

Capitolo 1

Introduzione

I circuiti convertitori che permettono di ottenere il valore efficace di un segnale sono largamente utilizzati in diversi strumenti di misura. Tra tutti in particolare, enunciamo il multimetro digitale. Prima di parlare di tale dispositivo, è bene sottolineare che esso ha un voltmetro digitale alla base del suo funzionamento.

1.1 Il voltmetro digitale

Il voltmetro digitale (DVM Digital Volt Meter), è un misuratore di tensione continua con il quale è possibile anche realizzare delle misurazioni di grandezze alternate. Per fare ciò è necessario anteporre degli appositi circuiti che, trattando la tensione sotto esame, la quale risulta variabile nel tempo, la trasformano in un segnale continuo significativo. Il valore numerico espresso dallo strumento, rappresenta generalmente il valore efficace della grandezza misurata.

I primi voltmetri numerici erano del tipo “a valore medio” con raddrizzatori a doppia semionda attivi. Essi sono migliori dei semplici ponti a diodi perché basati sull’uso di amplificatori operazionali che permettono di ridurre gli errori sistematici causati dal raddrizzamento (soglie dei diodi, non linearità per piccole tensioni ecc ...). Hanno tuttavia il grosso limite di poter essere utilizzati solo con grandezze di tipo sinusoidale.

Oggi quasi tutti i voltmetri numerici misurano il valore efficace di qualsiasi segnale posto al loro ingresso ed è per questo che utilizzano circuiti integrati di conversione a vero valore efficace (TRMS).

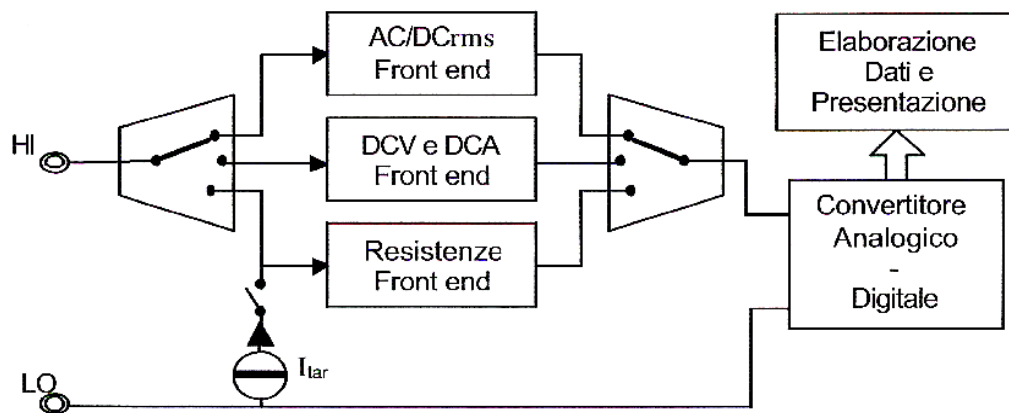
1.2 Il multimetro digitale

L’acronimo inglese che viene utilizzato per identificare il multimetro digitale è DMM (Digital Multi Meter); tale strumento, che ci permette di misurare tensioni, correnti DC, AC e resistenze, deriva da un altro dispositivo: il voltmetro numerico.

Nella figura che segue viene rappresentato un multimetro da laboratorio.



A conferma di quanto detto pocanzi, esso ha alla base del suo funzionamento un voltmetro numerico. Per comprendere meglio come opera questo strumento di misura è opportuno andare ad analizzare il suo schema a blocchi, raffigurato nell'immagine proposta qui di seguito.



Osservando la figura precedente si nota che prima del convertitore analogico-digitale, che ha la funzione di misurare la tensione continua analogica e trasformarla in digitale, sono presenti dei *blocchi*, i quali consentono, oltre alle misure native di tensione, anche misure di corrente, attraverso la misurazione della tensione ai capi di resistori tarati. E di resistenze, iniettando una corrente tarata proprio nel resistore incognito e misurando la tensione ai suoi capi. Gli elementi "Front-end" possiedono tutti quei circuiti analogici che condizionano i segnali derivanti dall'ingresso col fine di realizzare opportune funzioni operative (amplificatori, attenuatori tarati, convertitori a vero valore efficace ...).

1.2.1 Misura di grandezze alternate

Come anticipato precedentemente, per allargare il campo di utilizzo del multimetro digitale a grandezze alternate, è necessario inserire a monte un circuito che converta la tensione variabile nel tempo in un segnale che presenti una componente continua che sarà legata proporzionalmente all'ampiezza del segnale stesso.

La conversione AC/DC viene compiuta da un circuito non lineare che può essere realizzato in diversi modi. E' possibile fare una prima grande classificazione degli strumenti di misura dividendoli in due tipologie distinte: i RMS e i TRMS, acronimi di "root mean square" e "true root mean square" (tradotte in italiano con le seguenti espressioni: "strumento a quasi valore efficace" e "strumento a vero valore efficace").

Capitolo 2

Considerazioni sulle grandezze utilizzate

Prima di procedere con le realizzazioni pratiche, è bene fare delle analisi sulle terminologie e sulle grandezze che verranno adottate.

2.1 Componente continua di un segnale periodico

Dato un segnale $v(t)$ periodico, si definisce componente continua del segnale stesso, la grandezza V_{dc} data dalla relazione:

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt,$$

dove T è il periodo del segnale. Un segnale sinusoidale puro ha componente continua nulla.

2.2 Valore efficace di un segnale periodico

Nella misura di tensioni alternate, si è di solito interessati al valore efficace V_{eff} . Esso è definito come segue:

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}.$$

Gli anglosassoni indicano il valore efficace come “root mean square value” (abbreviato in RMS). Questa espressione è un utile suggerimento per ricordare la scrittura della formula: si comincia con la radice quadrata (root) per poi indicare il valore medio (mean) che, come visto precedentemente, è costituito dall’integrale esteso ad un periodo, diviso per il periodo stesso del segnale elevato al quadrato (square).

Qualsiasi sia la forma d’onda del segnale, il suo valore efficace risulta positivo e viene calcolato semplicemente applicando la formula sopra riportata.

Per un segnale sinusoidale $v(t) = V_p \sin \frac{2\pi}{T} t,$

vale: $V_{eff} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}.$

2.3 Fattore di cresta

Misurare direttamente il “valore efficace” di un segnale non è semplice. Risulta perciò più agevole procedere alla misura in maniera indiretta, attraverso la valutazione di altri parametri stazionari del segnale in esame. Ad esempio si potrebbe cominciare con l’analisi del suo legame con il valore di picco. Il rapporto che sussiste tra esso ed il valore efficace assume il nome di

“fattore di cresta”. Prendendo in considerazione quanto detto pocanzi circa il segnale sinusoidale, possiamo dire che il fattore di cresta è pari a $\sqrt{2}$.

Quest’ultimo muta al variare della forma d’onda del segnale, pertanto è necessario dividere il valore di picco del segnale in esame per il relativo fattore di cresta, al fine di ottenere il vero valore efficace senza commettere errori.

Molti circuiti di conversione dividono automaticamente il valore di picco del segnale trattato per $\sqrt{2}$, qualunque sia la sua forma d’onda; attuano cioè la procedura relativa ad un segnale sinusoidale.

Proprio perché il più delle volte i segnali analizzati risultano apprezzabilmente distorti (ossia non puramente sinusoidali), si sono sviluppati dei circuiti di conversione più elaborati che permettono di ottenere una misura corretta del valore efficace. Si è così fatta una distinzione tra i circuiti che si possono utilizzare correttamente solo se il segnale da misurare è sinusoidale, e quelli utilizzabili con qualunque forma d’onda. Le sigle che vengono adoperate sono rispettivamente RMS e TRMS.

2.4 Valore medio convenzionale di un segnale periodico

Si definisce valore medio convenzionale V_m di un segnale periodico $v(t)$, la componente continua del segnale considerato in valore assoluto, ovvero, se $v(t)$ è periodico di periodo T ,

$$V_m \equiv \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt.$$

Nel caso di un segnale sinusoidale:

$$v(t) = V_p \sin \frac{2\pi}{T} t ,$$

è possibile integrare su un semiperiodo e raddoppiare il valore:

$$V_m = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt = \frac{2 V_p}{\pi} .$$

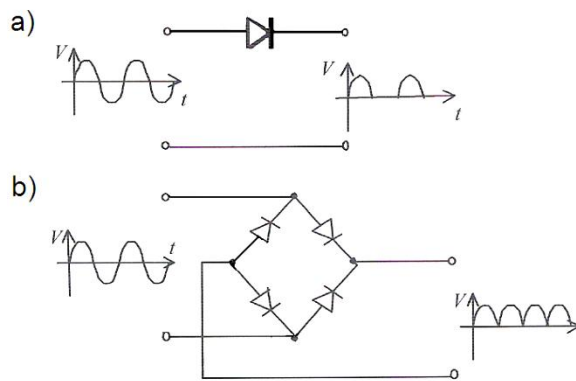
Nota bene: eseguire l’operazione $|v(t)|$ sul segnale $v(t)$ significa raddrizzare il segnale stesso.

Capitolo 3

Convertitori RMS/DC

3.1 Convertitori a valore medio

Questi convertitori fanno uso di raddrizzatori a singola o doppia semionda (ponte di Graëtz). La loro funzione è proprio quella di raddrizzare il segnale inserito al loro ingresso. Gli effetti del raddrizzamento singolo o doppio sono qui sotto illustrati:



a) Raddrizzatore a singola semionda. b) Raddrizzatore a doppia semionda.

Il segnale di cui sopra viene inviato al multimetro digitale, il quale darà un'indicazione della sola componente continua del segnale raddrizzato.

Se il segnale è sinusoidale:

$$v(t) = V_p \sin \frac{2\pi}{T} t ,$$

caso a): il multimetro misura un valore medio convenzionale $V'm$ diverso da quello definito precedentemente in quanto l'operazione $| \cdot |$ (modulo) realizzata sul segnale porta ad una eliminazione della semionda negativa. Il valore misurato dal voltmetro è ricavabile risolvendo il seguente integrale:

$$V'm = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt = \frac{V_p}{\pi} .$$

Il valore $V'm$ è comunque legato al valore efficace della sinusoide dalla relazione:

$$V_{eff} = \frac{V'm \pi}{\sqrt{2}} \cong 2,22 V'm .$$

caso b): lo strumento misura il valore medio convenzionale definito precedentemente e può essere ricavato dall'equazione:

$$V_m = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = \frac{2V_p}{\pi}$$

Esso è legato al valore efficace dalla relazione:

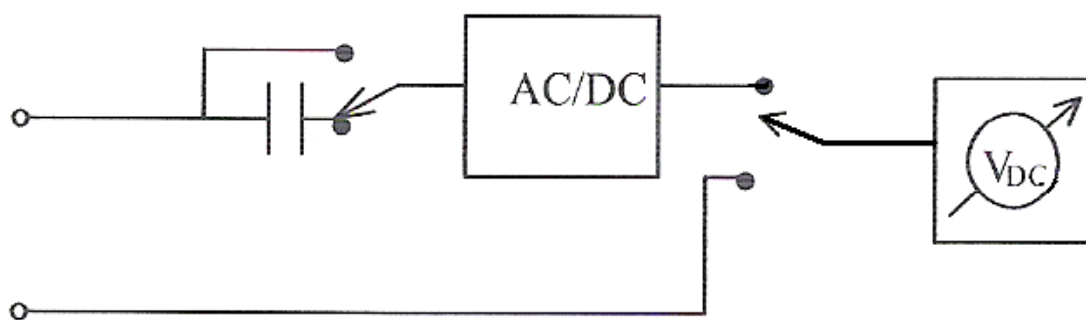
$$V_{eff} = \frac{V_m \pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11 V_m .$$

Normalmente, lo strumento di misura viene impostato in modo tale che l'utente legga sul display direttamente il valore efficace. Il costruttore quindi implementa internamente una funzione tale da moltiplicare il valore medio ottenuto per il fattore 1.11 o 2.22 a seconda che il raddrizzatore di cui si fa uso sia rispettivamente a doppia o a singola semionda (si considera a priori che il segnale misurato sia sinusoidale).

Intuitivamente si capisce che questi tipi di circuiti non possono trattare segnali non sinusoidali. Infatti, se viene inserito un altro tipo di forma d'onda, il valore letto (V_{letto}), non risulterà il vero valore efficace, ma corrisponderà al valore medio convenzionale moltiplicato per uno dei due fattori visti precedentemente. Ciò accade in quanto non valgono più le corrispondenze con lo stesso valore efficace.

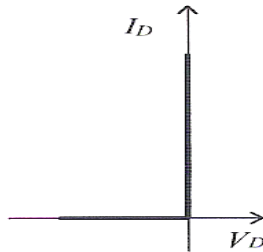
Un ulteriore problema si verifica quando al segnale sinusoidale di ingresso viene sovrapposta una componente continua. In tal caso, il multimetro fornisce una misura priva di ogni validità. Ad esempio, se si considera un segnale composto da una componente alternata di ampiezza A e di una continua di ampiezza maggiore o uguale ad A, questo attraversa il raddrizzatore senza essere modificato in quanto è interamente positivo.

Per fermare la componente continua è possibile inserire nel raddrizzatore un condensatore di blocco a monte e in serie (come viene mostrato nella figura seguente).



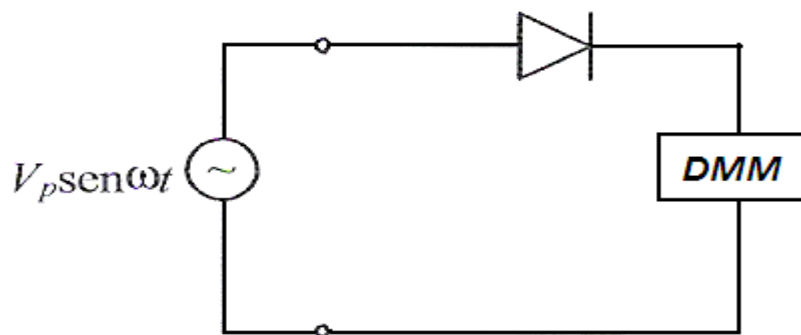
3.1.1 Comportamento reale

Nella trattazione fatta finora si sono considerati i diodi come elementi ideali, contraddistinti cioè dalla caratteristica che segue:

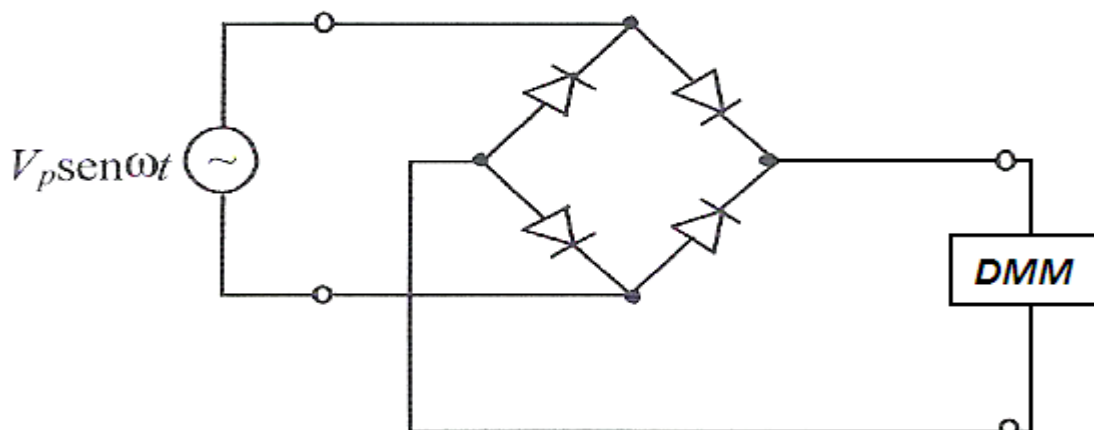


Caratteristica ideale del diodo.

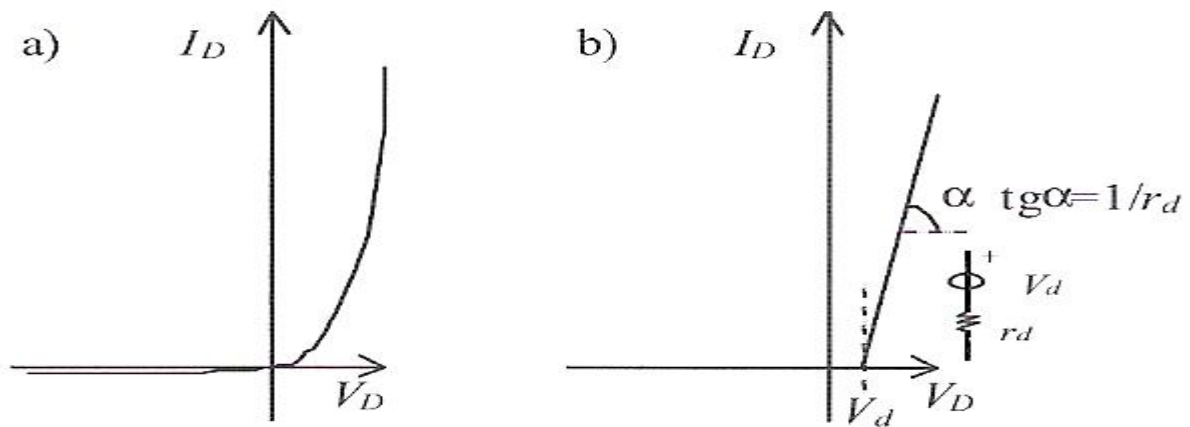
Con la seguente ipotesi, e nel caso si faccia uso del raddrizzatore a singola semionda, la tensione media rilevata sarà pari a V_p/Π .



Nel caso in cui si preveda l'uso di un raddrizzatore a doppia semionda, la tensione media risulterà essere pari a $2V_p/\Pi$.



È noto che la caratteristica reale del diodo è di tipo esponenziale:



a) Caratteristica reale del diodo.

b) Caratteristica linearizzata a tratti.

Se si considera comunque una sua approssimazione linearizzata a tratti, come quella mostrata dalla figura antecedente, la tensione media rilevata risulta essere per il primo caso pari a:

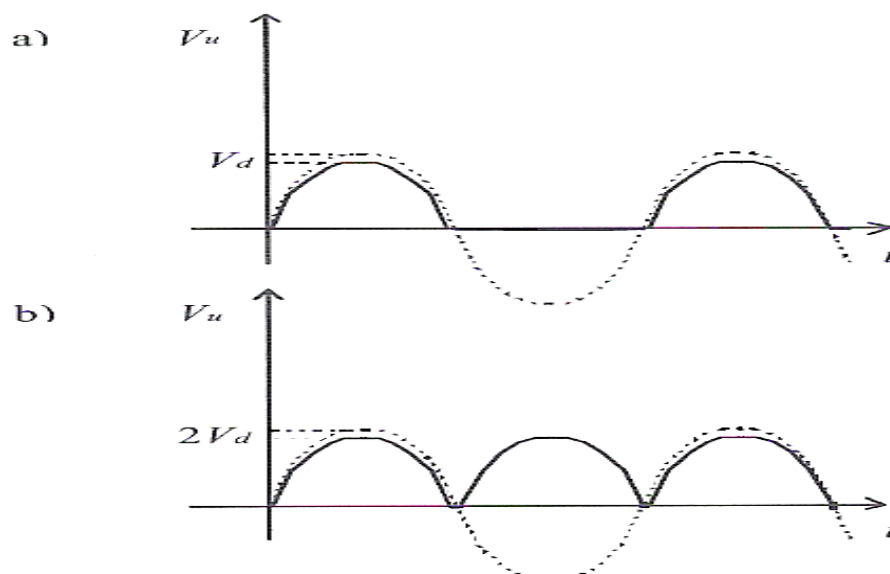
$$V = \frac{V_p - V_d}{\pi},$$

in cui la V_d è la tensione di soglia del diodo.

Per il secondo caso è pari a:

$$V = 2 \frac{V_p - 2V_d}{\pi}.$$

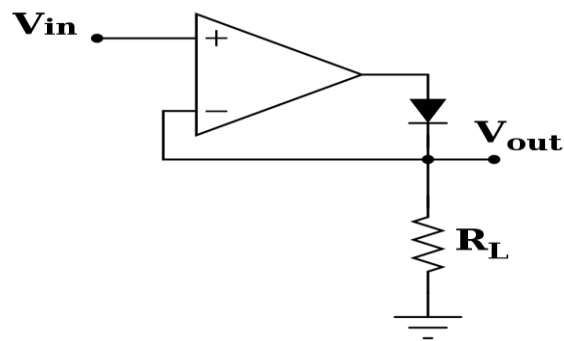
Ora l'effetto della tensione di soglia è duplice in quanto, in ogni semiperiodo, entra sempre in conduzione una coppia di diodi.



Dallo studio del circuito si nota che l'errore relativo commesso nella misura diviene tanto maggiore quanto più V_p è prossimo alla tensione di soglia V_d del diodo. Se V_p è quasi uguale a V_d significa che si sta lavorando nella zona del ginocchio della caratteristica del diodo. Pertanto, la tensione calcolata nelle due precedenti espressioni, risulta approssimata in modo grossolano.

3.2 Circuito super diodo

Per eliminare i problemi causati dalla tensione di soglia del diodo, si utilizzano dei circuiti attivi con amplificatori operazionali. Sotto è mostrata una classica soluzione di raddrizzatore a singola semionda (circuito super diodo).

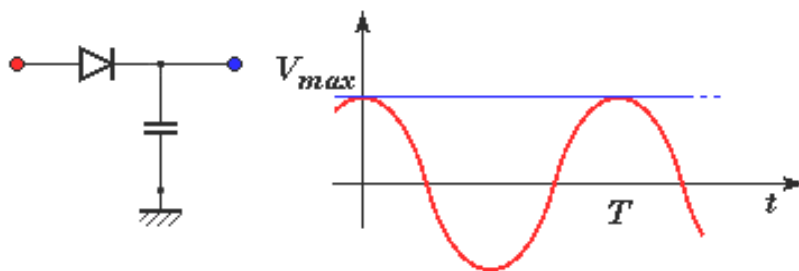


3.6 Convertitori a valore di picco

I convertitori a valore di picco generano una componente continua che è pari al valore di picco del segnale sotto misurazione.

3.6.1 Circuito con diodo in serie

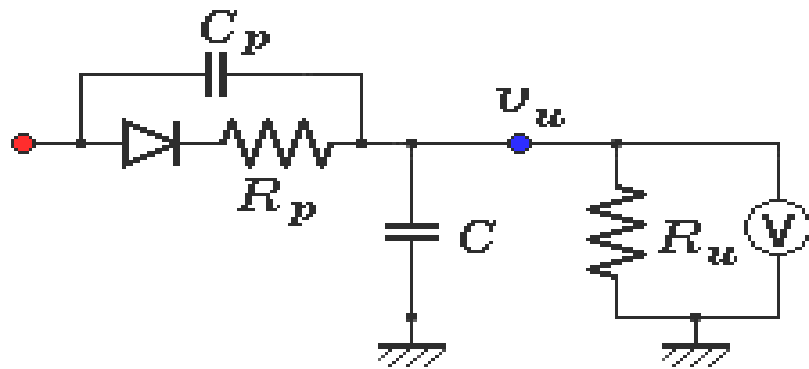
Ipotesizzando di essere in condizioni ideali dove si trascura l'effetto della soglia del diodo e dei suoi elementi parassiti, dove il valore dell'impedenza di ingresso dello strumento di misura è infinito e dove si ha un segnale di ingresso a valore medio nullo, una semplicissima soluzione circuitale di convertitore si può ottenere connettendo un diodo con un condensatore come mostrato in figura:



Trascurando il funzionamento del sistema durante il transitorio iniziale, in uscita si ottiene una tensione costante pari al valore di picco del segnale posto in ingresso.

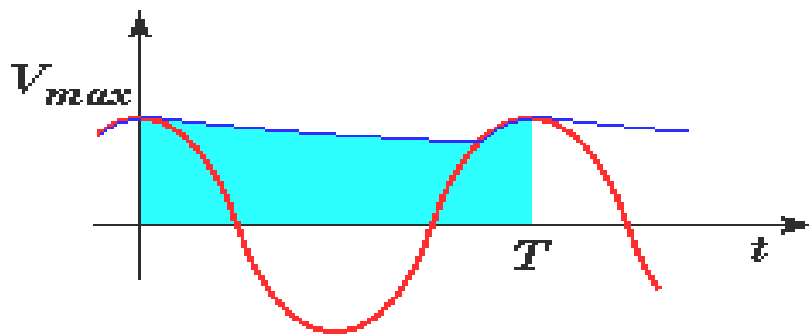
Vediamo ora come il comportamento del circuito viene modificato tenendo conto degli elementi parassiti del diodo (trascuriamo in questa trattazione gli effetti della tensione di soglia del dispositivo) e del valore finito dell'impedenza dello strumento di misura.

Per analizzare più approfonditamente il funzionamento dello strumento ed individuare l'incertezza con cui viene misurato il valore di picco del segnale di ingresso, facciamo riferimento allo schema mostrato nella successiva figura.



E' bene notare che alle basse frequenze, considerando cioè una banda di frequenza che va dai pochi hertz fino al centinaio di kHz, si possono trascurare le conseguenze dei parametri parassiti del diodo in confronto all'effetto di carico realizzato dallo strumento sull'uscita del circuito con la sua resistenza equivalente R_u .

Nella figura che segue, è possibile osservare la forma d'onda del segnale che giunge all'ingresso del multimetro.



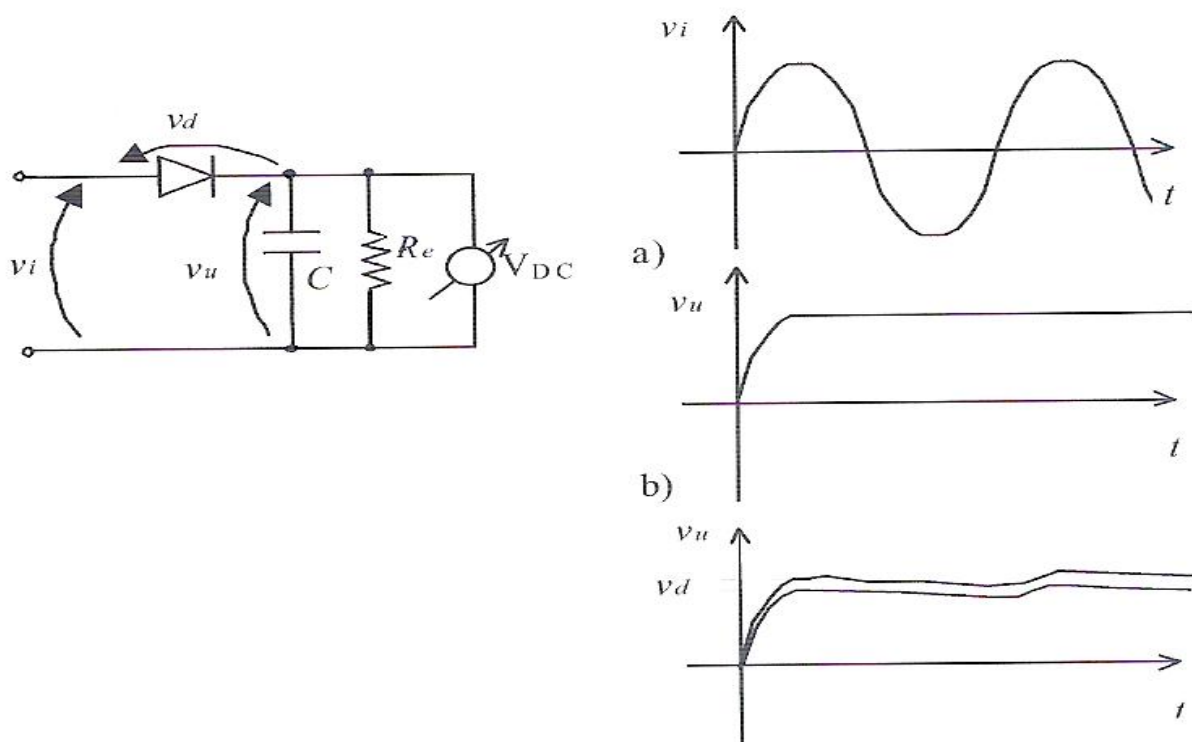
3.6.2 Funzionamento

Non appena la tensione di ingresso supera il valore massimo, il diodo si interdice e la capacità C si scarica attraverso la resistenza R_u . Ciò fa sì che la tensione di uscita assuma il tipico andamento esponenziale decrescente fino a quando la tensione di ingresso, crescendo, polarizza nuovamente il diodo permettendo alla capacità C di caricarsi. Da questo istante e fino a quando non si giunge al successivo massimo, la tensione di uscita segue un andamento sinusoidale.

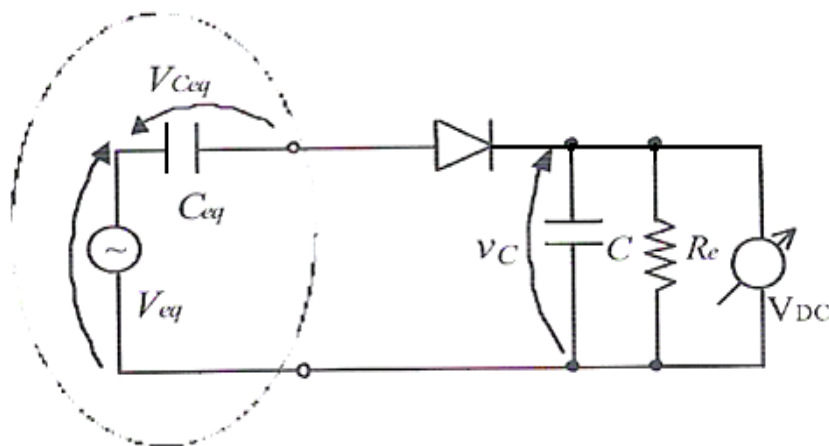
3.6.7 Approfondimenti sulle non idealità

Considerando ora gli effetti della tensione di soglia del diodo V_d e tenendo conto della resistenza non infinita del voltmetro, la tensione di uscita presenta una riduzione rispetto al valore massimo ideale V_{max} . Si osserva dai grafici successivi che la tensione ai capi del condensatore, la quale risulta essere anche la tensione misurata dal voltmetro, ha un andamento circa costante e pari a $V_{max} - V_d$ con un "ripple". L'ampiezza del "ripple" sarà tanto più piccola quanto minore sarà il periodo del segnale sinusoidale di ingresso rispetto alla costante di tempo di scarica del condensatore.

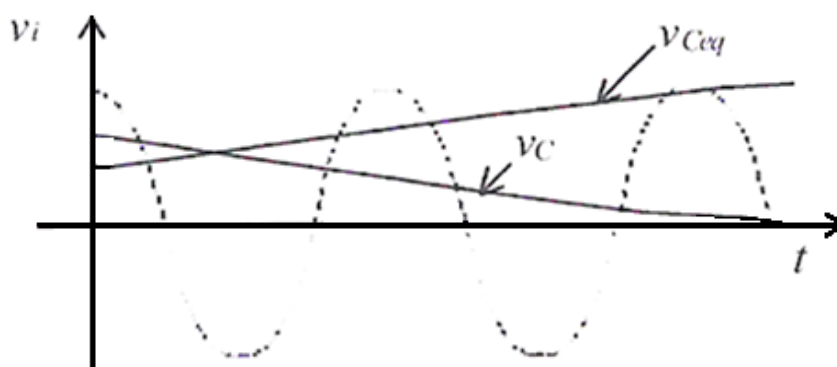
La figura che segue mette in risalto le considerazioni fatte pocanzi.



Il circuito mostrato non viene effettivamente utilizzato; infatti, se al segnale si somma una componente continua V_{dc} , essa si aggiungerebbe alla V_{max} incrementando la misura totale della tensione. Inoltre, affinché il sistema funzioni correttamente, è necessario che l'equivalente di Thevenin del circuito sul quale si effettua la misura, presenti continuità ohmica. Se questo non accade, si ottiene la situazione illustrata nella figura che segue.



Misurando con il voltmetro la V_{eq} a regime, si riscontra un'indicazione nulla. Ciò può essere verificato analizzando la situazione di transitorio nel quale inizialmente, con il diodo in conduzione, la V_C è determinata dal rapporto di partizione della tensione di ingresso su C_{eq} e C . Appena il diodo va in interdizione, il condensatore C comincia a scaricarsi attraverso la resistenza R_e del voltmetro mentre il condensatore C_{eq} mantiene la carica perché il diodo è "aperto" e non esiste un percorso resistivo dove può fluire la corrente di scarica. Quando nel successivo ciclo della componente sinusoidale la somma di V_{eq} e V_{ceq} è maggiore di V_C , il diodo passa nuovamente in conduzione. La carica fornita dal generatore però, porta ora a caricare solo C_{eq} aumentando così la tensione ai suoi capi. A sua volta, il condensatore C si carica ad una tensione $V_{eq} - V_{ceq}$ inferiore a quella iniziale. Non appena il diodo si interdice nuovamente, la tensione su C_{eq} risulta essere maggiore a quella che si andava registrando precedentemente. Il processo illustrato continua fino a quando la tensione ai capi di C risulta essere quasi nulla e la tensione V_{ceq} circa pari al valore di picco della tensione di ingresso.

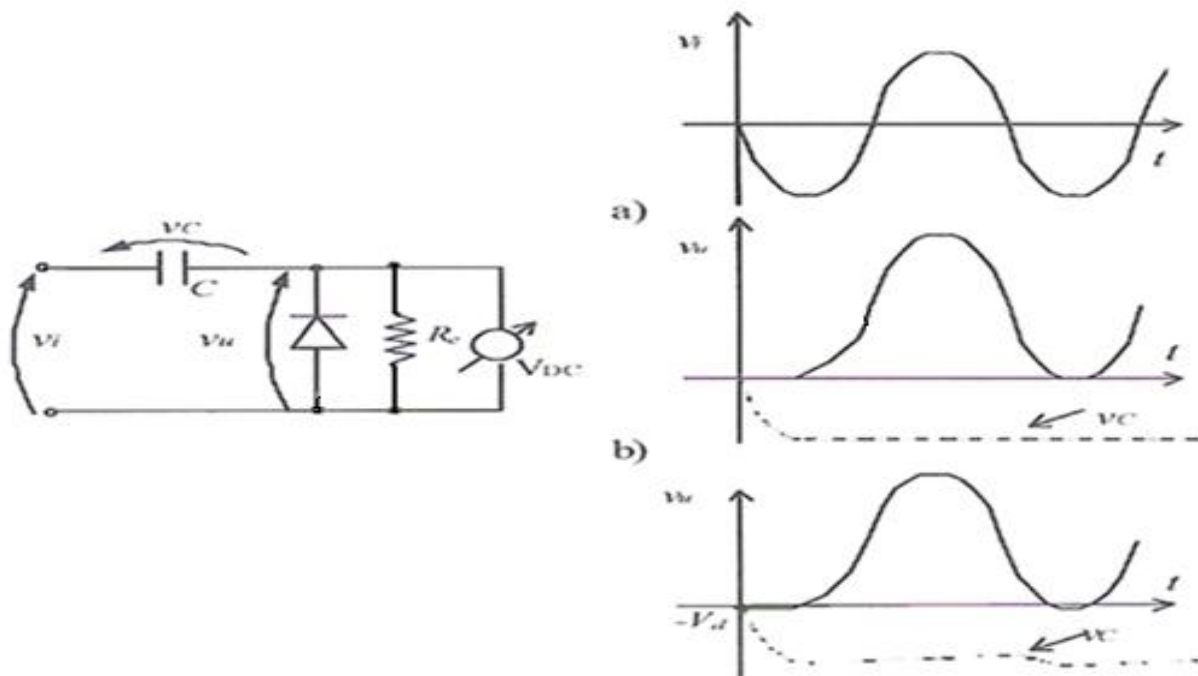


Andamento delle tensioni V_C e V_{ceq} .

A causa di questo problema, non è possibile inserire davanti al voltmetro un condensatore di blocco per arrestare la componente continua del segnale che si sta trattando, così come precedentemente si era visto nel caso del circuito a valore medio.

3.7 Circuito con condensatore in serie

La figura successiva rappresenta un'altra soluzione di convertitore a valore di picco.



a) Andamento ideale della tensione misurata. b) Andamento reale.

3.7.1 Funzionamento

Supponiamo originariamente scarico il condensatore C (pertanto $v_c = 0V$) e consideriamo un segnale di ingresso sinusoidale $v_i(t) = V_p \sin \omega t$. Nel primo quarto di periodo, il diodo è in conduzione e il condensatore si carica fino a possedere ai suoi capi una tensione pari a $v_c = -V_p$. Non appena la tensione $v_i(t)$ sale al di sopra del suo valore minimo, il diodo passa in interdizione e la tensione $v_u(t)$ segue la differenza $v_i - v_c = v_i - (-V_p)$. Il segnale $v_u(t)$ a regime sarà pari alla somma della componente alternata $v_i(t)$ e della componente continua V_p . Se la componente alternata ha una frequenza abbastanza elevata, inviando il segnale $v_u(t)$ al multimetro, esso darà un'indicazione della sola componente continua V_p , cioè il valore di picco del segnale di ingresso.

Il funzionamento del circuito non viene così alterato da un'eventuale componente continua sovrapposta al segnale $v_i(t)$, in quanto, grazie alla presenza della capacità C , si arriva ad avere una tensione $v_u(t)$ uguale a quella nella figura a).

Quello che finora è stato descritto è il funzionamento ideale. Se si tiene conto della presenza della resistenza R_e di ingresso del voltmetro e della caratteristica non ideale del diodo, l'andamento del segnale in uscita dal circuito sarà simile a quello della figura b) dove la componente continua di $v_u(t)$ è traslata del valore della soglia del diodo V_d e quindi risulta inferiore a V_p .

Anche in questa circostanza, affinché l'utente possa leggere direttamente sul display il valore efficace del segnale, il costruttore deve necessariamente inserire a valle del blocco un partitore

che realizzi il fattore $1/\sqrt{2}$, oppure far si che l'operazione venga compiuta dallo strumento stesso in altro modo.

Quindi il problema che sorgeva per i convertitori a valore medio, inevitabilmente si ripresenta nei convertitori a valore di picco (o cresta) ossia, se la tensione da misurare non è sinusoidale il valore letto (V_{letto}) sul display non è il suo valore efficace ma, corrisponde a:

$$V_{letto} = V_p \times 0.707 .$$

Sostanzialmente, il voltmetro continua a misurare correttamente la tensione di picco V_p del segnale dato, ma non vale più la corrispondenza con il valore efficace per altre forme d'onda. Pertanto, qualsiasi sia la forma del segnale misurato, si riesce ad ottenere il valore di picco:

$$V_p = \frac{V_{letto}}{0.707} = V_{letto} \times \sqrt{2}$$