

SOMMARIO

<i>GENERALITÀ SUI CIRCUITI MODULATORI</i>	2
<i>MODULATORE PWM</i>	3
<i>DEMULATORE PWM</i>	4
<i>VCO OSCILLATORE CONTROLLATO IN TENSIONE</i>	4
<i>VCO CON AMPLIFICATORE OVA</i>	6
<i>BIBLIOGRAFIA</i> :	7

PWM - VCO

prof. Cleto Azzani
IPSIA Moretto Brescia

aprile 1994

Generalità sui circuiti Modulatori

Un circuito modulatore è un circuito elettronico in grado di modificare in modo continuo e in funzione dell'ampiezza di un segnale elettrico esterno denominato segnale modulante, uno dei parametri che caratterizzano un altro segnale denominato portante. Un modulatore è dotato di due ingressi (ingresso modulante e ingresso portante) ed una uscita (segnale modulato).

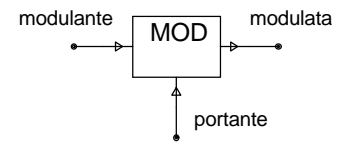


fig. 1 Modulatore generico

A seconda che la portante sia di tipo sinusoidale o impulsivo avremo modulatori per segnali sinusoidali e modulatori per segnali rettangolari o impulsivi.

Un *segnale sinusoidale* è caratterizzato da tre parametri: l'ampiezza, la frequenza e la fase pertanto avremo tre tipi di circuiti modulatori (modulatore di ampiezza AM, modulatore di frequenza FM, modulatore di fase).

Un *segnale di tipo impulsivo* (onda rettangolare) è caratterizzato dall'ampiezza, dal periodo (legato alla frequenza), dalla durata a livello alto (legata al duty-cycle) e dalla posizione assunta dal fronte di salita (o di discesa) entro il periodo T . Ne consegue che avremo modulatori PAM (Pulse Amplitude Modulation / Modulazione impulsiva di ampiezza), modulatori PFM (Pulse Frequency Modulation/ Modulazione impulsiva di frequenza), modulatori PWM (Pulse Width Modulation/ Modulazione impulsiva di durata) e modulatori PPM (Pulse Position Modulation/ Modulazione impulsiva di posizione).

I circuiti modulatori sono principalmente utilizzati nel campo del trattamento e della trasmissione a distanza dell'informazione (trasmissioni radiotelevisive, trasmissione dati, telemisure e telecontrolli) ma anche in sistemi di controllo industriali.

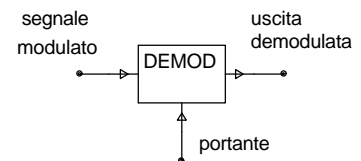


fig. 2 Demodulatore sincrono

A valle di una catena di trasmissione dell'informazione è necessario recuperare dal segnale modulato l'informazione introdotta dai circuiti modulatori; si parlerà allora di processo di demodulazione o di rivelazione. Si possono avere demodulatori sincroni qualora si richieda la presenza della portante per attuare il processo di demodulazione (fig. 2) e demodulatori asincroni qualora la portante non sia necessaria (fig. 3).

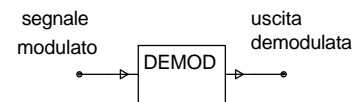


fig. 3 Demodulatore asincrono

Nel caso quindi di portanti sinusoidali modulate avremo, ad esempio demodulatori AM, FM. In caso di portanti impulsive avremo demodulatori PAM, PFM, PWM, PPM, delta, PCM.

Modulatore PWM

Il circuito modulatore PWM (Pulse Width Modulator / Modulatore a durata di impulsi) è strutturalmente costituito da un amplificatore operazionale funzionante ad anello aperto da circuito comparatore senza isteresi. All'ingresso non invertente viene applicato il segnale V_e lentamente variabile nel tempo denominato segnale modulante, all'ingresso invertente viene applicato un segnale V_g di forma d'onda triangolare denominato portante (vedi fig. 4).

È importante sottolineare che la frequenza del segnale V_g deve risultare molto maggiore della frequenza del segnale V_e per poter considerare, sia pure in prima approssimazione, V_e costante durante un periodo completo del segnale V_g .

Ciò premesso si consideri il grafico riportato in fig. 5

La fem del generatore V_g nell'intervallo $0 < t < T/2$ può essere espressa dalla relazione matematica:

$$v_g(t) = \frac{4 \cdot E \cdot t}{T} - E \quad 1.1$$

Nell'intervallo $0 < t < t_1$ V_e risulta maggiore di V_g pertanto in uscita all'operazionale avremo il livello massimo di saturazione positiva E , nell'intervallo $t_1 < t < t_2$ V_e risulta minore di V_g pertanto in uscita all'operazionale avremo il livello massimo di saturazione negativo V_{ee} . Si noti inoltre che il periodo del segnale d'uscita coincide con quello del segnale V_g . Imponendo nella 1.1 all'istante $t=t_1$ l'eguaglianza :

$$v_g(t_1) = V_e \quad 1.2$$

si ricava immediatamente :

$$t_1 = \frac{T(E + V_e)}{4E} \quad 1.3$$

osservando dal grafico che, per la simmetria della forma d'onda, risulta $T_1 = 2 t_1$ si ottiene :

$$T_1 = \frac{T(E + V_e)}{2E} = \frac{T}{2} + \frac{T}{2E} V_e \quad 1.4$$

da cui risulta quanto segue :

$$\begin{aligned} \text{se } V_e = 0 &\rightarrow T_1 = T_0 = T/2 \\ \text{se } V_e > 0 &\rightarrow T_1 > T/2 \quad T_0 < T/2 \\ \text{se } V_e < 0 &\rightarrow T_1 < T/2 \quad T_0 > T/2 \end{aligned} \quad 1.5$$

È possibile quindi affermare che l'informazione contenuta nell'ampiezza del segnale V_e viene trasformata in una equivalente informazione contenuta nella durata T_1 (a livello logico alto) del segnale V_u presente in uscita al circuito di fig. 1. La relazione 1.4 rappresenta il legame matematico esistente fra durata a livello alto del segnale V_u e ampiezza del segnale V_e .

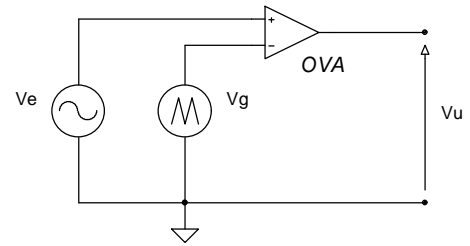


fig.4 Schema di principio di un modulatore PWM

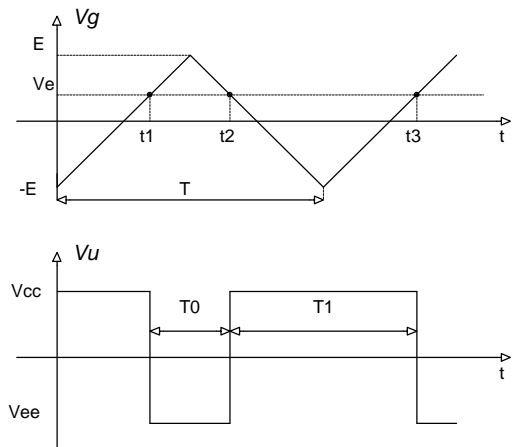


fig. 5 forme d'onda relative ad ingresso ed uscita

Demodulatore PWM

Il più semplice circuito che da un segnale modulato PWM estrae l'informazione in essa contenuta è rappresentato da un filtro Passa Basso (LPF) che in opportune condizioni restituisce in uscita il valore medio del segnale di ingresso V_e . Dalla relazione 1.4 che ci fornisce l'espressione dell'intervallo di tempo T_1 (modulatore PWM) è possibile ricavare quanto segue :

$$T_0 = T - T_1 = T - \frac{T}{2} - \frac{T}{2E} V_e = \frac{T}{2} - \frac{T}{2E} V_e \quad 1.6$$

ricordando la definizione di valore medio riferito all'onda quadra di fig. 5 si ha:

$$[V_{PWM}]_m = \frac{V_{CC} T_1 + V_{EE} T_0}{T} \quad 1.7$$

essendo inoltre:

$$V_{EE} = -V_{CC} \quad 1.8$$

$$[V_{PWM}]_m = \frac{V_{CC}}{2} \left(1 + \frac{V_e}{E} - 1 + \frac{V_e}{E} \right) = \frac{V_{CC}}{E} \cdot V_e \quad 1.9$$

Si noti come dall'analisi dell'espressione 1.9 si desume che il valore medio del segnale in uscita ad un modulatore PWM è proporzionale al valore di V_e (segnale modulante); la costante di proporzionalità è data dal rapporto fra il valore della tensione di alimentazione V_{CC} dell'OVA (modulatore) e l'ampiezza massima E della portante triangolare.

Il filtro passa basso LPF con costante di tempo opportunamente calcolata svolge le funzioni di demodulatore in quanto il segnale modulato PWM periodico ma non sinusoidale è sviluppabile in serie di Fourier; il valore medio dato dall'espressione 1.9 rappresenta la componente continua A_0 per separare la quale è necessario disporre di un filtro Passa basso capace di eliminare tutte le componenti sinusoidali e cosinusoidali compresa la fondamentale (di frequenza pari alla portante PWM).

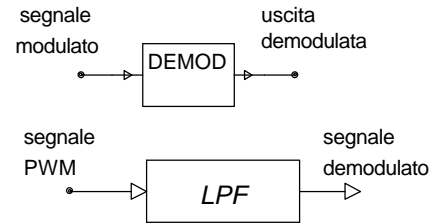


fig. 6 Demodulatore PWM

VCO Oscillatore controllato in tensione

Il termine VCO (Voltage Controlled Oscillator) o VCM (Voltage Controlled Multivibrator) si attribuisce a dispositivi capaci di generare un segnale la cui frequenza è strettamente legata all'ampiezza di una tensione di pilotaggio fornita in ingresso al sistema. Il termine VCM è più appropriato quando il segnale di uscita è di forma d'onda quadra, il termine VCO viene utilizzato negli altri casi. Nel caso di proporzionalità diretta fra ampiezza del segnale in ingresso e frequenza del segnale d'uscita la f.d.t. del VCO ha le dimensioni di Hz/V .

$$K_{VCO} = \frac{f_u}{V_i} \quad [K_{VCO}] = \left[\frac{\text{Hz}}{\text{V}} \right] \quad 1.10$$

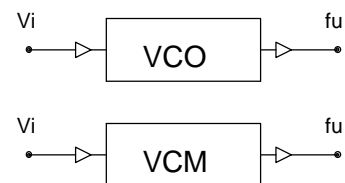


fig. 7 VCO/VCM

Un semplice esempio di VCO è per l'appunto quello presentato in fig. 8. Esso comprende un oscillatore rilassato ad UJT nel quale la capacità C viene caricata a corrente costante consentendo quindi alla tensione V_c di crescere con legge lineare. Il BJT Q2 costituisce il generatore di corrente che pilota il condensatore C ; è un generatore di tipo "source" compensato termicamente contro le variazioni di V_{be} . Il BJT Q1 è un generatore di corrente "sink" che provvede al pilotaggio di Q2. Applicando il secondo principio di Kirchoff alla maglia di ingresso di Q1 è immediato verificare che risulta :

$$I_{C1} \cong I_{E1} = \frac{V_i - V_{BE}}{R_{E1}} \quad 1.11$$

una relazione analoga può essere scritta per la maglia di ingresso del BJT Q2:

$$I_{C2} \cong I_{E2} = \frac{R_{C1} I_{C1}}{R_{E2}} = \frac{V_i - V_{BE}}{R_{E1}} \cdot \frac{R_{C1}}{R_{E2}} \quad 1.12$$

affinchè il circuito funzioni da oscillatore a rilassamento è essenziale che risulti interessato il tratto a resistenza differenziale negativa ossia :

$$I_V < I_{C2} < I_P \quad 1.13$$

Se la condizione 1.13 risulta verificata, l'andamento nel tempo della tensione ai capi del condensatore C (grafico fig. 9) è data dalla relazione:

$$v_c(t) = \frac{I_{C2}}{C} t + V_0 \quad 1.14$$

ove V_0 rappresenta il valore di tensione di regime che è presente ai capi del condensatore prima dell'inizio di un nuovo ciclo di carica (praticamente coincidente con la tensione di valle dell'UJT). Il coefficiente angolare m della retta che esprime la legge di carica è dato da:

$$m = \frac{I_{C2}}{C} = \frac{V_i - V_{BE}}{R_{E1}} \cdot \frac{R_{C1}}{R_{E2} C} \quad 1.15$$

Analizzando l'espressione 1.15 si noti che il coefficiente angolare della retta dipende in primo luogo dal valore dei componenti R_{E1} , R_{E2} , R_{C1} e C e inoltre da V_i . Detto T il tempo impiegato per raggiungere il valore V_p dell'UJT si avrà :

$$v_c(T) = \frac{I_{C2}}{C} T + V_0 = V_p \quad 1.16$$

$$T = \frac{V_p - V_0}{I_{C2}} C \quad 1.17$$

e quindi :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{I_{C2}}{V_p - V_0} \cdot \frac{1}{C} = \frac{V_i - V_{BE}}{R_{E1}} \cdot \frac{R_{C1}}{R_{E2} C} \cdot \frac{1}{V_p - V_0} \cong \frac{V_i}{R_{E1}} \cdot \frac{R_{C1}}{R_{E2} C} \cdot \frac{1}{\eta V_{CC}} \quad 1.18$$

da cui risulta :

$$K_{VCO} = \frac{f_u}{V_i} = \frac{R_{C1}}{R_{E1} R_{E2} C} \cdot \frac{1}{\eta V_{CC}} \quad 1.19$$

L'espressione 1.18 è stata ottenuta operando alcune approssimazioni: in primo luogo si è trascurata V_{be} rispetto a V_i , in secondo luogo si è ritenuta V_0 trascurabile rispetto al valore ηV_{CC} .

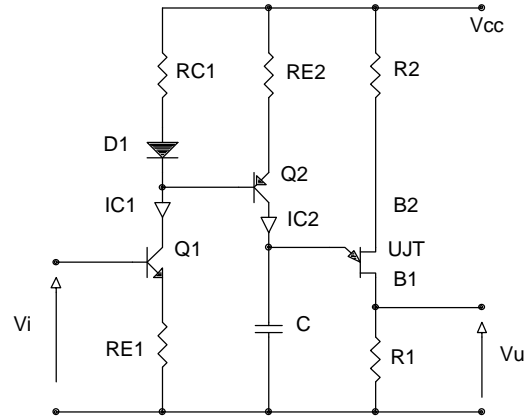


fig. 8 VCO con UJT

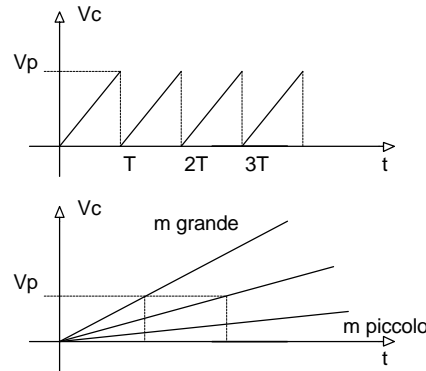


fig. 9 andamento della $V_c(t)$

Un altro esempio di VCO è quello presentato in fig. 10. Esso è

realizzato con amplificatore operazionale, due comparatori

RS.

Supponiamo che il condensatore C

ingresso al circuito venga applicata una tensione positiva e che l'uscita

logico alto (Vcc); la tensione in uscita all'integratore sicuramente

fig. 11); si consideri che D1 risulta interdetto). In questa fase l'ingresso

(Vee) in quanto Vni < Vi e l'ingresso R si trova a livello logico

certo punto la tensione presente in uscita all'integratore raggiunge il

comparatore superiore C1 commuta a livello logico alto;

livello logico basso, il diodo D1 viene polarizzato direttamente ed il condensatore C si scarica rapidamente essendo R2 << R1. La scarica porta il potenziale in uscita all'integratore sempre più vicino a 0V; quando tale

del bistabile passa a livello logico alto (Vcc) il diodo D1 si interdice ed il ciclo si ripete da capo.

L'andamento della tensione in uscita al circuito integratore nell'intervallo di tempo in cui D1 risulta interdetto

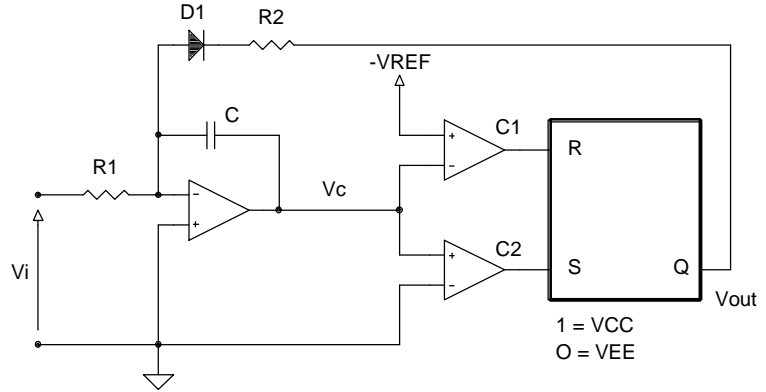


fig. 10 VCO con OVA

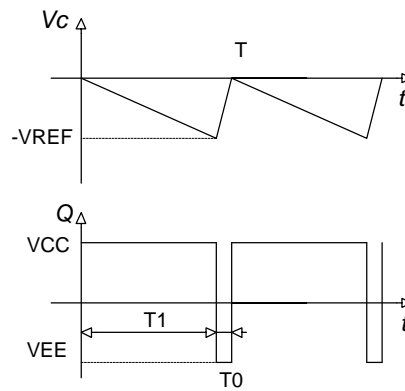


fig. 11 Andamento temporale di Vc e Vout

$$v_c(t) = -\frac{V_i}{R_1 C} t \quad 1.20$$

$$v_c(T_1) = -\frac{V_i}{R_1 C} T_1 = -V_{REF} \quad 1.21$$

$$T_1 = \frac{V_{REF}}{V_i} R_1 C \quad 1.22$$

L'andamento della tensione in uscita al circuito integratore nell'intervallo di tempo in cui D1 risulta conduttore (uscita Q a livello logico basso Vee=-Vcc) è dato dall'espressione:

$$v_c(t) = -\left(\frac{V_i}{R_1 C} - \frac{V_{CC}}{R_2 C}\right) t - V_{REF} \cong \frac{V_{CC}}{R_2 C} t - V_{REF} \quad 1.23$$

$$v_c(T_0) = 0 = \frac{V_{CC}}{R_2 C} T_0 - V_{REF} \quad 1.24$$

$$T_0 = \frac{V_{REF}}{V_{CC}} R_2 C \quad 1.25$$

$$T = T_1 + T_0 = \frac{V_{REF}}{V_i} R_1 C + \frac{V_{REF}}{V_{CC}} R_2 C = V_{REF} C \left(\frac{R_1}{V_i} + \frac{R_2}{V_{CC}} \right) \cong V_{REF} C \frac{R_1}{V_i} \quad 1.26$$

essendo come è noto $R_2 \ll R_1$. Dalla 1.26 si desume infine :

$$f = \frac{1}{T} \cong \frac{V_i}{V_{REF} C R_1} \quad 1.27$$

$$K_{VCO} = \frac{f_u}{V_i} = \frac{1}{V_{REF} C R_1} \quad 1.28$$

Bibliografia :

Cuniberti	Elettronica 2 e 3 vol	Petrini Editore
Azzani Cleto	Transistore UJT	dispense
	Generatori di Corrente	dispense
	Lo sviluppo in serie di Fourier	dispense