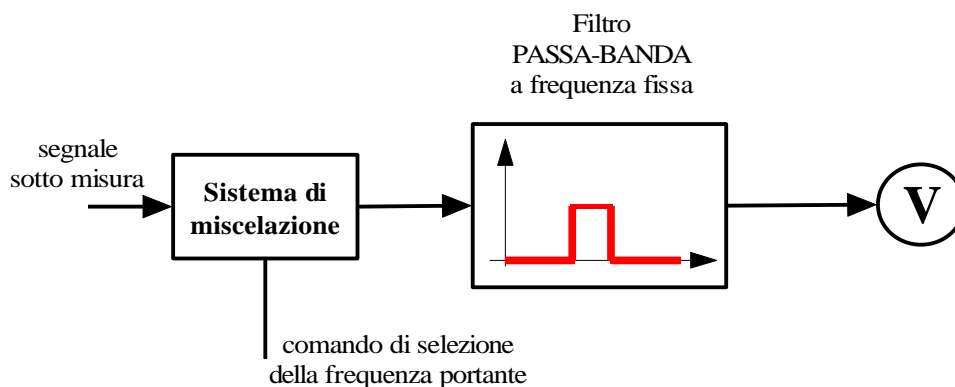


Appunti di Compatibilità Elettromagnetica **Analizzatore di spettro**

INTRODUZIONE

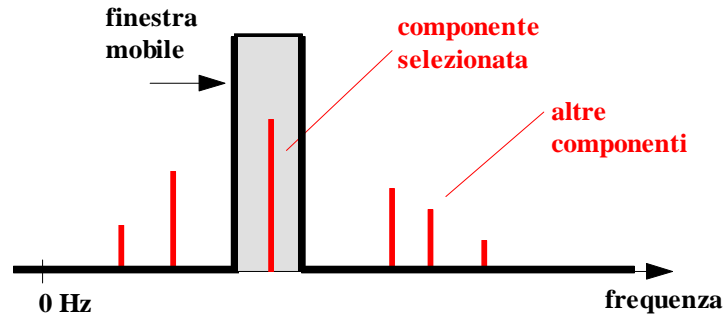
Gli **analizzatori di spettro** sono dispositivi con lo scopo di visualizzare lo **spettro di ampiezza di segnali periodici**. Il principio di funzionamento è quello di un **ricevitore a supereterodina**, schematizzato nella figura seguente:



Si usa un filtro a frequenza fissa ed estremamente selettivo: il segnale $x(t)$ in ingresso viene miscelato con una **portante sinusoidale** generata da un *oscillatore locale*, in modo da effettuare una traslazione del suo spettro $X(f)$; in particolare, dato che la frequenza f_C della suddetta portante viene fatta aumentare progressivamente, la traslazione di $X(f)$ è tale che, aumentando f_C , porzioni sempre diverse di $X(f)$ si trovino nella banda (fissa) del filtro e vengano quindi da esso isolate e successivamente misurate.

In base a queste considerazioni, si evidenzia dunque che *la banda del filtro è fissa, ossia centrata su una frequenza centrale f_0 fissa, mentre è lo spettro del segnale che viene spostato in posizioni sempre diverse*. Tuttavia, ai fini della comprensione del funzionamento dello strumento, è comunque lecito usare un modello più semplice, in cui è la banda del filtro che viene via via spostata su posizioni diverse, fino a coprire tutto l'intervallo di interesse (si parla talvolta di **finestra mobile** che *spazzola* l'intervallo di frequenza di interesse).

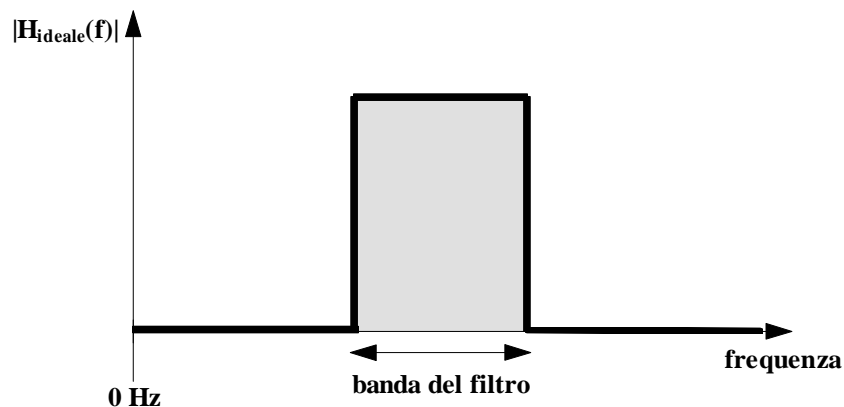
La figura seguente evidenzia allora il fatto che, traslando nel tempo la frequenza centrale f_0 del filtro da un valore minimo iniziale ad un valore massimo finale (a scelta dell'operatore), il filtro passa-banda seleziona le componenti spettrali del segnale di ingresso che sono presenti, in ciascun istante, all'interno della banda centrata appunto su f_0 :



LARGHEZZA DI BANDA DEL FILTRO

Detto questo, andiamo ad analizzare come maggiore dettaglio l'effetto del filtro passa-banda a frequenza variabile sullo spettro che lo strumento mostra sullo schermo. Questa analisi risulta essere molto importante, come si vedrà, ai fini del soddisfacimento delle **norme** sulle emissioni radiate e condotte: ricordiamo, infatti, che le **prove di conformità** alle norme consistono nel verificare che nessun valore misurato dallo strumento ecceda i limiti per il campo di frequenza considerato.

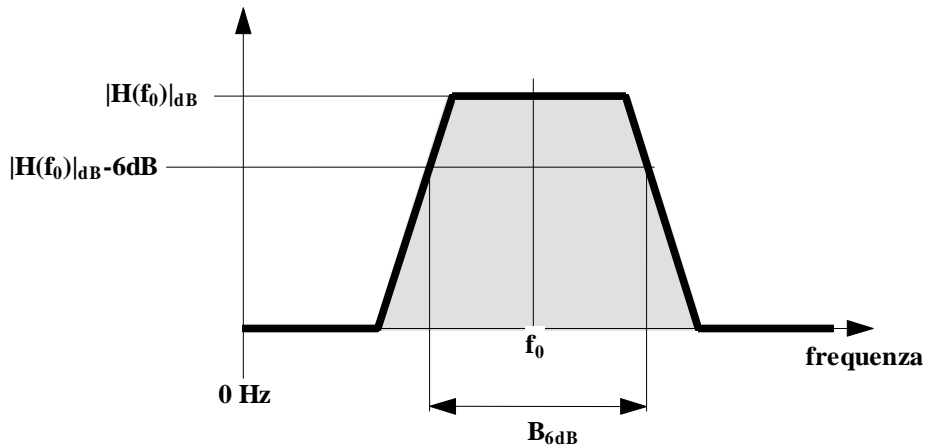
L'elemento più importante, nel determinare il livello che viene indicato dall'analizzatore di spettro ad una data frequenza, è la **larghezza di banda** (o semplicemente **banda**) del filtro, scelta dall'operatore:



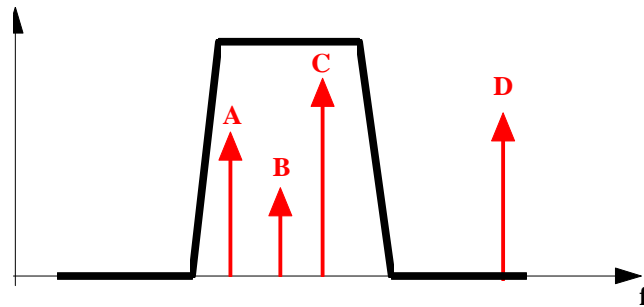
La figura riporta ovviamente il modulo della funzione di trasferimento $H(f)$ ideale di un filtro passa-banda. E' noto però che un simile andamento di $H(f)$ non si può ottenere. Ciò che si realizza nella pratica sono funzioni centrate su una **frequenza centrale f_0** e via via decrescenti, per frequenze superiori ed inferiori, in modo più o meno rapido a seconda della **selettività** che si vuole ottenere.

Generalmente, la banda che si considera è quella cosiddetta a **6dB**: essa è definita come l'ampiezza dell'intervallo di frequenza entro cui il modulo di $H(f)$ risulta inferiore al valore massimo $|H(f_0)|$ per non più di 6dB. Detto in altre parole, gli estremi della banda del filtro sono quelli in corrispondenza dei quali $|H(f)|_{dB}$ è 6dB al di sotto del valore massimo $|H(f_0)|_{dB}$.

Per semplicità, se schematizziamo il modulo di $H(f)$ con un *andamento trapezoidale* anziché con quello ideale rettangolare, abbiamo quanto segue:



Detto questo, vediamo cosa succede alle nostre misure. Immaginiamo di poter “congelare”, in un generico istante, la posizione del filtro passa-banda in un determinato punto della sua escursione. Supponiamo inoltre che, in tale istante, risultino presenti, nella banda del filtro, tre armoniche distinte, come illustrato nella figura seguente:



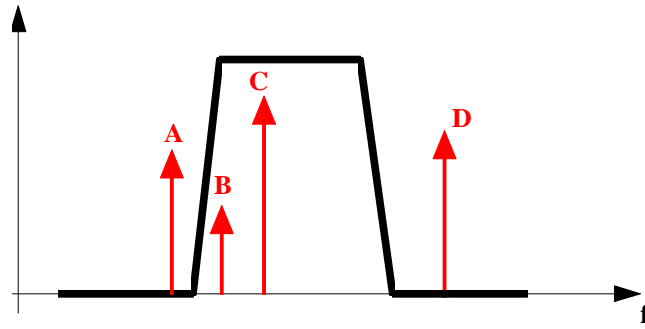
In ogni istante, il livello che lo strumento indica, in corrispondenza della frequenza centrale della banda, è la somma dei livelli spettrali compresi nella banda del filtro¹. Nella situazione riportata in figura, quindi, lo strumento indica un livello $A+B+C$.

Da notare che la frequenza centrale f_0 della banda individua solo la posizione della banda stessa; il fatto che lo strumento indichi un livello $A+B+C$ in corrispondenza di tale frequenza centrale non significa, come si è appena visto, che esiste una componente armonica di livello $A+B+C$ a frequenza f_0 , ma solo che la banda raccoglie (nell'istante considerato) un livello complessivo $A+B+C$. Il numero di armoniche (ed i rispettivi livelli) che hanno dato luogo a questo livello complessivo non è determinabile in alcun modo.

Non appena il filtro, proseguendo nel suo ciclo, si sposta di una posizione verso destra², la prima armonica ad uscire dalla sua banda sarà evidentemente A:

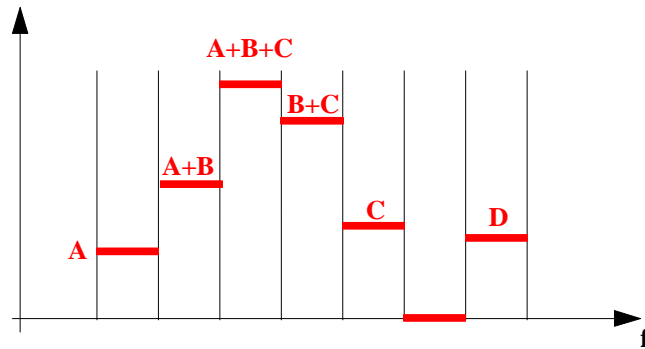
¹ Se lo strumento misura il **valore efficace** del segnale complessivo contenuto nella banda del filtro, si tratta di elevare al quadrato i valori efficaci delle singole componenti, sommare e poi calcolare la radice quadrata della somma. Per semplicità, supponiamo invece, per il momento, che lo strumento misuri il **valore di picco** (o *livello*) del segnale complessivo, che si ottiene banalmente sommando i valori di picco delle singole armoniche.

² Si tenga conto che lo spostamento della banda del filtro non può avvenire con continuità, ma solo a scatti, cioè per posizioni discrete.



In questa nuova situazione, il livello indicato dallo strumento è chiaramente $B+C$. Spostandosi ulteriormente verso destra, il filtro passa ad includere solo C , per cui indicherà un livello pari a C . Con un ulteriore *scatto*, non avremo invece più alcuna componente nella banda del filtro, per cui sarà indicato un livello nullo. Infine, un ulteriore traslazione verso destra porterà la componente D all'interno della banda del filtro, per cui l'indicazione fornita sarà di un livello pari a D .

In definitiva, il display dello strumento fornirà un diagramma dei livelli misurati del tipo seguente:



Questo discorso mostra un concetto fondamentale: affinché il livello indicato dall'analizzatore di spettro in corrispondenza della generica frequenza sia il più basso possibile, si deve scegliere una larghezza di banda del filtro più piccola possibile. Infatti, più piccola è la larghezza di banda e minore è il numero di componenti armoniche che il filtro lascia passare di volta in volta.

Nel campo delle misure di emissioni radiate e condotte, gli enti normativi fissano la larghezza di banda minima da impiegare. E' ovvio che non avrebbe senso usare una larghezza di banda superiore a quella minima imposta da tali enti: infatti, in base a quanto detto prima, all'aumentare della larghezza di banda, i livelli misurati aumentano anch'essi e sicuramente questo non va a vantaggio della conformità ai limiti previsti.

Il fatto che, in ogni posizione del filtro passa-banda, l'analizzatore di spettro sommi tutti i livelli spettrali compresi nella banda del filtro stesso ed il fatto che il livello alla frequenza centrale del filtro rappresenti questa somma suggerisce la seguente importante considerazione: a parità di larghezza di banda B_{6dB} del filtro dello strumento, affinché i livelli misurati dall'analizzatore di spettro siano i più bassi possibile, è necessario che la distanza reciproca tra tutte le armoniche del segnale in questione sia maggiore di B_{6dB} . Vediamo di spiegarci meglio con un esempio.

Consideriamo una apparecchiatura che presenta al suo interno due distinti oscillatori di temporizzazione, che però funzionano alla stessa frequenza, ad esempio 10 MHz. Eventuali emissioni radiate saranno allora alla frequenza di 10 MHz ed alle sue armoniche. Ciascun segnale di temporizzazione può irradiare da diversi punti del sistema, per cui il segnale totale ricevuto dall'antenna di misura (e quindi poi dall'analizzatore di spettro) è la somma di queste emissioni.

Supponiamo allora che i livelli ricevuti dall'antenna siano stati irradiati da due punti diversi dell'apparecchiatura ma abbiano la stessa intensità. Questo comporta che il segnale misurato alle varie frequenze (in questo caso, 10 MHz e armoniche, ossia 20 MHz, 30 MHz e così via) risulti sempre 6dB superiore al livello di ciascun singolo segnale. Al contrario, supponiamo adesso che i due oscillatori non abbiano più la stessa frequenza, ma, per esempio, funzionino a 10 MHz ed a 15 MHz. In questo caso, ci saranno ancora gli stessi problemi di emissione, ma saranno meno gravi rispetto a prima: infatti, le emissioni avverranno adesso a 10 MHz, a 15 MHz, a 20 MHz, a 30MHz, a 40 MHz, a 45 MHz e così via e queste frequenze sono separate tra loro per una quantità maggiore dei 100 kHz di larghezza di banda del filtro previsto dalle norme. Quindi, nonostante ci siano ancora frequenze in corrispondenza delle quali il livello misurato è 6dB al di sopra di quello corrispondente al singolo segnale irradiato, ci sono invece altre frequenze (le armoniche dell'oscillatore a 15 MHz) in corrispondenza delle quali il segnale captato è singolo, per cui è più facile rientrare nei limiti imposti dalle norme.

In questo esempio, si è dunque fatta l'ipotesi che i segnali irradiati dai due punti distinti dell'apparecchiatura in questione fossero di uguale intensità alle varie frequenze: questo fa' sì che la sovrapposizione di due armoniche alla stessa frequenza determini un livello misurato superiore di circa 6 dB al livello corrispondente a ciascuna delle due armoniche isolate. In effetti, anche se le due armoniche in questione non fossero di uguale intensità, la loro somma porterebbe un aumento del livello misurato che può risultare comunque abbastanza elevato. La tabella seguente mostra numericamente questo concetto:

Differenza tra i livelli dei due segnali (dB)	Aumento del livello del segnale più intenso (dB)
0	6.02
1	5.53
2	5.08
3	4.65
.....
10	2.39

La prima riga corrisponde al caso considerato prima, in cui le due armoniche hanno uguale intensità (per cui la differenza di livello tra di esse è di 0 dB): in questo caso, il raddoppio del livello corrisponde ai citati 6 dB. La seconda riga considera invece il caso in cui i livelli delle due armoniche differiscano di 1 dB: in questo caso, si trova che il livello dell'armonica, tra le due, di maggiore intensità risulta aumentato di 5.53 dB. Il discorso prosegue per differenze di livello (in dB) via via maggiori. L'ultimo valore riportato è una differenza di ben 10 dB, cui consegue un aumento del livello dell'armonica più intensa di 2.39 dB. Si può poi verificare che, per una differenza di livello di circa 18 dB, l'aumento del livello del segnale più intenso è di circa 1 dB. Per differenze di livello ancora maggiori, il segnale più intenso rimane praticamente invariato, perché troppo superiore rispetto all'altro.

La tabella appena riportata e discussa è stata preparata supponendo che i due segnali in questione siano in fase, in modo che la loro somma dia il valore massimo; *i risultati riportati sono ottenuti convertendo dapprima le ampiezze dei segnali nei loro valori assoluti, poi facendo la somma ed infine convertendo il risultato in dB*. Ad esempio, nel caso della somma di due armoniche sinusoidali, abbiamo quanto segue:

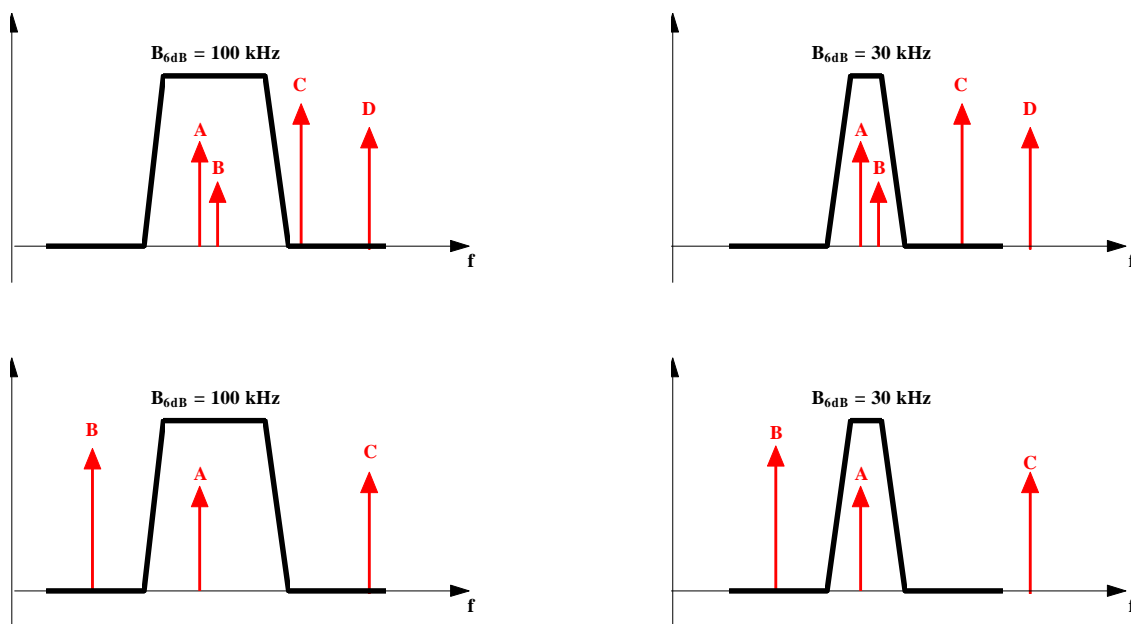
$$\begin{cases} v_1(t) = V_1 \sin(\omega t) \\ v_2(t) = V_2 \sin(\omega t) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} |v_1(t)|_{\max} = V_1 \\ |v_2(t)|_{\max} = V_2 \end{cases} \longrightarrow V_{\max} = |v_{\text{TOT}}(t)|_{\max} = V_1 + V_2 \longrightarrow (V_{\max})_{\text{dB}} = 20 \log_{10} V_{\max}$$

Se per esempio le due armoniche hanno uguale livello V_0 , allora si ottiene

$$(V_{\max})_{\text{dB}} = 20 \log_{10} V_{\max} = 20 \log_{10} 2V_0 = (V_0)_{\text{dB}} + 6.02 \text{dB}$$

Quello appena descritto è proprio il metodo effettivo con cui l'analizzatore di spettro somma i livelli che risultano di volta in volta compresi nella banda del filtro. Possiamo allora dedurre ancora una volta l'opportunità di utilizzare, negli apparecchi da noi progettati, segnali che diano luogo ad armoniche la cui reciproca distanza in frequenza sia maggiore della larghezza di banda del filtro: questo accorgimento, infatti, rende senz'altro più agevole il soddisfacimento delle norme sulle emissioni.

Sempre nel contesto di questo discorsi, si intuisce quale possa essere un metodo semplice per stabilire se due o più armoniche si sommano all'interno della banda del filtro dell'analizzatore di spettro: una volta "letto" un determinato livello in corrispondenza di una data frequenza, possiamo provare a ridurre la larghezza di banda del filtro³; ad esempio, possiamo passare dai 100 kHz, previsti dalle norme, a 30 kHz:



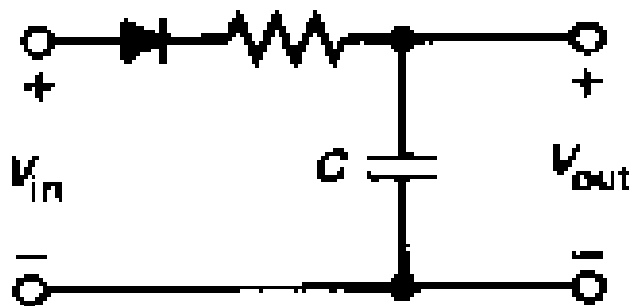
Se, dopo questo restringimento della banda, non si verifica alcun cambiamento della misura, significa o che le armoniche in questione sono particolarmente ravvicinate (come avviene nelle due figure superiori appena riportate) oppure che l'armonica è unica (come avviene nelle due figure inferiori appena riportate).

³ Dato che non stiamo compiendo misure di livello, ma stiamo solo cercando di capire quale sia la distanza tra le armoniche spettrale, è lecito ridurre la larghezza di banda del filtro al di sotto del valore minimo previsto dalle norme.

CONFRONTO TRA PICCO E QUASI PICCO

Nei precedenti discorsi, abbiamo parlato solo delle caratteristiche del filtro passa-banda presente nell'analizzatore di spettro, osservando che tale filtro ha il compito di isolare porzioni spettrali via via diverse fino a coprire l'intero intervallo di frequenza di interesse. Il passo successivo è allora quello di capire in quale modo lo strumento esegue le misure sulle "fettine spettrali" di volta in volta isolate dal filtro passa-banda.

Implicitamente, abbiamo finora supposto che il misuratore usato dall'analizzatore di spettro fosse un **rivelatore di picco**: con questa ipotesi, le misure riguardano il valore di picco (in realtà il valore efficace) delle armoniche sinusoidali. Un semplice rivelatore di picco è illustrato nella figura seguente:



Si tratta dunque di un circuito formato semplicemente dalla serie tra un diodo, un resistore ed un condensatore. L'uscita è costituita dalla tensione prelevata ai capi del condensatore. E' ovvio che gli strumenti reali usano circuiti molto più complessi e sofisticati, ma quello appena riportato consente comunque di comprendere i meccanismi di funzionamento fondamentali.

Per comprenderne il funzionamento, consideriamo il caso semplice in cui il segnale applicato in ingresso è proprio una sinusoide. Tale sinusoide (con valore di picco V_0) e la corrispondente uscita del circuito sono riportate nella figura seguente:

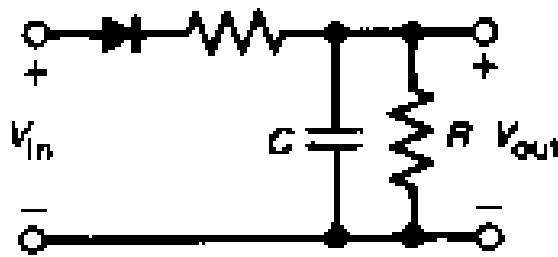


Concentriamoci sul funzionamento del diodo presente nel circuito, assumendo per tale diodo un *comportamento ideale*⁴: fin quando esso non conduce, non circola corrente nel circuito, per cui la tensione ai capi del condensatore è nulla, nell'ipotesi che il condensatore fosse inizialmente scarico. Dire che $v_C=0$ ed anche che $v_R=0$ (dato che $i=0$) equivale a dire che la tensione ai capi del diodo coincide esattamente con la tensione in ingresso. Di conseguenza, il diodo non conduce fin quando la tensione in ingresso è negativa. Al contrario, quando tale tensione è positiva, il diodo conduce e, comportandosi approssimativamente come un cortocircuito, fa sì che il condensatore si carichi ad

⁴ Ricordiamo che il **comportamento ideale di un diodo** prevede che esso si comporti come un circuito aperto quando la tensione ai suoi capi è negativa (diodo non in conduzione) e come un cortocircuito quando invece tale tensione è positiva (diodo in conduzione); si trascurano perciò la tensione di accensione (ossia il fatto per cui il diodo conduce solo quando la tensione positiva ai suoi capi è superiore a circa 0.2-0.3V), la resistenza di conduzione (ossia il fatto per cui la caratteristica I-V non è verticale durante la condizione, ma presenta una certa pendenza r_D), la corrente inversa di saturazione (ossia la minima corrente erogata dal diodo quando non è in conduzione) e la tensione di rottura (cioè il fatto che il diodo, se sottoposto ad una tensione negativa particolarmente elevata, *cede* ed eroga una corrente notevole).

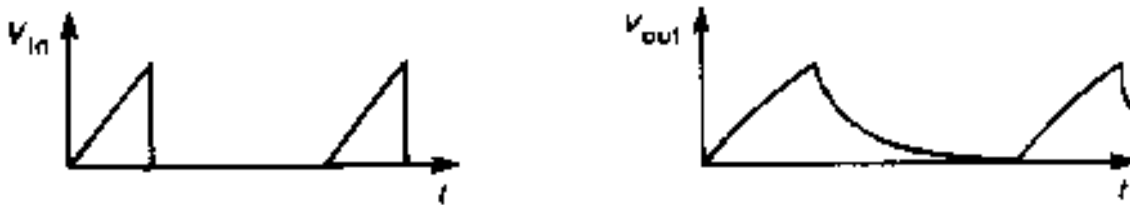
una tensione coincidente con quella di ingresso. Nel caso della sinusoide, abbiamo dunque un tratto iniziale della v_{out} che segue perfettamente la v_{in} . Quando la v_{in} arriva al picco positivo e poi prende a diminuire, la tensione ai capi del diodo diventa negativa (basta applicare la LKT per rendersene conto), per cui esso va in interdizione; non solo, ma questa condizione di $v_{diodo} \leq 0$ risulta poi sempre verificata, per cui il diodo non conduce più ed il condensatore, non potendosi scaricare, rimane carico al valore di picco della sinusoide, che quindi può essere misurato.

Questo discorso vale dunque per un *rivelatore di picco*. Tuttavia, la maggior parte delle norme sulle emissioni⁵ impongono che il livello del segnale, da confrontare con i limiti opportuni, sia misurato non tramite un rivelatore di picco, ma tramite un **rivelatore di quasi-picco**. Una semplice configurazione circuitale di questo tipo di rivelatore è illustrata nella figura seguente:



Rispetto al circuito visto prima, abbiamo semplicemente aggiunto un resistore in parallelo al condensatore su cui preleviamo la tensione di uscita. Anche in questo caso, gli strumenti reali utilizzano circuiti ben più complessi, ma quello appena proposto è comunque di grande utilità didattica.

Supponiamo che il segnale ricevuto (quindi il segnale in ingresso al circuito) sia una successione di impulsi triangolari molto separati nel tempo:



A sinistra è riportata la successione di impulsi sufficientemente distanziati tra loro, mentre a destra è riportata la corrispondente uscita del rivelatore di quasi picco

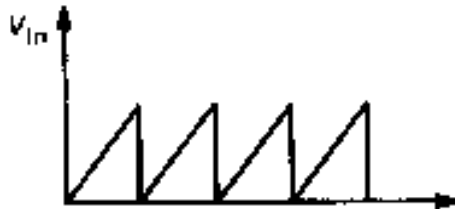
Il funzionamento del circuito, almeno quando il segnale in ingresso è positivo, è identico al caso precedente: quando $v_{in} > 0$, il diodo conduce e quindi il condensatore prende a caricarsi, seguendo quasi perfettamente (salvo un inevitabile ritardo) la tensione in ingresso; quando quest'ultima raggiunge il valore massimo e prende a scendere, il diodo si interdice, così come accadeva per il rivelatore di picco; tuttavia, mentre in quel caso il condensatore non poteva scaricarsi e quindi conservava invariata nel tempo la propria tensione, adesso è presente in parallelo un resistore, attraverso cui può quindi avvenire la scarica. Di conseguenza, la tensione di uscita assume il tipico andamento esponenziale del processo di scarica di un condensatore con costante di tempo RC:

$$v_{out}(t) = V_{max} e^{-t/RC}$$

⁵ Ad esempio, le norme FCC per le emissioni condotte

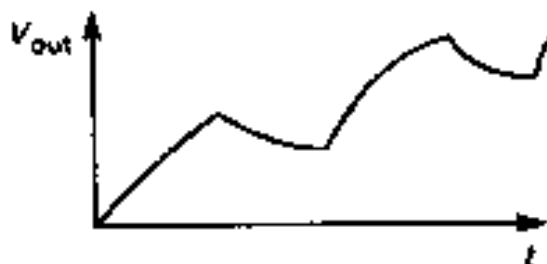
Se la distanza temporale tra gli impulsi in ingresso è sufficientemente maggiore della costante di tempo RC, il condensatore ha il tempo di scaricarsi completamente prima dell'arrivo del nuovo impulso; quando questo arriva, il ciclo si ripete allora identico a prima. La forma d'onda risultante è dunque quella riportata in figura.

Adesso invece supponiamo che gli impulsi in ingresso siano molto vicini tra loro, praticamente a formare un tipico *andamento a dente di sega*:



In questo caso, il tempo a disposizione del condensatore per scaricarsi è molto minore: infatti, dopo l'arrivo del generico impulso, il condensatore prende a scaricarsi nel momento in cui la v_{in} comincia a scendere, ma il processo di scarica termina non appena la v_{in} risale (cioè in corrispondenza del nuovo impulso), assume un valore tale da riportare in conduzione il diodo (ossia un valore tale da dare $v_{diodo} > 0$).

Quindi, l'arrivo di ogni nuovo impulso avviene mentre il condensatore non si è ancora scaricato, il che comporta che l'uscita continui sempre ad aumentare, dando origine ad una forma d'onda del tipo seguente:



Nonostante questi discorsi siano molto semplificati rispetto alla realtà, essi danno comunque una idea del concetto finale: per i segnali con una frequenza di ripetizione bassa, il livello misurato dal rivelatore di quasi picco è molto più piccolo di quello misurato dal rivelatore di picco. Detto in altre parole, a parità di intensità, questi segnali a bassa frequenza generano livelli di ricezione più elevati nel funzionamento di picco che non nel funzionamento di quasi-picco: di conseguenza, anche in presenza di elevate intensità e quindi di elevati valori misurati nel funzionamento di picco, è possibile comunque che vengano rispettati i limiti normativi espressi in termini di valori di quasi-picco. Viceversa, se i livelli di quasi-picco misurati per un dato segnale superano i limiti, allora succederà sicuramente lo stesso per i livelli di picco.

Il motivo per cui la gran parte delle norme fanno riferimento ai valori di quasi picco è da ricercarsi nella finalità stessa delle norme: infatti, le norme hanno il principale obiettivo di evitare le interferenze nei ricevitori delle comunicazioni via radio e via filo; di conseguenza, mentre gli impulsi poco frequenti non impediscono all'ascoltatore di ottenere l'informazione desiderata, al contrario una modulazione continua di un segnale (a causa dei disturbi) interferisce molto più pesantemente con la possibilità dell'ascoltatore di ottenere la suddetta informazione. Per questo motivo, quindi, si usano i rivelatori

di quasi-picco, che forniscono misure molto più elevate, a parità di intensità, per i segnali con variazioni veloci che non per quelli con variazioni lente.

Rivelatore di valore medio

Concludiamo ricordando che le norme **CISPR 22** sui limiti alle emissioni condotte sono fornite in termini sia di livelli di quasi-picco sia di livello medio. Quest'ultimo viene misurato tramite un **rivelatore di valor medio**: quest'ultimo è sostanzialmente un filtro passa-basso, a banda molto stretta, posizionato dopo un classico *rivelatore di inviluppo*; in tal modo, il filtro lascia passare praticamente solo la componente continua dell'inviluppo della forma d'onda rivelata in ingresso.

Uno strumento di questo tipo è molto utile quando si vogliono isolare segnali continui che siano nascosti all'interno di uno spettro a larga banda.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**
e-mail: sandry@iol.it
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>
succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>