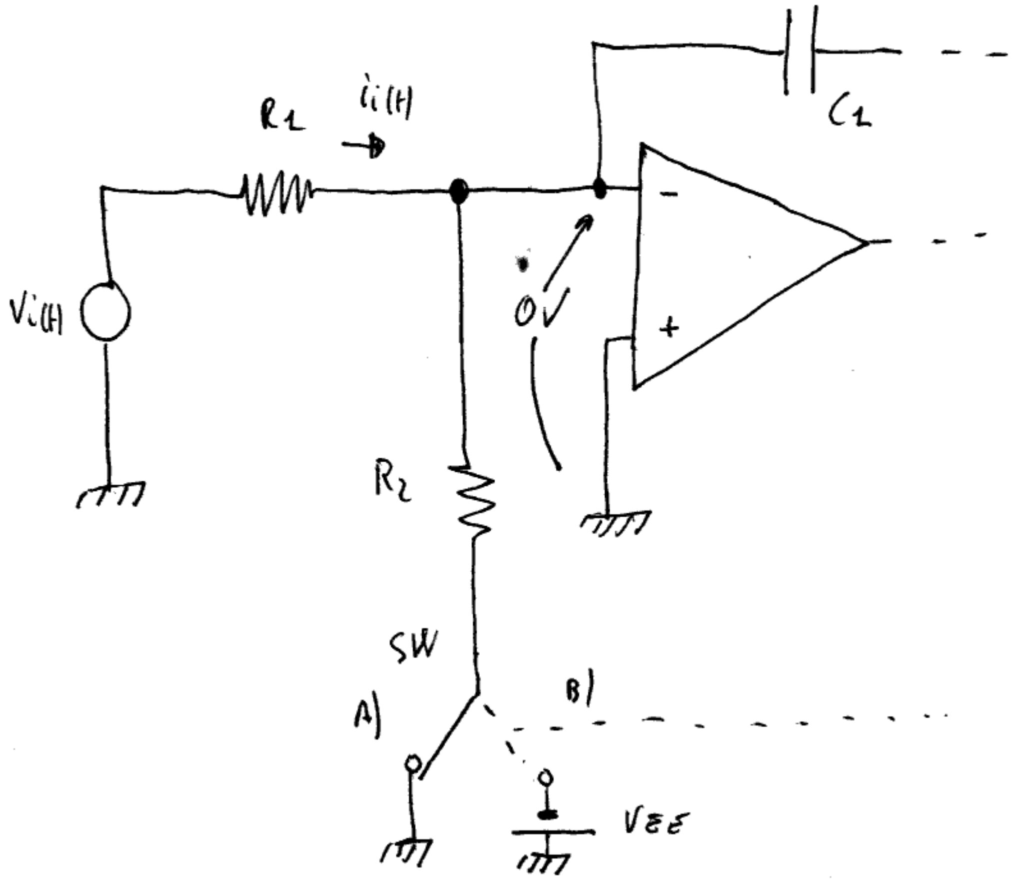


Per ottenere un andamento ciclico, occorre poter ristabilire opportunamente le condizioni iniziali.

Si riconsideri il circuito in figura:

ristabilire le condizioni iniziali, implica che

ad intervalli opportuni, il condensatore venga scaricato.



In riferimento allo schema di principio in figura,

quando il deviatore SW è nella posizione A), si rileva

che la resistenza R2 non è sottoposta ad alcuna differenza

di potenziale, per cui non viene attraversata da alcuna

corrente: infatti, entrambi i capi di R2 sono

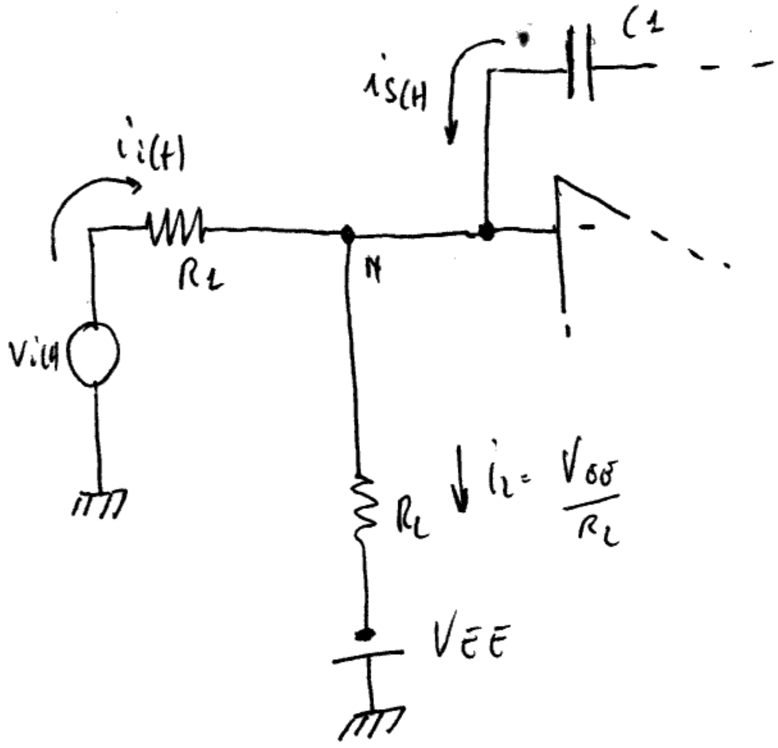
al potenziale 0 Volt.

Viceversa, quando SW è portato nella posizione B)

R_2 viene attraversata dalla corrente

$i_2 = \frac{V_{EE}}{R_2}$, essendo l'altro capo al potenziale di

massa virtuale:

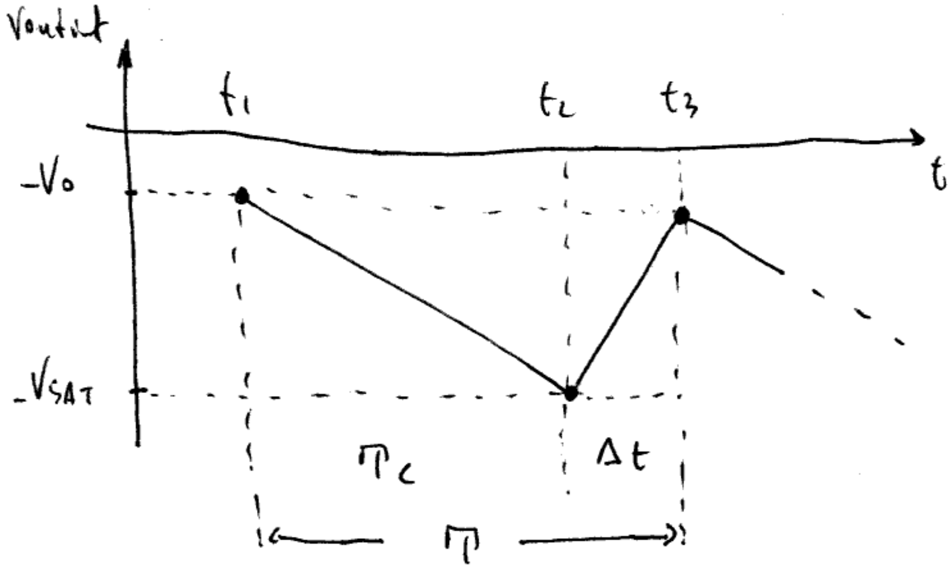


L'equazione al nodo N porge: $+i_i(t) + i_S(t) - i_2 = 0$, per cui

$$i_S(t) = i_2 - i_i(t)$$

$$\boxed{i_S(t) = \frac{V_{EE}}{R_2} - \frac{V_i(t)}{R_1}}$$

Il condensatore si scaricherà se $i_2 > i_i(t)$, così da innescare una rampa positiva (crescente).



Ponendo $V_{i(t)}$ costante, si ha, a regime:

carica $Q_C = i_{C(t)}(t_2 - t_1)$; $t_2 - t_1 = T_C$

scarica $Q_S = i_{S(t)}(t_3 - t_2)$; $t_3 - t_2 = \Delta t$.

Si ha equilibrio, quindi ciclicità del fenomeno, quando si determina l'uguaglianza delle cariche, da cui il nome "bilanciamento di carica".

Il sistema "deviatore - R_2 - V_{DD}", viene realizzato avvalendosi di: un comparatore,

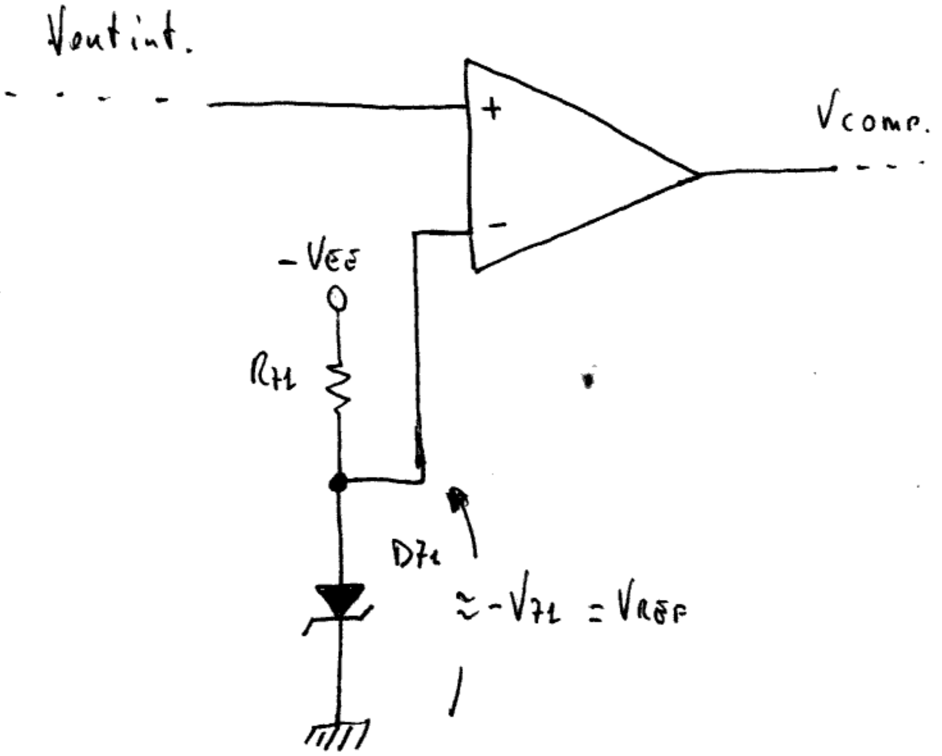
una tensione di riferimento, V_{REF},

un multivibratore monostabile,

e circuiti accessori,

le cui modalità vengono meglio esplicate in appresso.

IL COMPARATORE



Il comparatore deve fornire in uscita un fronte di discesa.

Viene pertanto provocata la commutazione dallo stato "alto" a quello "basso", allorché la tensione in uscita dall'integratore invertente trapassa una corrispondente tensione di riferimento.

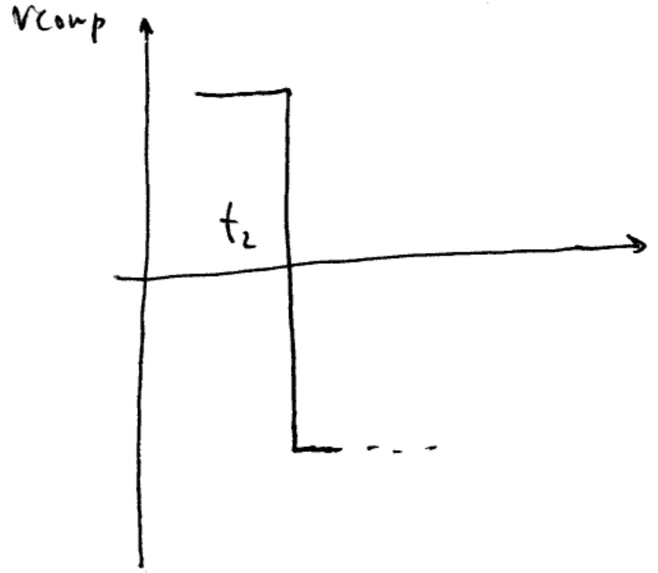
In particolare, si avrà commutazione discendente quando $V_{out\,int}$ diviene più negativa di V_{REF}, ossia

$$V_{out\,int} < -V_{Z1}$$

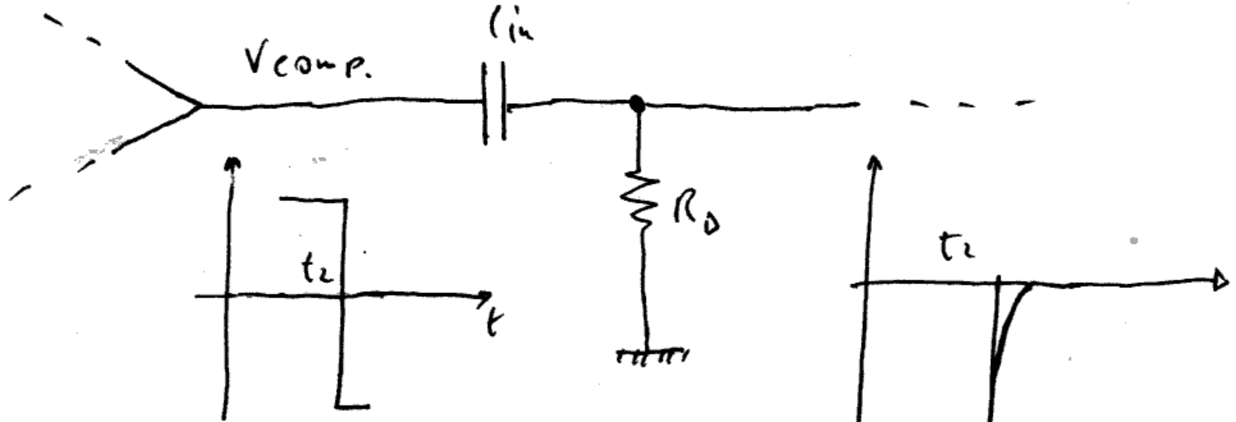
ovvero

$$\boxed{-V_{C2}(t) < -V_{T2}}$$

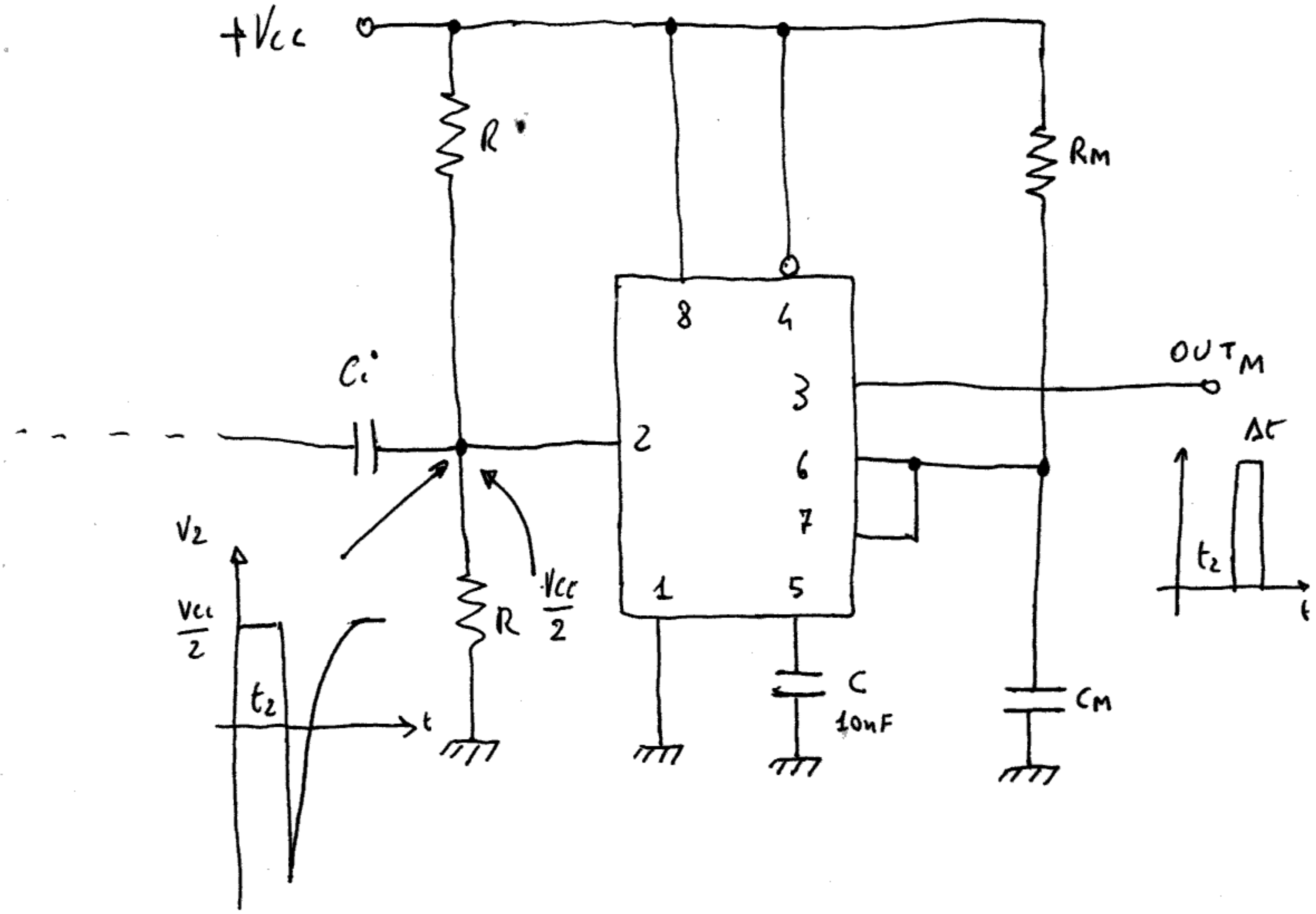
Il punto istante, che chiamiamo t_2, viene quindi provocato un fronte di discesa, che indichiamo genericamente di seguito:



Il fronte di discesa può essere isolato mediante un circuito derivatore, del tipo in figura:



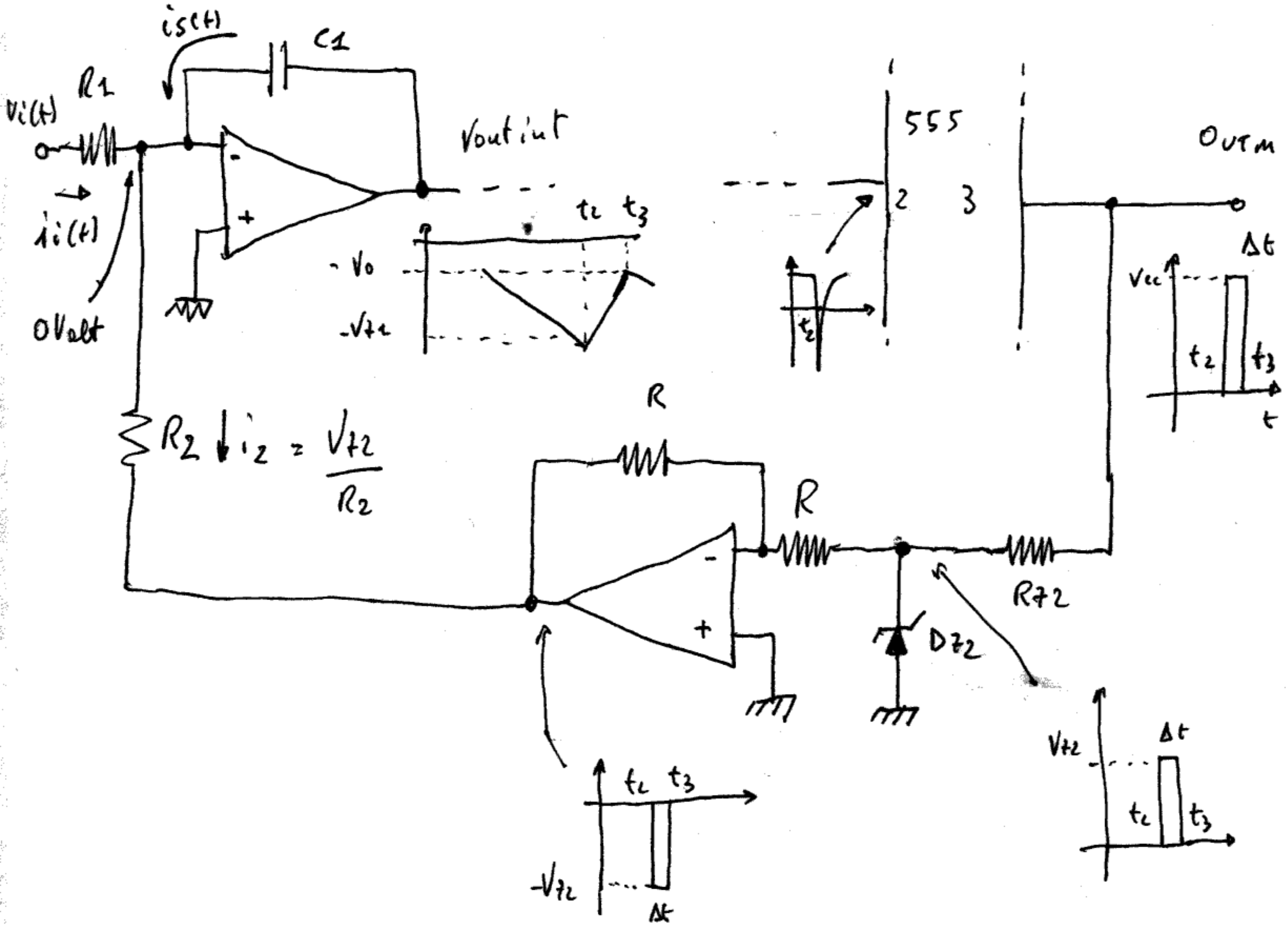
Detto impulso negativo, può essere utilizzato per determinare l'innesco di un multivibratore monostabile, quale quello esposto di seguito, realizzato avvalendosi di un integrato NE 555.



Quando V_2 cala sotto il valore $\frac{V_{cc}}{3}$, si innesca un ciclo per cui in uscita appare un impulso positivo, di ampiezza pari a circa V_{cc}, di durata

$$\boxed{\Delta t \simeq 1{,}1\, R_M C_M}$$

Questo impulso, opportunamente limitato in ampiezza ed invertito in polarità, costituisce insieme ad R_2, il sistema di scarica del condensatore C_1



Riassumendo: all'istante t_2 parte il ciclo del monostabile, per cui viene richiamata la corrente i_2.
Tale corrente scaricherà il condensatore, dedotta la corrente $i_i(t)$.

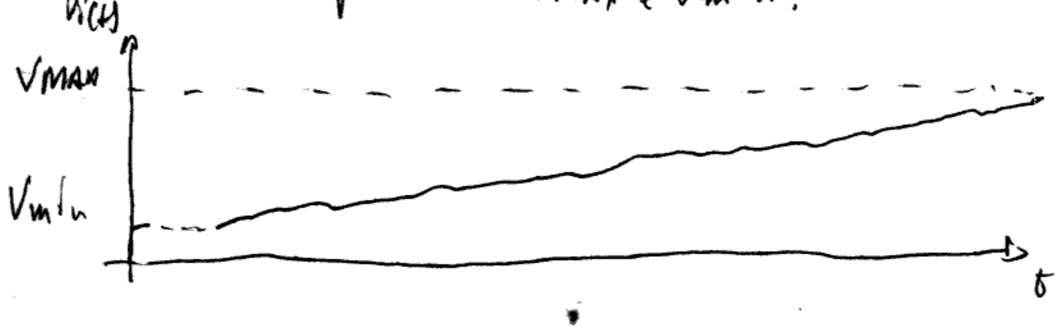
$i_s(t) = i_2 - i_i(t)$

$$\boxed{i_s(t) = \frac{V_{z2}}{R_2} - \frac{V_i(t)}{R_1}}$$

Nel tempo Δt, la tensione V_{C1} tornerà al valore iniziale V_0.

Poniamo ora l'esame il ciclo di funzionamento del sistema.

1) La tensione $V_i(t)$ varia molto lentamente in un campo di valori compreso tra V_{MAX} e V_{min}:



2) A questa tensione $V_i(t)$ si associa un segnale impulsivo, di durata costante Δt, la cui frequenza istantanea è posta in diretta proporzionalità con $V_i(t)$ stessa.

3) Di conseguenza, la frequenza del segnale impulsivo potrà variare da un valore f_{MAX} ad un valore f_{min}: in altri termini, alla variazione $\Delta V_{i(t)} = V_{MAX} - V_{min}$, si associa un campo di variazione della frequenza convertita, $\Delta f = f_{MAX} - f_{min}$.

Il rapporto $\dfrac{\Delta f}{\Delta V_{i(t)}} = K$, è un parametro caratteristico del convertitore.

4) Alla tensione V_{iMAX} è associata f_{MAX}, quindi $T_{minimo} = T_{min}$

Alla tensione V_{imin} è associata f_{min}, quindi T_{MAX}

5) Come detto, Δt è costante.

Poniamo un esempio, che sarà adottato come criterio di dimensionamento.

Sia V_i variabile tra 1 e 10 Volts; a tale campo si associa quello di variazione della frequenza del segnale impulsivo, e relativo periodo, da 1KHz a 10KHz. Pertanto

$$V_i = 1V \rightarrow f_{min} = 1KHz \rightarrow T_{MAX} = 1ms = 1000\mu s$$

$$V_i = 10V \rightarrow f_{MAX} = 10KHz \rightarrow T_{min} = 0{,}1ms = 100\mu s$$

Δt deve essere minore di T_{min}: si può optare per $\Delta T = \frac{1}{5} T_{min}$

$\Delta t = 20\mu s$.

Δt assume quindi un peso relativo rispetto ai due periodi: quasi trascurabile per $T = T_{MAX}$, affatto trascurabile per $T = T_{min}$.

Siamo ora in grado di procedere all'analisi dei fenomeni di carica e scarica di C_1 ed alla conseguente analisi dei tempi.

Definiamo T_C il tempo di carica del condensatore C_1 e, come noto, Δt il tempo di scarica.

Fase di carica

Ipotizzata una tensione iniziale V_0, il condensatore C_1 viene caricato nel tempo T_c dalla corrente $\frac{V_i(t)}{R_1}$, costante; il processo di carica si arresta allorché $V_{C1}(t) = V_{Z1}$.

Allora, la variazione di carica ΔQ_{CC} è

$$\boxed{\Delta Q_{CC} = \frac{V_i(t)}{R_1} \cdot T_c}$$

. Il fenomeno di carica dura da t_1 a t_2, $t_2 - t_1 = T_c$

La tensione evolve secondo la relazione:

$$V_{C1}(t) = V_0 + \frac{1}{C_1}\frac{V_i(t)}{R_1} t$$

, per cui, in $t = t_2$, $V_{C1}(t_2) = V_{Z1}$

$$V_{C1}(t_2) = \boxed{V_{Z1} = V_0 + \frac{1}{C_1}\frac{V_i(t)}{R_1} T_c} \quad (1)$$

Fase di scarica.

Dall'istante t_2 a quello t_3, dove $\Delta t = t_3 - t_2 =$ costante, il condensatore è sottoposto a scarica dalla corrente i_{sc}.

$i_{sc} = \frac{V_{Z2}}{R_2} - \frac{V_i(t)}{R_1}$; allora $\boxed{\Delta Q_{cs} = \left(\frac{V_{Z2}}{R_2} - \frac{V_i(t)}{R_1}\right)\Delta t}$

L'evoluzione della tensione V_{C1} parte quindi da V_{Z1} e termina a V_0.

$$V_{C1}(t) = V_{Z1} - \frac{1}{C_1}\left(\frac{V_{Z2}}{R_2} - \frac{V_i(t)}{R_1}\right)t \text{ , da } t_2 \text{ a } t_3$$

$$V_{C1}(t_3) = \boxed{V_0 = V_{Z1} - \frac{1}{C_1}\left(\frac{V_{Z2}}{R_2} - \frac{V_i(t)}{R_1}\right)\Delta t} \quad (2)$$

Riassumendo si ha:

$$\Delta Q_{c\,carica} = \frac{V_{i(t)}\,T_c}{R1}$$

$$V_{C1(t)} = V_0 + \frac{1}{C1}\,\frac{V_{i(t)}}{R1}\,t \,, \qquad \text{da } t_1 \text{ a } t_2,\ t_2 - t_1 = T_c$$

$$\boxed{V_{T1} = V_0 + \frac{1}{C1}\,\frac{V_{i(t)}}{R1}\,T_c} \quad (1)$$

$$\Delta Q_{SCARICA} = \left(\frac{V_{T2}}{R2} - \frac{V_{i(t)}}{R1}\right)\Delta t$$

$$v_{C1(t)} = V_{T1} - \frac{1}{C1}\left(\frac{V_{T2}}{R2} - \frac{V_{i(t)}}{R1}\right)t\,, \quad \text{da } t_2 \text{ a } t_3,\ t_3 - t_2 = \Delta t$$

$$\boxed{V_0 = V_{T1} - \frac{1}{C1}\left(\frac{V_{T2}}{R2} - \frac{V_{i(t)}}{R1}\right)\Delta t} \quad (2)$$

Sostituendo la (2) nella (1), si ha,

$$V_{T1} = V_{T1} - \frac{1}{C1}\left(\frac{V_{T2}}{R2} - \frac{V_{i(t)}}{R1}\right)\Delta t + \frac{1}{C1}\,\frac{V_{i(t)}}{R1}\,T_c$$

da cui

$$\frac{V_{z2}}{R_2 C_1}\Delta t = \frac{V_i(t)}{R_1 C_1}(T_c + \Delta t) \quad \text{ed ancora}$$

$$\frac{V_{z2}}{R_2}\Delta t = \frac{V_i(t)}{R_1}(T_c + \Delta t)$$

ma $T_c + \Delta t = T = \frac{1}{f}$, generalmente, per cui

$$T = (T_c + \Delta t) = \frac{R_1}{R_2}\frac{V_{z2}}{V_i(t)}\Delta t \quad \text{ed infine}$$

f = frequenza del segnale impulsivo associato alla tensione istantanea $V_i(t)$, cioè $f = \frac{1}{T_c + \Delta t}$

$$\boxed{f = \frac{1}{\Delta t}\frac{R_2}{R_1}\frac{V_i(t)}{V_{z2}}}$$

Posto che $R_1, R_2, V_{z2}, \Delta t$ sono costanti, si evidenzia la <u>dipendenza lineare</u> di f da $V_i(t)$

$$\boxed{\frac{R_2}{R_1} = f\Delta t\frac{V_{z2}}{V_i(t)}}$$

Allora $\frac{R2}{R1} = f\ \frac{V_{r2}}{V_i(t)}$

Dimensionamento

a) I riferimenti di tensione vengono realizzati impiegando due diodi zener di tensione pari a 8,2 V. Le resistenze di limitazione possono essere 560 - 680 Ω.

b) La durata dell'impulso del monostabile deve essere un quinto del periodo minimo della tensione impulsiva.

Si è posto $V_{iMAX} = 10V$, $f_{MAX} = 10KHz$, $T_{min} = 100\mu s$

Allora, $\Delta t = \frac{100\mu s}{5} = 20\mu s$.

Ciò si può ottenere ponendo $C_M = 10nF$

$R_M = 1,8K$

c) La polarizzazione dell'ingresso di TRIGGER del 555 viene posta a $\frac{V_{cc}}{2} > \frac{V_{cc}}{3}$, mediante due resistenze di pari valore, $R = 10K\Omega$.

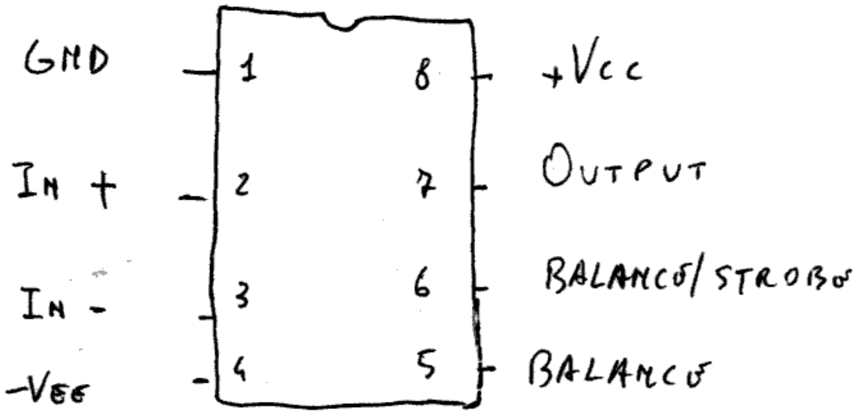
Il condensatore C_i deve essere tale da consentire la trasmissione del fronte di discesa proveniente dal comparatore

Si può porre $C_i = 1nF$

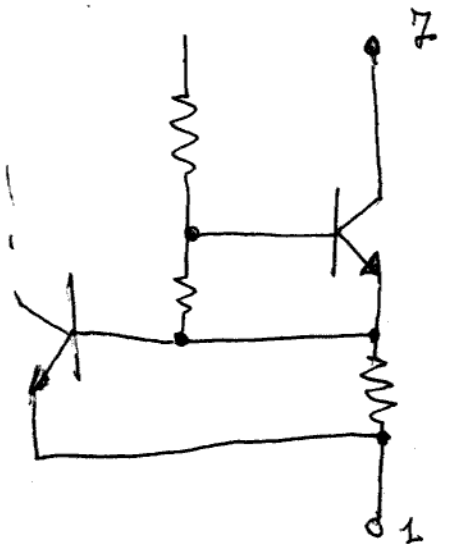
Allora, $\tau_i = 1nF \cdot 5K = 5\mu s \ll \Delta t$.

d) Il comparatore utilizzato appartiene alla famiglia LM 111 - 311.

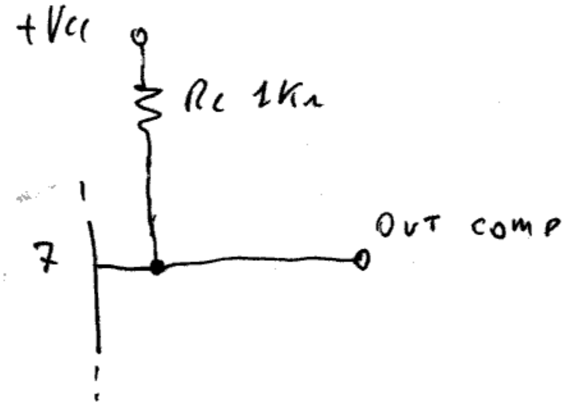
PIN OUT



Lo schema dell'integrato evidenzia che l'uscita è del tipo OPEN-COLLECTOR:



Se si desidera operare con la logica degli A.O., per il che a $Vd > 0$ l'uscita è positiva, si pone una resistenza di carico R_C del valore di $1K\Omega$ tra la sorgente di alimentazione positiva $+V_{CC}$ ed il terminale 7, uscendo dal medesimo.



e) Resistenze R_1, R_2.

Si è già osservato che $$\frac{R_2}{R_1} = f \, \Delta t \, \frac{V_{Z2}}{V_i(t)}$$

La relazione $K = \dfrac{\Delta f}{\Delta V_i(t)}$, costante di proporzionalità

tra f e $V_i(t)$, fornisce la relazione

$$f = K \, V_i(t)$$, nel campo previsto.

Ora, si è già ricavato che

$$f = \frac{1}{\Delta t} \, \frac{R_2}{R_1} \, \frac{V_i(t)}{V_{Z2}}$$, per cui

$$\boxed{\frac{\Delta f}{\Delta V_i(t)} = K = \frac{1}{\Delta t} \, \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{V_{Z2}}}$$, costante, come deve essere.

allora

$$\boxed{\frac{R_2}{R_1} = K \, V_{Z2} \, \Delta t}$$

quindi

$$R_2 = R_1 \, K \, V_{Z2} \, \Delta t$$

ANALISI di V_0

Dalla relazione (1), si esplicita V_0

$$V_0 = V_{Z1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_i(t) \, T_C$$

Ora, $T_C = T - \Delta t = \frac{1}{K V_{i(t)}} - \Delta t$

T_C non è linearmente dipendente da $V_i(t)$

Ciò comporta che V_0 non è costante

per gli estremi del campo di variazione di $V_i(t)$.

In particolare, se $V_{i(t)}$ diminuisce, V_0 aumenta,

e viceversa.

Si può porre $V_0 = 0$ in corrispondenza di

$$V_{i(t)} = V_{MAX}$$

Allora, la relazione (1) diviene

$$0 = V_{t1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_i(t)\, T_c \quad \text{, da cui}$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1} \frac{1}{V_{t1}} V_{iMAX} T_{cmin}$$

Per: $V_{iMAX} = 10V$, $T_{cmin} = 80\mu s$

$V_{t1} = 8{,}2V$ e ponendo $C_1 = 10nF$,

si ha:

$$R_1 = \frac{10 \cdot 80\mu s}{8{,}2V \cdot 10nF} = \frac{80}{8{,}2} K\Omega = 9{,}756 K\Omega \quad (10K\Omega, \text{v.c.})$$

$$R_2 = R_1 \, K \, V_{Z2} \, \Delta t$$

$$= 9{,}756K \cdot \frac{1KHz}{V} \cdot 8{,}2V \cdot 20\mu s = 1{,}600K \quad (1{,}64K,$$

2 resistenze da 3,3K in parallelo)