Filtri attivi e passivi

Viene detto filtro un circuito (o quadripolo) che nella trasmissione dei segnali, dai suoi terminali d'ingresso a quelli di uscita presenta delle caratteristiche selettive relative alla frequenza.
Un filtro quindi lascia passare inalterate alcune frequenza; ne blocca invece altre.
Nei vari settori dell'elettronica il filtro viene largamente utilizzato in numerose applicazioni: attenuazione del rumore e dei disturbi in un segnale utile, (ossia un segnale contenente informazioni), separazione di due o più segnali trasmessi sullo stesso canale; elaborazione dei segnali nella riproduzione audio Hi-Fi ecc…
I filtri si possono dividere in due distinte categorie: Filtri passivi e Filtri attivi.
I filtri passivi sono realizzati con componenti elettronici passivi come RLC. Tali componenti con una opportuna struttura circuitale evidenziano una buona azione filtrante. La loro realizzazione si basa sull'impiego di celle filtranti elementari poste in cascata, il numero e il tipo di celle da utilizzare dipende dalle specifiche di selettività richieste.
Un altro metodo di realizzazione dei filtri passivi, più preciso ma anche più complesso è quello per sintesi, che partendo dalle curve di risposta in frequenza desiderata, ossia modulo e fase, si stabilisce la posizione di poli e zeri di una f.d.t corrispondente, circuitalmente realizzabile.
Se l'impiego di filtri passivi LC rimane tuttora diffuso nel campo delle radiofrequenze, in quello delle basse frequenze, e in particolare modo nel settore audio, prevale l'uso di filtri attivi, realizzati con amplificatori operazionali e reti di reazione RC. La tecnica di progettazione di questi circuiti si rifà a quella per sintesi ma risulta notevolmente snellita dalle ben note caratteristiche degli operazionali che rendono non interagenti tra di loro eventuali celle filtranti poste in cascata .

Approssimazione delle curve di risposta ideali

Le curve di risposta ideali non sono fisicamente realizzabili e possono essere soltanto approssimate, in maniera più o meno precisa e diversificata.
In linea generale ad una curva approssimata si può far corrispondere una f.d.t razionale fratta con *n* poli ed eventuali *m* zeri, scomponibile in un prodotto di f.d.t di grado inferiore (secondo e primo grado). Il numero n dei poli della f.d.t definisce l'ordine del filtro.
Ad esempio la f.d.t di un filtro passo basso del quinto ordine è esprimibile nella forma seguente:

$$\mathbf{A(s)} = \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{(s^2 + b_1 s + c_1)(s^2 + b_2 s + c_2)(s + c_3)}} = \frac{\mathbf{k_1}}{\mathbf{s^2 + b_1 s + c_1}} \cdot \frac{\mathbf{k_2}}{\mathbf{s^2 + b_2 s + c_2}} \cdot \frac{\mathbf{k_3}}{\mathbf{s + c_3}}$$

dove $\mathbf{k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = cost}$

L'implementazione di un filtro superiore al secondo può in genere essere eseguita disponendo in cascata un certo numero di celle filtranti del secondo ordine, con l'aggiunta di una del primo ordine se **n** è dispari. Ciascuna cella elementare, comunemente realizzata con amplificatori operazionali muniti di opportune reti di reazione **RC**, non risulta in pratica interagente con le altre, vista la bassa resistenza di uscita di questi dispositivi.

L’approssimazione delle curve di risposta ideali può essere fatta seguendo diversi criteri, non legati all’ordine del filtro. Le tecniche di approssimazione differiscono tra loro per la scelta dei valori di ζ (fattore di smorzamento) e di ω_o (pulsazione naturale) nelle forme quadratiche presenti a denominatore della f.d.t.. A seconda dei casi risulta così possibile privilegiare specifici requisiti come ad esempio la piattezza della curva di risposta in banda passante, la sua rapidità nell’intorno della frequenza di taglio (**roll-off** iniziale), ecc…

Approssimazione di Butterworth

Presenta un coefficiente di smorzamento $\boldsymbol{\zeta = 1/\sqrt{2} = 0{,}707}$.
Essa garantisce la massima piattezza della risposta in banda passante, con roll-off iniziale discretamente elevato. I polinomi di grado n presenti a denominatore della f.d.t vengono detti polinomi di Butterworth e sono forniti dai manuali in forma normalizzata (avendo assunto $\boldsymbol{\omega_o = 1 rad/s}$).
Con riferimento alla f.d.t di un filtro passa basso l’approssimazione di Butterworth fornisce per $\boldsymbol{|A(j\omega)|}$ la seguente relazione:

$$\boldsymbol{|A(j\omega)| = \frac{|A_o|}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^{2n}}}}$$

dove ω_o, di valore uguale per tutte le forme quadratiche, coincide di fatto con la pulsazione di taglio superiore a **–3dB** del filtro ω_H, indipendentemente dal valore di n.

Approssimazione di Chebyschev

Presenta un coefficiente di smorzamento $\boldsymbol{0{,}5 < \zeta < 0{,}707}$, ossia poco smorzato.
Essa tende ad ottenere un roll-off iniziale elevato, ossia una notevole attenuazione già poco oltre la frequenza di frontiera. Ciò è realizzabile con fattori di smorzamento bassi, a discapito della piattezza della risposta in banda passante, dove la curva di **|A(jω)|**, presenta un’ondulazione (ripple); l’ampiezza massima del ripple costituisce un dato di progetto indipendente dall’ordine del filtro e per tale motivo l’approssimazione di Chebyschev viene detta anche a ripple uguale.
Oltre all’ampiezza del ripple espressa in dB (nei casi pratici mai superiore ai 3dB), viene stabilita la frequenza di frontiera $\boldsymbol{f_C}$, detta anche lunghezza del canale del ripple, che in questo caso è la frequenza per la quale la curva di risposta scende definitivamente al di sotto del limite inferiore del guadagno fissato in banda passante.
Lo scarso smorzamento rende insoddisfacente la risposta al transitorio dei filtri alla Chebyschev che presenta un overshoot e un settling time crescenti sia con l’ordine del filtro sia con l’ampiezza del ripple fissata. L’aumento di questi due fattori porta in compenso ad avere una maggiore rapidità della curva di risposta, che in determinate applicazioni, non solo in campo audio, si rileva il requisito di maggiore importanza.

Approssimazione di Bessel

Presenta un coefficiente di smorzamento $\boldsymbol{\zeta = \sqrt{3}/2 = 0{,}866}$, molto smorzato.

Essa mira in primo luogo a conseguire una buona linearità della curva di fase in banda passante. Ciò equivale ad avere un ritardo di fase costante per tutte le frequenze. In questo senso, nell'ambito della banda passate, un filtro di Bessel funge da linea di ritardo.
L'andamento della curva di risposta del modulo è monotonico (non vi è ripple) con roll-off che raggiunge il suo valore asintotico **–20ndB/dec**, in maniera molto più graduale che nei due casi precedenti.
In sede di progetto, scelto l'ordine del filtro, che oltre al roll-off asintotico, determina il grado di linearità della fase, si può fissare la frequenza di taglio a **–3dB** oppure, il tempo di ritardo desiderato. Sono a questo proposito disponibili apposite tabelle che forniscono i valori di **Q** e di $\mathbf{f_o = \omega_o / 2\pi}$ delle forme quadratiche della f.d.t, normalizzati per $\mathbf{f_{-3dB} = 1Hz}$ o per un tempo di ritardo nominale (a **f = 0**) di **1s**.
I filtri di Bessel sono impiegati soprattutto per introdurre piccoli tempi di ritardo nella trasmissione dei segnali, nel filtraggio passa basso di forme d'onda rettangolari in sistemi PWM (Pulse Width Modulation), e in generale quando deve essere limitata la distorsione di fase.