

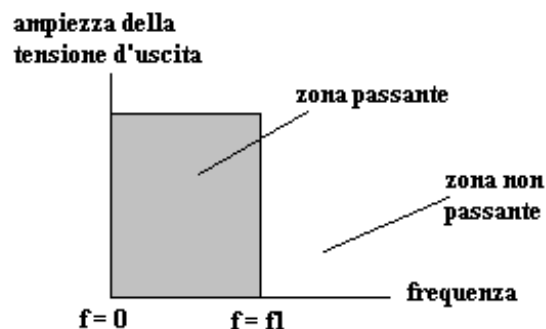
Cap. 5 Filtri di banda passivi

In questo capitolo tratteremo dei filtri di banda passivi, strutture che giocano un ruolo molto importante nell'ambito della progettazione dei circuiti analogici; le funzioni esplicate da questi dispositivi vengono svolte mediante l'impiego di componenti che non richiedono alimentazione alcuna, da qui il nome di strutture passive.

5.1 Filtri passa basso passivi

Un filtro passa basso **ideale** è un circuito che ha il compito di consentire il passaggio di tensioni elettriche la cui frequenza può essere compresa tra $f = 0$ Hz a $f = f_l$ Hz, oltre la frequenza f_l tutte le tensioni vengono bloccate e all'uscita del filtro non si ha alcun segnale. L'andamento grafico di questo comportamento è riportato in figura 5.1.

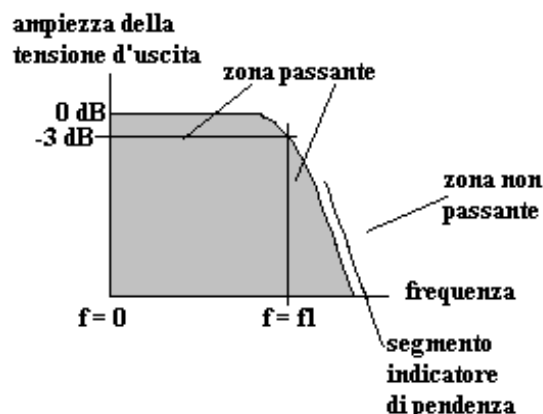
figura 5.1



In figura sono evidenziate le due zone caratteristiche del filtro, la zona passante, entro la quale i segnali d'ingresso possono transitare purché abbiano frequenze inferiori ad f_l , e la zona non passante, nella quale nessun segnale avente frequenza superiore a f_l può transitare.

Il comportamento di un filtro passa basso **reale** ha però un comportamento molto diverso nell'intervallo di frequenze che precede e che segue il valore di f_l ; il percorso tra zona passante e zona non passante non avviene bruscamente, come in figura 5.1, ma gradualmente, secondo una curva caratteristica la cui pendenza è tanto più elevata quanto maggiore è la complessità del circuito passa basso; si ha perciò una curva di risposta reale del tipo di quella indicata in figura 5.2.

figura 5.2

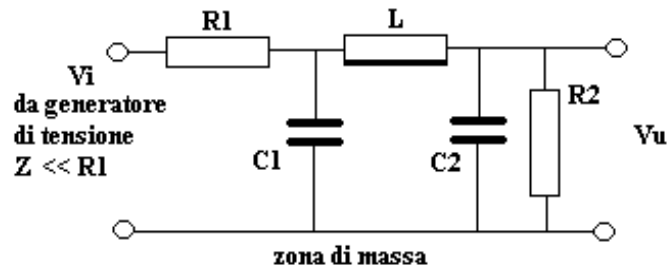


In figura 5.2 si vede come la risposta del filtro passa basso consenta di attenuare le frequenze superiori a f_l secondo una certa curva caratterizzata dal punto di ascissa f_l ed ordinata -3 dB e dalla pendenza della curva stessa espressa in dB/ottava; il valore di f_l è detto frequenza di taglio. Si comprende che più è elevata la pendenza tanto più il filtro reale tende a diventare un filtro ideale.

La pendenza è di -6 dB per ogni componente reattivo presente nel filtro; tre componenti reattivi, quali, ad esempio, due condensatori ed un'induttanza provocano una pendenza di -18 db/ottava.

Lo schema elettrico di un filtro passa basso, nella configurazione circuitale più semplice, detta “cellula”, è mostrato in figura 5.3.

figura 5.3



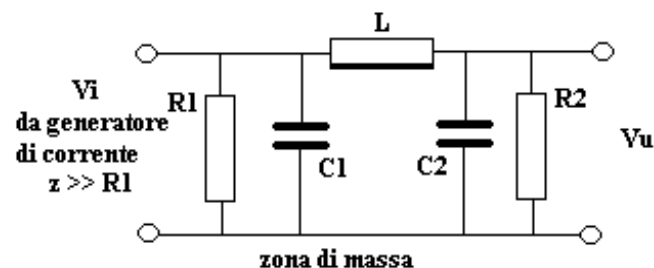
Nella figura si vedono i componenti che costituiscono la struttura filtrante, due resistenze R1 ed R2, uguali tra loro, due condensatori C1 e C2, anch’essi uguali tra loro ed un’induttanza L.

La tensione del segnale d’ingresso, Vi, è applicata in serie alla resistenza R1; il segnale d’uscita Vu è presente ai capi di R2.

Questa configurazione della cellula necessita di un segnale d’ingresso il cui generatore abbia un’impedenza molto più bassa del valore di R1, si dice in questo caso che il generatore deve essere un “generatore di tensione”, ciò comporta una perdita di 6 dB (2 volte), perdita d’inserzione, per la partizione della tensione Vi da parte di R1 ed R2.

Un circuito filtrante con le stesse caratteristiche di risposta di quello mostrato in figura 5.3 è realizzabile per il filtraggio di segnali prodotti da “generatori di corrente”, generatori che hanno un’impedenza molto più elevata di R1; lo schema di questo filtro è mostrato in figura 5.4.

figura 5.4



In questo circuito la tensione d’ingresso è applicata in parallelo ad R1 ed il segnale d’uscita Vu, come nel circuito precedente, è presente ai capi di R2; in questo caso la tensione Vi non subisce nessuna perdita d’inserzione.

Il progetto di entrambi i filtri passa basso sopra illustrati è fattibile, con semplici formule di calcolo, mediante il dimensionamento dei componenti in dipendenza del valore voluto della frequenza di taglio f1; le formule in oggetto sono le seguenti:

$$C = 1 / (2 * \pi * f1 * R)$$

$$L = R / (\pi * f1)$$

dove

C è espresso in Farad

L è espresso in Henry

Per le soluzioni circuitali alle quali si applicano le formule indicate si hanno le seguenti caratteristiche:

Filtro passa basso con segnale V_i da generatore di tensione

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -3dB – 6 dB = -9 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben oltre il valore di f_1 ; Att. = -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni raddoppiamento della frequenza)

Filtro passa basso con segnale V_i da generatore di corrente

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = 0 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -3dB – 0dB = -3 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben oltre il valore di f_1 ; Att.= -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni raddoppiamento della frequenza)

La differenza tra la prima configurazione circuitale e la seconda, a prima vista, farebbe propendere per l'adozione incondizionata della seconda, ma la scelta dipende esclusivamente dalle caratteristiche dei circuiti elettronici che devono impiegare i filtri passa basso che, in alcuni casi richiedono la prima ed in altri la seconda.

L'impiego delle formule di calcolo è subordinato, sia alla frequenza di taglio voluta, sia dal valore di R che deve essere commisurato ai circuiti elettronici che forniscono la tensione d'ingresso V_i o che usufruiscono della tensione d'uscita V_u .

La semplicità delle formule consente un facile dimensionamento dei componenti ma pone serie difficoltà nel calcolo della risposta teorica del filtro che non può essere affrontata in termini elementari; dal punto applicativo la difficoltà di calcolo delle curve di risposta è superabile mediante curve "normalizzate" già tracciate e di facile impiego.

Ora, come di consuetudine, cerchiamo d'impostare e di sviluppare un piccolo progetto di un filtro di banda:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa basso in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una $Z_u = 50$ ohm, si voglia una frequenza di taglio $f_1 = 6700$ Hz ed una pendenza di -18 dB/ottava.

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.3 per cui: Il valore di R_1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 50$ ohm quindi dovrà essere:

$$R_1 \gg Z_u$$

ovvero

$$R_1 \gg 50 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R_1 sia almeno 100 volte il valore di Z_u quindi

$$R_1 = 5000 \text{ ohm.}$$

Dato che $R_1 = R_2$ si ha

$$R_2 = 5000 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili il dato di R1 sarà accettabile altrimenti dovrà essere rivisto.

Calcolo di L e C:

Dati $f_1 = 6700$ Hz e $R = 5000$ ohm

il calcolo di L si effettua con la formula:

$$L = R / (\pi * f_1) = 5000 \text{ ohm} / (3.14 * 6700 \text{ Hz}) = 237.7 \text{ mH}$$

il calcolo di C si effettua con la formula:

$$C = 1 / (2 * \pi * f_1 * R) = 1 / (6.28 * 6700 \text{ Hz} * 5000 \text{ ohm}) = 4753 \text{ pF}$$

Quindi $C_1 = C_2 = C = 4753$ pF (con precisione dell'1.25 %)

Entrambi i componenti calcolati sono di valore accettabile, quindi il valore di $R = 5000$ ohm è adatto al progetto; se ad esempio fossero risultati od $L = 237$ H o $C = 47$ pF la cosa non sarebbe stata possibile per i seguenti motivi:

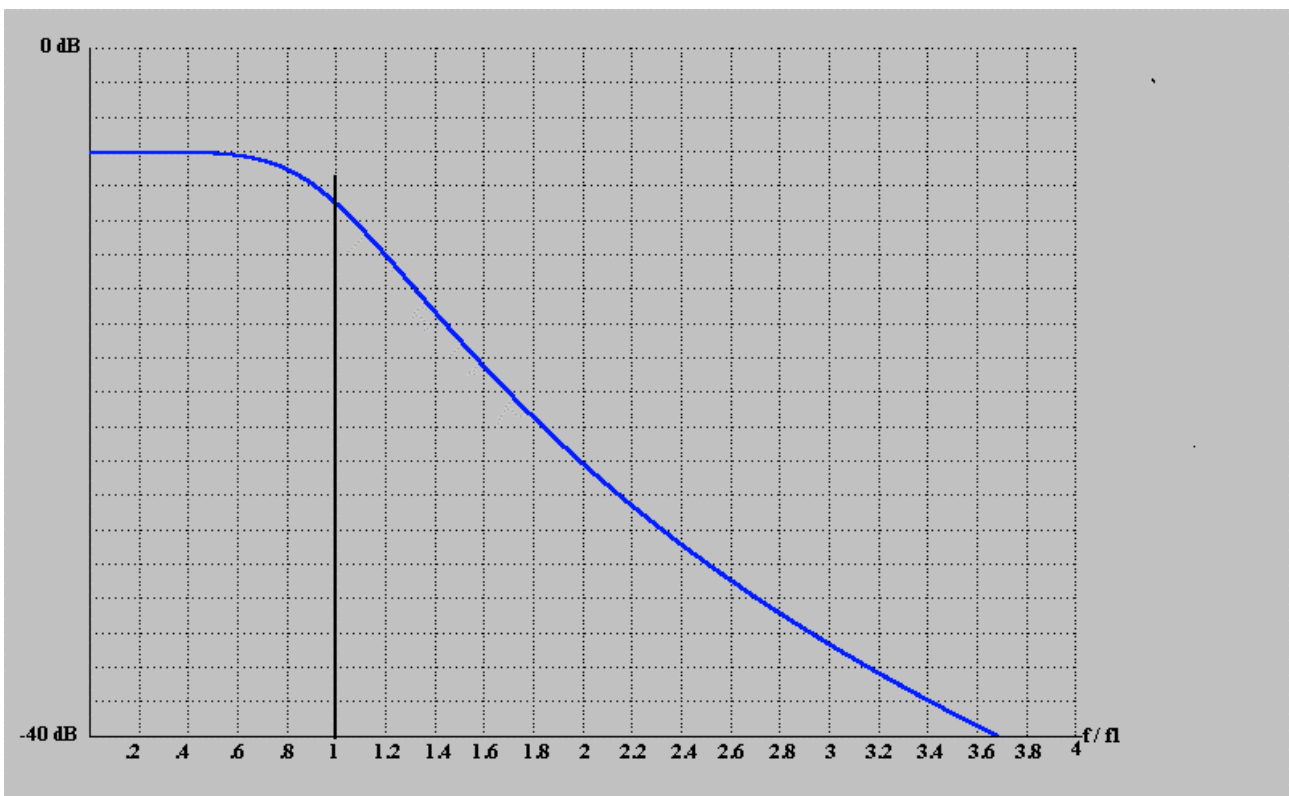
Un'induttanza da 237 H non sarebbe stata realizzabile per le notevoli dimensioni richieste. Un condensatore da 47 pF sarebbe stato troppo piccolo ed il filtro avrebbe subito senz'altro l'influenza dei valori delle diverse capacità parassite distribuite, paragonabili al valore di C.

Tracciamento della curva di risposta:

Poter disporre dell'andamento grafico della curva di risposta del filtro è utile per il controllo della normale funzionalità del circuito una volta costruito.

Dato che il calcolo diretto in base ai valori calcolati di R; C; L non è fattibile semplicemente, utilizziamo la curva di risposta universale, tracciata in figura 5.5, che si adatta a tutti i filtri passa basso che hanno la struttura di figura 5.3.

figura 5.5



La curva di risposta universale ha in ascisse il rapporto f/f_1 , ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 2 dB per divisione.

Per utilizzare la curva di figura 5.5 dobbiamo determinare il rapporto f / f_1 per ciascuna frequenza per la quale desideriamo stabilire l'attenuazione prodotta dal filtro; se vogliamo ad esempio conoscere l'attenuazione del nostro filtro alla frequenza $f = 12000$ Hz dobbiamo:

1) calcolare il rapporto:

$$f / f_1 = 12000 \text{ Hz} / 6700 \text{ Hz} \approx 1.8$$

2) tracciare una perpendicolare dall'ascissa d'ampiezza 1.8 e trovare il punto d'incontro con la curva

3) tracciare una perpendicolare dal punto d'incontro all'asse delle ordinate sul quale si leggerà il valore d'attenuazione di circa 21.5 dB.

Come si vede il procedimento è semplice e consente di utilizzare la curva per controllare il corretto funzionamento del filtro una volta costruito.

A questo proposito si deve osservare che tra i valori d'attenuazione teorici, rilevati con l'ausilio della curva di figura 5.5, e valori misurati in laboratorio si potranno trovare differenze dell'ordine di circa 1dB a causa, sia dell'incertezza delle misure, sia per le perdite naturali che si hanno nell'induttanza.

Osservazioni generali:

Il progetto della cellula passa basso si conclude con alcune osservazioni che ne chiariscono meglio il funzionamento.

Del filtro di cui abbiamo trattato s'è detto che nella zona d'attenuazione la pendenza è di -18 dB / ottava, questa caratteristica è controllabile soltanto per valori di frequenza lontani dalla frequenza di taglio f_1 . Un'idea quantitativa di questo comportamento si ha immediatamente dall'esame della curva di risposta di figura 5.5; se consideriamo l'attenuazione al punto d'ascissa 1 con il punto d'ascissa 2, corrispondenti rispettivamente a due frequenze l'una il doppio dell'altra, si vede che nel primo punto l'attenuazione è di -9 dB e nel secondo punto di -24 dB con un salto di 15 dB contro i 18 che sono la caratteristica teorica della cellula. Se ora esaminiamo altri due punti della curva più lontani da f_1 , il punto di ascissa 1.8 e il punto di ascissa 3.6, riscontriamo per il primo un'attenuazione di -22 dB e per il secondo un'attenuazione di circa -39.7 dB con un salto di 17.7 dB che si avvicina sensibilmente al valore teorico della pendenza di -18 dB/ottava dichiarata per questo tipo di cellula.

Sempre esaminando la curva di figura 5.5 vediamo come sia presente un'attenuazione di -6 dB anche nella zona passante, l'attenuazione in oggetto, della quale abbiamo già accennato in precedenza, è dovuta alla partizione tra le due resistenze R_1 ed R_2 che terminano la cellula, questo fatto, una volta noto, è irrilevante perché la quota fissa d'attenuazione d'inserzione di -6 dB si ripercuote su tutte le frequenze, sia nella zona passante sia nella zona d'attenuazione, con la conseguenza che il rapporto tra ampiezza delle tensioni nelle due zone è indipendente dall'attenuazione d'inserzione, ma dipende soltanto dalla pendenza naturale d'attenuazione del filtro.

Nelle prove del funzionamento del filtro non è facile controllare le zone d'attenuazione elevate che superino attenuazioni di -40 dB; misure di questo genere richiedono molta cura e voltmetri selettivi che consentano la misura soltanto attorno alla frequenza per la quale si vuole controllare l'attenuazione, senza queste attenzioni si rischia di misurare tensioni interferenti che non provengono dal filtro sotto esame traendo conclusioni errate sul funzionamento della cellula.

Un secondo esempio è ora necessario per vedere l'impiego della cellula di figura 5.4

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa basso in grado di essere accoppiato ad un generatore di corrente avente una $Z_u = 100000$ ohm, si voglia una frequenza di taglio $f_1 = 12500$ Hz ed una pendenza di -18 dB/ottava.

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.4 per cui:

Il valore di R_1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 100000$ ohm quindi dovrà essere:

$$R_1 \ll Z_u$$

ovvero

$$R_1 \ll 100000 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R_1 sia almeno $1/100$ il valore di Z_u quindi

$$R_1 = 1000 \text{ ohm.}$$

Dato che $R_1 = R_2$ si ha

$$R_2 = 1000 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R_1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili il dato di R_1 sarà accettabile, altrimenti dovrà essere rivisto.

Calcolo di L e C:

Dati $f_1 = 12500$ Hz e $R = 1000$ ohm

il calcolo di L si effettua con la formula:

$$L = R / (\pi * f_1) = 1000 \text{ ohm} / (3.14 * 12500 \text{ Hz}) = 25.47 \text{ mH}$$

il calcolo di C si effettua con la formula:

$$C = 1 / (2 * \pi * f_1 * R) = 1 / (6.28 * 12500 \text{ Hz} * 1000 \text{ ohm}) = 12738 \text{ pF}$$

Quindi $C_1 = C_2 = C = 12738$ pF (con precisione dell'1.25 %)

Tracciamento della curva di risposta:

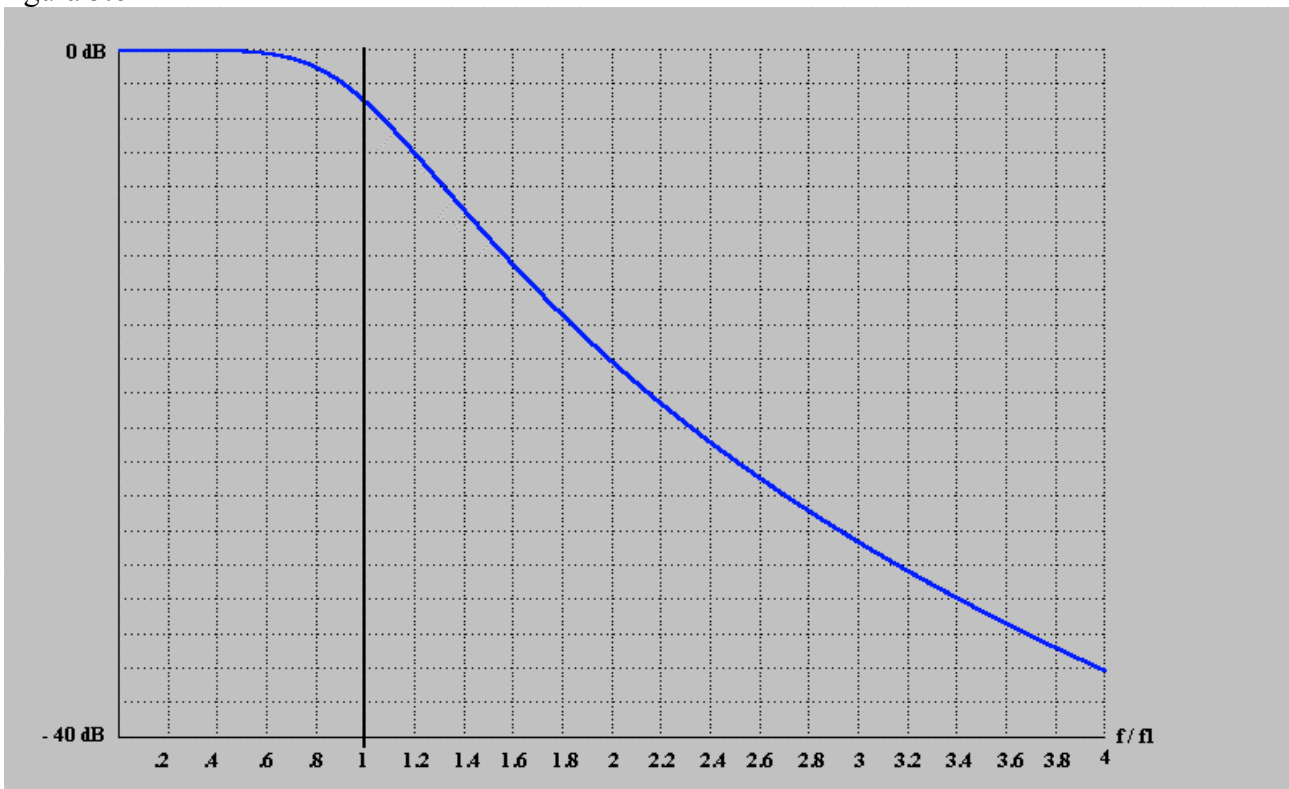
La curva di risposta di questo filtro ha l'identico profilo di quella tracciata in figura 5.5 ma non presenta l'attenuazione d'inserzione di -6 dB essendo pilotato di corrente invece che di tensione; la risposta del nuovo passa basso è riportata in figura 5.6.

Il filtro presenta attenuazione 0 dB nella zona passante e -3 dB in corrispondenza alla frequenza di taglio $f_1 = 12500$ Hz, così come si evince dal punto d'ascissa 1, calcolato dal rapporto tra $f = 12500$ Hz ed $f_1 = 12500$ Hz:

$$f/f_1 = 12500 \text{ Hz} / 12500 \text{ Hz} = 1$$

Si ricorda, come già detto in precedenza, che in questo tipo di filtro, pur non essendo presente l'attenuazione d'inserzione, non si ha un miglioramento nel rapporto tra ampiezza delle tensioni nella zona passante e le tensioni nella zona d'attenuazione.

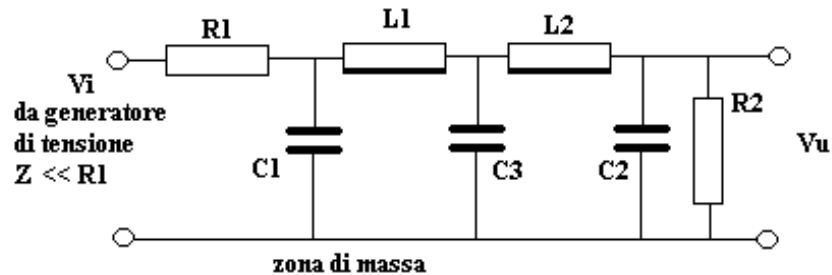
figura 5.6



5.1.1 Il filtro passa basso a più cellule

Per ottenere filtri passa basso con attenuazioni fuori banda aventi pendenze superiori a quelle ottenibili con filtri ad una cellula, si possono realizzare strutture con più cellule uguali tra loro. Un esempio di questa nuova configurazione a due cellule, derivata dalla struttura di figura 5.3, è riportata in figura 5.7.

figura 5.7



Il nuovo filtro è composto dalle due resistenze di terminazione R1 ed R2 di valore uguale, le induttanze L1 ed L2 uguali tra loro, i condensatori C1 e C2 anch'essi di valore uguale tra loro ed infine il condensatore C3 di valore doppio rispetto a C1.

Le formule di calcolo dei componenti sono le stesse illustrate nel paragrafo 5.1 che qui riassumiamo data la presenza di C3

$$C1 = C2 = 1 / (2 * \pi * f1 * R)$$

$$C3 = 2 * C1$$

$$L = R / (\pi * f1)$$

Si deve osservare che in questa configurazione compaiono soltanto 5 componenti reattivi dato che, a seguito dell'unione tra due cellule, il condensatore C3 ne sostituisce due; il circuito è pertanto da considerarsi, al fine dei calcoli, come se avesse 6 componenti reattivi.

La nuova struttura consente un'attenuazione fuori banda con una pendenza di -36 dB per ottava, con un taglio di -6 dB, rispetto alla banda passante, in corrispondenza della frequenza di taglio f1.

Sintetizzando:

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 6 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -6dB - 6 dB = -12 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben oltre il valore di f1; Att. = -36 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 63 volte ad ogni raddoppiamento della frequenza)

Anche per questa configurazione risulta utile lo sviluppo di un esercizio:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa basso in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una $Z_u = 10$ ohm, si voglia una frequenza di taglio $f1 = 5000$ Hz ed una pendenza di -36 dB/ottava.

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.7 per cui:

Il valore di R1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 10$ ohm, quindi dovrà essere:

$R1 \gg Z_u$

ovvero

$$R1 \gg 10 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R1 sia almeno 100 volte il valore di Zu quindi

$$R1 = 1000 \text{ ohm.}$$

Dato che R1 = R2 si ha

$$R2 = 1000 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili il dato di R1 sarà accettabile altrimenti dovrà essere rivisto.

Calcolo di L1; L2; C1; C2; C3:

Dati f1 = 5000 Hz e R1=R2 = 1000 ohm

il calcolo di L1 = L2 si effettua con la formula:

$$L1 = L2 = R / (\pi * f1) = 1000 \text{ ohm} / (3.14 * 5000 \text{ Hz}) = 63.7 \text{ mH}$$

il calcolo di C1 e C2 si effettua con la formula:

$$C1 = C2 = 1 / (2 * \pi * f1 * R) = 1 / (6.28 * 5000 \text{ Hz} * 1000 \text{ ohm}) = 31847 \text{ pF}$$

(con precisione dell'1.25 %)

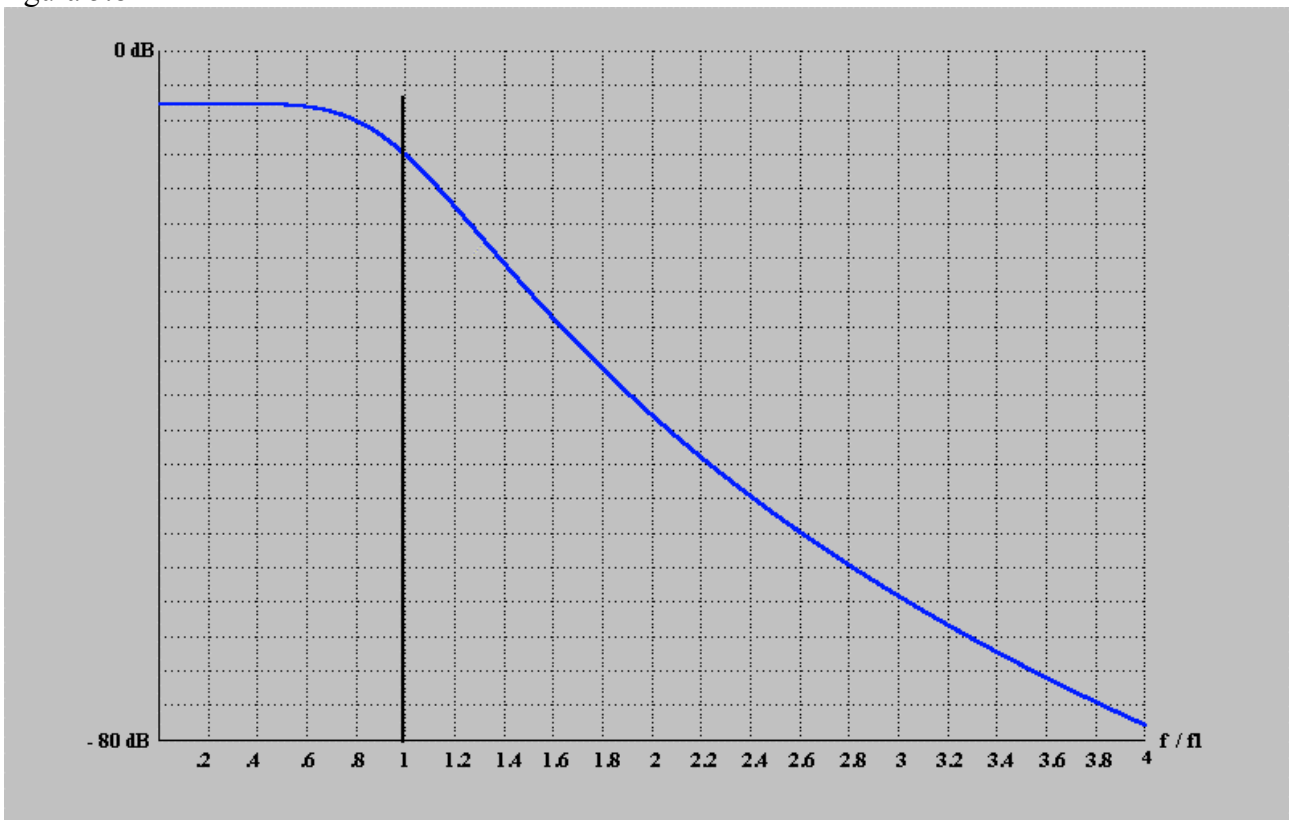
Il valore di C3 sarà pertanto

$$C3 = 2 * C1 = 2 * 31847 \text{ pF} = 63694 \text{ pF (con precisione dell'1.25 %)}$$

Tracciamento della curva di risposta:

La curva di risposta universale di questo filtro ha un profilo diverso di quella tracciata in figura 5.5 ed è riportata in figura 5.8

figura 5.8



La curva di risposta ha in ascisse il rapporto f/f_1 , ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 4 dB per divisione per un totale di 80 dB.

Per utilizzare la curva di figura 5.7 dobbiamo determinare il rapporto f / f_1 per ciascuna frequenza per la quale desideriamo stabilire l'attenuazione prodotta dal filtro; se vogliamo ad esempio conoscere l'attenuazione del nostro filtro alla frequenza $f = 15000$ Hz dobbiamo:

1) calcolare il rapporto:

$$f / f_1 = 15000 \text{ Hz} / 5000 \text{ Hz} = 3$$

2) tracciare una perpendicolare dall'ascissa d'ampiezza 3 e trovare il punto d'incontro con la curva

3) tracciare una perpendicolare dal punto d'incontro all'asse delle ordinate sul quale si leggerà il valore d'attenuazione di circa 64 dB.

A questo proposito si deve osservare che tra i valori d'attenuazione teorici, rilevati con l'ausilio della curva di figura 5.7, e valori misurati in laboratorio si potranno trovare differenze dell'ordine di circa 2dB a causa, sia dell'incertezza delle misure, sia per le perdite naturali che si hanno nelle due induttanze.

Osservazioni generali:

Il progetto della doppia cellula passa basso si conclude con alcune osservazioni che ne chiariscono meglio il funzionamento:

Del filtro di cui abbiamo trattato s'è detto che nella zona d'attenuazione la pendenza è di -36 dB / ottava, questa caratteristica è controllabile soltanto per valori di frequenza lontani dalla frequenza di taglio f_1 . Un'idea quantitativa di questo comportamento si ha immediatamente dall'esame della curva di risposta di figura 5.7; se consideriamo l'attenuazione al punto d'ascissa 1 con il punto d'ascissa 2, corrispondenti rispettivamente a due frequenze l'una il doppio dell'altra, si vede che nel primo punto l'attenuazione è di -12 dB e nel secondo punto di -42.4 dB con un salto di 30.4 dB contro i 36 che sono la caratteristica teorica della doppia cellula. Se ora esaminiamo altri due punti della curva più lontani da f_1 , il punto di ascissa 1.8 e il punto di ascissa 3.6, riscontriamo per il primo un'attenuazione di -36.8 dB e per il secondo un'attenuazione di circa -72 dB con un salto di 35.2 dB che si avvicina sensibilmente al valore teorico della pendenza di -36 dB/ottava dichiarata per questo tipo di configurazione.

5.2 Filtri passa alto passivi

Un filtro passa alto **ideale** è un circuito che ha il compito di consentire il passaggio di tensioni elettriche la cui frequenza può essere compresa tra f_1 e valori superiori ad f_1 ; sotto la frequenza f_1 tutte le tensioni vengono bloccate e all'uscita del filtro non si ha alcun segnale, l'andamento grafico di questo comportamento è riportato in figura 5.9.

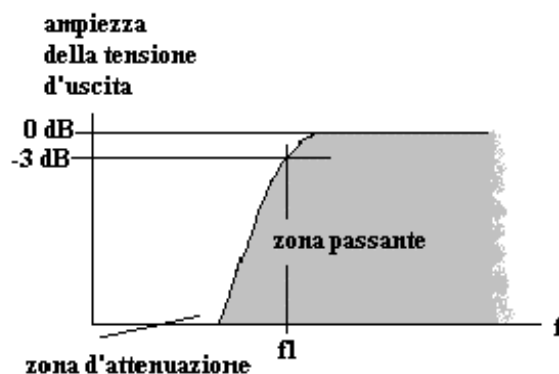
figura 5.9



In figura sono evidenziate le due zone caratteristiche del filtro, la zona passante, entro la quale i segnali d'ingresso possono transitare purché abbiano frequenze superiori ad f_1 , e la zona non passante, nella quale nessun segnale avente frequenza inferiore ad f_1 può transitare.

Il comportamento di un filtro passa alto **reale** ha però un comportamento molto diverso nell'intervallo di frequenze che precede e che segue il valore di f_1 ; il percorso tra zona passante e zona non passante non avviene bruscamente, come in figura 5.9, ma gradualmente, secondo una curva caratteristica la cui pendenza è tanto più elevata quanto maggiore è la complessità del circuito passa alto, si ha perciò una curva di risposta reale del tipo di quella indicata in figura 5.10.

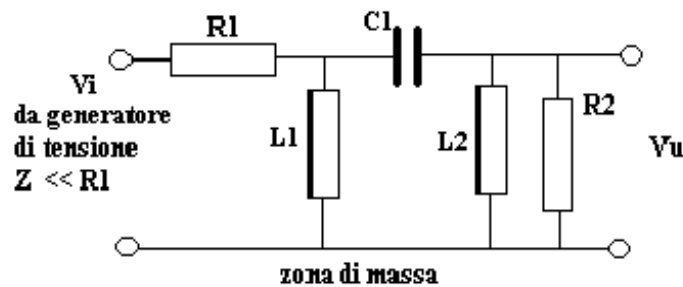
figura 5.10



In figura 5.10 si vede come la risposta del filtro passa alto consenta di attenuare le frequenze inferiori ad f_1 secondo una certa curva caratterizzata dal punto di ascissa f_1 ed ordinata -3 dB e dalla pendenza della curva stessa espressa in dB/ottava; il valore di f_1 è detto frequenza di taglio.

Lo schema elettrico di un filtro passa alto, nella configurazione circuitale più semplice, detta “cellula”, è mostrato in figura 5.11.

figura 5.11

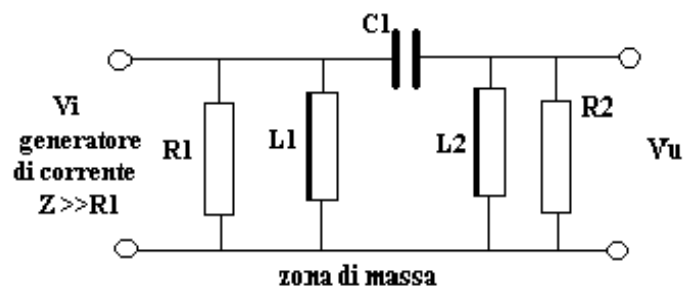


Nella figura si vedono i componenti che costituiscono la struttura filtrante, due resistenze R1 ed R2, uguali tra loro, due induttanze L1 ed L2, anch'esse uguali tra loro ed una capacità C1. La tensione del segnale d'ingresso, Vi, è applicata in serie alla resistenza R1; il segnale d'uscita Vu è presente ai capi di R2.

Questa configurazione della cellula necessita di un segnale d'ingresso il cui generatore abbia un'impedenza molto più bassa del valore di R1. Si dice in questo caso che il generatore deve essere un “generatore di tensione”, ciò comporta una perdita di 6 dB (2 volte), perdita d'inserzione, per la partizione della tensione Vi da parte di R1 ed R2.

Un circuito filtrante con le stesse caratteristiche di risposta di quello mostrato in figura 5.11 è realizzabile per il filtraggio di segnali prodotti da “generatori di corrente”, generatori che hanno un'impedenza molto più elevata di R1, lo schema di questo filtro è mostrato in figura 5.12.

figura 5.12



In questo circuito la tensione d'ingresso è applicata in parallelo ad R1 ed il segnale d'uscita Vu, come nel circuito precedente, è presente ai capi di R2; in questo caso la tensione Vi non subisce nessuna perdita d'inserzione.

Il progetto di entrambi i filtri passa alto sopra illustrati è fattibile, con semplici formule di calcolo, mediante il dimensionamento dei componenti in dipendenza del valore voluto della frequenza di taglio f1; le formule in oggetto sono le seguenti:

$$C = 1 / (4 * \pi * f1 * R)$$

$$L = R / (2 * \pi * f1)$$

dove

C è espresso in Farad

L è espresso in Henry

Per le soluzioni circuitali alle quali si applicano le formule indicate si hanno le seguenti caratteristiche:

Filtro passa alto con segnale Vi da generatore di tensione

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -3dB – 6 dB = -9 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di f_1 ; Att. = -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

Filtro passa alto con segnale Vi da generatore di corrente

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = 0 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -3dB – 0dB = -3 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di f_1 ; Att.= -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

Sviluppiamo ora il consueto esercizio sull'argomento:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa alto in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una $Z_u = 20 \text{ ohm}$, si voglia una frequenza di taglio $f_1 = 10000 \text{ Hz}$ ed una pendenza di -18 dB/ottava.

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.11 per cui: Il valore di R_1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 20 \text{ ohm}$ quindi dovrà essere:

$$R_1 \gg Z_u$$

ovvero

$$R_1 \gg 20 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile* che R_1 sia almeno 100 volte il valore di Z_u quindi

$$R_1 = 2000 \text{ ohm.}$$

Dato che $R_1 = R_2$ si ha

$$R_2 = 2000 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R_1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili il dato di R_1 sarà accettabile altrimenti dovrà essere rivisto.

Calcolo di L e C:

Dati $f_1 = 1000 \text{ Hz}$ e $R = 2000 \text{ ohm}$

il calcolo di L si effettua con la formula:

$$L = R / (2 * \pi * f_1) = 2000 \text{ ohm} / (3.14 * 10000 \text{ Hz}) = 63.7 \text{ mH}$$

Quindi $L1 = L2 = 63.7 \text{ mH}$

il calcolo di $C1$ si effettua con la formula:

$$C1 = 1 / (4 * \pi * f1 * R) = 1 / (4 * 6.28 * 10000 \text{ Hz} * 2000 \text{ ohm}) = 1990 \text{ pF}$$

(con precisione dell'1.25 %)

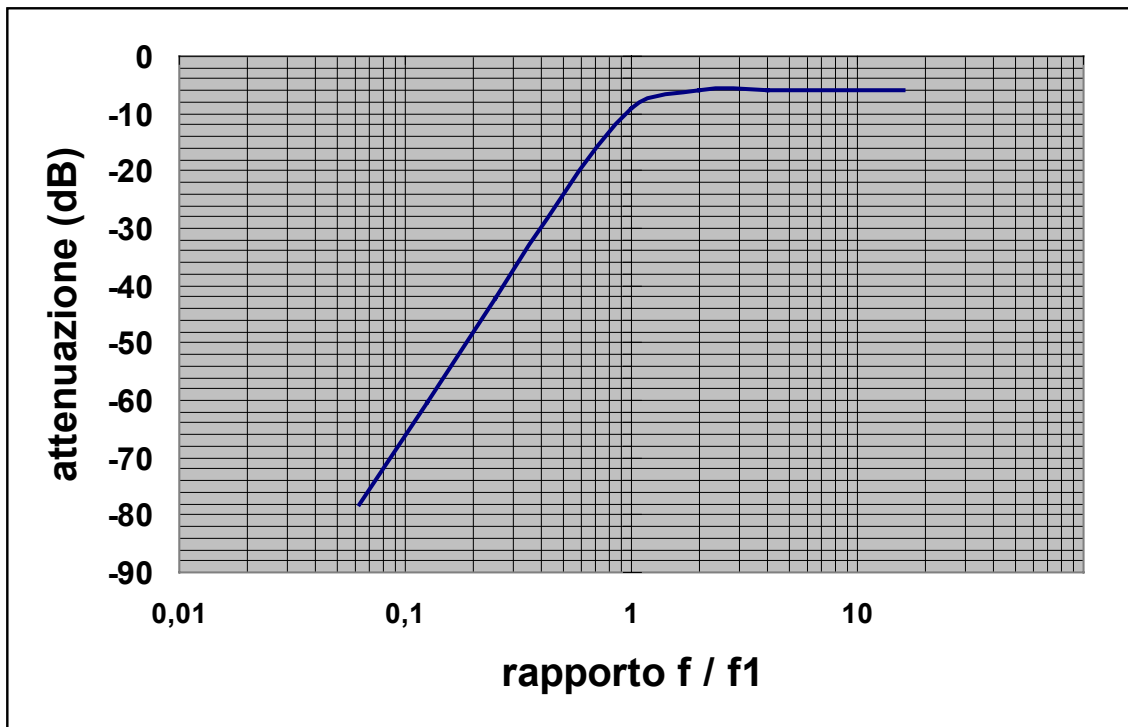
Entrambi i componenti calcolati sono di valore accettabile, quindi il valore di $R = 2000 \text{ ohm}$ è adatto al progetto.

Tracciamento della curva di risposta:

Poter disporre dell'andamento grafico della curva di risposta del filtro è utile per il controllo della normale funzionalità del circuito una volta costruito.

Utilizziamo un curva di risposta universale adatta alla cellula di figura 5.11; questa curva è tracciata nella figura 5.13.

figura 5.13



La curva di risposta universale ha, in ascisse logaritmiche, il rapporto $f/f1$, ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 2 dB per divisione.

Per utilizzare la curva di figura 5.13 dobbiamo determinare il rapporto $f / f1$ per ciascuna frequenza per la quale desideriamo stabilire l'attenuazione prodotta dal filtro; se vogliamo ad esempio conoscere l'attenuazione del nostro filtro alla frequenza $f = 4000 \text{ Hz}$ dobbiamo:

1) calcolare il rapporto:

$$f / f1 = 4000 \text{ Hz} / 10000 \text{ Hz} = 0.4$$

2) tracciare una perpendicolare dall'ascissa d'ampiezza 0.4 e trovare il punto d'incontro con la curva

3) tracciare una perpendicolare dal punto d'incontro all'asse delle ordinate sul quale si leggerà il valore d'attenuazione di circa 30 dB.

Osservazioni generali:

Il progetto della cellula passa alto si conclude con alcune osservazioni che ne chiariscono meglio il funzionamento:

Del filtro di cui abbiamo trattato s'è detto che nella zona d'attenuazione la pendenza è di -18 dB / ottava , questa caratteristica è controllabile soltanto per valori di frequenza lontani dalla frequenza di taglio f_1 . Un'idea quantitativa di questo comportamento si ha immediatamente dall'esame della curva di risposta di figura 5.13; se consideriamo l'attenuazione al punto d'ascissa 1 con il punto d'ascissa 0.5, corrispondenti a due frequenze l'una la metà dell'altra, si vede che nel primo punto l'attenuazione è di -9 dB e nel secondo punto di -24 dB con un salto di 15 dB contro i 18 che sono la caratteristica teorica della cellula. Se ora esaminiamo altri due punti della curva più lontani da f_1 , il punto di ascissa 0.2 e il punto di ascissa 0.1, corrispondenti anch'essi a due frequenze l'una la metà dell'altra, riscontriamo per il primo un'attenuazione di -48 dB e per il secondo un'attenuazione di -66 dB con un salto di 18 dB che coincide al valore teorico della pendenza di -18 dB/ottava dichiarata per questo tipo di cellula.

Sviluppiamo ora un esercizio per l'impiego della configurazione passa alto di figura 5.12:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa alto in grado di essere accoppiato ad un generatore di corrente avente una $Z_u = 150000 \text{ ohm}$, si voglia una frequenza di taglio $f_1 = 2000 \text{ Hz}$ ed una pendenza di -18 dB/ottava .

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.12 per cui:

Il valore di R_1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 150000 \text{ ohm}$ quindi dovrà essere:

$$R_1 \ll Z_u$$

ovvero

$$R_1 \ll 150000 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R_1 sia almeno $1/100$ il valore di Z_u quindi

$$R_1 = 1500 \text{ ohm.}$$

Dato che $R_1 = R_2$ si ha

$$R_2 = 1500 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R_1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili, il dato di R_1 sarà accettabile, altrimenti dovrà essere rivisto.

Calcolo di L e C :

Dati $f_1 = 2000 \text{ Hz}$ e $R = 1500 \text{ ohm}$

il calcolo di L_1 ed L_2 si effettua con la formula:

$$L_1 = L_2 = R / (2 * \pi * f_1) = 1500 \text{ ohm} / (2 * 3.14 * 2000 \text{ Hz}) = 119.4 \text{ mH}$$

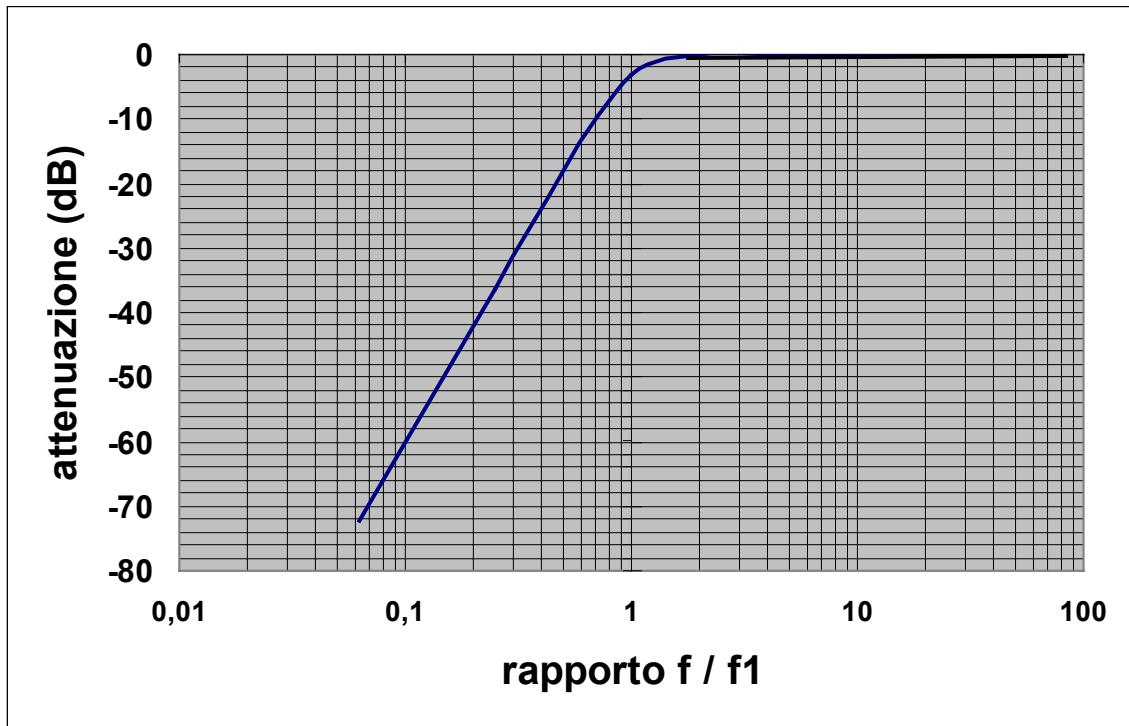
il calcolo di C1 si effettua con la formula:

$$C1 = 1 / (4 * \pi * f1 * R) = 1 / (4 * 3.14 * 2000 \text{ Hz} * 1500 \text{ ohm}) = 26539 \text{ pF}$$

Tracciamento della curva di risposta:

La curva di risposta di questo filtro ha l'identico profilo di quella tracciata in figura 5.13 ma non presenta l'attenuazione d'inserzione di -6 dB essendo pilotato di corrente invece che di tensione; la risposta del nuovo passa alto è riportata in figura 5.14.

figura 5.14



La curva di risposta universale ha, in ascisse logaritmiche, il rapporto $f/f1$, ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 2 dB per divisione.

Il filtro presenta attenuazione 0 dB nella zona passante e -3 dB in corrispondenza alla frequenza di taglio $f1 = 2000 \text{ Hz}$, così come si evince dal punto d'ascissa 1, calcolato dal rapporto tra $f = 2000 \text{ Hz}$ ed $f1 = 2000 \text{ Hz}$:

$$f/f1 = 2000 \text{ Hz} / 2000 \text{ Hz} = 1$$

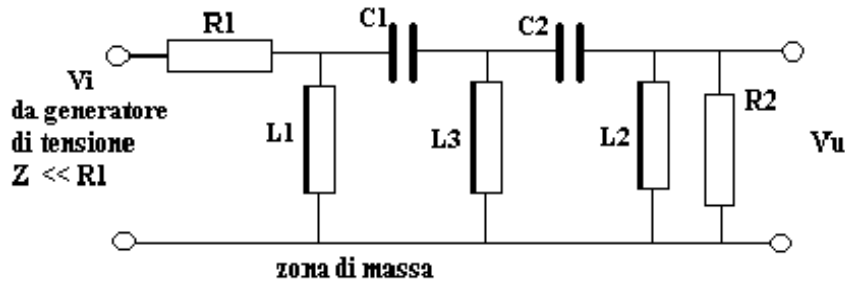
La pendenza è controllabile tra $f/f1 = 0.2$ e $f/f1 = 0.1$; in questo intervallo, sensibilmente inferiore alla frequenza di taglio, è di -18 dB/ottava .

Si ricorda, come già detto in precedenza, che in questo tipo di filtro, pur non essendo presente l'attenuazione d'inserzione, non si ha un miglioramento nel rapporto tra ampiezza delle tensioni nella zona passante e le tensioni nella zona d'attenuazione.

5.2.1 Il filtro passa alto a più cellule

Per ottenere filtri passa alto con attenuazioni fuori banda aventi pendenze superiori a quelle ottenibili con filtri ad una cellula, si possono realizzare strutture con più cellule uguali tra loro. Un esempio di questa nuova configurazione a due cellule, derivata dalla struttura di figura 5.11, è riportata in figura 5.15.

figura 5.15



Il nuovo filtro è composto dalle due resistenze di terminazione R1 ed R2 di valore uguale, le induttanze L1 ed L2 uguali tra loro, i condensatori C1 e C2 anch'essi di valore uguale tra loro ed infine dall'induttanza L3 di valore dimezzato rispetto ad L1.

Le formule di calcolo dei componenti sono le stesse illustrate nel paragrafo 5.2, che qui riassumiamo, data la presenza di L3

$$C1 = C2 = 1 / (4 * \pi * f1 * R)$$

$$L1 = L2 = R / (2 * \pi * f1)$$

$$L3 = L2 / 2$$

Si deve osservare che in questa configurazione compaiono soltanto 5 componenti reattivi dato che, a seguito dell'unione tra due cellule, la reattanza L3 ne sostituisce due; il circuito è pertanto da considerarsi, al fine dei calcoli, come se avesse 6 componenti reattivi.

La nuova struttura consente un'attenuazione fuori banda con una pendenza di -36 dB per ottava, con un taglio di -6 dB, rispetto alla banda passante, in corrispondenza della frequenza di taglio f1.

Sintetizzando:

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 6 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -6dB - 6 dB = -12 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di f1; Att. = -36 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 63 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

Anche per questa configurazione risulta utile lo sviluppo di un esercizio:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa alto in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una $Z_u = 10 \text{ ohm}$, si voglia una frequenza di taglio $f1 = 1000 \text{ Hz}$ ed una pendenza di -36 dB/ottava.

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.15, per cui: Il valore di R1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 10 \text{ ohm}$, quindi dovrà essere:

$$R1 \gg Z_u$$

ovvero

$$R1 \gg 10 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R1 sia almeno 100 volte il valore di Zu, quindi

$$R1 = 1000 \text{ ohm.}$$

Dato che $R1 = R2$, si ha

$$R2 = 1000 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili il dato di R1, sarà accettabile, altrimenti, dovrà essere rivisto.

Calcolo di L1; L2; L3 C1; C2;:

Dati $f1 = 1000 \text{ Hz}$ e $R1=R2 = 1000 \text{ ohm}$

il calcolo di L1 = L2 si effettua con la formula:

$$L1=L2=R/(2 * \pi * f1)=1000 \text{ ohm}/(2 * 3.14 * 1000 \text{ Hz})=159.2 \text{ mH}$$

$$L3 = L1 / 2 = 159.2 \text{ mH} / 2 = 79.6 \text{ mH}$$

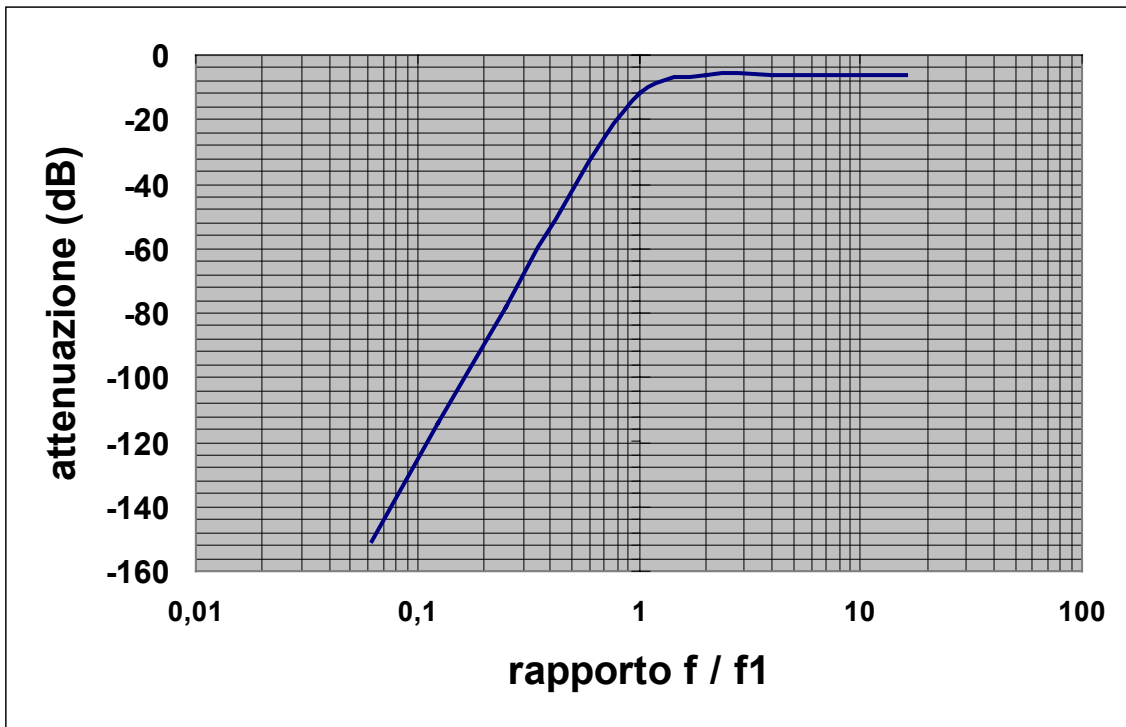
il calcolo di C1 e C2 si effettua con la formula:

$$C1 = C2 = 1 / (4 * \pi * f1 * R) = 1 / (12.56 * 1000 \text{ Hz} * 1000 \text{ ohm}) = 79617 \text{ pF}$$

(con precisione dell'1.25 %)

Tracciamento della curva di risposta:

La curva di risposta universale di questo filtro ha un profilo diverso di quella tracciata in figura 5.14 ed è riportata in figura 5.16
figura 5.16



La curva di risposta ha in ascisse il rapporto f/f_1 , ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 4 dB per divisione per un totale di 160 dB.

Per utilizzare la curva di figura 5.16 dobbiamo determinare il rapporto f / f_1 per ciascuna frequenza per la quale desideriamo stabilire l'attenuazione prodotta dal filtro; se vogliamo ad esempio conoscere l'attenuazione del nostro filtro alla frequenza $f = 100$ Hz dobbiamo:

1) calcolare il rapporto:

$$f / f_1 = 100 \text{ Hz} / 1000 \text{ Hz} = 0.1$$

2) tracciare una perpendicolare dall'ascissa d'ampiezza 0.1 e trovare il punto d'incontro con la curva

3) tracciare una perpendicolare dal punto d'incontro all'asse delle ordinate sul quale si leggerà il valore d'attenuazione di circa 125 dB.

Osservazioni generali:

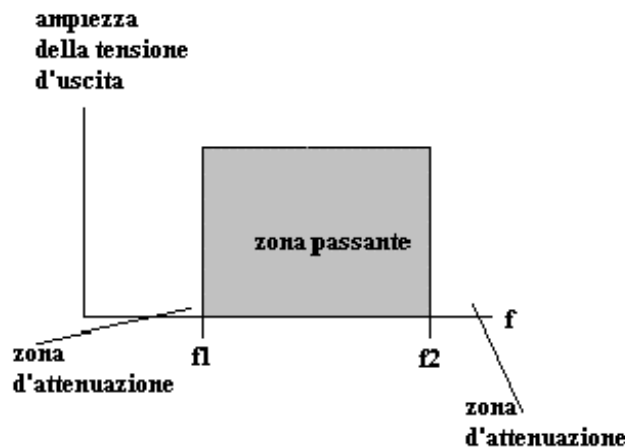
Il progetto della doppia cellula passa alto si conclude con alcune osservazioni che ne chiariscono meglio il funzionamento:

Del filtro di cui abbiamo trattato s'è detto che nella zona d'attenuazione la pendenza è di -36 dB / ottava; questa caratteristica è controllabile soltanto per valori di frequenza lontani dalla frequenza di taglio f_1 . Un'idea quantitativa di questo comportamento si ha immediatamente dall'esame della curva di risposta di figura 5.16; se consideriamo l'attenuazione al punto d'ascissa 1 con il punto d'ascissa 0.5, corrispondenti rispettivamente a due frequenze l'una il doppio dell'altra, si vede che nel primo punto l'attenuazione è di -12 dB e nel secondo punto di -40 dB con un salto di 28 dB contro i 36 che sono la caratteristica teorica della doppia cellula. Se ora esaminiamo altri due punti della curva più lontani da f_1 , il punto di ascissa 0.2 e il punto di ascissa 0.1, riscontriamo per il primo un'attenuazione di -88 dB e per il secondo un'attenuazione di circa -125 dB con un salto di 37 dB che si avvicina sensibilmente al valore teorico della pendenza di -36 dB/ottava dichiarata per questo tipo di configurazione.

5.3 Filtri passa banda passivi

Un filtro passa banda **ideale** è un circuito che ha il compito di consentire il passaggio di tensioni elettriche la cui frequenza può essere compresa tra f_1 ed f_2 ; al di fuori di questo intervallo tutte le tensioni vengono bloccate e all'uscita del filtro non si ha alcun segnale. L'andamento grafico di questo comportamento è riportato in figura 5.17.

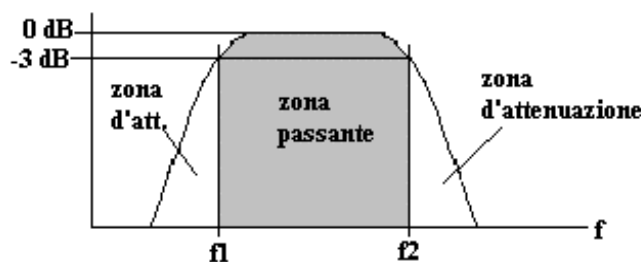
figura 5.17



In figura sono evidenziate le due zone caratteristiche del filtro, la zona passante, entro la quale i segnali d'ingresso possono transitare purché abbiano frequenze comprese tra f_1 ed f_2 , e la zona non passante, nella quale nessun segnale avente frequenza inferiore ad f_1 o superiore ad f_2 può transitare.

Il comportamento di un filtro passa banda **reale** ha però un comportamento molto diverso nell'intervallo di frequenze che precede f_1 e che segue f_2 ; il percorso tra zona passante e zona non passante non avviene bruscamente, come in figura 5.17, ma gradualmente, secondo una curva caratteristica la cui pendenza è tanto più elevata quanto maggiore è la complessità del circuito passa banda. Si ha perciò una curva di risposta reale del tipo di quella indicata in figura 5.18.

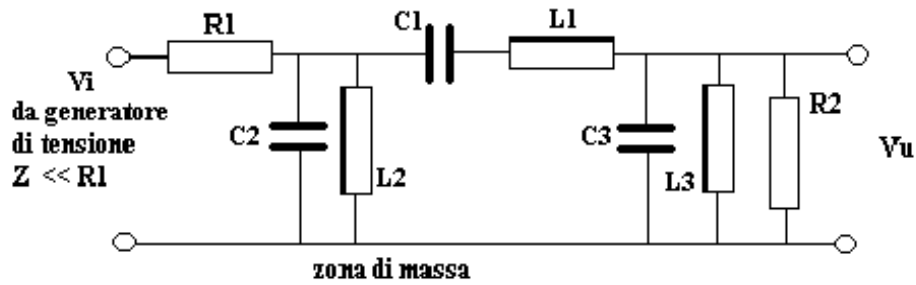
figura 5.18



In figura 5.18 si vede come la risposta del filtro passa banda consenta di attenuare le frequenze inferiori ad f_1 e superiori ad f_2 secondo certe curve caratterizzate dai punti di ascissa f_1 ed f_2 ed ordinate -3 dB. Le pendenze della curva sono espresse in dB/ottava; i valori di f_1 e di f_2 sono detti frequenze di taglio.

Lo schema elettrico di un filtro passa banda, nella configurazione circuitale più semplice, detta "cellula", è mostrato in figura 5.19.

figura 5.19



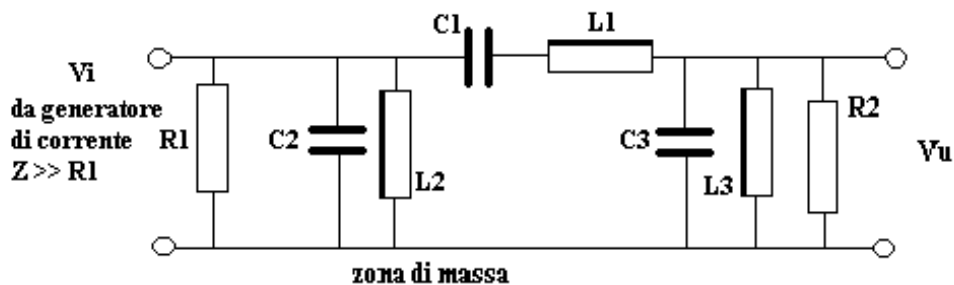
Nella figura si vedono i componenti che costituiscono la struttura filtrante, due resistenze R1 ed R2 uguali tra loro, due condensatori C2 e C3 , anch’essi uguali tra loro, le induttanze L2 ed L3 uguali tra loro ed infine il condensatore C1 e l’induttanza L1.

La tensione del segnale d’ingresso, Vi, è applicata in serie alla resistenza R1; il segnale d’uscita Vu è presente ai capi di R2.

Questa configurazione della cellula necessita di un segnale d’ingresso il cui generatore abbia un’impedenza molto più bassa del valore di R1 (si dice in questo caso che il generatore deve essere un “generatore di tensione”) ; ciò comporta una perdita di 6 dB (2 volte), perdita d’inserzione, per la partizione della tensione Vi da parte di R1 ed R2.

Un circuito filtrante con le stesse caratteristiche di risposta di quello mostrato in figura 5.19 è realizzabile per il filtraggio di segnali prodotti da “generatori di corrente” , i quali hanno un’impedenza molto più elevata di R1. Lo schema di questo filtro è mostrato in figura 5.20.

figura 5.20



Il progetto di entrambi i filtri passa banda sopra illustrati è fattibile, con particolari formule di calcolo, mediante il dimensionamento dei componenti in dipendenza del valore voluto delle due frequenze di taglio f1 ed f2; le formule in oggetto sono le seguenti:

$$L1 = R / [\pi * (f2 - f1)]$$

$$L2 = L3 = R * (f2 - f1) / (2 * \pi * f1 * f2)$$

$$C1 = (f2 - f1) / (4 * \pi * f1 * f2 * R)$$

$$C2 = C3 = 1 / [2 * \pi * (f2 - f1) * R]$$

dove

C è espresso in Farad

L è espresso in Henry

Il calcolo di un filtro di banda richiede un poco d'esperienza per evitare di trovarsi, dopo la procedura di computazione con le formule indicate, con valori di componenti praticamente non accettabili, o perché troppo grandi o perché troppo piccoli. Vedremo più avanti come affrontare queste difficoltà. Un metodo per la computazione veloce su P.C. di filtri di banda è riportato in appendice A9.

Per le soluzioni circuitali, alle quali si applicano le formule indicate, si hanno le seguenti caratteristiche:

Filtro passa banda con segnale Vi da generatore di tensione

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alle due frequenze di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alle frequenze di taglio Att. = -3dB – 6 dB = -9 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di f_1 e ben sopra il valore di f_2 ; Att. = -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni raddoppiamento della frequenza)

Filtro passa banda con segnale Vi da generatore di corrente

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = 0 dB

Attenuazione alle frequenze di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = - 3 dB

Attenuazione totale alle frequenze di taglio Att. = -3dB – 0dB = -3 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di f_1 e ben sopra il valore di f_2 ; Att.= -18 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 8 volte ad ogni raddoppiamento della frequenza)

Vediamo lo sviluppo di un esercizio classico:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa banda in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una $Z_u = 20$ ohm, si vogliano le frequenze di taglio poste rispettivamente per $f_1 = 5000$ Hz $f_2 = 10000$ Hz ed una pendenza di -18 dB/ottava.

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.19, per cui: Il valore di R_1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 10$ ohm ; quindi dovrà essere: $R_1 \gg Z_u$

ovvero

$$R_1 \gg 10 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R_1 sia almeno 100 volte il valore di Z_u , quindi

$$R_1 = 2000 \text{ ohm.}$$

Dato che $R_1 = R_2$, si ha

$$R_2 = 2000 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R_1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili, il dato di R_1 sarà accettabile, altrimenti, dovrà essere rivisto.

Calcolo di L_1 ; L_2 ; L_3 ; C_1 ; C_2 ; C_3 :

Dati $f_1 = 5000$ Hz ; $f_2 = 10000$ Hz ed $R_1=R_2 = 2000$ ohm

il calcolo di L_1 si effettua con la formula:

$L1 = R / [\pi * (f2 - f1)] = 2000 \text{ ohm} / [3.14 * (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz})] = 127.38 \text{ mH}$
 il calcolo di $L2 = L3$ si effettua con la formula:

$$L2 = L3 = R * (f2 - f1) / (2 * \pi * f1 * f2) = 2000 \text{ ohm} * (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz}) / (6.28 * 5000 \text{ Hz} * 10000 \text{ Hz}) = 31.8 \text{ mH}$$

il calcolo di $C1$ si effettua con la formula:

$$C1 = (f2 - f1) / (4 * \pi * f1 * f2 * R) = (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz}) / (12.56 * 5000 \text{ Hz} * 10000 \text{ Hz} * 2000 \text{ ohm}) = 3980 \text{ pF}$$

(con precisione dell'1.25 %)

il calcolo di $C2 = C3$ si effettua con la formula:

$$C2 = C3 = 1 / [2 * \pi * (f2 - f1) * R] = 1 / [6.28 * (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz}) * 2000 \text{ ohm}] = 15923 \text{ pF}$$

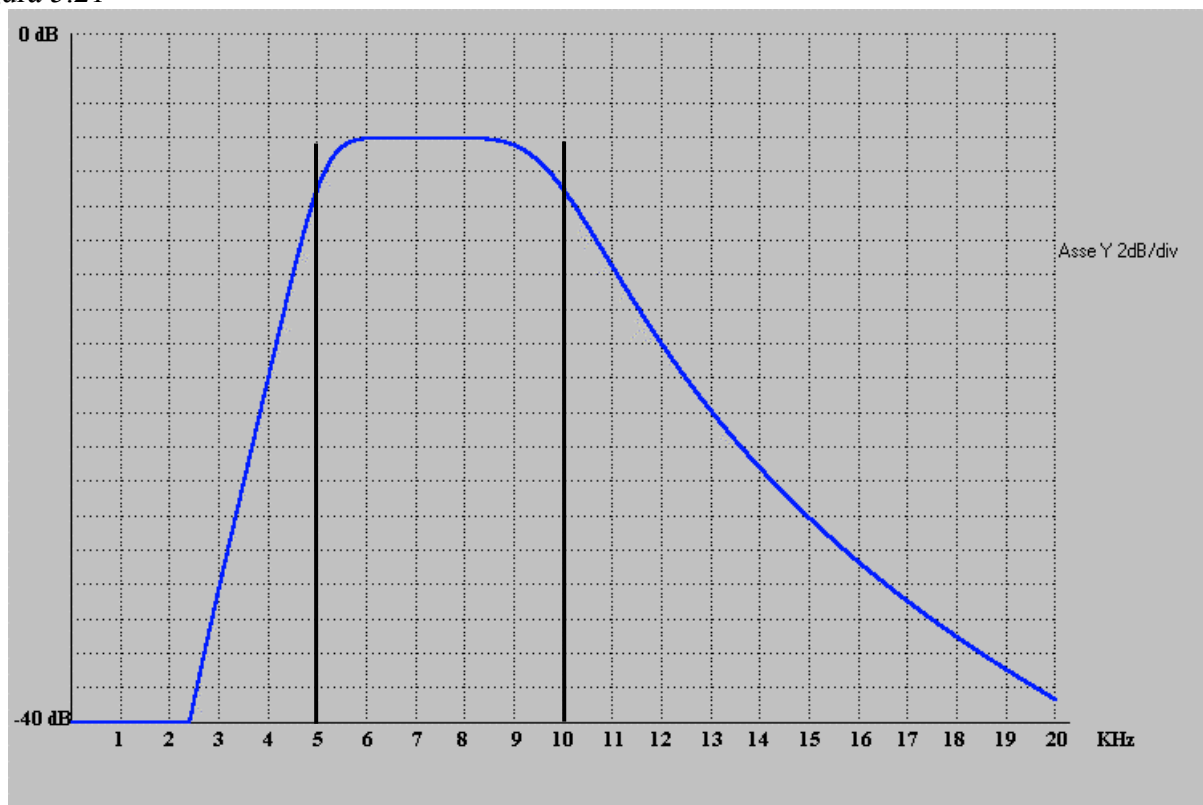
(con precisione dell'1.25 %)

Tracciamento della curva di risposta:

Nel caso dei filtri passa banda non è possibile utilizzare una curva di risposta universale, ma si deve ricorrere al tracciamento specifico della risposta del filtro progettato.

La curva di risposta di questo filtro è riportata in figura 5.21

figura 5.21



La curva di risposta ha in ascisse la frequenza espressa in KHz ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 2 dB per divisione, per un totale di 40 dB.

La lettura della curva mostra particolari caratteristiche:

- Per le frequenze di taglio, $f_1 = 5000$ Hz e $f_2 = 10000$, Hz l'attenuazione è di -9 dB.
- Dalla frequenza di taglio $f_2 = 10000$ Hz al suo doppio, $f = 20000$ Hz, si evidenzia un salto d'attenuazione di ben 31 dB che apparentemente contrasta con la pendenza dichiarata di -18 dB/ottava. Questo comportamento è dovuto al coefficiente di merito delle induttanze che nei pressi della frequenza di taglio incrementa la pendenza d'attenuazione (per trovare la pendenza di -18 dB/ottava si dovrebbe tracciare la risposta per frequenze oltre i $20-40$ KHz).
- Dalla frequenza di taglio $f_1 = 5000$ Hz alla sua metà, $f = 2500$ Hz, si evidenzia un salto attenuazione di circa 31 dB; anche in questo caso il comportamento è dovuto al coefficiente di merito delle induttanze che, nei pressi della frequenza di taglio, incrementa la pendenza d'attenuazione (per trovare la pendenza di -18 dB/ottava si dovrebbe tracciare la risposta per frequenze sotto i 1000 o 2000 Hz).

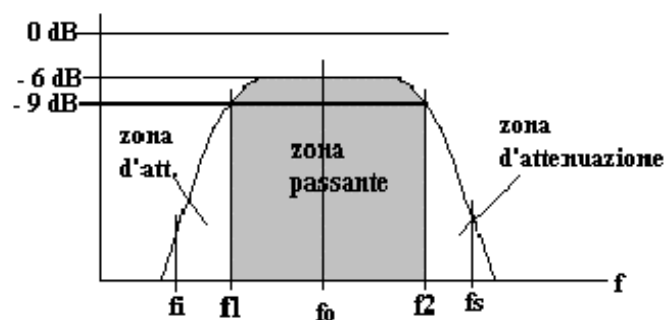
Osservazioni in merito alla curva di risposta:

Per quanto visto in merito alla curva di risposta risulta evidente che il suo tracciamento non è fattibile senza l'impiego di un idoneo programma di calcolo, già menzionato in precedenza e contenuto in appendice A10; se non si ha la possibilità di impiegare detto programma si consiglia ciò che molti anni fa veniva fatto in questi casi, per il controllo dei filtri di banda in laboratorio, in assenza dei grafici delle curve di risposta:

- Si annotano i dati:
 - Frequenze di taglio, f_1 ed f_2 , della banda passante voluta.
 - Frequenza di centro banda $f_0 = (f_1 + f_2) / 2$.
 - Estremo superiore, f_s , della zona d'attenuazione d'interesse nella quale ci si aspetta una pendenza minima di -18 dB/ottava.
 - Estremo inferiore, f_i , della zona d'attenuazione d'interesse nella quale ci si aspetta una pendenza minima di -18 dB/ottava.

La figura 5.22 mostra la collocazione dei dati nel contesto grafico relativo alla curva di risposta voluta.

figura 5.22



- Si dimensiona il filtro di banda con molta attenzione onde evitare errori banali di calcolo, si controllano i calcoli almeno due volte.
- Si costruisce il prototipo e lo si prova in laboratorio; si controlla che l'attenuazione alla frequenza f_0 , di centro banda, sia dell'ordine di -6 dB (tolleranza circa -1 dB);

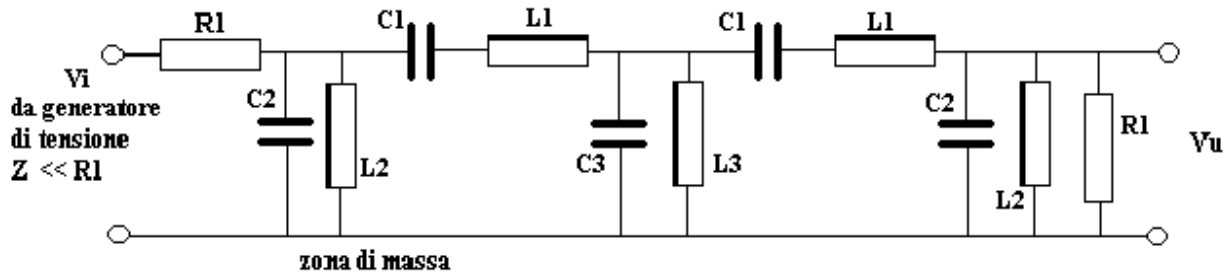
l'attenuazione in fo è dovuta per 6 dB alla perdita d'inserzione e per il restante alle perdite nelle induttanze.

- Si controlla che l'attenuazione alle frequenze di taglio f_1 ed f_2 sia dell'ordine di -9 dB (tolleranza circa -1 dB).
- Si controlla fuori dalla banda passante, tra f_2 ed f_s , se le pendenze d'attenuazione sono entro i limiti voluti (al meno -18 dB ad ogni raddoppiamento della frequenza).
- Si controlla fuori dalla banda passante, tra f_1 ed f_i , se le pendenze d'attenuazione sono entro i limiti voluti (al meno -18 dB ad ogni dimezzamento della frequenza).
- Se i dati rilevati corrispondono alle esigenze d'impostazione, il controllo del filtro può ritenersi concluso.

5.3.1 Il filtro di banda a due cellule

Per ottenere filtri passa banda con pendenze superiori a quelle ottenibili con filtri ad una cellula si possono realizzare strutture con due cellule uguali tra loro. Un esempio di questa nuova configurazione, derivata dalla struttura di figura 5.20, è riportata in figura 5.23.

figura 5.23



Per semplificare l'illustrazione del nuovo filtro sono indicati con le stesse sigle i componenti uguali tra loro quali:

Le due resistenze di terminazione R, le due induttanze L1, i due condensatori C1, i due condensatori C2 e le due induttanze L2

Fanno gruppo a parte il condensatore C3 e l'induttanza L3.

Le formule di calcolo dei componenti sono le stesse illustrate nel paragrafo 5.3 che qui riassumiamo data la presenza di L3 e di C3.

$$L1 = R / [\pi * (f2 - f1)]$$

$$L2 = R * (f2 - f1) / (2 * \pi * f1 * f2)$$

$$C1 = (f2 - f1) / (4 * \pi * f1 * f2 * R)$$

$$C2 = 1 / [2 * \pi * (f2 - f1) * R]$$

$$C3 = 2 * C2$$

$$L3 = L2 / 2$$

Si deve osservare che in questa configurazione compaiono soltanto 10 componenti reattivi dato che, a seguito dell'unione tra due cellule, la reattanza L3 ed il condensatore C3 ne sostituiscono, due la prima e due il secondo; il circuito è pertanto è da considerarsi, al fine dei calcoli, come se avesse 12 componenti reattivi.

La nuova struttura consente un'attenuazione fuori banda con una pendenza di -36 dB per ottava, con un taglio di -6 dB, rispetto alla banda passante, in corrispondenza delle frequenze di taglio f1 ed f2. Sintetizzando:

Perdita d'inserzione nella zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione alla frequenza di taglio rispetto al livello della zona passante Att. = -6 dB

Attenuazione totale alla frequenza di taglio Att. = -6dB - 6 dB = -12 dB

Pendenza della curva d'attenuazione ben sopra il valore di f2; Att. = -36 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 63 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

Pendenza della curva d'attenuazione ben sotto il valore di f1; Att. = -36 dB/ottava (pari alla riduzione dell'ampiezza del segnale di 63 volte ad ogni dimezzamento della frequenza)

Vediamo ora un'applicazione pratica di calcolo di un filtro di banda a due cellule:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un filtro passa banda in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una $Z_u = 36 \text{ ohm}$, si vogliono le frequenze di taglio poste rispettivamente per $f_1 = 1000 \text{ Hz}$ $f_2 = 2000 \text{ Hz}$ ed una pendenza di -36 dB/ottava .

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.23 per cui: Il valore di R_1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 36 \text{ ohm}$, quindi dovrà essere: $R_1 \gg Z_u$

ovvero

$$R_1 \gg 36 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R_1 sia almeno 100 volte il valore di Z_u , quindi

$$R_1 = 3600 \text{ ohm.}$$

*La possibilità che R_1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili, il dato di R_1 sarà accettabile, altrimenti, dovrà essere rivisto.

Calcolo di L_1 ; L_2 ; L_3 ; C_1 ; C_2 ; C_3 :

Dati $f_1 = 1000 \text{ Hz}$; $f_2 = 2000 \text{ Hz}$ ed $R_1 = 3600 \text{ ohm}$

il calcolo di L_1 si effettua con la formula:

$$L_1 = R / [\pi * (f_2 - f_1)] = 3600 \text{ ohm} / [3.14 * (2000 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz})] = 1.14 \text{ H}$$

il calcolo di L_2 si effettua con la formula:

$$L_2 = R * (f_2 - f_1) / (2 * \pi * f_1 * f_2) = 3600 \text{ ohm} * (2000 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz}) / (6.28 * 1000 \text{ Hz} * 2000 \text{ Hz}) = 0.286 \text{ H}$$

il calcolo di C_1 si effettua con la formula:

$$C_1 = (f_2 - f_1) / (4 * \pi * f_1 * f_2 * R) = (2000 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz}) / (12.56 * 1000 \text{ Hz} * 2000 \text{ Hz} * 3600 \text{ ohm}) = 11058 \text{ pF} \\ (\text{ con precisione dell'1.25 \%})$$

il calcolo di C_2 si effettua con la formula:

$$C_2 = 1 / [2 * \pi * (f_2 - f_1) * R] = 1 / [6.28 * (2000 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz}) * 3600 \text{ ohm}] = 44232 \text{ pF} \\ (\text{ con precisione dell'1.25 \%})$$

ed infine:

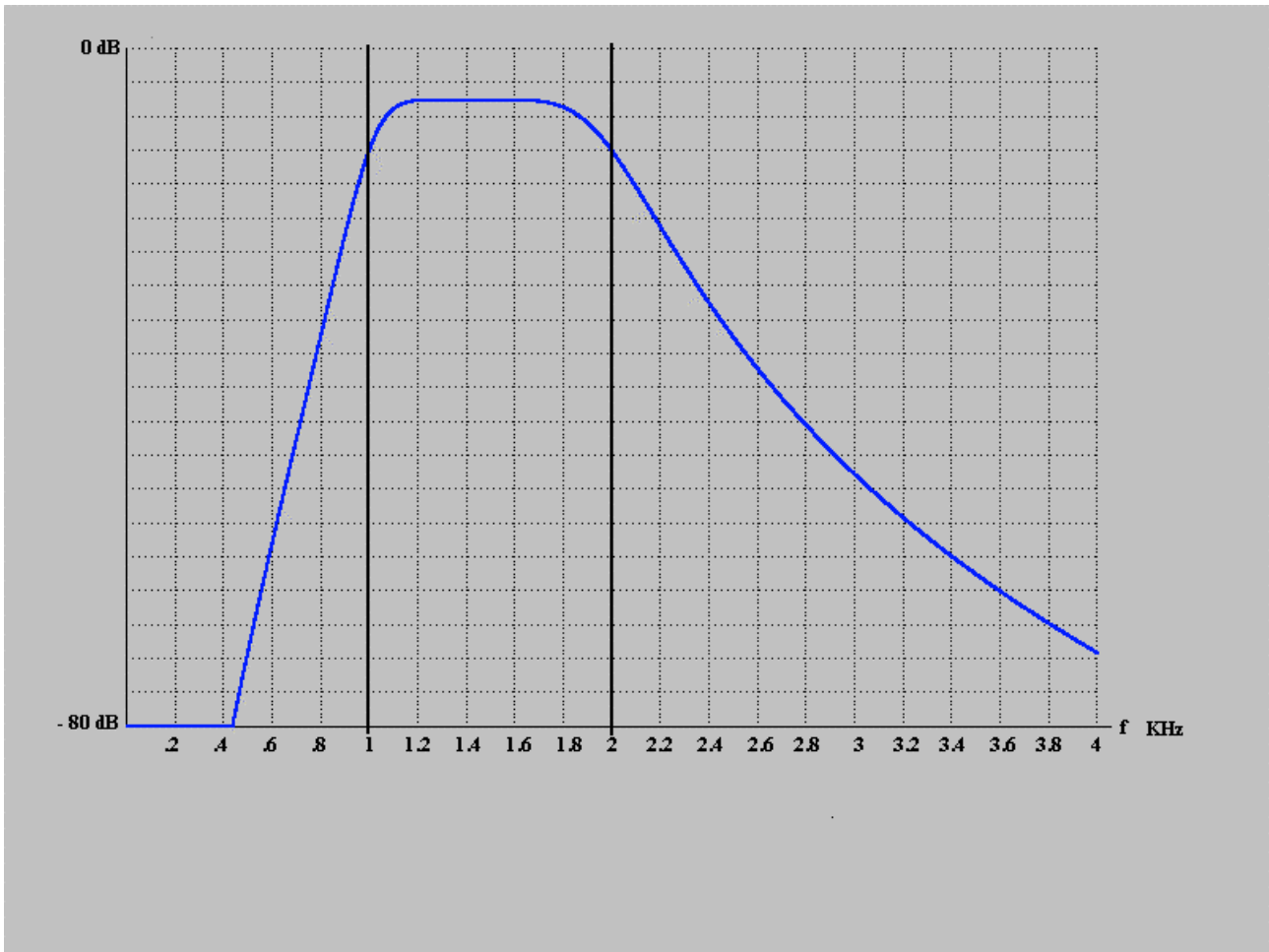
$$C_3 = 2 * C_2 = 44232 \text{ pF} * 2 = 88464 \text{ pF} (\text{ con precisione dell'1.25 \%})$$

$$L_3 = L_2 / 2 = 0.286 \text{ H} / 2 = 0.143 \text{ H}$$

Tracciamento della curva di risposta:

La curva di risposta di questo filtro è riportata in figura 5.24

figura 5.24



La curva di risposta ha in ascisse la frequenza espressa in KHz ed in ordinate l'attenuazione del filtro ad intervalli di 4 dB per divisione, per un totale di 80 dB.

La lettura della curva mostra le nuove caratteristiche:

- Per le frequenze di taglio, $f_1 = 1000$ Hz e $f_2 = 2000$, Hz l'attenuazione è di -12 dB.
- Dalla frequenza di taglio $f_2 = 2000$ Hz al suo doppio, $f = 4000$ Hz, si evidenzia un salto d'attenuazione di ben 60 dB.
- Dalla frequenza di taglio $f_1 = 1000$ Hz alla sua metà, $f = 500$ Hz, si evidenzia un salto attenuazione di circa 58 dB.

5.4 Tecniche di calcolo per i componenti dei filtri passivi

Negli esercizi svolti nei precedenti paragrafi abbiamo sempre impostato i progetti partendo dalle caratteristiche d'impedenza imposte dal generatore, fosse questo di tensione come di corrente. Questa procedura di calcolo, se pur corretta, a volte non può essere seguita per motivi banali, ma contingenti e cogenti, quali la difficoltà a reperire in tempi brevi le capacità che il progetto richiede. Infatti il progetto dei filtri passivi è subordinato essenzialmente alla possibilità di reperire i condensatori del valore desiderato. Per gli altri componenti la situazione è invece meno critica: le resistenze ad esempio, date le loro piccole dimensioni, si possono facilmente combinare in serie od in parallelo, od in entrambi i modi, per ottenere i valori voluti.

Le induttanze, essendo componenti costruiti in "casa", sono facili da adattare alle proprie necessità. L'approvvigionamento di condensatori di valori personalizzati di capacità, con precisioni all'1.25% o meglio allo 0.625% è possibile mediante ordine apposito a ditte specializzate; questa operazione richiede tempo e sensibili quantitativi d'ordine.

Sono d'altra parte disponibili in commercio diretto, quindi approvvigionabili entro 24 ore, condensatori di precisione all'1 %, entro gamme di valori standard, che possono risolvere le problematiche del progetto, purché il progetto stesso si adatti a ciò che il mercato offre. Vedremo nei paragrafi seguenti come procedere per l'utilizzo di questi componenti.

Affrontare un progetto secondo questa diversa ottica significa ovviamente dover risolvere, alcune volte, anche il problema d'accoppiamento tra il filtro e l'impedenza del generatore.

5.4.1 Passa basso con condensatori standard di precisione.

Il progetto di un filtro passa basso che impieghi condensatori standard di precisione deve essere inizialmente condotto come se tutto fosse dipendente dalle caratteristiche del generatore, per poi aggiustare le cose in modo da poter impiegare i componenti disponibili.

Supponiamo che sia stato progettato un passa basso con i seguenti dati:

Dati originali del progetto:

Filtro pilotato con generatore di tensione.

$f_1 = 10000 \text{ Hz}$.

$R_1 = R_2 = 4500 \text{ ohm}$

$C_1 = C_2 = 3539 \text{ pF}$

$L_1 = 0.143 \text{ H}$

Ricerca del componente più adatto:

Si voglia realizzare il filtro con un condensatore Csd standard di precisione; si deve scegliere per Csd il valore più vicino a $C_1 = 3539 \text{ pF}$, nei cataloghi commerciali troveremo, ad esempio, il valore di 3300 pF , quindi $C_{ds} = 3300 \text{ pF}$.

Nuovo dimensionamento del filtro:

Sulla base del valore di C_{ds} calcoliamo il nuovo valore di R_1 e di L_1 secondo le formule:

$$R_1 = R_2 = 1 / (2 * \pi * f_1 * C)$$

$$L = R_1 / (\pi * f_1)$$

$$R_1 = R_2 = 1 / (2 * \pi * f_1 * C) = 1 / (6.28 * 10000 * 3300 \text{ pF}) = 4825 \text{ ohm}$$

$$L = R_1 / (\pi * f_1) = 4825 \text{ ohm} / (3.14 * 10000) = 0.153 \text{ H}$$

Comparazione tra dati originali e nuovi dati del filtro:

Procediamo ad un sintetico commento tra dati originali di progetto e nuovi dati di realizzazione:

Il valore di $C1 = C2$ passa da 3539 pF a 3300 pF:

La variazione di capacità è modesta ed accettabile.

Il valore di $L1$ passa da 0.143 H a 0.153 H:

La variazione di induttanza è modesta ed accettabile.

Il valore di $R1 = R2$ passa da 4500 ohm a 4825 ohm:

L'incremento del valore delle resistenze di terminazione sono in favore del tipo di pilotaggio di tensione del filtro.

5.4.2 Passa banda con condensatori standard di precisione.

La soluzione del progetto di un passa banda con condensatori standard di precisione è più complicato che nei casi dei filtri passa basso o passa alto dato che per il passa banda si devono adattare due valori di capacità invece che uno come negli altri casi.

Vediamo come procedere nell'ipotesi di utilizzare condensatori standard nel progetto già sviluppato nel paragrafo 5.3; da quest'ultimo riportiamo i dati:

Dati originali del progetto e premessa:

Filtro pilotato con generatore di tensione.

$f_1 = 5000 \text{ Hz}$.

$f_2 = 10000 \text{ Hz}$

$R_1 = R_2 = 2000 \text{ ohm}$

$C_1 = 3980 \text{ pF}$

$C_2 = C_3 = 15923 \text{ pF}$

$L_1 = 127.38 \text{ mH}$

$L_2 = 31.8 \text{ mH}$

Premessa: Per il tipo di computazioni seguenti avremo la necessità, per la prima volta nel capitolo 5, di calcolare il numero di spire delle induttanze del filtro in base alle indicazioni del paragrafo 1.4.

Ricerca del componente più adatto alla sostituzione di C2 e C3:

La ricerca per la sostituzione dei condensatori con componenti standard più adatti **deve iniziare necessariamente** per $C_2 = C_3$.

Iniziamo a vedere quale condensatore Csd standard di precisione possa sostituire $C_1 = C_2$; si deve scegliere per Csd il valore più vicino a $C_1 = 15923 \text{ pF}$, nei cataloghi commerciali troveremo, ad esempio, il valore di 15000 pF , quindi $C_{ds} = 15000 \text{ pF}$.

Nuovo dimensionamento di R1, R2, L2, L3:

Sulla base del valore di C_{ds} calcoliamo il nuovo valore di $R_1 = R_2$ secondo la formula:

$$R_1 = R_2 = 1 / [2 * \pi * (f_2 - f_1) * C_2]$$

$$R_1 = 1 / [2 * \pi * (f_2 - f_1) * C_2] = 1 / [6.28 * (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz}) * 15000 \text{ pF}] = 2123 \text{ ohm}$$

ed $L_2 = L_3$ secondo la formula:

$$L_2 = L_3 = R_1 * (f_2 - f_1) / (2 * \pi * f_1 * f_2)$$

$$L_2 = L_3 = 2123 \text{ ohm} * (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz}) / (6.28 * 5000 \text{ Hz} * 10000 \text{ Hz}) = 33.80 \text{ mH}$$

Nuovo dimensionamento di L1 e C1 :

Se ora esaminiamo le formule per il calcolo di L_1 e C_1 sotto riportate

$$L_1 = R_1 / [\pi * (f_2 - f_1)]$$

$$C_1 = (f_2 - f_1) / (4 * \pi * f_1 * f_2 * R_1)$$

ci rendiamo conto che entrambe sono dipendenti dal nuovo valore di R_1 e che pertanto, se calcoliamo i valori di L_1 e C_1 , ci troviamo di fronte a valori diversi dagli originali che, per quanto riguarda L_1 non rappresentano alcuna difficoltà dovendola ricalcolare, ma riportano, salvo casi

assolutamente eccezionali, a valori di C1 che non sono reperibili tra le disponibilità standard.

Siamo quindi di fronte ad un problema nuovo che dobbiamo risolvere nel seguente modo:

Si tratta di calcolare il valore di una resistenza particolare, Ro, con la formula sotto riportata

$$R_o = (f_2 - f_1) / (4 * \pi * f_1 * f_2 * C_1)$$

dopo aver scelto, non stupisca, per C1 lo stesso valore standard scelto per C2 = 15000 pF

quindi:

$$R_o = (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz}) / (12.56 * 5000 \text{ Hz} * 10000 \text{ Hz} * 15000 \text{ pF}) = 530.7 \text{ ohm}$$

Con questo valore di Ro si computa L1 con la formula:

$$L_1 = R_o / [\pi * (f_2 - f_1)]$$

$$L_1 = 530.7 \text{ ohm} / [3.14 * (10000 \text{ Hz} - 5000 \text{ Hz})] = 33.8 \text{ mH}$$

Induttanza che realizzata su di un nucleo in ferrite con $\alpha = 42$ richiede N spire:

$$N = \alpha * \sqrt{L} = 42 * \sqrt{33.8 \text{ mH}} = 244 \text{ spire}$$

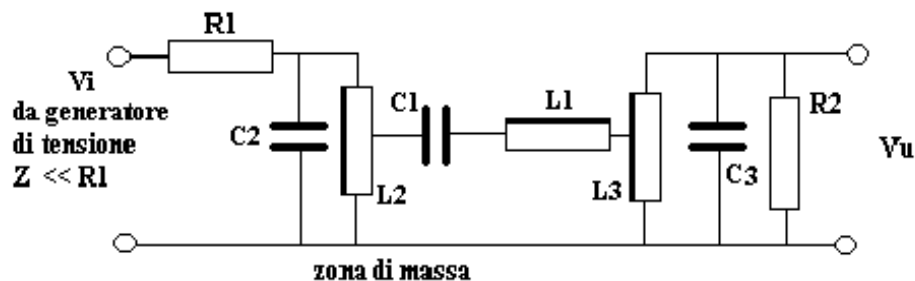
Nella struttura di un filtro passa banda normale i due componenti L1 e C1 sono collegati in serie tra loro e connessi tra L2//C2 e L3//C3 (si veda figura 5.20), in questo modo il circuito formato da L1 e C1 deve presentare una resistenza caratteristica pari a R1 = R2.

Al nuovo circuito, formato ora con L1 = 33.8 mH e C1 = 15000 pF, abbiamo imposto invece una resistenza caratteristica di 530.7 ohm, tale circuito non può essere collegato dove il precedente e, per essere inserito nella cellula passa banda, deve essere “adattato” opportunamente.

L’adattamento consiste in un particolare collegamento alle induttanze L2 ed L3 che, per svolgere questa funzione, devono essere costruite come autotrasformatori (si veda paragrafo 1.5.4).

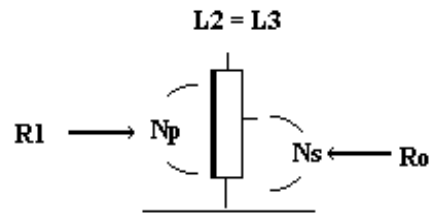
Per proseguire questa fase di calcolo è ora necessario fare riferimento al nuovo schema della cellula passa banda, così come illustrato in figura 5.25.

figura 5.25



Nello schema si vede che il circuito formato dalla serie tra C1 ed L1 è collegato in punti intermedi degli avvolgimenti di L2 e L3, in questo modo la resistenza caratteristica dei gruppi L2,C2 e L3,C3 è presentata nei nuovi punti di collegamento a valori nettamente inferiori sulla base del rapporto tra Np ed Ns così come mostrato in figura 5.26

figura 5.26



Infatti ai capi della totalità delle spire, N_p , si trova la resistenza R_1 , mentre nelle porzioni di $L_2 = L_3$, formate dalle N_s spire, si trova la resistenza R_o . Il valore del rapporto tra N_p e N_s è dato dall'espressione:

$$N_p / N_s = \sqrt{R_1 / R_o}$$

quindi

$$N_p / N_s = \sqrt{2123 \text{ ohm} / 530.7 \text{ ohm}} = 2$$

A questo punto è necessario calcolare il numero di spire N_p di $L_2 = L_3$, sulla base dell'induttanza richiesta $L_2 = L_3 = 33.75 \text{ mH}$ nell'ipotesi di impiegare un nucleo in ferrite con $\alpha = 42$:

$$N_p = \alpha * \sqrt{L} = 42 * \sqrt{33.75} = 244 \text{ spire}$$

Essendo $N_p/N_s = 2$ abbiamo infine

$$N_s = N_p / 2 = 244 \text{ spire} / 2 = 122 \text{ spire}$$

Comparazione tra dati originali e nuovi dati del filtro:

Procediamo ad un sintetico commento tra dati originali di progetto e nuovi dati di realizzazione:

I valori di $C_2 = C_3$ passano da 15923 pF, a 15000 pF:

La variazione di capacità è modesta ed accettabile.

Il valori di L_2 ed L_3 passano da 31.8 mH a 33.75 mH:

La variazione di induttanza è accettabile, ma devono essere costruite con la presa al centro dell'avvolgimento.

Il valore di L_1 passa da 127.38 mH a 33.8 mH

Il valore di C_1 passa da 3980 pF a 15000 pF

Il valore di $R_1 = R_2$ passano da 2000 ohm a 2123ohm

L'incremento del valore delle resistenze di terminazione sono in favore del tipo di pilotaggio di tensione del filtro.

Osservazioni alla procedura:

La procedura di calcolo testé sviluppata non serve soltanto a consentire la reperibilità di componenti standard sul mercato, ma è oltremodo utile per realizzare i filtri di banda quando il circuito serie, costituito da L_1 e C_1 , viene a presentare, dopo il calcolo iniziale, valori non adatti ad una realizzazione fisica della cellula, o perché troppo piccoli o perché troppo grandi. Oppure per

consentire la costruzione di un filtro, in tempi brevi, utilizzando condensatori in giacenza di magazzino.

5.4.3 Realizzazione di passa banda utilizzando residui di lavorazione

Si debbano costruire un certo numero di filtri di banda utilizzando una partita di condensatori di precisione rimasta come residuo di una lavorazione precedente.

Vediamo di impostare il progetto:

Dati di base:

Configurazione del filtro **simile** a quella riportata in figura 5.25.

Generatore di tensione con impedenza trascurabile.

$f_1 = 3000$ Hz.

$f_2 = 15000$ Hz

C disponibili 8200 pF +/- 1.25 % per C1, C2; C3

Calcolo di R1, L2 = L3:

Il valore di R1 si calcola come segue:

$$R_1 = 1 / [2 * \pi * (f_2 - f_1) * C_2] = 1 / [6.28 * (15000 \text{ Hz} - 3000 \text{ Hz}) * 8200 \text{ pF}] = 1618 \text{ ohm}$$

Con il valore di R1 si calcola ora $L_2 = L_3$:

$$L_2 = L_3 = 1618 \text{ ohm} * (15000 \text{ Hz} - 3000 \text{ Hz}) / (6.28 * 3000 \text{ Hz} * 15000 \text{ Hz}) = 68.7 \text{ mH}$$

Si calcolano ora il numero di spire per $L_2 = L_3$ ipotizzando l'impiego di un nucleo in ferrite avente un valore di $\alpha = 42$:

$$N_p = \alpha * \sqrt{L_2} = 42 * \sqrt{68.7 \text{ mH}} = 348 \text{ spire}$$

Calcolo della resistenza caratteristica Ro del circuito serie C1, L1:

Si tratta di calcolare il valore della resistenza Ro, caratteristica della serie di C1 = 8200 pF con L1, mediante la formula sotto riportata:

$$R_o = (f_2 - f_1) / (4 * \pi * f_1 * f_2 * C_1) = (15000 \text{ Hz} - 3000 \text{ Hz}) / (12.56 * 3000 \text{ Hz} * 15000 \text{ Hz} * 8200 \text{ pF}) = 2589.9 \text{ ohm}$$

quindi procedere al calcolo di L1 con il valore di Ro:

$$L_1 = 2589.9 \text{ ohm} / [3.14 * (15000 \text{ Hz} - 3000 \text{ Hz})] = 68.7 \text{ mH}$$

Si calcolano ora il numero di spire per L1 ipotizzando l'impiego di un nucleo in ferrite avente un valore di $\alpha = 42$:

$$N_p = \alpha * \sqrt{L_1} = 42 * \sqrt{68.7 \text{ mH}} = 348 \text{ spire}$$

Accoppiamento del circuito serie C1, L1 al resto della cellula:

Il nuovo circuito serie, formato ora con $L_1 = 68.7$ mH e $C_1 = 8200$ pF, ha una resistenza caratteristica di 2589.9 ohm; tale circuito non può essere collegato al resto del filtro, per essere inserito nella cellula passa banda, ma deve essere "adattato" opportunamente. Per far ciò si deve anzitutto calcolare il rapporto tra R1 ed Ro:

$$R1 / Ro = 1618 \text{ ohm} / 2589.9 \text{ ohm} = 0.62$$

dal quale calcolare il rapporto tra N_p di $L2 = L3$ e la porzione N_s di queste mediante la relazione:

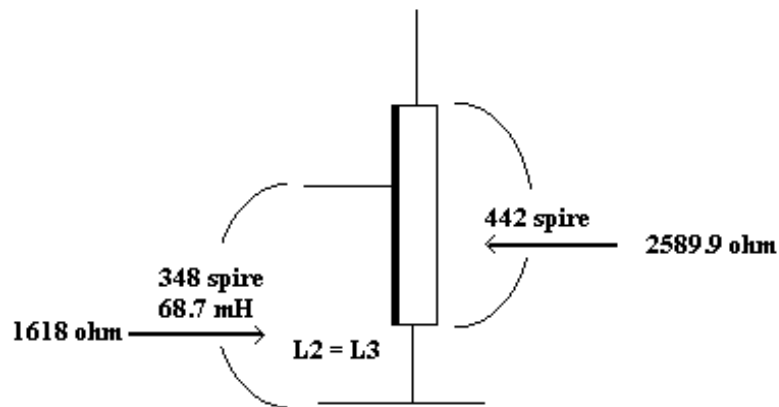
$$N_p / N_s = \sqrt{(R1 / Ro)} = \sqrt{0.62} = 0.787$$

quindi

$$N_s = N_p / 0.787 = 348 \text{ spire} / 0.787 = 442 \text{ spire}$$

Il risultato ottenuto indica che per accoppiare $L1$ e $C1$ al resto della cellula, le induttanze $L2 = L3$ devono avere un numero di spire superiori a quanto necessario per avere l'induttanza calcolata di 68,7 mH ; ciò significa che $L2 = L3$ devono comportarsi come un autotrasformatore in salita, così come è illustrato nella figura 5.27.

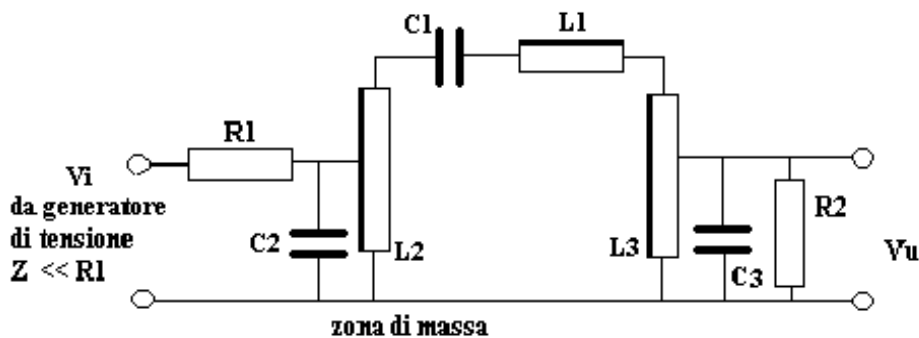
figura 5.27



Presentazione della nuova cellula passa banda:

Con gli elementi acquisiti non resta che presentare la nuova cellula passa banda strutturata così come riportato in figura 5.28:

figura 5.28



L'elenco dettagliato dei componenti la cellula è qui indicato:

$$R1 = R2 = 1618 \text{ ohm}$$

$$C1 = C2 = C3 = 8200 \text{ pF } \pm 1.25 \%$$

Induttanze su nuclei in ferrite con $\alpha = 42$

$L2 = L3 = 68.7 \text{ mH}$; sulle 348 spire (totale spire = 442)

$L1 = 68.7 \text{ mH}$; 348 spire

La curva di risposta di questo passa banda è identica a quella ottenibile con la configurazione di base tipo quella illustrata in figura 5.19.

5.5 Accoppiamento dei filtri alla circuitazione elettronica

Nella progettazione di filtri, passa basso, passa alto e passa banda, abbiamo quasi sempre iniziato considerando le caratteristiche del generatore secondo le quali si sono calcolati i valori delle resistenze di terminazione dei filtri stessi e, da queste, tutti gli altri componenti. Molte volte il progetto di un filtro prevede anche il dimensionamento del generatore ad esso collegato in modo da realizzare un circuito autonomo comprensivo dell'elettronica d'accoppiamento con la circuitazione esterna; in questi casi il filtro nasce prima, in base alle caratteristiche volute, ed il generatore viene adattato ad esso.

I circuiti elettronici che si prestano all'accoppiamento con i filtri sono di due tipi, così come sono le configurazioni delle cellule:

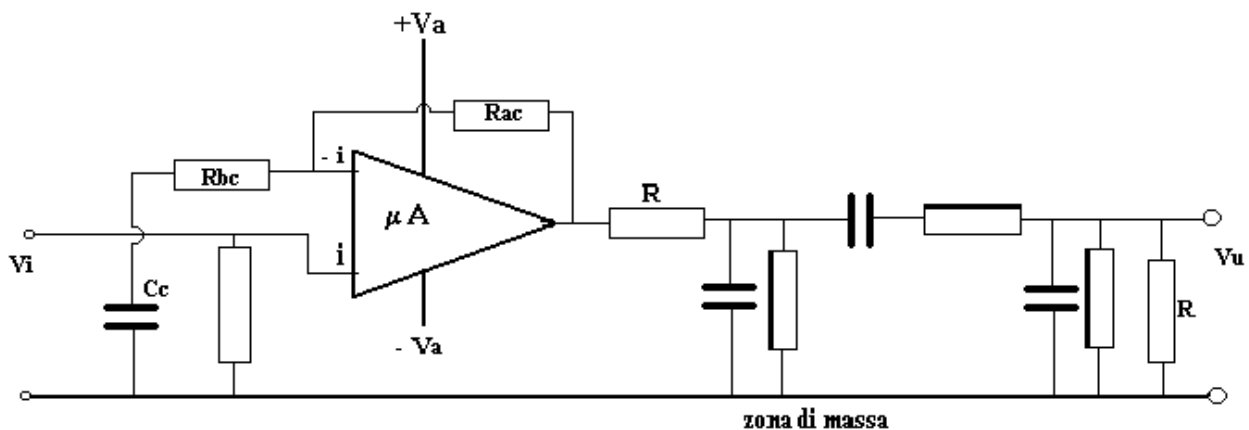
Primo tipo-Circuiti con bassa impedenza d'uscita per il pilotaggio di tensione.

Secondo tipo-Circuiti con alta impedenza d'uscita per il pilotaggio di corrente.

Vengono qui di seguito mostrati i due tipi d'accoppiamento prendendo come esempio di filtro un passa banda; questi i circuiti sono però adatti a pilotare qualsiasi tipo di cellule quali le passa basso o le passa alto.

Lo schema d'accoppiamento del primo tipo è mostrato in figura 5.29:

figura 5.29



In questo circuito il filtro è pilotato di tensione da un microamplificatore; questo accoppiamento è valido purché l'integrato sia in grado di fornire il doppio della massima tensione richiesta in uscita dal filtro su di un carico, R_c , pari a:

$$R_c = 2 * R$$

dove R è il valore delle resistenze di terminazione del filtro.

Deve essere inoltre la resistenza d'uscita, r_u , del microamplificatore dell'ordine di $R/100$.

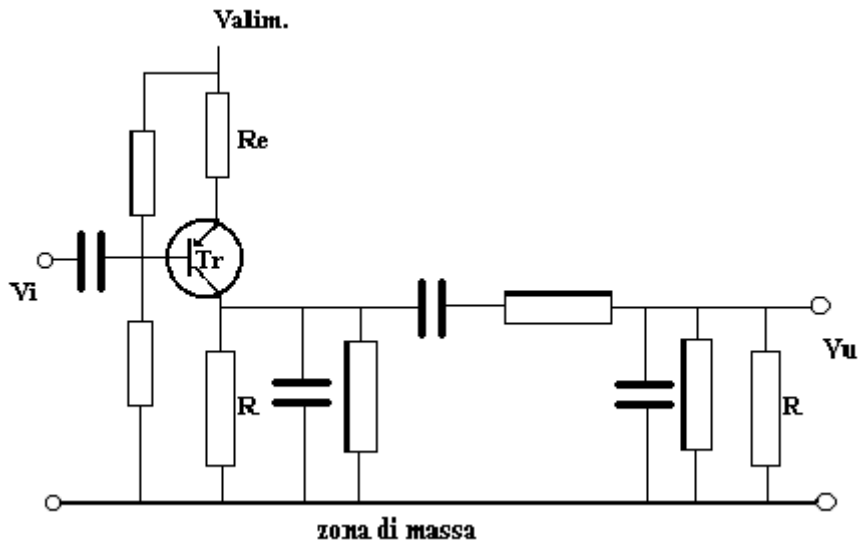
Lo schema d'accoppiamento del secondo tipo è mostrato in figura 5.30:

In questo circuito il filtro è pilotato di corrente da un transistor; questo accoppiamento è valido purché il transistor sia in grado di fornire la massima potenza richiesta in uscita su di un carico R_c pari a

$$R_c = R / 2$$

dove R è il valore delle resistenze di terminazione del filtro.
 Deve essere inoltre la resistenza d'uscita, r_u , del transistor dell'ordine di $100 * R$.

figura 5.30



Alcuni esempi sono necessari per vedere come dimensionare gli accoppiatori dei filtri; iniziamo con il primo tipo:

Primo esempio:

Dati di base:

Si debba progettare un accoppiatore per un filtro di banda affinché quest'ultimo sia pilotato a bassa impedenza; le caratteristiche del filtro sono:

Passa banda ad una cellula.

Tensione massima richiesta in centro banda $V_u = 2 V_{eff}$.

Frequenza di taglio inferiore $f_1 = 8000$ Hz.

Frequenza di taglio superiore $f_2 = 10000$ Hz.

Resistenze di terminazione $R_1 = R_2 = 1600$ ohm.

Selezione del circuito elettronico di pilotaggio:

Essendo richiesto il pilotaggio del filtro a bassa impedenza deve essere scelto il circuito d'accoppiamento di figura 5.29.

Valutazione della resistenza di carico R_c :

Si deve valutare la resistenza di carico R_c che il filtro di banda presenta al microamplificatore: essendo $R_1 = R_2 = 1600$ ohm, sarà

$$R_c = 2 * 1600 \text{ ohm} = 3200 \text{ ohm}$$

Valutazione della tensione massima V_g che il circuito di pilotaggio deve fornire:

Essendo richiesta una tensione V_u massima di $2 V_{eff}$ all'uscita del filtro, considerando i 6 dB (2 volte) di perdita d'inserzione P_{ins} , ed ipotizzando perdite interne P_{int} . del filtro di 1 dB (1.12 volte), abbiamo:

$$V_g = V_u * P_{ins} * P_{int} = 2 V_{eff} * 2 * 1.12 = 4.48 V_{eff}.$$

Considerazioni in merito alla risposta dell'accoppiatore :

Il circuito integrato ed i componenti che costituiscono la rete di controreazione dell'accoppiatore R_{ac} , R_{ab} , C_c devono consentire una risposta piatta nel campo di frequenze compreso tra $f_1 = 8000$ Hz e $f_2 = 10000$ Hz; deve essere opportunamente dimensionato C_c per la frequenza inferiore della banda.

Scelta del circuito integrato:

Il microamplificatore deve avere le seguenti caratteristiche:
Resistenza d'uscita r_u pari a circa

$$r_u = R_1 / 100 = 1600 \text{ ohm} / 100 = 16 \text{ ohm}$$

Possibilità di fornire su di un carico di 3200 ohm una tensione V_{gp} di picco pari a:

$$V_{gp} = 1.41 * V_g = 1.41 * 4.48 V_{eff}, = 6.3 V_p$$

Possibilità di fornire una corrente di picco I_p pari a:

$$I_p = V_{gp} / R_c = 6.3 V_p / 3200 \text{ ohm} = 1.9 \text{ mA}$$

Un circuito integrato che presenta le caratteristiche sopra esposte è il tipo LF157 che ha:

Massimo valore di $r_u = 10$ ohm a 100 KHz

Minima tensione di segnale $V_{gp} = 12$ V con $I_p = 5$ mA

Secondo esempio:

Dati di base:

Si debba progettare un accoppiatore per un filtro passa basso affinché quest'ultimo sia pilotato a bassa impedenza; le caratteristiche del filtro sono:

Passa basso ad una cellula.

Tensione massima richiesta in banda $V_u = 3 V_{eff}$.

Tensione minima richiesta in banda $V_{umin.} = 100$ mV

Frequenza di taglio $f_1 = 1000$ Hz.

Resistenze di terminazione $R_1 = R_2 = 5600$ ohm.

Selezione del circuito elettronico di pilotaggio:

Essendo richiesto il pilotaggio del filtro a bassa impedenza, deve essere scelto il circuito d'accoppiamento di figura 5.29.

Valutazione della resistenza di carico R_c :

Si deve valutare la resistenza di carico R_c che il filtro di banda presenta al microamplificatore: essendo $R_1 = R_2 = 5600$ ohm, sarà

$$R_c = 2 * 5600 \text{ ohm} = 11200 \text{ ohm}$$

Valutazione della tensione massima V_g che il circuito di pilotaggio deve fornire:

Essendo richiesta una tensione V_u massima di $3 V_{eff}$ all'uscita del filtro, considerando i 6 dB (2 volte) di perdita d'inserzione P_{ins} ed ipotizzando perdite interne $P_{int.}$ del filtro di 1 dB (1.12 volte), abbiamo:

$$V_g = V_u * P_{ins} * P_{int} = 3 V_{eff} * 2 * 1.12 = 6.72 V_{eff}.$$

Valutazione della tensione minima V_{gmin} che il circuito di pilotaggio deve fornire:

La V_{gmin} deve essere valutata dato che il filtro è un passa basso e l'accoppiatore non deve avere tensioni spurie di fuori zero tali da inquinare eventuali segnali a frequenza molto bassa.

Essendo richiesta una tensione V_u minima di 100 mV_{eff} all'uscita del filtro, considerando i 6 dB (2 volte) di perdita d'inserzione P_{ins} ed ipotizzando perdite interne P_{int} del filtro di 1 dB (1.12 volte), abbiamo:

$$V_{gmin} = V_{umin} * P_{ins} * P_{int} = 100 \text{ mV}_{eff} * 2 * 1.12 = 0.22 V_{eff}.$$

Considerazioni in merito alla risposta dell'accoppiatore :

Il circuito integrato ed i componenti che costituiscono la rete di controreazione dell'accoppiatore R_{ac} , R_{ab} , C_c devono consentire una risposta piatta nel campo di frequenze compreso tra $f = 0$ e $f = f_1 = 1000 \text{ Hz}$; deve essere pertanto eliminato il condensatore C_c , affinché il microamplificatore possa rispondere a segnali variabili dalla tensione continua a 1000 Hz.

Scelta del circuito integrato:

Il microamplificatore deve avere le seguenti caratteristiche:

Fuori zero massimo d'uscita $V_z \text{ max}$ pari a circa $1.41 * V_{gmin} / 10$

$$V_{fz} = 1.41 * 0.22 V_{eff} / 10 = 31 \text{ mV}$$

Resistenza d'uscita r_u pari a circa

$$r_u = R_1 / 100 = 5600 \text{ ohm} / 100 = 56 \text{ ohm}$$

Possibilità di fornire su di un carico di 11200 ohm una tensione V_{gp} di picco pari a:

$$V_{gp} = 1.41 * V_g = 1.41 * 6.72 V_{eff} = 9.4 V_p$$

Possibilità di fornire una corrente di picco I_p pari a:

$$I_p = V_{gp} / R_c = 9.4 V_p / 11200 \text{ ohm} = 0.8 \text{ mA}$$

Un circuito integrato che presenta le caratteristiche sopra esposte è il tipo LM108 che ha:

Massimo valore di $r_u = 50 \text{ ohm}$ a 100 KHz

Minima tensione di segnale $V_{gp} = 14 \text{ V}$ con $I_p = 2 \text{ mA}$

Fuori zero massimo d'uscita $V_z = 30 \text{ mV}$ per $G_{cc} = 20 \text{ dB}$ (10 volte)

Terzo esempio:

Dati di base:

Si debba progettare un accoppiatore per un filtro passa alto affinché quest'ultimo sia pilotato di corrente; le caratteristiche del filtro sono:

Passa alto ad una cellula.

Tensione massima richiesta in banda $V_u = 2 V_{eff}$.

Frequenza di taglio $f_1 = 2000 \text{ Hz}$.

Frequenza massima passante $f_{max} = 200 \text{ KHz}$

Resistenze di terminazione $R_1 = R_2 = 1000 \text{ ohm}$.

Selezione del circuito elettronico di pilotaggio:

Essendo richiesto il pilotaggio del filtro di corrente deve essere scelto il circuito d'accoppiamento di figura 5.30.

Valutazione della resistenza di carico Rc:

Si deve valutare la resistenza di carico Rc che il filtro di banda presenta al transistore: essendo R1 = R2 = 1000 ohm, sarà

$$R_c = 1000 \text{ ohm} / 2 = 500 \text{ ohm}$$

Valutazione della tensione massima Vg che il circuito di pilotaggio deve fornire:

Essendo richiesta una tensione Vu massima di 2 Veff all'uscita del filtro, ipotizzando perdite interne Pint. del filtro di 1 dB (1.12 volte), abbiamo:

$$V_g = V_u * P_{int.} = 2 V_{eff} * 1.12 = 2.24 V_{eff}.$$

Considerazioni in merito al guadagno ed alla risposta dell'accoppiatore :

Il transistore ed il circuito ad esso collegato deve essere in grado di consentire una risposta piatta nel campo di frequenze da f1 = 2000 Hz ad oltre i 200 KHz.

Il guadagno Gca dello stadio sarà calcolabile in base al rapporto:

$$G_{ca} = R_c / R_e = 500 \text{ ohm} / R_e$$

Caratteristiche del transistore:

Il transistore deve poter assicurare le seguenti caratteristiche:

Conduttanza d'uscita hoe pari almeno a:

$$h_{oe} = 1 / [100 * (R/2)] = 1 / [100 * (1000 \text{ ohm}/2)] = 20 \mu \text{ mho}$$

Risposta in frequenza oltre i 200 KHz.

Corrente massima di picco di segnale, Ip, pari a:

$$I_p = V_{gp} / R_c = 1.41 * V_g / R_c = 1.41 * 2.24 / 500 \text{ ohm} = 6.3 \text{ mA}$$

5.6 Filtri di banda passivi modificati

Con un procedimento elementare è possibile modificare i filtri passivi per ottenere da questi migliori pendenze d'attenuazione nel primo tratto della banda non passante a spese di un'ondulazione spuria, quantificabile, nella zona passante.

Questa modifica non comporta variazioni in assoluto della pendenza del filtro che, lontano dalla frequenza di taglio, riprende la pendenza che gli è propria, pendenza che è legata al numero dei componenti reattivi che costituiscono il filtro stesso; resta comunque una valida alternativa al filtro convenzionale qualora sia richiesta un'attenuazione a pendenza maggiore subito dopo la frequenza di taglio.

L'operazione necessaria per questa modifica consiste, una volta progettato il filtro secondo il tipo desiderato, di costruirlo con le resistenze di terminazione a valore doppio di quello imposto a calcolo.

Vediamo nei sottoparagrafi successivi come eseguire dette modifiche e in che modo valutarne pregi ed inconvenienti.

5.6.1 Filtro passa basso passivo modificato

Con gli indirizzi di progettazione acquisiti nel paragrafo 5.1 procediamo al dimensionamento di un filtro passa basso ad una cellula, destinato ad essere modificato per ottenere, **nel primo tratto della banda non passante**, pendenza superiore a -18 dB/ottava. Le caratteristiche del nuovo filtro saranno ottenute dalla modifica che eseguiremo nel contesto dell'esercizio seguente:

Dati di base:

Sia da realizzare un filtro passa basso modificato in grado di essere accoppiato ad un generatore di tensione avente una $Z_u = 25 \text{ ohm}$, si voglia una frequenza di taglio $f_1 = 10000 \text{ Hz}$ ed una pendenza **nel primo tratto della banda non passante**, superiore a -18 dB/ottava

Dimensionamento della resistenza d'ingresso:

Il dati di progetto prevedono una configurazione circuitale come quella di figura 5.3 per cui: Il valore di R_1 deve essere commisurato al valore di $Z_u = 25 \text{ ohm}$ e quindi dovrà essere:

$$R_1 \gg Z_u$$

ovvero

$$R_1 \gg 25 \text{ ohm}$$

per ottenere questa condizione è opportuno, se possibile*, che R_1 sia almeno 100 volte il valore di Z_u , quindi

$$R_1 = 2500 \text{ ohm}$$

Dato che $R_1 = R_2$, si ha

$$R_2 = 2500 \text{ ohm}$$

*La possibilità che R_1 possa essere del valore calcolato dipende dai valori di L e di C che ne conseguono; se i valori saranno realizzabili, il dato di R_1 sarà accettabile, altrimenti, dovrà essere rivisto.

Calcolo di L e C:

Dati $f_1 = 10000 \text{ Hz}$ e $R = 2500 \text{ ohm}$

il calcolo di L si effettua con la formula:

$$L = R / (\pi * f_1) = 2500 \text{ ohm} / (3.14 * 10000 \text{ Hz}) = 79.6 \text{ mH}$$

il calcolo di C si effettua con la formula:

$$C = 1 / (2 * \pi * f_l * R) = 1 / (6.28 * 10000 \text{ Hz} * 2500 \text{ ohm}) = 6369 \text{ pF}$$

Quindi $C_1 = C_2 = C = 6369 \text{ pF}$

Entrambi i componenti calcolati sono di valore accettabile, quindi il valore di $R = 2500 \text{ ohm}$ è adatto al progetto.

Definizione dei componenti per la costruzione del filtro passa basso modificato:

I componenti calcolati sono:

$$L = 79.6 \text{ mH}$$

$$C_1 = C_2 = 6369 \text{ pF} \text{ (con precisione dell'1.25 \%)}$$

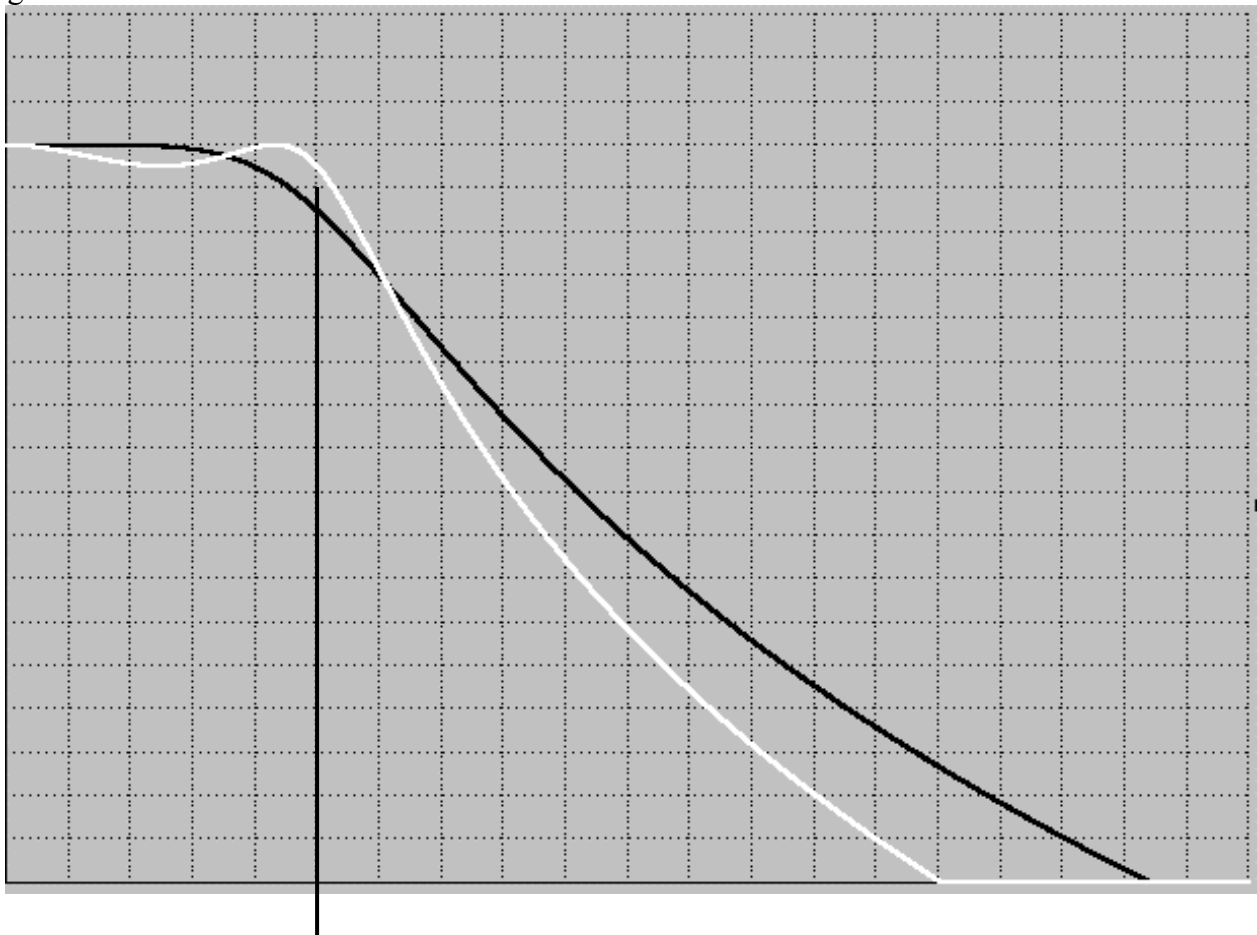
La resistenza di terminazione, con la quale sono stati calcolati i componenti sopra indicati, è stata scelta come $R = 2500 \text{ ohm}$, per la costruzione del filtro modificato questo componente deve assumere un valore R_m pari al doppio di R , cioè

$$R_m = 2 * R = 2 * 2500 = 5000 \text{ ohm.}$$

Tracciamento e confronto delle curve di risposta:

E' molto interessante esaminare la differenza tra la risposta del filtro classico e la risposta del nuovo filtro modificato, il confronto tra le due, mostrato in figura 5.31, evidenzia vantaggi e svantaggi tra le due soluzioni.

figura 5.31



Il diagramma ha in ascisse la frequenza divisa in 20 intervalli da 2000 Hz ciascuno ed in ordinate l'attenuazione divisa anch'essa in 20 intervalli, ciascuno dei quali vale 2 dB.

La curva di risposta del filtro passa basso normale è tracciata in nero, presenta la caratteristica attenuazione di -9 dB alla frequenza di taglio messa a calcolo ($F1 = 10000$ Hz): questo punto è evidenziato dal segmento verticale nero alzato dall'asse delle ascisse.

La curva di risposta del filtro passa basso modificato è tracciata in bianco; alla frequenza di taglio $F1$ presenta un'attenuazione di -7 dB, nella banda passante e evidenzia un'ondulazione dell'attenuazione contenuta entro 1 dB, a 12000 Hz ha un'attenuazione uguale al filtro normale, oltre tale frequenza la pendenza della curva scende molto più rapidamente del filtro normale, così come previsto.

Se il progetto generale del circuito elettronico nel quale il filtro deve essere inserito richiede, **nel primo tratto della banda non passante**, pendenza superiore al normale, e accetta le ondulazioni in banda, la modifica ha ragione di essere.

Se invece le ondulazioni in banda non sono accettabili, non resta che la scelta di un filtro normale a due cellule.

5.6.2 Filtro passa banda passivo modificato

Con gli indirizzi di progettazione acquisiti nel paragrafo 5.3 procediamo al dimensionamento di un filtro passa banda ad una cellula destinato ad essere modificato per ottenere, **nei primi tratti della banda non passante**, pendenze superiori a -18 dB/ottava. Le caratteristiche del nuovo filtro saranno ottenute dalla modifica che eseguiremo nel contesto dell'esercizio seguente:

Dati di progetto:

Si assumano come dati di progetto e dei componenti gli stessi impiegati per lo svolgimento dell'esercizio di paragrafo 5.3:

$Z_u = 20 \text{ ohm}$, $f_1 = 5000 \text{ Hz}$, $F_2 = 10000 \text{ Hz}$

Si preveda una modifica del filtro per ottenere una pendenza superiore a -18 dB/ottava **nei primi tratti della banda non passante**.

Riepilogo dei valori dei componenti:

$L_1 = 127.38 \text{ mH}$

$L_2 = L_3 = 31.8 \text{ mH}$

$C_1 = 3980 \text{ pF}$

$C_2 = C_3 = 15923 \text{ pF}$

$R = 2000 \text{ ohm}$

La resistenza di terminazione, con la quale sono stati calcolati i componenti sopra indicati, è stata scelta come $R = 2000 \text{ ohm}$; per la costruzione del filtro modificato questo componente deve assumere un valore R_m pari al doppio di R , cioè

$$R_m = 2 * R = 2 * 2000 = 4000 \text{ ohm.}$$

Tracciamento e confronto delle curve di risposta:

Similmente all'esercizio di paragrafo 5.6.1 esaminiamo la differenza tra la risposta del filtro classico e la risposta del nuovo filtro modificato; il confronto, mostrato in figura 5.32, evidenzia vantaggi e svantaggi relativi alle due soluzioni.

Il diagramma ha in ascisse la frequenza divisa in 20 intervalli da 1000 Hz ciascuno ed in ordinate l'attenuazione divisa anch'essa in 20 intervalli, ciascuno dei quali vale 2 dB.

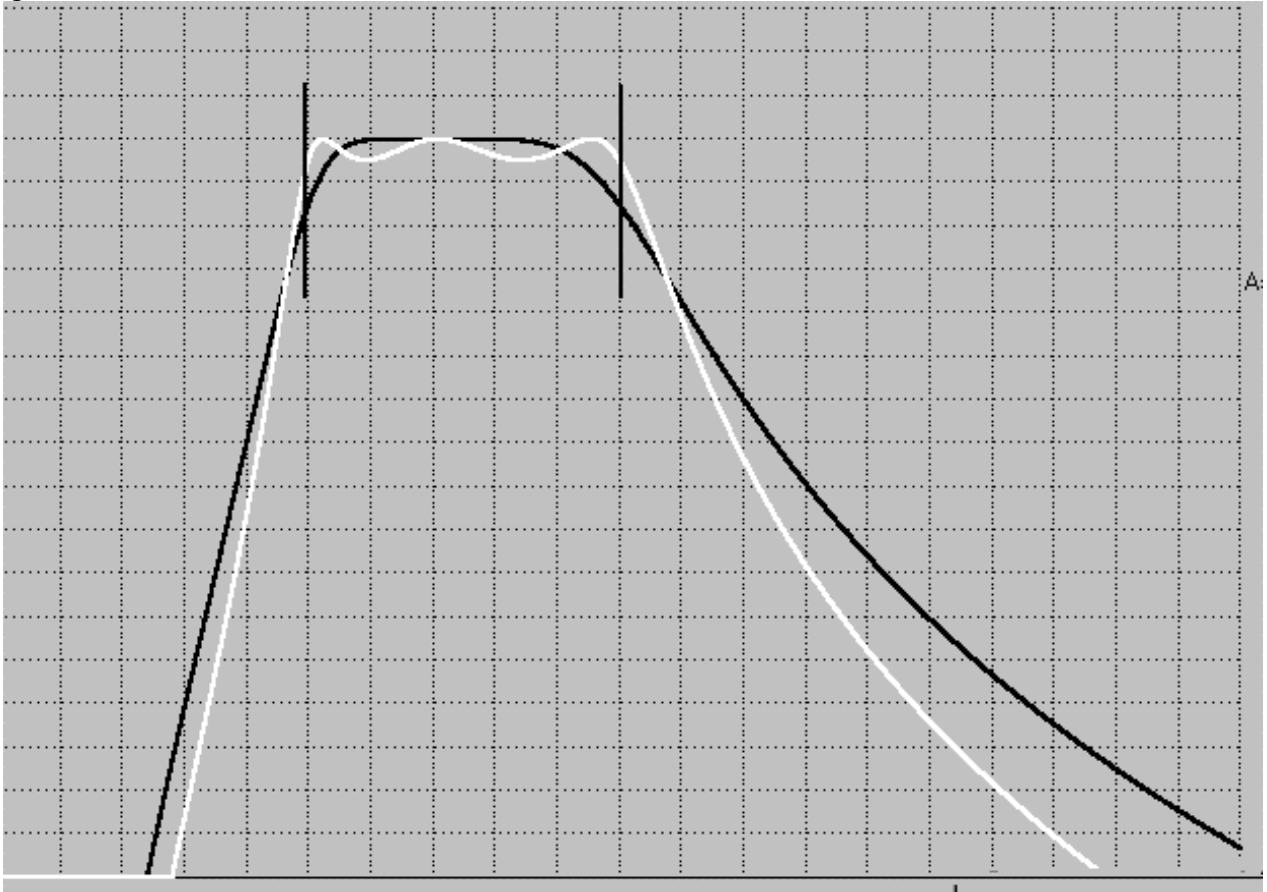
La curva di risposta del filtro passa banda normale è tracciata in nero, presenta la caratteristica attenuazione di -9 dB alle frequenze di taglio messe a calcolo ($F_1 = 5000 \text{ Hz}$, $F_2 = 10000 \text{ Hz}$): questi punti sono evidenziati dai segmenti verticali neri alzati dall'asse delle ascisse.

La curva di risposta del filtro passa banda modificato è tracciata in bianco: alle frequenze di taglio F_1 e F_2 presenta un'attenuazione di -7 dB, nella banda passante evidenzia un'ondulazione dell'attenuazione contenuta entro 1 dB, a 4800 Hz ed a 11000 Hz ha un'attenuazione uguale al filtro normale, sotto e sopra a tali frequenze la pendenza della curva scende più rapidamente del filtro normale, così come previsto.

Se il progetto generale del circuito elettronico, nel quale il filtro deve essere inserito, richiede, **nei primi tratti della banda non passante**, pendenze superiori al normale e accetta le ondulazioni in banda, la modifica ha ragione di essere.

Se invece le ondulazioni in banda non sono accettabili, non resta che la scelta di un filtro passa banda normale a due cellule.

figura 5.32



5.7 Filtri passa basso modificati come adattatori d'impedenza

5.7.1 Generalità

Con una cellula di filtro passa basso è possibile realizzare un circuito adattatore d'impedenza in grado di operare ad una frequenza singola o, con alcune approssimazioni, anche per segnali definiti in bande strette di frequenze.

La necessità dell'adattamento d'impedenza tra un generatore ed un utilizzatore sorge, ad esempio, nel circuito di figura 5.33, nel quale la forza elettromotrice "e", di un segnale, che scaturisce dal generatore avente impedenza R_g , deve essere convogliata nell'utilizzatore avente impedenza R_c . L'adattamento tra R_g ed R_c ha come obiettivo il trasferimento della massima potenza tra il generatore e l'utilizzatore stesso.

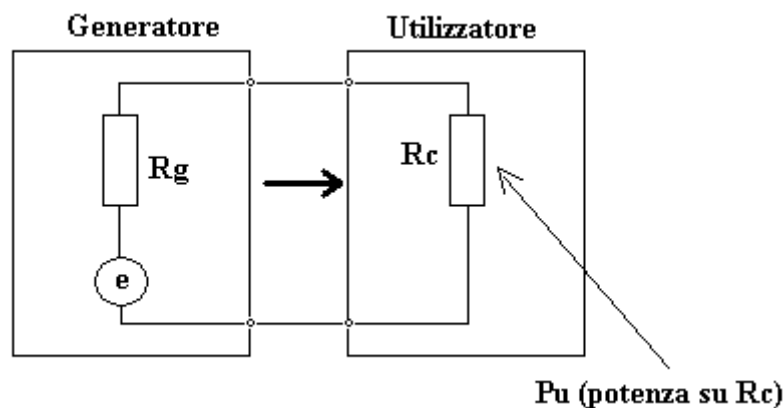
La formula che consente il calcolo della potenza trasferita su R_c è, come si ricorda:

$$P_c = (e^2 / R_g) * K / (K + 1)^2$$

dove $K = R_g / R_c$

La formula mostra come la potenza sul carico (R_c) dipenda, oltre che da "e" e da R_g , anche dal rapporto $K = R_g / R_c$

figura 5.33



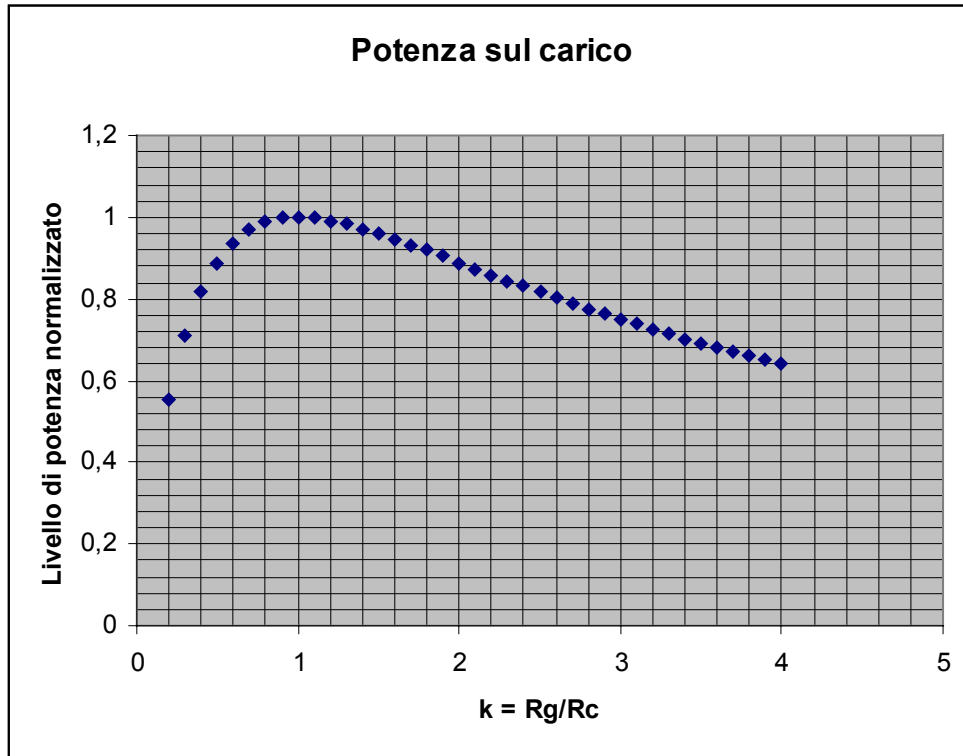
La dipendenza della potenza P_c da K è mostrata nel grafico di figura 5.34 che ha in ascisse la variabile $K = R_g / R_c$ e sulle ordinate la potenza P_c .

La curva ha il solo scopo di mostrare come varia la potenza P_c in dipendenza del rapporto tra R_g e R_c e non consente la determinazione del livello di potenza reale in funzione di "e" essendo "normalizzata"; ha cioè il massimo a livello unitario ed è indipendente da "e".

Il grafico mostra che il massimo della potenza su R_c si ha quando $K = 1$, cioè quando $R_c = R_g$, cosa peraltro universalmente nota; dalla curva si osserva che la potenza su R_c decresce sensibilmente sia per $R_c > R_g$ che per $R_c < R_g$, il che suggerisce di adattare sempre l'impedenza di carico R_c all'impedenza del generatore.

Nella tecnica corrente non sempre è possibile attribuire ad R_c lo stesso valore di R_g per ottenere la massima potenza sul carico, di qui la necessità di utilizzare appositi circuiti di adattamento d'impedenza quali, ad esempio, quelli scaturiti dalle cellule di filtro passa basso oggetto di questo paragrafo.

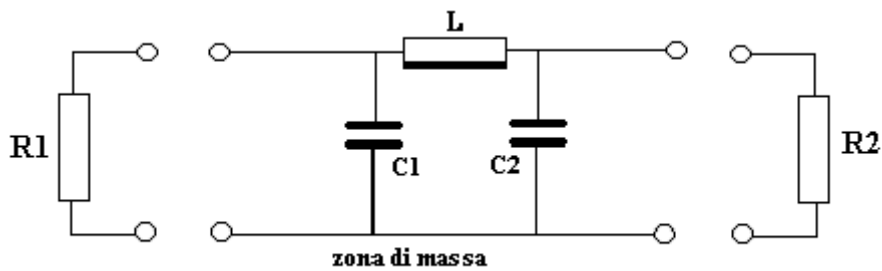
figura 5.34



5.7.2 Descrizione e calcolo della cella di adattamento d'impedenza

La struttura a "pi greco" dell'adattatore d'impedenza è mostrata in figura 5.35.

figura 5.35



Nella figura, con il simbolo R_1 , si individua il valore dell'impedenza di un generatore, alla frequenza f , che deve essere collegato ad un utilizzatore, con impedenza inferiore, indicato con R_2 . Il compito della struttura, composta dai componenti C_1 , L , C_2 , è quello di consentire che la massima potenza generata da R_1 venga trasferita, salvo le perdite sui componenti la cellula, su R_2 . Il progetto della cellula sopra illustrata è fattibile mediante il dimensionamento dei componenti in dipendenza dei valori di R_1 , R_2 , f , Q , mediante la serie di formule sotto riportata:

$$C1 = 1 / (2 * \pi * f * Xc1)$$

$$C2 = 1 / (2 * \pi * f * Xc2)$$

$$L = XL / (2 * \pi * f)$$

dove i valori di Xc1, Xc2, XL , per R1 > R2, sono dati dalle espressioni:

$$Xc1 = R1 / Q$$

$$Xc2 = R2 * \sqrt{ \{ (R1/R2) / [Q^2 + 1 - (R1/R2)] \} }$$

$$XL = [Q * R1 + (R1 * R2) / Xc2] / (Q^2 + 1)$$

con

R1 ed R2 (rispettivamente impedenze del generatore e dell'utilizzatore) sono espresse in ohm

C1 e C2 (capacità della cellula) sono espresse in Farad

L (induttanza della cellula) è espresso in Henry

f (frequenza del segnale del generatore) è espressa in Hertz

Q (coefficiente di merito della cellula dipendente da R1 ed R2) è un numero puro

Per il circuito adattatore d'impedenza al quale si applicano le formule indicate si deve osservare :

Struttura a pi greco

Le formule consentono un agevole dimensionamento dei componenti dell'adattatore d'impedenza ma pongono serie difficoltà nel calcolo della risposta teorica del circuito che non può essere affrontato in termini elementari; dal punto di vista applicativo il tracciamento della risposta non è indispensabile ai fini dell'utilizzo del circuito, è utile invece qualora si debbano sviluppare analisi approfondite sul comportamento della cellula a pi greco.

Il progetto di una cellula a pi greco è, naturalmente, subordinato ai valori di R1 e R2 che devono essere adattati per il miglior trasferimento di potenza alla frequenza di lavoro f; la scelta del valore del coefficiente di merito Q, dal quale dipendono sia la selettività della cellula che i valori dei componenti la stessa, deve essere fatta dal progettista in base alle esigenze contingenti del particolare problema tecnico da risolvere.

Ora, come nei paragrafi precedenti, cerchiamo d'impostare e di sviluppare un piccolo progetto di un adattatore d'impedenza:

Dati di progetto:

Sia da realizzare un adattatore d'impedenza in grado di accoppiare un generatore avente un'impedenza R1 di 4000 ohm ed una tensione a vuoto, "Vg", di 100 Veff, alla frequenza f di 3000 Hz ad un utilizzatore avente un'impedenza R2 di 50 ohm e si voglia che il complesso R1, R2, C1, C2, L abbia un coefficiente di merito Q di 25.

Calcolo delle reattanze dei componenti la cellula:

Per la reattanza di C1 si ha:

$$X_{c1} = R1 / Q$$

$$X_{c1} = 4000 \text{ ohm} / 25 = 160 \text{ ohm}$$

Per la reattanza di C2 si ha :

$$X_{c2} = R2 * \sqrt{ \{ (R1/R2) / [Q^2 + 1 - (R1/R2)] \} }$$

$$X_{c2} = 50 \text{ ohm} * \sqrt{ \{ (4000 \text{ ohm} / 50 \text{ ohm}) / [25^2 + 1 - (4000 \text{ ohm} / 50 \text{ ohm})] \} } = 19.13 \text{ ohm}$$

Per la reattanza XL si ha:

$$X_L = [Q * R1 + (R1 * R2) / X_{c2}] / (Q^2 + 1)$$

$$X_L = [25 * 4000 \text{ ohm} + (4000 \text{ ohm} * 50 \text{ ohm}) / 19.14] / (25^2 + 1) = 176.43 \text{ ohm}$$

Dimensionamento dei componenti la cellula:

$$C1 = 1 / (2 * \pi * f * X_{c1})$$

$$C1 = 1 / (2 * 3.14 * 3000 \text{ Hz} * 160 \text{ ohm}) = 0.3317 \mu\text{F} \text{ (arrotondabile a } 0.33 \mu\text{F)}$$

$$C2 = 1 / (2 * \pi * f * X_{c2})$$

$$C2 = 1 / (2 * 3.14 * 3000 \text{ Hz} * 19.14 \text{ ohm}) = 2.77 \mu\text{F} \text{ (arrotondabile a } 2.7 \mu\text{F)}$$

$$L = X_L / (2 * \pi * f)$$

$$L = 176.4 \text{ ohm} / (2 * 3.14 * 3000 \text{ Hz}) = 9.36 \text{ mH}$$

Considerazioni sui livelli di tensione:

Se l'adattatore d'impedenza funziona correttamente ed è privo di perdite, il generatore R1, avente un'impedenza di = 4000 ohm, vedrà, attraverso la cellula a pi greco, un carico di 4000 ohm e la potenza Pc sul carico sarà calcolabile con la formula, già esposta in precedenza, che riportiamo:

$$P_c = (e^2 / R_g) * K / (K + 1)^2$$

nella quale

$$e = V_g = 100 \text{ V}_{\text{eff}}$$

$$R_g = R1 = 4000 \text{ ohm}$$

$$K = 1$$

quindi

$$P_c = (100 \text{ Veff}^2 / 4000 \text{ ohm}) * 1 / (1 + 1)^2 = 0.625 \text{ W}$$

Dal valore di P_c ora calcolato possiamo valutare il livello di tensione, V_c , ai capi del carico essendo:

$$P_c = V_c^2 / R_2$$

abbiamo:

$$V_c = \sqrt{P_c * R_2}$$

La tensione V_c ai capi dell'utilizzatore sarà pertanto :

$$V_c = \sqrt{0.625 \text{ W} * 50 \text{ ohm}} = 5.59 \text{ Veff}$$

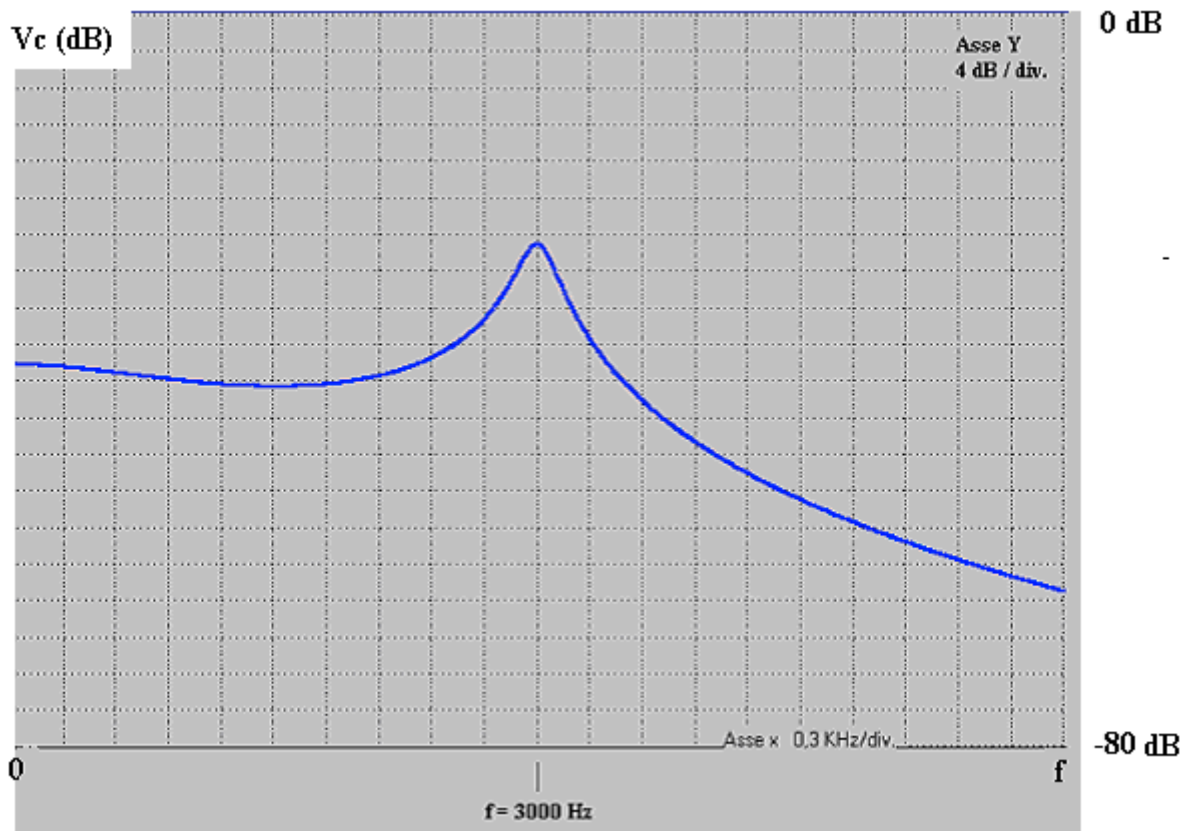
pari a circa -25 dB rispetto al livello $e = 100 \text{ Veff}$ del generatore in assenza di carico.

Sulla risposta del circuito:

A titolo illustrativo mostriamo ora la risposta in frequenza del circuito adattatore d'impedenza calcolabile, qualora la necessità d'indagine lo richieda, con il programma di elaborazione e grafica riportato in appendice A15.

Nella figura 5.36 è riportata, in assi cartesiani, la curva di risposta dell'adattatore calcolato in precedenza: in ordinate il livello di tensione V_c ai capi del carico, espresso in dB sotto il livello di $V_g = 100 \text{ Veff}$; sulle ascisse la frequenza in Hz.

figura 5.36



Dall'esame del grafico possiamo dedurre alcune interessanti informazioni relative al comportamento della cellula a pi greco con il variare della frequenza del generatore, queste, in ordine d'importanza, sono:

-alla frequenza $f = 3000$ Hz la curva presenta il massimo livello di V_c pari a circa -25 dB rispetto al valore di tensione $V_g = 100$ Veff, cioè:

$$V_c = 100 \text{ Veff} * [10^{(-25 \text{ dB} / 20)}] = 5.6 \text{ Veff}$$

pari al livello di tensione V_c calcolato in precedenza.

-il livello di V_c decresce sia per $f < 3000$ Hz che per $f > 3000$ Hz con il conseguente decremento di potenza sul carico, le pendenze di decremento di V_c sono determinate dal valore del Q della cellula a pi greco.

-la larghezza di banda del circuito a pi greco è valutabile dall'ampiezza dell'intervallo di frequenza per il quale il livello del segnale scende di 3 dB rispetto al massimo; cioè da -25 dB a -28 dB; dal grafico si valuta un $2\Delta f$ di circa 150 Hz.

-il livello di V_c per $f = 0$, condizione che si verificherebbe qualora la tensione del generatore fosse una corrente continua, è pari a -38.2 dB rispetto ai 100 Vcc di V_g , cioè:

$$V_c = 100 \text{ Vcc} * [10^{(-38.2 \text{ dB} / 20)}] = 1.23 \text{ Vcc}$$

Questo valore, nell'ipotesi che R_1 ed R_2 siano resistenze pure, si può verificare semplicemente anche mediante il rapporto tra R_1 e R_2 così come sotto indicato, dato che, per la corrente continua, la cellula a pi greco è trasparente; essendo $R_1 = 4000$ ohm, $R_2 = 50$ ohm, $V_g = 100$ Vcc si ha:

$$V_g : (R_1 + R_2) = V_c : R_2$$

ovvero:

$$V_c = V_g * R_2 / (R_1 + R_2) = 100 \text{ Vcc} * 50 \text{ ohm} / (4000 \text{ ohm} + 50 \text{ ohm}) = 1.23 \text{ Vcc}$$

-la scelta del valore del coefficiente di merito, imposta dai dati di base in $Q = 25$, determina il profilo della curva di risposta; per avere una risposta più stretta si devono adottare valori del $Q > 25$, per avere una risposta più larga si devono adottare valori del $Q < 25$.