

Cap.9 Strumenti elettronici e tecniche di misura

La strumentazione elettronica per le misure nel campo della circuitazione analogica di bassa frequenza può essere scelta in dipendenza dell'attività da svolgere: amatoriale, di studio o professionale. In ogni caso si deve ricordare che l'esecuzione delle misure deve essere fatta con la "testa" più che con gli strumenti; se si pensa a fondo sul da farsi si possono ottenere risultati soddisfacenti anche con attrezzature di misura modeste.

L'impiego degli strumenti di misura deve essere preceduto da un'adeguata preparazione del posto di lavoro, che deve prevedere:

Piano d'appoggio con mensola sopraelevata per l'appoggio strumenti e supporto prese di tensione di rete e massa.

Lastra di alluminio da appoggiare sul piano di lavoro (dimensioni $\approx 400 \times 300$ mm), coperta di materiale isolante, con due cavetti di collegamento, l'uno, per la connessione con la massa del banco, l'altro, per la connessione con il lato freddo del circuito elettronico in prova; circuito che dovrà essere appoggiato su detta lastra per essere adeguatamente schermato (schermatura elettrostatica). Per non vanificare l'impiego dello schermo la circuitazione elettronica in prova deve essere sempre realizzata, connettendo tutti i componenti che la costituiscono, con conduttori il più corti possibili.

Scatola di alluminio senza coperchio, isolata internamente e con cavetto di massa, da utilizzare, quando necessario, per la schermatura superiore dei circuiti in prova; la scatola, sovrapposta al circuito in prova, crea, con la lastra sottostante al circuito, una efficiente gabbia di Faraday. Eliminazione, entro un raggio di una sfera da 1 metro, di qualsiasi trasformatore o apparato elettrico con trasformatori che non faccia parte della strumentazione di misura.

9.1 Le attrezzature di laboratorio

Le attrezzature di laboratorio necessarie per la sperimentazione ed il collaudo dei circuiti elettronici analogici possono dividersi in tre categorie:

Strumentazione minima di base.

Attrezzatura di medio livello.

Dotazione completa di alto livello.

La "Strumentazione minima di base" deve essere costituita dai seguenti apparecchi di misura:

- 1- Tester universale a bobina mobile 10000 ohm/volt (strumento elettromeccanico di costo modesto in grado di consentire misure di tensioni e correnti in continua e in alternata a frequenze inferiori a 1000 Hz e misure di resistenza).
- 2- Oscilloscopio a due assi (x,y) con risposta di frequenza dalla corrente continua ad 10 MHz (strumento elettronico di costo medio in grado di consentire misure di: tensioni alternate visualizzandone graficamente l'andamento, tensioni continue, frequenza, fase e tempo)
- 3- Alimentatore multiplo stabilizzato con tensioni d'uscita regolabili massime di +/- 30 V (generatore di tensioni continue stabilizzate variabili su predisposizione manuale, basso costo).
- 4- Cuffia telefonica con $z = 16$ ohm (per semplici controlli audio, basso costo)

L' "Attrezzatura di medio livello" deve essere costituita dai seguenti apparecchi di misura:

- 1- Tester universale a bobina mobile 10000 ohm/volt (strumento elettromeccanico di costo modesto in grado di consentire misure di tensioni e correnti in continua e in alternata a frequenze inferiori a 1000 Hz e misure di resistenza)
- 2- Oscilloscopio a due assi (x,y) con risposta di frequenza dalla corrente continua ad 10 MHz.(strumento elettronico di costo medio in grado di consentire misure di: tensioni alternate visualizzandone graficamente l'andamento, tensioni continue, frequenza, fase e tempo)

- 3- N° due Alimentatori multipli stabilizzati con tensioni d'uscita regolabili massime di +/- 30 V (generatori di tensioni continue stabilizzate variabili su predisposizione manuale, basso costo).
- 4- Generatore di onde sinusoidali nel campo di frequenze compreso tra 10Hz e 1 Mhz. (strumento elettronico di costo medio con regolatore manuale della frequenza e dell'ampiezza dei segnali emessi)
- 5- Voltmetro elettronico per misure in corrente alternata da 10 Hz a 1 Mhz (strumento di precisione a scale di misura predisponibile manualmente, costo elevato).
- 6- Attenuatore di segnali 0-60 dB a scatti di 1 dB (strumento elettromeccanico di precisione, costo elevato).
- 7- Frequenzimetro per misure fino a 1 MHz. (strumento elettronico per misure precise di frequenza, costo medio).
- 8- Cuffia telefonica con $z = 16 \text{ ohm}$ (per semplici controlli audio, basso costo)

La "Dotazione completa ad alto livello" deve comprendere:

- 1- Tester universale a bobina mobile 10000 ohm/volt (strumento elettromeccanico di costo modesto in grado di consentire misure di tensioni e correnti in continua e in alternata a frequenze inferiori a 1000 Hz e misure di resistenza).
- 2- Tester universale a bobina mobile 100000 ohm/volt (strumento elettromeccanico di medio costo in grado di consentire misure di tensioni e correnti in continua e in alternata a frequenze inferiori a 1000 Hz e misure di resistenza).
- 3- N° due Oscilloscopi a due assi (x,y) con risposta di frequenza dalla corrente continua ad 10 MHz.(strumenti elettronici di costo medio in grado di consentire misure di: tensioni alternate visualizzandone graficamente l'andamento, tensioni continue, frequenza, fase e tempo)
- 4- N° quattro Alimentatori multipli stabilizzati con tensioni d'uscita regolabili massime di +/- 30 V). (generatori di tensioni continue stabilizzate variabili su predisposizione manuale, basso costo).
- 5- N° due Generatori di onde sinusoidali nel campo di frequenze compreso tra 10Hz e 1 Mhz. (strumenti elettronici di costo medio con regolatore manuale della frequenza e dell'ampiezza dei segnali emessi)
- 6- Generatore modulato in frequenza ed ampiezza. (strumento elettronico di costo elevato con variatore manuale e automatico della frequenza e ampiezza dei segnali emessi).
- 7- Generatore di rumore (strumento elettronico di costo elevato con regolatore manuale dell'ampiezza e della banda di frequenza del rumore emesso).
- 8- Voltmetro elettronico per misure in corrente alternata da 10 Hz a 1 Mhz.(strumento di precisione a scale di misura predisponibile manualmente, costo elevato).
- 9- Voltmetro elettronico per misure di correnti continue (strumento di precisione a scale di misura predisponibili manualmente, costo elevato).
- 10- Voltmetro elettronico a vero valore efficace (strumento di precisione per la misura delle tensioni di segnale a larga banda, costo elevato).

- 11- Voltmetro selettivo (strumento di precisione a scale di misura predisponibili manualmente, dotato di selettore manuale della frequenza e della banda di misura, costo molto elevato).
- 12- Attenuatore di segnali a scatti 0-60 dB a scatti di 1 dB (strumento elettromeccanico di precisione, costo elevato).
- 13- Frequenzimetro per misure fino a 1 MHz. e misuratore di tempi (strumento elettronico a scale e funzioni predisponibile, costo medio).
- 14- Analizzatore di spettro nel campo 10Hz 10 Mhz (strumento elettronico con presentazione video degli spettri di frequenza dei segnali dotato di selettore manuale della banda e della definizione d'analisi, costo molto elevato).
- 15- Distorsionometro (strumento elettronico per la misura globale, in percentuale, della distorsione dei segnali sinusoidali, costo medio).
- 16- Fasometro (strumento elettronico per la misura precisa degli sfasamenti tra segnali elettrici, costo elevato).
- 17- Ponte per la misura delle induttanze e delle capacità (strumento elettrico o elettronico per la misura precisa dei valori dei componenti elettrici, costo elevato).
- 18- Wattmetro c.a. (strumento elettromeccanico per la misura della potenza elettrica assorbita da utenti vari, costo medio)
- 19- Amperometri c.c. e c.a. (strumenti elettromeccanici di precisione per la misura della corrente, costo alto)
- 20- Termometro elettronico a contatto (per il rilievo della temperatura dei componenti di potenza, costo medio)

9.2 Misure di tensione e corrente

Le misure di tensione e corrente si possono dividere in due tipi: quelle in corrente continua e quelle in corrente alternata. Esaminiamole separatamente dato che i metodi e gli accorgimenti necessari per i rilievi sono sensibilmente diversi tra loro.

-Misure di tensioni continue

Le misure di tensioni continue, da eseguire sulla circuitazione analogica, hanno come obiettivo il controllo dei livelli delle stesse per verificare se i partitori resistivi, le polarizzazioni dei componenti attivi e quant'altro sono conformi ai dati di progetto. Queste misure è buona norma che vengano sempre eseguite, inizialmente, con voltmetri a bobina mobile (Tester). Questi strumenti pur non offrendo né la precisione né la sensibilità dei voltmetri elettronici, che peraltro potranno comunque essere impiegati in un secondo tempo se le misure lo richiedono, sono da preferire a quest'ultimi nelle fasi iniziali delle misure. La ragione di questa procedura risiede nel fatto che quando l'indice di un tester indica un valore di tensione, c'è la certezza che detta tensione sia presente, magari con un valore un poco diverso; altrettanta certezza non si potrebbe avere, invece, con un voltmetro elettronico erroneamente collegato (per mancanza d'esperienza) che indicherebbe presenza di tensione anche nel caso in cui questa non fosse presente. Riassumendo quindi: è necessario eseguire inizialmente una serie di misure a carattere orientativo con un tester, e poi ripeterle successivamente con un voltmetro elettronico per ottenere letture più precise.

L'impiego di un tester per misure di tensioni continue nei circuiti analogici, richiede una rapida comparazione (operazione generalmente non necessaria per i voltmetri elettronici) tra le caratteristiche dello

strumento e quelle del punto nel quale dette misure devono essere eseguite; alcuni semplici esempi per utilizzo di questo strumento sono di seguito riportati:

Primo esempio:

Un tester che abbia una resistenza di 10000 ohm/volt, se disposto per misure con 10V fondo scala, presenta una resistenza Ri d'ingresso di:

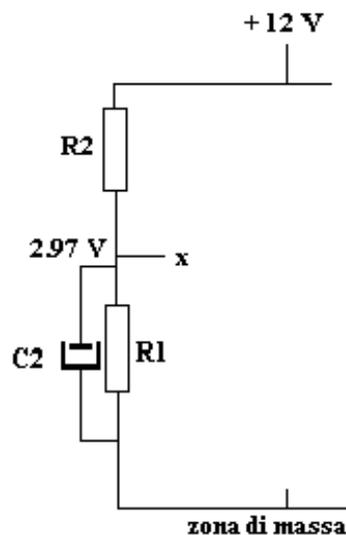
$$R_i = 10 \text{ V} * 10000 \text{ ohm/volt} = 100000 \text{ ohm}$$

Con uno strumento avente queste caratteristiche potremo rilevare livelli di tensione in punti di un circuito che presentino valori di resistenza non superiori ad 1/10 di Ri, in tal caso commetteremo un errore massimo del 10%. La figura 9.1 illustra la condizione di misura:

il circuito rappresenta un partitore resistivo (R1 = 3300 ohm; R2 = 10000 ohm) con il quale, dalla tensione di 12Vcc, si ottiene un livello di 2.97 Vcc; detta tensione si ottiene dalla relazione:

$$12\text{V} * R_1 / (R_1 + R_2) = 12\text{V} * 3300 \text{ ohm} / (3300 \text{ ohm} + 10000 \text{ ohm}) = 2.97 \text{ V}$$

figura 9.1



Se per misurare la tensione generata dal partitore colleghiamo il tester tra il punto x e la zona di massa, il circuito si troverà ad avere in parallelo ad R1 anche la resistenza (Ri = 100000 ohm) dello strumento; ciò provocherà un cambiamento della resistenza verso massa che da R1 diventerà:

$$R_1 // R_i = (3300 \text{ ohm} * 100000 \text{ ohm}) / (3300 \text{ ohm} + 100000 \text{ ohm}) = 3194 \text{ ohm}$$

e di conseguenza una variazione della tensione in x da 2.97 V a:

$$12\text{V} * 3194 \text{ ohm} / (3194 \text{ ohm} + 10000 \text{ ohm}) = 2.9 \text{ V}$$

con un errore di lettura del -2.4%.

In questo caso l'errore di misura commesso è piccolo grazie al fatto che la Ri è ben 30.3 volte il valore di R1.

Secondo esempio:

Errore ben superiore al -2.4% si sarebbe commesso se, con lo stesso tester, avessimo eseguito la misura su di un partitore in cui fossero state: $R_1 = 33000 \text{ ohm}$, $R_2 = 100000 \text{ ohm}$; in tal caso il cambiamento della resistenza verso massa sarebbe stato da $R_1 = 33000 \text{ ohm}$ a:

$$R_1 // R_i = (33000 \text{ ohm} * 100000 \text{ ohm}) / (33000 \text{ ohm} + 100000 \text{ ohm}) = 24812 \text{ ohm}$$

con una conseguente variazione della tensione misurata da 2.97 V a:

$$12V * 24812 \text{ ohm} / (24812 \text{ ohm} + 100000 \text{ ohm}) = 2.38 V$$

con un errore inaccettabile di misura del - 24.7%.

Questo risultato dipende ovviamente dalla resistenza del tester che è di sole 3.03 volte il valore di R_1 ; è chiaro quindi che, prima di qualsiasi misura di tensione con uno strumento a bobina mobile, sia necessario valutare quale incidenza può avere la resistenza dello strumento sul circuito sotto controllo. Ciò non significa che certe misure non si possano fare, ma che si debba tener conto, mediante calcolo, dell'errore commesso per valutare l'effettivo livello di tensione nel punto di misura; un terzo esempio chiarirà la situazione:

Terzo esempio:

Supponiamo che il partitore di figura 1.9 sia formato da $R_1 = 680 \text{ ohm}$ e $R_2 = 8200 \text{ ohm}$, con tali valori di resistenze la tensione deve essere:

$$12V * 680 \text{ ohm} / (680 \text{ ohm} + 8200 \text{ ohm}) = 0.91 V$$

Dobbiamo ora verificare se tale tensione è misurabile con un tester da 10000 ohm/volt disposto su di un fondo scala di 2.5V, in questo caso R_i sarà :

$$R_i = 2.5V * 10000 \text{ ohm/volt} = 25000 \text{ ohm}$$

e

$$R_i // R_1 = R_p = (680 \text{ ohm} * 25000 \text{ ohm}) / (680 \text{ ohm} + 25000 \text{ ohm}) = 661.9 \text{ ohm}$$

di conseguenza leggeremo una tensione V_L pari a:

$$V_L = 12V * 661.9 \text{ ohm} / (661.9 \text{ ohm} + 8200 \text{ ohm}) = 0.89 V$$

Possiamo ora passare, mediante calcolo, dalla lettura di 0.89 V, alla tensione reale (V_r) nel punto x utilizzando l'espressione:

$$V_r = V_L (1 + R_o / R_i)$$

nella quale $R_o = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2)$.

Essendo $R_o = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2) = 680 \text{ ohm} * 8200 \text{ ohm} / (680 \text{ ohm} + 8200 \text{ ohm}) = 627.92 \text{ ohm}$

si ha:

$$V_r = 0.89 * (1 + 627.92 \text{ ohm} / 25000 \text{ ohm}) = 0.91 V$$

Il valore di V_r ora calcolato rappresenta la tensione realmente presente tra il punto di misura x e la massa.

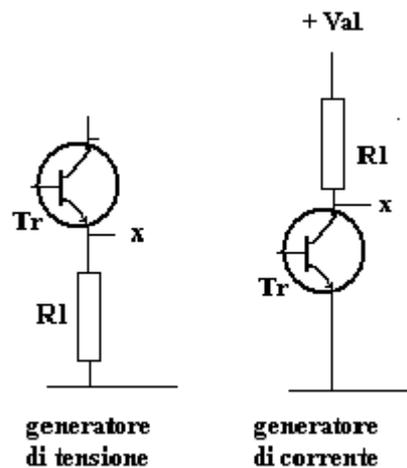
Dagli esempi illustrati emergono chiaramente due principi da seguire per le misure di tensione in corrente continua:

Utilizzare, per quanto possibile, tester con la più elevata resistenza/volt; ad esempio uno strumento da 100000 ohm/volt risulta meno critico che uno da 10000 ohm/volt.

Valutare sempre il rapporto R_i / R (del punto di misura) per giudicare se la misura dovrà essere corretta a calcolo oppure accettata così come da rilievo.

Situazioni diverse da quelle precedenti si hanno quando le misure di tensione vengono eseguite in circuiti nei quali le resistenze non determinano partizioni di tensione ma sono collegate o ad un generatore di tensione o di corrente; questi due casi sono illustrati in figura 9.2.

figura 9.2



Nel generatore di tensione (circuito a sinistra) la differenza di potenziale tra il punto x e la massa non è determinata dal valore di R_1 ma dalla polarizzazione di base di Tr . La misura eseguita con il tester ai capi di R_1 , pur alterando un poco la corrente in Tr , in dipendenza del valore di R_i del tester, non altera il valore di tensione in x e di conseguenza la misura di tensione può considerarsi precisa anche con un tester da 10000 ohm/volt.

Nel generatore di corrente (circuito a destra) la tensione tra il punto x e la massa è determinata dal valore di R_1 e dalla conduttanza d'uscita hoe di Tr . La misura della tensione V_L , eseguita con il tester nel punto x , deve essere messa a calcolo per la determinazione del valore (V_r) vero secondo l'espressione:

$$V_r = V_L (1 + R_u / R_i)$$

nella quale $R_u = R_1 / hoe / (R_1 + 1/hoe)$.

Un ultimo esempio, per concludere l'argomento, è di seguito esposto:

Quarto esempio:

In un circuito simile al generatore di corrente di figura 9.2 si debba misurare la tensione continua tra il punto x e massa, i vari parametri siano:

$R_1 = 47000$ ohm

$hoe = 12$ μ ho

Tester da 10000 ohm/volt su scala 10V ($R_i = 10000$ ohm * 10V = 100000 ohm)

La misura della tensione con il tester indica $V_L = 6 \text{ Vcc}$

Si può calcolare la tensione reale V_r applicando la formula indicata sopra:

essendo $R_u = 47000 \text{ ohm} / 12 \mu\text{mho} / (47000 \text{ ohm} + 1/ 12 \mu\text{mho}) = 30051 \text{ ohm}$

si ha $V_r = 6 \text{ V} * (1 + 30051 \text{ ohm} / 100000 \text{ ohm}) = 7.8 \text{ Vcc}$

-Misure di tensioni alternate

Le misure di tensioni alternate o segnali, da eseguire sulla circuitazione analogica, hanno come obiettivo il controllo dei livelli delle stesse per verificare se i guadagni o le perdite dei vari circuiti sono conformi ai dati di progetto. Queste misure difficilmente possono essere fatte con un tester, sia per la bassa resistenza d'ingresso di questi strumenti, quando sono predisposti per misure di tensione alternata, sia per la limitata banda di frequenze misurabile. Per eseguire rilievi di tensioni in un ampio campo di frequenze è necessario il voltmetro elettronico che abbina una elevata resistenza d'ingresso ad una banda di lavoro estesa. Con il tester si possono invece eseguire misure di livelli di tensione per il controllo dei trasformatori di alimentazione e altre misure a bassa frequenza.

La misura di tensioni di segnale con un voltmetro elettronico è opportuno che venga sempre accompagnata da un controllo oscilloscopico contemporaneo. In questo modo si evitano errori di lettura sul voltmetro a causa di erronei collegamenti dello stesso al circuito sotto controllo.

Per fare il riscontro con l'oscilloscopio è sufficiente collegare il suo ingresso in parallelo ai terminali di misura del voltmetro; la tensione efficace misurata da quest'ultimo dovrà corrispondere di massima al valore picco-picco della stessa, visualizzata sull'oscilloscopio, diviso per 2.81. Nel procedere alle misure di tensione di segnale si deve prestare molta attenzione che i cavi di collegamento degli strumenti ai circuiti non provochino l'instabilità dei circuiti stessi (tendenza all'innescio di oscillazioni spurie); l'impiego dell'oscilloscopio consente di verificare, tra l'altro, anche la stabilità del circuito in esame. Molte volte di fronte ad un circuito che entra in oscillazione per la presenza degli strumenti di misura, si blocca il fenomeno inserendo, tra i terminali caldi di quest'ultimi e il punto di misura, una piccola resistenza da qualche migliaio di ohm.

Nell'ambito delle misure su tensioni alternate un particolare cenno deve essere fatto nei riguardi dei segnali a larga banda (tra questi anche le tensioni di rumore). Per misurare con precisione il livello di questi segnali dovrebbero essere utilizzati particolari voltmetri elettronici detti "a vero valore efficace": questo tipo di strumenti, indicando il livello della tensione in funzione del calore prodotto dai segnali e non in dipendenza della loro forma, ne esprime pertanto il valore efficace reale. Diverso è il comportamento dei voltmetri elettronici ordinari, in corrente alternata, che indicano il livello nel presupposto che il segnale abbia una forma sinusoidale. Dato però che non sempre è disponibile in laboratorio un voltmetro a vero valore efficace, si consiglia, per misure su segnali a larga banda, l'impiego di un voltmetro elettronico ordinario da utilizzare per livelli compresi nel primo terzo di scala. Ad esempio: se il voltmetro è disposto su fondo scala di 10 V_{eff} e l'indice mostra che la tensione del segnale a larga banda è prossima ai 9 V_{eff} conviene cambiare il fondo scala è portarlo a 30 V_{eff} in modo che l'indice si posizioni intorno ad un terzo del settore di lettura; in questo modo l'indicazione sarà più precisa di quanto non lo sarebbe prima del cambiamento di scala.

-Misure di correnti continue

Le misure di correnti continue nella circuitazione analogica sono indirizzate prevalentemente al controllo della regolarità dei consumi sulle tensioni d'alimentazione; queste operazioni si eseguono facilmente con i comuni tester e non richiedono particolari precisioni. Se in qualche caso sono necessarie precisioni elevate si può utilizzare un milliamperometro digitale.

Si deve tener presente che la sistemazione di un tester per la misura del consumo di un circuito può, a volte, provocarne l'instabilità; ciò si evita disponendo tra il terminale del tester collegato al circuito e massa un condensatore elettrolitico di grande capacità. È comunque opportuno che gli strumenti utilizzati per la misura delle correnti d'alimentazione vengano scollegati, subito dopo i rilievi, per non alterare il regolare funzionamento dei circuiti stessi.

Se nelle misure di corrente continua in un circuito elettronico dovessero evidenziarsi consumi molto superiori ai dati previsti dal progetto, ciò è indice di qualche anomalia quali, instabilità, componenti resistivi di valore errato, semiconduttori guasti, condensatori elettrolitici montati con polarità invertita. In alcuni di questi casi la ricerca del componente che produce un eccessivo consumo è facilmente individuabile dal controllo della temperatura degli stessi, fatto con il dorso delle dita.

-Misure di correnti alternate

Alle misure dirette di correnti alternate dei segnali sono preferibili rilievi di tensione ai capi di componenti circuitali da trasformare, mediante calcolo, nelle correnti che scorrono in essi. Le misure indirette di corrente presentano il vantaggio di non dover sezionare il circuito per inserirvi lo strumento, operazione tanto più difficoltosa se deve essere condotta su di un circuito definitivi montato su circuito stampato.

Per il controllo di correnti alternate forti, quali quelle in gioco negli alimentatori, è consigliabile l'inserzione, in serie ai conduttori in cui fluisce detta corrente, di un amperometro in c.a. o di un tester opportunamente predisposto per tali rilievi.

9.3 Misure sui componenti passivi e attivi

Una numerosa ed utile serie di misure può essere condotta sui componenti passivi e attivi per il controllo delle loro caratteristiche; questi rilievi si basano essenzialmente sull'uso del tester predisposto per la misura delle resistenze.

-Componenti resistivi

Per queste operazioni è necessario, il più delle volte, che il componente da controllare si sconnesse dal circuito in cui è saldato. Il valore ohmico di un resistore può non corrispondere al dato nominale per diverse cause tra le quali, le più probabili, sono: un eccessivo stress termico o un difetto costruttivo. La tecnica di misura delle resistenze ohmiche non richiede particolari accorgimenti, salvo per resistori di valore superiore a circa 470000 ohm, per i quali è opportuno non tenere tra le dita i reofori, durante la misura, per non alterarne il valore ponendone in parallelo, inavvertitamente, la resistenza elettrica del corpo.

-Componenti capacitivi

Il tester consente di misurare, indicativamente, la funzionalità dei condensatori (un condensatore può non funzionare per interruzione del collegamento interno dei reofori) controllandone il processo di carica e di scarica; disponendo lo strumento per la misura delle resistenze di più alto valore e ponendo i suoi terminali ai capi di un condensatore, si vedrà l'indice indicare un breve passaggio di corrente per poi ritornare ad indicare resistenza nulla. Ripetendo l'operazione, dopo aver invertito la polarità dei terminali, si osserverà ancora un picco di corrente ad indicare che il condensatore ha un comportamento regolare. Se durante questo controllo l'indice del tester rimane a segnalare un qualsiasi valore di resistenza il condensatore è da sostituire.

-Componenti induttivi

Il controllo dei componenti induttivi con il tester è limitato soltanto alla verifica della continuità degli avvolgimenti e per il rilievo, qualora sussistano dubbi sulla correttezza degli avvolgimenti, della resistenza ohmica attesa in base ai dati di progetto. In alcuni casi se necessario, disponendo di un tester adatto (strumento in grado di misurare resistenze dell'ordine di decine di mega ohm), si possono controllare le resistenze d'isolamento, a bassa tensione, tra i vari avvolgimenti.

-Componenti attivi

Il tester può essere utile per il controllo indicativo della funzionalità di due componenti attivi quali diodi e transistori; grazie infatti alle caratteristiche delle giunzioni, che presentano resistenze elettriche molto diverse in dipendenza della polarità delle tensioni applicate, è possibile un loro rapido controllo.

Se con il tester misuriamo la resistenza di conduzione di un diodo, applicando il terminale positivo dello strumento sull'anodo e l'altro sul catodo, si devono misurare valori dell'ordine di pochi ohm. Rovesciando la polarità dei terminali, in modo che l'anodo abbia tensione negativa ed il catodo tensione positiva, si devono misurare valori dell'ordine di alcune migliaia di ohm; se queste condizioni sono verificate si può ritenere che il funzionamento del diodo sia regolare. Nel caso in cui non si verifichi conduzione o non ci sia differenza tra le due condizioni di polarizzazione del diodo significa che quest'ultimo ha la giunzione distrutta.

Un controllo del tutto simile a quello dei diodi può essere esteso ai transistori; in un transistor NPN, collegando il terminale positivo del tester alla base, si potrà verificare la conduzione base emettitore e base collettore misurando, in entrambi i casi, valori di resistenza di pochi ohm. Invertendo la polarità dello strumento sulla base, si dovranno riscontrare valori dell'ordine di migliaia di ohm per le due giunzioni (questi valori sono indicativi per transistori di piccola potenza, per semiconduttori per potenze elevate i valori sono molto inferiori). Qualora una od entrambe le giunzioni non conducessero o non mostrassero differenza di resistenza per polarità invertite, il transistor sarebbe

da ritenersi distrutto. Per il controllo dei transistori PNP la procedura è analoga alla precedente salvo la polarità da assegnare alla base, per la conduzione delle giunzioni, che deve essere invertita. Un secondo controllo veloce, a complemento dei precedenti, da eseguire su di un transistor NPN può essere realizzato collegando i terminali del tester, disposto come ohmetro, con il positivo sul collettore e il negativo sull'emettitore avendo cura di tenere la base collegata all'emettitore stesso; in queste condizioni il transistor non deve condurre. Scollegando la base dall'emettitore e collegandola al collettore il transistor deve mostrare piena conduzione. Con polarità invertite lo stesso controllo può essere fatto su transistori tipo PNP. È opportuno precisare che nessuna delle procedure sopra elencate può essere applicata ai circuiti integrati che non possono in alcun modo essere controllati così semplicemente.

9.4 Misure sui circuiti accordati

Le misure elettriche sui circuiti accordati di bassa frequenza (circuiti risonanti) richiedono una minima attrezzatura ed una sensibile esperienza per ottenere risultati apprezzabili.

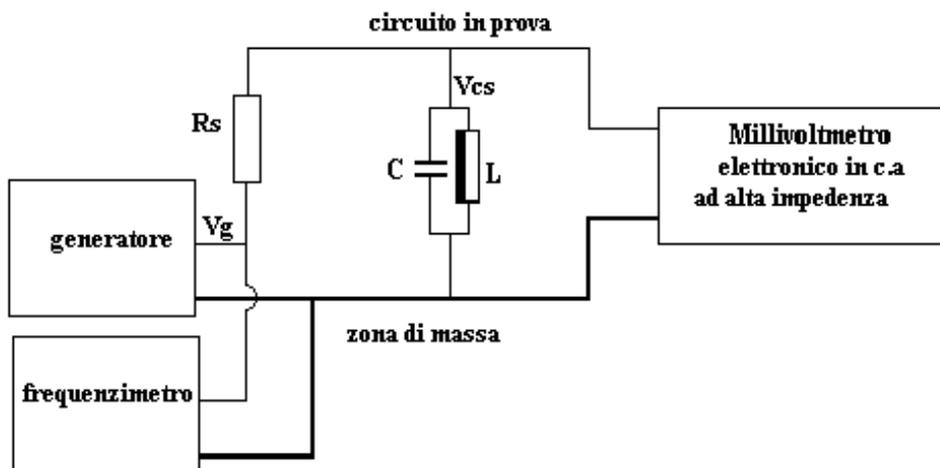
I rilievi da condurre su questi circuiti hanno i seguenti obiettivi:

- taratura dei componenti.
- misura della frequenza di risonanza.
- misura del coefficiente di merito.
- rilievo della curva di risposta.

Le misure possono interessare componenti reattivi L e C di circuiti accordati parallelo o circuiti accordati serie che, per valori del coefficiente di merito $Q > 10$, possono essere tarati e controllati disponendoli sempre in parallelo, come viene mostrato di seguito.

Per l'esecuzione delle misure è necessario attrezzare un posto di lavoro con gli strumenti ed i collegamenti riportati in figura 9.3

figura 9.3



La figura mostra l'impiego di tre strumenti quali:

- generatore di segnali sinusoidali.
- frequenzimetro per la misura della frequenza emessa dal generatore.
- millivoltmetro elettronico in corrente alternata ad alta impedenza ($Z > 10 \text{ Mohm}$) (per questo strumento è consigliato un modello ad indice invece che a display digitale, con il primo si riesce più facilmente a seguire le variazioni d'ampiezza nelle fasi di taratura dei circuiti risonanti).

Al centro del disegno è tracciato lo schema del circuito risonante parallelo sul quale devono essere effettuate le misure; il circuito è eccitato dal generatore attraverso la resistenza R_s le cui caratteristiche saranno di seguito definite.

I diversi collegamenti indicati nello schema devono essere realizzati con conduttori il più corti possibili avendo cura di collegare la zona di massa alla piastra schermante in dotazione al posto di

lavoro. I conduttori che fanno capo al circuito risonante devono essere fissati a quest'ultimo o con pinzette di ottima qualità o, meglio, con saldature a stagno.

Le misure sul circuito risonante devono essere precedute da un'accurata valutazione delle caratteristiche di progetto del circuito e dei parametri che si vogliono rilevare, per poi proseguire ai rilievi previsti, così come mostra l'esempio seguente:

Procedura di misura di un circuito risonante parallelo:

La procedura deve iniziare con l'esame dei dati di progetto del circuito risonante; supponiamo che questi siano:

Frequenza di risonanza voluta $F_0 = 14536$ Hz

Valore dell'induttanza costruita $L = 0.012$ H

Valore della capacità assegnata $C = 10000$ pF

Valore stimato del coefficiente di merito $Q = 100$

Le ragioni che richiedono la taratura del circuito risonante sono così motivate:

La frequenza di risonanza F_0 è il valore per il quale il progetto ha indicato la costruzione di un'induttanza da 0.012 H e l'impiego di un condensatore da 10000 pF. L'induttanza è stata realizzata, avvolgendo il numero calcolato delle spire, per ottenere il valore di 0.012 H, una volta aggiustata correttamente la mina di taratura del nucleo in ferrite entro il $\pm 7\%$ concesso a tale regolazione (le regolazioni possono variare dal $\pm 5\%$ al $\pm 10\%$ in dipendenza del tipo di nuclei). Il condensatore è stato selezionato con tolleranza del $\pm 1\%$ del valore nominale di 10000 pF. In presenza delle tolleranze di cui abbiamo accennato si comprende come i due componenti, una volta collegati, richiedano un'accurata taratura per ottenere la frequenza di risonanza voluta, taratura affidata esclusivamente al posizionamento della mina mediante rotazione all'interno del nucleo. La taratura si realizza quando si verifica l'uguaglianza:

$$2 * \pi * F_0 * L = 1 / (2 * \pi * F_0 * C)$$

Per eseguire le misure sul circuito risonante si deve dimensionare opportunamente il resistore R_s affinché questo possa iniettare nel circuito la corrente richiesta senza alterarne sensibilmente la resistenza dinamica (R_s simula approssimativamente un generatore di corrente). Il valore di R_d si calcola, nell'ipotesi di $Q = 100$ indicato a progetto, con l'espressione:

$$R_d = Q * 2 * \pi * F_0 * L$$

quindi: $R_d = Q * 2 * \pi * F_0 * L = 100 * 2 * 3.14 * 14536 \text{ Hz} * 0.012 \text{ H} = 109543 \text{ ohm}$

accettando una variazione del 10% di R_d si potrà porre $R_s = 10 * R_d \approx 1 \text{ Mohm}$.

Definito il valore di R_s si procede al calcolo indicativo della tensione sinusoidale (V_g) che dovrà essere applicata a R_s dal generatore. V_g è legata al valore desiderato di tensione (V_{cs}), ai capi del circuito risonante. Affinché si possano eseguire misure a livelli ragionevoli, né troppo piccole (sarebbero di difficile misurazione), né troppo grandi (potrebbero portare in saturazione l'induttanza); un livello di tensione massima (V_{cs}) di 1 V_{eff} è un valore accettabile.

La tensione fornita dal generatore si può calcolare con la formula:

$$V_g = V_{cs} * (R_s + R_d) / R_d$$

che con i dati a nostra disposizione diventa:

$$V_g = 1 V_{eff} * (1000000 \text{ ohm} + 109543 \text{ ohm}) / 109543 \text{ ohm} = 10.1 V_{eff}$$

Con il calcolo di V_g finisce l'attività preliminare di calcolo ed iniziano le misure secondo il seguente protocollo:

- 1) Si accendono i tre strumenti di misura e si verifica che i loro collegamenti al circuito di misura siano conformi allo schema elettrico di figura 9.3
- 2) Controllando il generatore con il frequenzimetro s'imposta con il primo la frequenza $F_0 = 14536$ Hz.
- 3) Si regola il generatore per livello di $V_g = 10$ Veff
- 4) Si procede ad una prima lettura di V_{cs} con il voltmetro elettronico, il livello misurato potrà essere inferiore ad 1 Veff.
- 5) Si ruota lentamente la mina di regolazione dell'induttanza L fino ad ottenere il massimo di V_{cs} , si otterrà $V_{cs} = 1.2$ Veff .
- 6) Ottenuto il massimo di V_{cs} , si ruota ulteriormente la mina di regolazione nello stesso senso del passo precedente: si deve ottenere un decremento di V_{cs} . Poi si ruota in senso inverso la mina per ottenere nuovamente il massimo di $V_{cs} = 1.2$ Veff (**con questa azione si è proceduto alla taratura dei componenti ed alla misura della frequenza di risonanza**).
- 7) Proseguiamo le operazioni misura sul circuito risonante con la misura del coefficiente di merito Q da confrontare con il valore di progetto di $Q = 100$. Per far ciò incrementiamo la frequenza del generatore fino a quando la tensione V_{cs} decrementa di 0.7 volte (-3 dB) rispetto al suo massimo (si passa da $V_{cs} = 1.2$ Veff. a $V_{cs} = 0.84$ Veff.); si annota il valore della frequenza $F_1 = 14616$ Hz. Si riporta il generatore alla frequenza $F_0 = 14536$ Hz e si controlla il valore di risonanza $V_{cs} = 1.2$ Veff. Si decrementa il valore frequenza del generatore fino a quando la tensione V_{cs} decrementa di 0.7 volte (-3 dB) rispetto al suo massimo (si passa da $V_{cs} = 1.2$ Veff. a $V_{cs} = 0.84$ Veff.); si annota il valore della nuova frequenza $F_2 = 14456$ Hz. Si riporta il generatore alla frequenza F_0 .
- 8) Con i dati delle frequenze rilevate al punto precedente si calcola il valore del coefficiente di merito rilevato sperimentalmente con la formula:

$$Q = F_0 / (F_1 - F_2)$$

che con i dati rilevati fornisce:

$$Q = 14536 \text{ Hz} / (14616 \text{ Hz} - 14456 \text{ Hz}) = 90.8$$

Il valore misurato del Q , inferiore di circa il 10% di quello calcolato a progetto si può ritenere congruente con il teorico dato che la misura risente della presenza di R_s che incide nella riduzione del Q sperimentale (**con questa operazione si è misurato il coefficiente di merito**).

Si osservi che la differenza tra F_1 ed F_2 è assimilabile alla larghezza di banda del circuito risonante visto come filtro; questa viene espressa con il simbolo Δf secondo l'espressione:

$$\Delta f = F1 - F2$$

che per il nostro circuito vale :

$$\Delta f = 14616 \text{ Hz} - 14456 \text{ Hz} = 160 \text{ Hz}$$

- 9) L'ultimo passo che conclude le misure sul circuito risonante è relativo al tracciamento della sua curva di risposta che si esegue variando la frequenza del generatore nel campo di frequenze e ad intervalli prescelti, e annotando, per ciascuno di questi il livello di V_{cs} da riportare successivamente su apposito diagramma cartesiano.

A seguito di questo esercizio è opportuno evidenziare una particolare situazione che può verificarsi, durante le misure sui componenti L e C, se, per errore costruttivo, il valore di L non è quello previsto dal progetto del circuito risonante. Ciò può accadere, con più probabilità, quando, non disponendo in laboratorio di un ponte di misura per le induttanze, si affida il controllo dei componenti alla fase di taratura del circuito risonante; in questo caso, eventuali errori sull'induttanza emergono durante le operazioni indicate ai punti 5) e 6) del citato esercizio.

Per comprendere se l'errore d'avvolgimento in L è dovuto per eccesso o per difetto di spire d'avvolgimento si consiglia la seguente procedura che riprende dal punto 6) dell'esercizio precedente:

- 6) Ottenuto il massimo di V_{cs} si ruota ulteriormente la mina di regolazione nello stesso senso e non si ottiene alcun decremento di V_{cs} : questo indica che non siamo riusciti ad accordare il circuito.
- 7) Si ruota la mina di regolazione portandola a circa metà corsa, si varia la frequenza del generatore per valori superiori ed inferiori a $F_0 = 14536 \text{ Hz}$ cercando la frequenza per la quale si ha un massimo netto di V_{cs} . Se detta operazione porta, ad esempio, ad una frequenza $F_i = 13212 \text{ Hz}$, essendo $F_i < F_0$ significa che l'induttanza ha un valore superiore a quello richiesto. Se invece l'accordo del circuito porta, ad esempio, $F_s = 15989 \text{ Hz}$, essendo $F_s > F_0$ significa che l'induttanza ha un valore inferiore a quello richiesto.
- 8) Nel caso che si abbia $F_i < F_0$ è facile smontare l'induttore per ridurne le spire nel rapporto F_0 / F_i come segue:

$$N_r \approx N [1 - (F_i / F_0)]$$

Se l'induttore doveva avere, ad esempio, 145 spire dovremmo ridurre l'avvolgimento attuale di N_r spire:

$$N_r = 145 * [1 - (13212 / 14536)] \approx 13 \text{ spire}$$

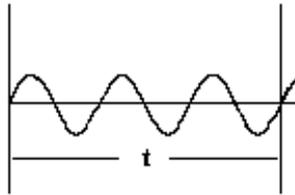
- 9) Nel caso che si abbia $F_s > F_0$ è necessario costruire un nuovo avvolgimento dell'induttore prestando attenzione nel conteggio delle spire.

9.5 Misure di frequenza

Misure di frequenza precise possono essere condotte con semplicità disponendo di idonei strumenti (frequenzimetri) con i quali procedere rapidamente ai rilievi interessati. Questi dispositivi consentono la misura di segnali unifrequenziali; perciò non sono adatti per determinare i contenuti di frequenza di segnali a banda larga; per questo scopo devono essere impiegati gli analizzatori di spettro. Sull'impiego del frequenzimetro l'unico accorgimento da seguire consiste nell'impiego di cavi adatti, per il collegamento sul punto di misura, affinché la loro capacità non alteri la frequenza di risonanza del dispositivo sotto controllo.

Misure di frequenza non precise, ma comunque significative, possono essere fatte utilizzando un oscilloscopio con il quale misurare la durata temporale di un certo numero di periodi della frequenza del segnale il cui andamento compare sullo schermo video. La procedura alla quale abbiamo accennato è illustrata in figura 9.4 e di seguito commentata:

figura 9.4



In figura è mostrato l'oscillogramma di un segnale sinusoidale, visualizzato sullo schermo di un oscilloscopio, al fine di misurarne approssimativamente la frequenza; la linea verticale a sinistra corrisponde al punto di sincronizzazione del segnale effettuato regolando l'asse dei tempi dello strumento, la linea verticale a destra individua la fine dell'intervallo temporale entro il quale ci accingiamo ad eseguire la misura di tempo. In base alla scala dei tempi impostata sull'oscilloscopio e con l'ausilio delle graduazioni sull'asse x dello stesso si misura il tempo "t" intercorrente tra i due riferimenti verticali; il calcolo della frequenza si esegue con l'espressione:

$$F = n / t$$

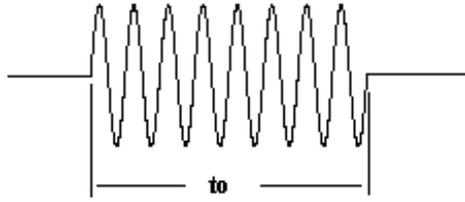
dove n è il numero dei periodi compresi nell'intervallo temporale di misura "t".

Se, ad esempio, il tempo "t" relativo all'oscillogramma di figura 9.4 fosse di 4.6 mSec la frequenza del segnale sarebbe:

$$F = 3 / 4.6 * 10^{-3} \approx 652 \text{ Hz}$$

Sempre utilizzando l'oscilloscopio è possibile eseguire una misura approssimata della larghezza di banda dello spettro di impulsi rettangolari, a contenuto unifrequenziale, simili a quello riportato in figura 9.5:

figura 9.5



In figura 9.5 è mostrato l'oscillogramma di un impulso a contenuto sinusoidale visualizzato sullo schermo di un oscilloscopio; con t_0 è indicata la durata temporale dell'impulso misurata sull'asse x dello strumento.

La larghezza di banda dello spettro dell'impulso, nell'intervallo di frequenze che contiene la maggiore quantità di energia, è valutabile con approssimazione con l'espressione:

$$\Delta f = 1 / t_0$$

La frequenza di centro banda F_0 è invece data dall'espressione

$$F_0 = n / t_0$$

dove n è il numero dei periodi contenuti nell'impulso.

Vediamo come valutare e tracciare lo spettro di frequenza di un impulso sinusoidale con il seguente esempio:

Dati di base e tema:

Dall'esame osciloscopico di un impulso rettangolare a contenuto sinusoidale si sono rilevati i seguenti dati:

Durata dell'impulso $t_0 = 10 \text{ mSec}$

Numero di periodi all'interno dell'impulso $n = 8$

Calcolare la frequenza centrale F_0 , la larghezza approssimata dello spettro dell'impulso, e tracciarne il grafico.

Sviluppo:

Calcolo della frequenza centrale F_0 :

$$F_0 = n / t_0 = 8 / 10 * 10^{-3} \text{ Sec} = 800 \text{ Hz}$$

Calcolo della larghezza di banda dello spettro Δf :

$$\Delta f = 1 / t_0 = 1 / 10 * 10^{-3} \text{ Sec} = 100 \text{ Hz}$$

La banda si estenderà per metà sotto la frequenza centrale F_0 e per metà sopra a detta frequenza, cioè da:

$$F_0 - \Delta f/2 = 800 \text{ Hz} - 50 \text{ Hz} = 750 \text{ Hz}$$

a

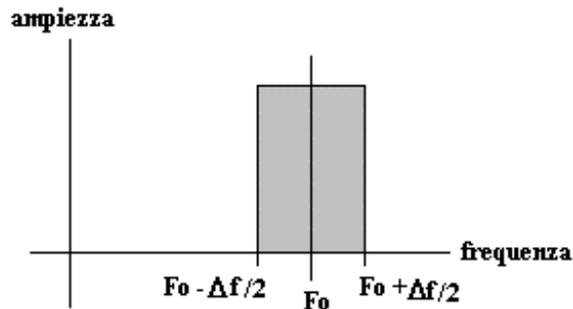
$$F_0 + \Delta f/2 = 800 \text{ Hz} + 50 \text{ Hz} = 850 \text{ Hz}$$

Come tracciare il grafico dello spettro:

Per tracciare il grafico del profilo dello spettro si dovrebbe conoscerne la legge che lo governa, questo tipo d'informazione non è deducibile dal semplice esame osciloscopico, dovremo perciò tracciare un diagramma orientativo certamente valido nei valori limiti della sua larghezza e della posizione della frequenza centrale.

In figura 9.6 è tracciato lo spettro sulla base dei dati calcolati, in ascisse sono riportate le frequenze ed in ordinate l'andamento delle ampiezze ipotizzato, per semplicità, a profilo rettangolare:

figura 9.6



Osservazioni:

Il procedimento per la misura della durata dell'impulso con l'oscilloscopio e i successivi calcoli per determinare approssimativamente lo spettro, pur nella loro semplicità, consentono la soluzione di un problema importante: la definizione delle caratteristiche di un filtro necessario al transito di detto impulso bloccando eventuali segnali o rumori interferenti non desiderati.

Se si deve, ad esempio, discriminare l'impulso, preso ad esempio nell'esercizio precedente, da un rumore perturbante distribuito su di una banda di frequenze estesa tra 100 Hz e 1500 Hz, dobbiamo dimensionare un filtro in grado di far transitare l'impulso bloccando, per quanto possibile, il passaggio del rumore.

Dato che i calcoli hanno portato alla definizione della banda dell'impulso compresa tra:

$$F_0 - \Delta f/2 = 750 \text{ Hz}$$

$$F_0 + \Delta f/2 = 850 \text{ Hz}$$

si dovrà dimensionare un filtro passa banda che abbia le frequenze di taglio, f_1 e f_2 , rispettivamente inferiore e superiore del 10% degli estremi della banda dell'impulso; potrà essere

$$f_1 = (F_0 - \Delta f/2) / 1.1 = 750 \text{ Hz} / 1.1 \approx 680 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 1.1 * (F_0 + \Delta f/2) = 1.1 * 850 \text{ Hz} \approx 935 \text{ Hz}$$

A questo punto è necessario fare una precisazione che, pur esulando dalle tecniche di misura di questo capitolo, dato l'esempio fatto, è necessaria affinché non si crei confusione sull'effetto del filtro di banda sul rumore che inquina l'impulso.

La banda in cui è distribuito il rumore è stata indicata tra 100 Hz e 1200 Hz, il filtro, necessario al passaggio dell'impulso, ha una banda compresa tra 680 Hz e 935 Hz; da ciò ne consegue:

-tutte le frequenze del rumore comprese tra 100 e 680 Hz vengono attenuate dal taglio operato dal filtro sotto la frequenza f_1 .

-tutte le frequenze del rumore comprese tra 935 Hz e 1550 Hz vengono attenuate dal taglio operato dal filtro sopra la frequenza f_2 .

Nella banda del filtro però non transita soltanto l'impulso ma anche la parte del rumore non attenuata e distribuita tra 680 Hz e 935 Hz; il guadagno, G_f , nell'impiego del filtro non è perciò illimitato ma è contenuto nei termini indicati dall'espressione seguente:

$$G_f = \sqrt{ (B_n / B_f) }$$

dove B_n è la banda del rumore e B_f è la banda del filtro

Nel nostro caso, essendo

$$B_n = 1500 \text{ Hz} - 100 \text{ Hz} = 1400 \text{ Hz}$$

$$B_f = 935 \text{ Hz} - 680 \text{ Hz} = 255 \text{ Hz}$$

il vantaggio G_f (guadagno di banda) vale:

$$G_f = \sqrt{B_n / B_f} = \sqrt{(1400 \text{ Hz} / 255 \text{ Hz})} = 2.34 \text{ (7.4 dB)}$$

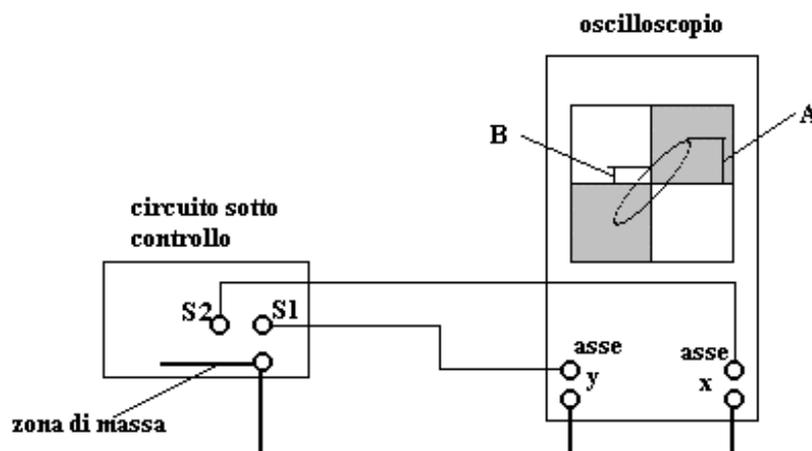
9.6 Misure di fase

Le misure di fase, tra segnali aventi la stessa frequenza, possono essere condotte con precisione disponendo di idoneo strumento (fasometro) con il quale procedere rapidamente ai rilievi interessati. In questo caso le misure si eseguono collegando i due ingressi dello strumento ai due punti del circuito nei quali sono presenti i due segnali la cui relazione di fase deve essere controllata. Sull'impiego del fasometro l'unico accorgimento da seguire consiste nell'impiego di cavi adatti, per il collegamento sui punti di misura, affinché le loro capacità non alterino le fasi dei segnali sotto controllo.

Lo strumento citato, però, dato il sensibile costo e l'uso sporadico, non è generalmente disponibile nell'ambito di modeste attrezzature di laboratorio; il tecnico, quindi, deve studiare come misurare gli sfasamenti tra i segnali con i mezzi comuni a sua disposizione.

Misure di fase non molto precise, ma significative, possono essere fatte utilizzando un oscilloscopio dotato degli assi x e y con il quale esaminare alcune figure caratteristiche dette "figure di Lissajous"; questo semplice metodo richiede il collegamento dello strumento al circuito sotto misura secondo lo schema di figura 9.7.

figura 9.7



Nella figura 9.7 si osserva:

- a sinistra il circuito sotto controllo nel quale sono individuati i due terminali ai quali fanno capo i segnali S1 e S2 tra i quali deve essere eseguita la misura di fase.
- a destra l'oscilloscopio nel quale sono evidenziati i due ingressi agli assi x e y.
- il collegamento della zona di massa del circuito con i terminali di massa dello strumento.
- il collegamento del segnale S1 all'ingresso di deflessione verticale (asse y) dell'oscilloscopio.
- il collegamento del segnale S2 all'ingresso di deflessione orizzontale (asse x) dell'oscilloscopio.
- lo schermo dell'oscilloscopio, suddiviso dai caratteristici assi ortogonali, attraversati da una figura ellittica (figura di Lissajous) sulla quale si individuano, il punto d'ampiezza massima, indicato

con la lettera A e il punto d'incontro con l'asse y indicato con la lettera B. Per meglio individuare la posizione delle figure sul video sono stati distinti i quattro quadranti dello schermo ombreggiando il I° e il III° (così possiamo dire che l'asse maggiore dell'ellisse tracciato in figura interseca il I° e il III° quadrante)

La misura che illustreremo è valida soltanto se i guadagni di amplificazione dei due assi dell'oscilloscopio sono identici tra loro: la procedura per il rilievo dello sfasamento tra due segnali è la seguente:

- si regolano i guadagni dei due assi dello strumento affinché la figura che compare sullo schermo

abbia l'ampiezza più grande possibile (maggiori sono le dimensioni del tracciato migliore è la precisione dei rilievi successivi).

- si controllano con cura i guadagni dei due assi, dopo l'aggiustaggio delle dimensioni della figura, per evitare errori accidentali sull'uguaglianza tra i due.

-si procede al rilievo delle variabili A e B aiutandosi con le tacche delle divisioni del reticolo graduato dello schermo; si osserva, inoltre, se l'asse dell'ellisse interseca i quadranti I° e III° o II° e IV° (la variabile A è il valore dell'ordinata del punto più alto dell'ellisse, la variabile B è l'ordinata del punto d'intersezione tra l'ellisse e l'asse y).

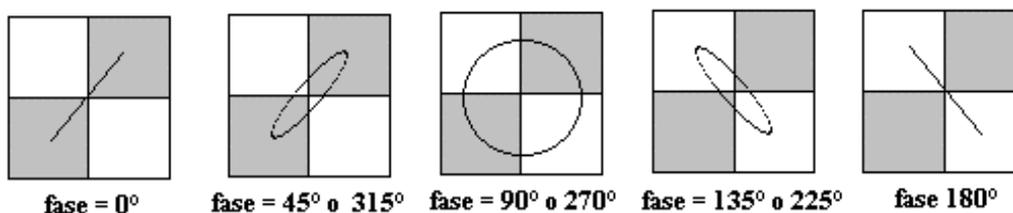
-si calcola il rapporto B/A

-se l'asse maggiore dell'ellisse taglia il I° e il III° quadrante si calcola lo sfasamento con la formula $\phi = \text{Arc Sen} (B / A)$ o si utilizza il grafico di figura 9.9

-se l'asse maggiore dell'ellisse taglia il II° e il IV° quadrante si calcola lo sfasamento con la formula $\phi = 180 - \text{Arc Sen} (B / A)$ o si utilizza il grafico di figura 9.10

Prima di mostrare gli esempi di misura di fase è interessante osservare, in figura 9.8, un certo numero di tracciati caratteristici che possono comparire sullo schermo dell'oscilloscopio per alcuni valori particolari di sfasamento:

figura 9.8



La prima immagine a sinistra mostra il tracciato che si visualizza sullo schermo dell'oscilloscopio quando la fase tra due segnali è 0° : in questo caso l'ellisse è schiacciata al punto di comparire come un segmento disposto tra il I° e il III° quadrante, si ha B/A = 0.

La seconda immagine a sinistra mostra il tracciato che si visualizza sullo schermo dell'oscilloscopio quando la fase tra due segnali è 45° oppure 315° : in questo caso l'asse maggiore dell'ellisse è disposto tra il I° e il III° quadrante e si ha B / A = 0.707.

L'immagine centrale mostra il tracciato che si visualizza sullo schermo dell'oscilloscopio quando la fase tra due segnali è 90° oppure 270° : in questo caso l'ellisse si è deformata in un cerchio e si ha B/A = 1.

La penultima immagine mostra il tracciato che si visualizza sullo schermo dell'oscilloscopio quando la fase tra due segnali è 135° oppure 225° : in questo caso l'asse maggiore dell'ellisse è disposto tra il II° e il IV° quadrante e si ha B / A = 0.707.

L'ultima immagine mostra il tracciato che si visualizza sullo schermo dell'oscilloscopio quando la fase tra due segnali è 180° : in questo caso l'ellisse è schiacciata al punto di comparire come un segmento disposto tra il II° e il IV° quadrante, si ha $B/A = 0$.

Da questa serie di immagini si comprende come il metodo possa condurre ad ambiguità nella misura dello sfasamento tra due segnali ad eccezione del caso in cui questo sia 0° o 180° . Il problema dell'ambiguità di misura è comune a molti metodi di rilievo della fase tra due segnali; vedremo in seguito (paragrafo 9.6.1) come tenerne conto.

Vediamo ora come affrontare la misura della fase con due esempi numerici e grafici senza porci il problema dell'ambiguità di misura:

-Primo esempio

Dati rilevati sull'oscilloscopio:

Dopo gli aggiustaggi del caso si è formata sull'oscilloscopio un'ellisse con l'asse maggiore disposto tra il I° e il III° quadrante, la misura della variabile A ha indicato $A = 6$ divisioni del reticolo, la misura della variabile B ha indicato $B = 4$ divisioni del reticolo.

Valutazioni dello sfasamento:

Essendo l'asse maggiore dell'ellisse disposto tra il I° e il III° quadrante, lo sfasamento tra i due segnali si valuta con l'espressione

$$\phi = \text{Arc Sen} (B / A) \text{ (asse per il I° e III° quadrante)}$$

o utilizzando il grafico di figura 9.9.

A scopo didattico utilizzeremo entrambi i metodi per la determinazione di ϕ in modo che il lettore possa poi scegliere quello che gli è più congeniale:

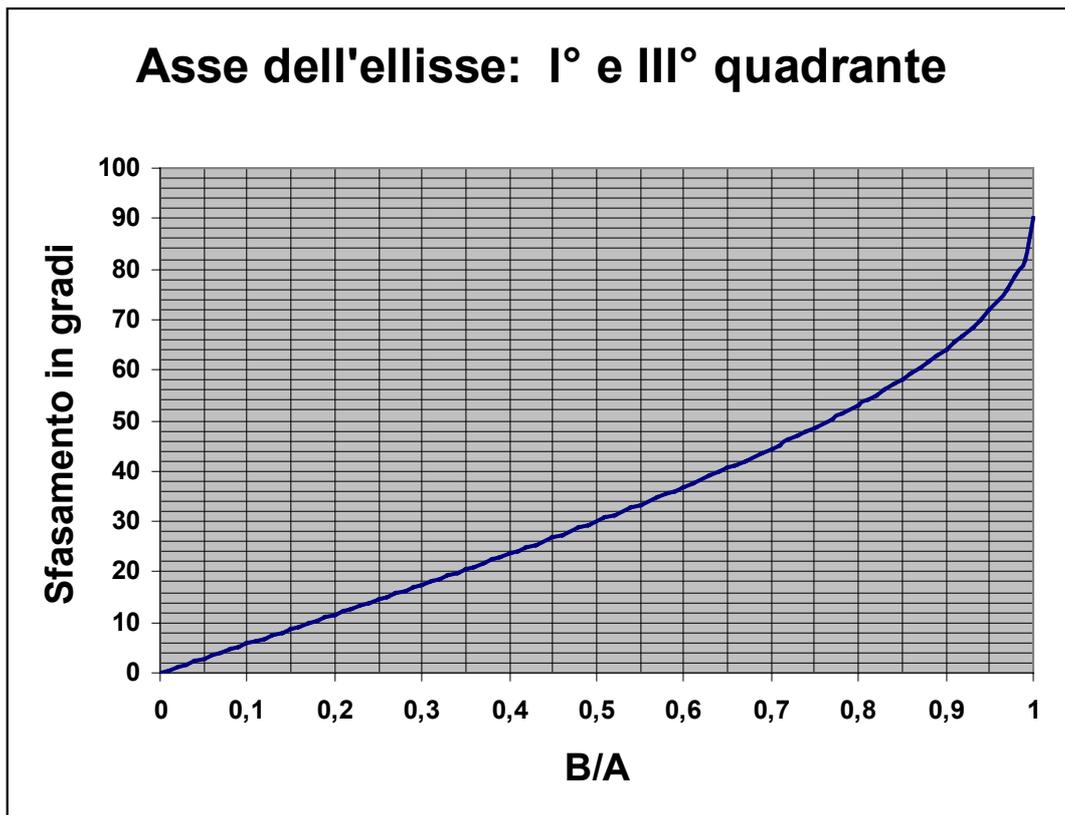
Metodo numerico- il rilievo strumentale ha individuato l'asse maggiore dell'ellisse intersecare il I° e III° quadrante, si utilizza pertanto l'espressione di calcolo $\phi = \text{Arc Sen} (B / A)$ che, con i valori rilevati di $A = 6$ e $B = 4$, consente di ottenere:

$$\phi = \text{Arc Sen} (B / A) = \text{Arc Sen} (4 / 6) = 41.8^\circ$$

Metodo grafico- essendo l'asse maggiore dell'ellisse disposto tra il I° e III° quadrante si deve far riferimento alla curva di figura 9.9.

Dopo aver calcolato il rapporto $B/A = 4/6 = 0.66$ lo si individua sull'asse delle ascisse e da questo, intercettando la curva, l'ordinata corrispondente che indica uno sfasamento $\phi = 42^\circ$.

figura 9.9



-Secondo esempio

Dati rilevati sull'oscilloscopio:

Dopo gli aggiustaggi del caso si è formata sull'oscilloscopio un'ellisse con l'asse maggiore disposto tra il II° e il IV° quadrante, la misura di della variabile A ha indicato A = 5.2 divisioni del reticolo, la misura della varabile B ha indicato B = 2.8 divisioni del reticolo.

Valutazioni dello sfasamento:

Essendo l'asse maggiore dell'ellisse disposto tra il II° e il IV° quadrante lo sfasamento tra i due segnali si valuta con l'espressione

$$\phi = 180 - \text{Arc Sen} (B / A) \quad (\text{asse per il II° e IV° quadrante})$$

o utilizzando il grafico di figura 9.10.

A scopo didattico utilizzeremo entrambi i metodi per la determinazione di ϕ in modo che il lettore possa poi scegliere quello che gli è più congeniale:

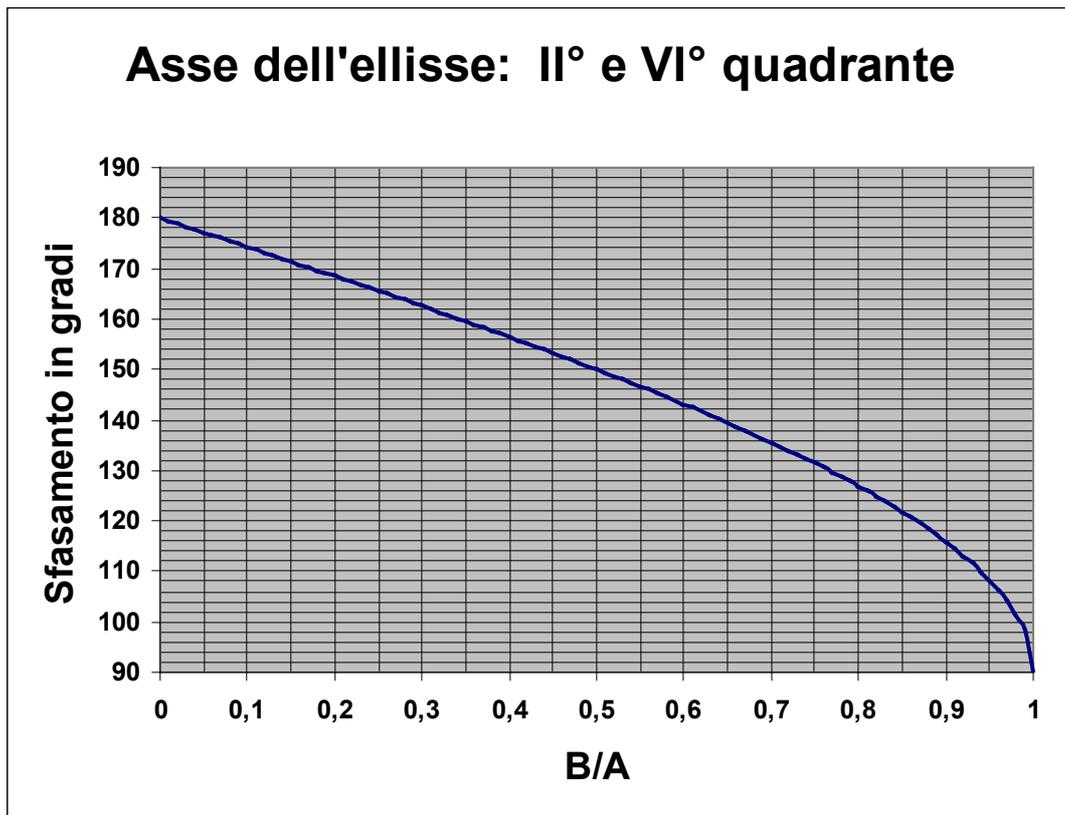
Metodo numerico- il rilievo strumentale ha individuato l'asse maggiore dell'ellisse intersecare il I° e III° quadrante, si utilizza pertanto l'espressione di calcolo $\phi = 180 - \text{Arc Sen} (B / A)$, che con i valori rilevati di A = 5.2 e B = 2.8, consente di ottenere:

$$\phi = 180 - \text{Arc Sen} (B / A) = 180 - \text{Arc Sen} (2.8 / 5.2) = 147.42^\circ$$

Metodo grafico- essendo l'asse maggiore dell'ellisse disposto tra il II° e VI° quadrante si deve far riferimento alla curva di figura 9.10.

Dopo aver calcolato il rapporto $B/A = 2.8/5.2 = 0.53$ lo si individua sull'asse delle ascisse e da questo, intercettando la curva, l'ordinata corrispondente che indica uno sfasamento $\phi = 148^\circ$.

figura 9.10



9.6.1 Il problema dell'ambiguità nella misura di fase con l'oscilloscopio

Il problema dell'ambiguità di misura non si pone quando sia conosciuto, a priori, che il campo entro il quale si può trovare lo sfasamento da rilevare è inferiore a 180° (questa condizione si verifica in pratica il più delle volte). L'incertezza nasce invece nei casi in cui l'entità dello sfasamento sia assolutamente sconosciuta come negli esempi condotti nel paragrafo precedente. Nel citato paragrafo abbiamo imparato a interpretare le figure di Lissajous per la misura dello sfasamento tra due segnali aventi la stessa frequenza, abbiamo inoltre sviluppato gli esercizi i cui risultati ci serviranno ora per cercare di risolvere il problema dell'ambiguità di misura.

Gli esercizi menzionati hanno portato ai seguenti risultati:

- ellisse con l'asse maggiore disposto tra i quadranti I° e III: sfasamento calcolato $\phi = 41.8^\circ$
- ellisse con l'asse maggiore disposto tra i quadranti II° e IV: sfasamento calcolato $\phi = 147.42^\circ$

Le ellissi che sono servite alla determinazione di questi sfasamenti sono anche rappresentative di sfasamenti ϕ_1 e ϕ_2 che si ottengono dai primi con la differenza a 360° , in altre parole:

- l'ellisse che ha consentito il calcolo di $\phi = 41.8$ è anche espressione di uno sfasamento $\phi_1 = 360^\circ - 41.8^\circ = 318.2^\circ$
- l'ellisse che ha consentito il calcolo di $\phi = 147.42$ è anche espressione di uno sfasamento $\phi_2 = 360^\circ - 147.42^\circ = 212.58^\circ$

Ecco quindi che le misure eseguite, non essendo conosciuto a priori se il campo entro il quale poteva trovarsi lo sfasamento da rilevare era inferiore a 180° , sono ambigue, non consentono infatti di stabilire quali sono in realtà gli sfasamenti veri tra i segnali esaminati; 41.8° o 318.2° ? 147.42° o 212.58° ?

La soluzione al problema si ha mediante l'esame del senso di movimento del pennello elettronico dell'oscilloscopio:

-se il pennello elettronico ruota nel senso delle lancette dell'orologio sono validi gli sfasamenti che scaturiscono dalle formule:

$$\phi = \text{Arc Sen} (B / A) \quad (\text{asse per il I}^\circ \text{ e III}^\circ \text{ quadrante})$$

$$\phi = 180 - \text{Arc Sen} (B / A) \quad (\text{asse per il I}^\circ \text{ e III}^\circ \text{ quadrante})$$

o dalle curve 9.9 e 9.10.

-se il pennello elettronico ruota in senso contrario alle lancette dell'orologio sono validi gli sfasamenti che scaturiscono dalle formule:

$$\phi = 360 - \text{Arc Sen} (B / A) \quad (\text{asse per il I}^\circ \text{ e III}^\circ \text{ quadrante})$$

$$\phi = 180 + \text{Arc Sen} (B / A) \quad (\text{asse per il I}^\circ \text{ e III}^\circ \text{ quadrante})$$

o dalla differenza a 360° dei dati ricavati dalle curve 9.9 e 9.10.

Quanto detto è chiaro ma non facilmente verificabile; se ad esempio facessimo una misura di fase tra due tensioni a frequenza molto, molto, bassa, si riuscirebbe ad individuare il senso di rotazione del pennello elettronico e il problema sarebbe immediatamente risolto. Normalmente, però, i segnali hanno valori di frequenza tali da non consentire la visione del senso di movimento del pennello elettronico e quindi deve essere adottato un sistema per poterlo stabilire.

Tra i diversi metodi escogitati per individuare il senso di rotazione del pennello elettronico ne citiamo uno tra i più semplici: si realizza uno sfasatore variabile da inserire, prima delle operazioni di misura, in serie ad uno dei due segnali, incrementando lo sfasamento lentamente si osserva un'alterazione dell'ellisse che si sposta nel senso di rotazione del pennello elettronico. Una volta individuato il senso di rotazione, si ripristina la misura in assenza dello sfasatore.

9.7 Le misure sui circuiti analogici

I circuiti analogici comprendono una vasta categoria di unità funzionali che, singolarmente o collegate a gruppi, consentono la realizzazione di molteplici apparecchiature elettroniche. Per tale ragione esse richiedono accurate misure di controllo per la verifica delle loro caratteristiche fisiche con i dati originali di progetto.

I circuiti analogici sono definiti da un numeroso elenco di caratteristiche che, individuate in base alla tipologia circuitale, sono necessarie per stabilirne il comportamento nelle più svariate applicazioni.

Diverse infatti devono essere, ad esempio, le caratteristiche di rumore di un amplificatore progettato per ricevere segnali di alcuni microvolt rispetto a quelle di un amplificatore destinato a ricevere segnali di centinaia di millivolt.

Un elenco delle misure sui circuiti analogici, e sulle procedure per eseguirle, viene qui riportato affinché ciascuno possa trovare in esso quella serie di rilievi che più si adattano al tipo di unità progettata:

- correnti continue di alimentazione
- tensioni di polarizzazione
- temperatura dei componenti
- guadagno
- risposta in frequenza
- dinamica e linearità
- distorsione
- correnti continue di alimentazione (in presenza dei segnali massimi)
- rumore proprio
- impedenza d'ingresso
- potenza d'uscita

- stabilità con e senza carico
- diafonia (solo per gruppi di amplificatori)
- coerenza tra i rumori propri (solo per gruppi di amplificatori)
- influenza ai campi magnetici
- influenza ai campi elettrostatici

Le procedure per l'esecuzione delle misure sopra elencate sono di seguito illustrate prendendo a modello, di volta in volta, il circuito analogico che più si presta a mostrarne l'applicabilità.

9.7.1 Misure delle correnti continue di alimentazione

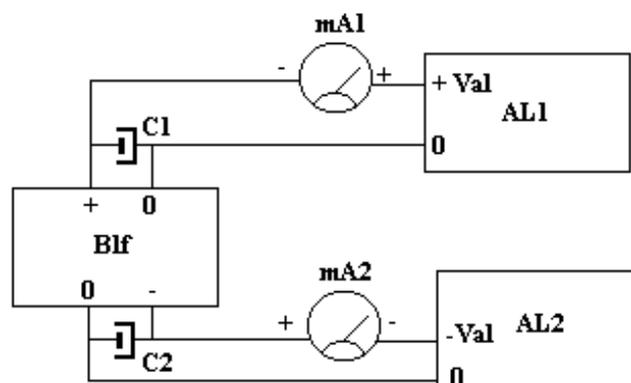
La misura delle correnti continue d'alimentazione è comune a tutti i circuiti elettronici; questa deve essere impostata secondo lo schema di figura 9.11 che mostra un generico blocco funzionale (Blf) al quale sono connesse due tensioni d'alimentazione, l'una positiva e l'altra negativa. In serie ai cavi di collegamento sono disposti due milliamperometri mA1 e mA2 per il rilievo della corrente assorbita dai due alimentatori AL1 e AL2.

Questa misura, peraltro molto semplice, richiede alcune accortezze per evitare che la presenza dei due strumenti possa alterare la normale funzionalità del blocco alimentato:

- i conduttori di collegamento tra gli alimentatori utilizzati devono essere il più corti possibile.
- ciascun alimentatore deve portare la propria tensione con due cavetti separati anche se poi, i lati freddi di ciascuna coppia, sono collegati nello stesso punto di massa del circuito utilizzatore.
- lo strumento mA1 deve essere collegato con il terminale positivo all'alimentatore.
- lo strumento mA2 deve essere collegato con il terminale negativo all'alimentatore.
- gli strumenti devono avere un fondo scala non superiore al doppio della corrente prevista nel consumo del Blf (ciò per consentire letture di correnti sufficientemente precise). (I milliamperometri singoli possono essere sostituiti, se necessario, da due tester disposti per la misura di correnti continue).
- nei punti di connessione dei fili d'alimentazione su Blf devono essere collegati due condensatori elettrolitici, C1 e C2, di tensioni adatte e di capacità superiori a 100 μF .

Per non correre il rischio di danneggiare i due strumenti all'accensione (la presenza di C1 e C2 può creare un forte passaggio di corrente iniziale) è opportuno, se possibile, aumentare gradatamente la tensione degli alimentatori fino al raggiungimento delle Val. volute; se ciò non fosse possibile, a seguito delle caratteristiche degli alimentatori, si suggerisce di cortocircuitare i due milliamperometri al momento dell'accensione per liberarli subito dopo per eseguire le misure.

figura 9.11



In dipendenza del tipo del circuito Blf possono essere misurate le correnti per funzionamenti elettrici diversi; nel caso, ad esempio, che Blf sia un oscillatore si dovranno rilevare le correnti nelle condizioni senza carico esterno e con carico collegato.

Nel caso di un amplificatore si dovranno misurare le correnti in assenza di segnale d'ingresso, con segnale d'ingresso senza carico d'uscita, e con carico collegato, analogamente dovrà essere fatto per un circuito rivelatore di segnali.

I valori delle correnti misurate devono essere conformi, entro il +/- 10%, ai dati di progetto del Bf, non si deve mai essere ottimisti di fronte ad un consumo di corrente notevolmente inferiore a quello previsto; questa condizione non costituisce un risparmio di energia, ma nasconde qualche errore che deve essere individuato e successivamente rimosso.

Così di fronte a consumi eccessivi si deve togliere immediatamente tensione al Bf per toccare, con molta attenzione per non ustionarsi, tutti i componenti montati sul circuito per rilevare se qualcuno di essi ha assunto una temperatura eccessiva; questa anomalia capita con frequenza, nei circuiti elettronici, a seguito del collegamento a polarità invertite di condensatori elettrolitici.

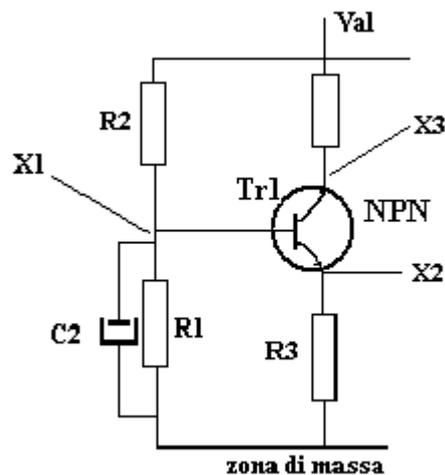
E' buona norma scollegare i milliamperometri una volta eseguite le misure salvo che, per ragioni diverse, non sia necessario monitorare in continuità le correnti assorbite dal Bf.

9.7.2 Misure delle tensioni di polarizzazione

La misura delle tensioni di polarizzazione è necessaria per verificare che il circuito elettronico lavori secondo quanto stabilito a progetto, errori su tali tensioni possono provocare innumerevoli anomalie funzionali che è impossibile elencare. Il controllo di dette tensioni deve avvenire, per quanto possibile, in assenza di segnali alternati circolanti nel circuito in esame. Questo tipo di misure, come già accennato all'inizio del capitolo, può essere fatto, in via preliminare con un tester, e, successivamente, una volta verificata la normalità dei livelli rilevati, e qualora la precisione lo richieda, con un voltmetro elettronico.

Per evitare che la resistenza R_i del tester possa alterare eccessivamente le misure è opportuno svolgerle nei punti a più bassa resistenza, per dedurle, indirettamente, nei punti a resistenza più alta, così come, per esempio, è mostrato in figura 9.12.

figura 9.12



Se nel circuito di figura 9.12 si deve controllare la polarizzazione di base, formata dal partitore R1 e R2, è più conveniente misurare la tensione X2 sull'emettitore e risalire a X1 sommando a X2 la V_{be} del transistor e quindi scrivere:

$$X1 = X2(\text{misurata}) + V_{be}$$

Diversa è invece la misura della tensione continua sul collettore, punto X3, che non ha altra possibilità che di essere misurata direttamente con un voltmetro ad alta resistenza d'ingresso.

Le misure delle tensioni di polarizzazione difficilmente coincideranno con quelle di progetto per il sommarsi delle seguenti cause:

-differenza tra i valori delle resistenze messe a calcolo e le resistenze con le quali è stato costruito il circuito; quest'ultime infatti presenteranno tolleranze che possono essere dell' $\pm 1\%$, del $\pm 5\%$ o del $\pm 10\%$, in base alle scelte fatte dal progettista del circuito.

-differenze tra le tensioni d'alimentazioni previste a progetto e tensioni effettivamente applicate al circuito.

-imprecisione degli strumenti di misura.

-alterazione dei valori resistivi a causa delle R_i degli strumenti durante le misure.

Tutto ciò non per disarmare chi si deve accingere alle misure su di un circuito, ma per sottolineare che precisioni di lettura che differiscano da quelle di progetto del $\pm 10\%$ rappresentano già un ottimo risultato.

9.7.3 Misure della temperatura dei componenti

Generalmente nei circuiti elettronici che non forniscono potenze elevate la temperatura dei componenti è tale da consentirne al tatto il rilievo indicativo (si tenga presente che fino a temperature di circa 50° la sensazione percepita non è dolorosa). Se a progetto non sono previste dissipazioni elevate, basta un'ispezione grossolana come sopra indicato per metterci tranquilli sulla normalità del comportamento termico del circuito.

Se invece sono previste in gioco potenze elevate, le temperature conseguenti potranno essere rilevate mediante l'impiego di adatto termometro elettronico a contatto.

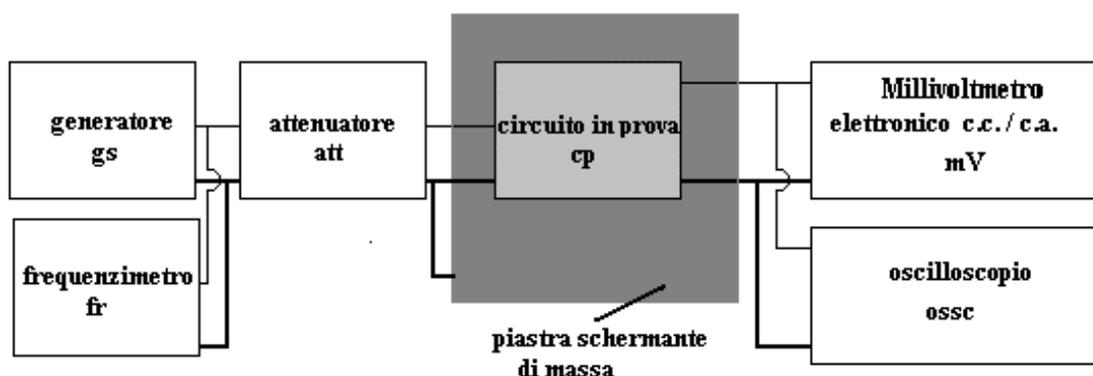
9.7.4 Misure del guadagno

Il parametro di guadagno, elemento fondamentale per innumerevoli circuiti elettronici analogici, è fissato in sede di progetto e successivamente verificato durante le prove del circuito in laboratorio. La misura del guadagno può riguardare indifferentemente amplificatori, rivelatori, adattatori d'impedenza, trasformatori e quant'altro possa avere, assieme, un ingresso ed un uscita per segnali. La tecnica per la misura dei guadagni deve essere acquisita, oltre che con queste brevi note, anche con l'esperienza diretta e ripetuta sulla circuitazione reale.

Il problema principale che nasce in questo tipo di misure risiede nell'entità stessa del guadagno che si deve rilevare; vedremo che, guadagni bassi, per i quali possiamo mettere in gioco livelli di tensione d'ingresso sensibilmente elevate, non rappresentano alcuna difficoltà di rilevamento, viceversa, guadagni elevati, che devono necessariamente essere legati a livelli di tensioni d'ingresso molto piccoli, rappresentano un sensibile problema tecnico da affrontare.

Lo schema generale per la misura del guadagno di un circuito elettronico è riportato nella figura 9.13 e di seguito commentato:

figura 9.13



Il circuito di misura vede:

sul lato sinistro

- il generatore di segnali (gs) con il quale viene prodotta la tensione per la misura.
- il frequenzimetro (fr) con il quale controllare la frequenza emessa.
- l'attenuatore di precisione att.

al centro

- il circuito in prova (cp)
- la lastra schermante in dotazione al posto di misura

a destra

- il millivoltmetro di misura (mV) utilizzabile sia per letture in c.a. che in c.c.
- l'oscilloscopio di controllo (ossc)

Tutta la strumentazione indicata, che può far parte una buona attrezzatura di laboratorio, non necessita di alcun commento, ad eccezione dell'attenuatore (att) che, ad evitare erronee convinzioni, richiede alcune precisazioni importanti. Il compito di un attenuatore è di portare all'ingresso del circuito in prova (cp) il livello di tensione necessario affinché la prova stessa possa aver luogo; applicando ad esempio con il generatore (gr) un livello di tensione di 1 V_{eff} su (att) si può regolare l'attenuatore per ottenere all'ingresso di (cp) diversi livelli di tensione come a esempio: 100 mV eff, 10 mV eff, 1 mV eff; 100 μV eff. Esaminando tali numeri vediamo che, regolando (att), questo riduce la tensione d'uscita del generatore rispettivamente di 1/10 (20 db), 1/100 (40 db), 1/1000 (60 db), 1/10000 (80) dB; chiunque, per mancanza d'esperienza, potrebbe osservare che queste partizioni di tensione possono essere realizzate semplicemente utilizzando quattro partitori resistivi costruiti, ad esempio, rispettivamente con i valori: 10000ohm-1000ohm, 10000ohm-100ohm, 10000 ohm-10 ohm, 10000ohm-1ohm. Purtroppo questa soluzione può essere valida soltanto per attenuare nel rapporto 1/10, per il rapporto 1/100 può presentare già alcuni problemi, mentre per gli altri rapporti è improponibile.

Quando si costruisce un partitore resistivo di tensione alternata ci troviamo infatti di fronte ad un circuito che fisicamente appare come formato da due soli componenti, mentre elettricamente si comporta come un insieme di capacità e campi elettrostatici, induttanze e campi elettromagnetici, che non sono governati dal valore delle resistenze del partitore, ma dipendono prevalentemente dalla posizione relativa dei componenti e dai loro collegamenti elettrici. In questa situazione complessa si può comprendere come sia impensabile che, a distanza di pochi centimetri l'uno dall'altro, livelli di tensione d'ingresso di alcuni volt non possano influenzare livelli di tensione che si vorrebbero d'ampiezza di decine di microvolt. Tutto ciò sarebbe ancora più critico se, per avere diversi valori d'attenuazione, volessimo impiegare numerosi partitori resistivi collegati ad un gruppo di commutazione. Anche pensando di realizzare piccoli schermi elettrostatici, le condizioni indicate restano difficili; soltanto costruzioni meccaniche particolari, realizzabili a livello industriale, consentono di poter ottenere attenuazioni variabili, elevate e precise: queste costruzioni vanno sotto il nome di attenuatori e sono disponibili in commercio.

Con molta esperienza è possibile autocostruire una singola cellula d'attenuazione per ottenere un unico livello di tensione fisso e calibrato.

Dopo questa premessa vediamo come procedere alla misura del guadagno di un circuito in prova pensando l'impiego di un'attenuatore di mercato; ciò mediante lo sviluppo dei seguenti esercizi:

Primo esercizio

Dati di base:

Supponiamo di operare su di un amplificatore in corrente alternata, avente i seguenti dati di progetto:

- frequenza di lavoro: da $F_1 = 1000$ Hz a $F_2 = 20000$ Hz
- guadagno: $G = 156 \pm 5\%$ (43,8 dB \pm 0.5 dB)

-tensione massima d'uscita senza carico $V_{umax} = 10 V_{eff}$.

Preparazione alla misura:

La misura deve essere preparata mediante la definizione del livello d'ingresso all'amplificatore. La valutazione del livello della tensione d'ingresso, per la misura del guadagno, è opportuno che preveda il più elevato livello possibile, affinché la misura stessa venga meno influenzata da fattori esterni, quali interferenze con la strumentazione od altro, o da fattori interni, quale il rumore proprio dell'amplificatore.

Dato che il livello massimo d'uscita dell'amplificatore è di $10V_{eff}$, è ragionevole prevedere di lavorare con una tensione d'uscita pari ad $\frac{1}{2}$ della massima per essere sicuri di eseguire misure in una zona di amplificazione lineare; ne segue

$$V_i = (V_{umax} / 2) / G$$

dalla quale

$$V_i = (10 V_{eff} / 2) / 156 = 32 \text{ mV eff}$$

Gli strumenti devono essere impostati come segue:

-Il generatore deve essere regolato alla frequenza di centro banda:

$$F = (F_1 + F_2) / 2 = (1000 \text{ Hz} + 20000 \text{ Hz}) / 2 = 10500 \text{ Hz}$$

ad un livello di tensione $V_g = 3.2 V_{eff}$

-L'attenuatore deve essere regolato per un'attenuazione di:

$$att = V_g / V_i = 3.2 V_{eff} / 32 \text{ mV eff} = 100 \text{ volte (40 dB)}$$

-Il millivoltmetro, disposto per misure di tensioni alternate, deve essere inizialmente preparato o per un fondo scala di 100 mVolt per i controlli iniziali, successivamente dovrà essere commutato per un fondo scala di 10 Veff.

-L'oscilloscopio dovrà essere tarato per visualizzare segnali d'ampiezza di circa 30 Vpp.

Predisposizioni alla misura:

Nelle misure di guadagno è indispensabile che il circuito in prova ed i collegamenti tra questo e la strumentazione siano eseguiti con estrema cura. Dato che il guadagno in gioco nel nostro esempio non è molto elevato, sarà sufficiente controllare che la piastra schermante, sottostante il circuito (cp), sia stata correttamente collegata alla massa dello stesso e che tutti i collegamenti tra gli strumenti e il (cp) siano stati fatti con cavetti schermati.

Esecuzione della misura:

La misura deve iniziare con un controllo preventivo del livello applicato all'ingresso dell'amplificatore con il voltmetro elettronico; detto livello deve risultare di 32 mV eff. ed eventuali differenze da questo valore devono essere recuperate variando il livello del generatore (gr). Dopo il controllo, si collega il millivoltmetro all'uscita dell'amplificatore, avendo cura di collegarvi contemporaneamente anche l'ingresso dell'oscilloscopio. Dopo questa operazione si deve verificare, su quest'ultimo, che la forma d'onda del segnale d'uscita dall'amplificatore sia netta e precisa, senza ondulazioni anomale o deformazioni di qualsiasi natura. Una volta eseguito il controllo oscilloscopio, si procede alla lettura della tensione indicata dal voltmetro; supponiamo di leggere:

$$V_{um} = 4.8 V_{eff}$$

Il guadagno misurato G_m risulta quindi:

$$G_m = V_{um} / V_i = 4.8 \text{ V}_{eff} / 32 \text{ mV}_{eff} = 150 \text{ volte}$$

L'errore percentuale ε tra il valore del guadagno misurato ed il valore di progetto risulta di:

$$\varepsilon = 100 * [1 - (G / G_m)]$$

ovvero
$$\varepsilon = 100 * [1 - (156 / 150)] = -4\%$$

errore compreso nelle tolleranze di progetto.

Secondo esercizio

Dati di base:

Supponiamo di operare su di un amplificatore in corrente alternata, avente i seguenti dati di progetto:

- frequenza di lavoro: da $F_1 = 10000 \text{ Hz}$ a $F_2 = 15000 \text{ Hz}$
- guadagno: $G = 84500 \pm 10\%$ ($98.5 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$)
- tensione massima d'uscita senza carico $V_{umax} = 4 \text{ V}_{eff}$.

Preparazione alla misura:

Similmente all'esercizio precedente calcoliamo:

$$V_i = (V_{umax} / 2) / G$$

dalla quale

$$V_i = (4 \text{ V}_{eff} / 2) / 84500 = 23.6 \mu\text{V}_{eff}$$

Gli strumenti devono essere impostati come segue:

-Il generatore deve essere regolato alla frequenza di centro banda:

$$F = (F_1 + F_2) / 2 = (10000 \text{ Hz} + 15000 \text{ Hz}) / 2 = 12500 \text{ Hz}$$

ad un livello di tensione $V_g = 0.23 \text{ V}_{eff}$

-L'attenuatore deve essere regolato per un'attenuazione di:

$$\text{att} = V_g / V_i = 0.23 \text{ V}_{eff} / 23.6 \mu\text{V}_{eff} \approx 9745 \text{ volte (} 80 \text{ dB)}$$

-Il millivoltmetro, disposto per misure di tensioni alternate, deve essere preparato per un fondo scala di 10 V_{eff} .

-L'oscilloscopio dovrà essere tarato per visualizzare segnali d'ampiezza di circa 6 V_{pp} .

Predisposizioni alla misura:

Dato che il guadagno in gioco, in questa nuova ipotesi di misura, è molto elevato, sarà indispensabile sovrapporre al (cp) un adatto coperchio metallico, da collegare a massa, che, assieme alla piastra sottostante e a tutti i collegamenti con cavetti schermati, crei una protezione elettrostatica totale del circuito.

Esecuzione della misura:

La misura, contrariamente alla precedente, non può iniziare con un controllo preventivo del livello applicato all'ingresso dell'amplificatore, perché è molto difficile poter misurare una tensione di

23.6 μV con un voltmetro elettronico. Le alternative potrebbero essere o la disponibilità di un voltmetro selettivo in sostituzione del voltmetro ordinario, o la fiducia di una misura corretta della V_g e del buon funzionamento dell'attenuatore.

Prima di procedere alla misura della tensione all'uscita dell'amplificatore si deve verificare, su l'oscilloscopio, che la forma d'onda del segnale d'uscita dall'amplificatore sia senza ondulazioni anomale o deformazioni di qualsiasi natura; dato l'elevato guadagno dell'amplificatore si vedrà la traccia del segnale leggermente perturbata dal rumore elettronico proprio che, date le caratteristiche indicate nei dati di base, non è quantizzato e quindi non comparabile con il rumore visualizzato. Una volta eseguito il controllo oscilloscopio, si procede alla lettura della tensione indicata dal voltmetro; supponiamo di leggere:

$$V_{um} = 2.2 V_{eff}$$

Il guadagno misurato G_m risulta quindi:

$$G_m = V_{um} / V_i = 2.2 V_{eff} / 23.6 \mu\text{V}_{eff} = 93220 \text{ volte}$$

L'errore percentuale ε tra il valore del guadagno misurato ed il valore di progetto risulta di:

ovvero
$$\varepsilon = 100 * [1 - (84500 / 93220)] = + 9.3 \%$$

errore compreso nelle tolleranze di progetto.

9.7.5 Misure della risposta in frequenza

Le misure della risposta in frequenza dei circuiti analogici possono riguardare indifferentemente amplificatori, rivelatori, filtri di banda attivi e passivi, adattatori d'impedenza, trasformatori e quant'altro possa avere, assieme, un ingresso ed un uscita per segnali.

Questo tipo di rilievi non presenta particolari difficoltà se si limita a controllare la risposta del (cp) nella zona passante e nelle zone immediatamente vicine ad essa nelle quali il livello d'uscita del segnale decade da 1/10 ad 1/20 del livello massimo. Per analisi nelle zone d'attenuazione superiori ai valori indicati si incontrano alcuni impedimenti che vedremo come superare.

Per le misure della risposta in frequenza si può impiegare ancora il circuito tracciato in figura 9.13 secondo le procedure che andiamo ad illustrare nel seguente esempio:

Dati di base:

Supponiamo di operare su di un amplificatore in corrente alternata, avente i seguenti dati di progetto:

-limiti della frequenza di lavoro a -3 dB : da $F_1 = 8000 \text{ Hz}$ ($\pm 500 \text{ Hz}$) a $F_2 = 12000 \text{ Hz}$ ($\pm 500 \text{ Hz}$)

-pendenza d'attenuazione fuori banda: 12 dB/ottava

-guadagno: $G = 200 \pm 10 \%$ ($46 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$)

-tensione massima d'uscita senza carico $V_{umax} = 8 V_{eff}$.

Si controlli la risposta tra 4000 Hz e 24000 Hz .

Preparazione alla misura:

La misura deve essere preparata mediante la definizione del livello d'ingresso all'amplificatore. La valutazione del livello della tensione d'ingresso, per la misura della risposta in frequenza, è opportuno che preveda il più elevato livello possibile, affinché la misura stessa venga meno influenzata da fattori esterni, quali interferenze con la strumentazione od altro, o da fattori interni quale il rumore proprio dell'amplificatore.

Dato che il livello massimo d'uscita dell'amplificatore è di 8V eff, è ragionevole prevedere di lavorare con una tensione d'uscita pari ad 1/2 della massima per essere sicuri di eseguire misure in una zona di amplificazione lineare. Ne segue:

$$V_i = (V_{umax} / 2) / G$$

dalla quale

$$V_i = (8 \text{ Veff} / 2) / 200 = 20 \text{ mV eff}$$

Gli strumenti devono essere impostati come segue:

-Il generatore deve essere regolato, inizialmente, alla frequenza di centro banda:

$$F = (F_1 + F_2) / 2 = (8000 \text{ Hz} + 12000 \text{ Hz}) / 2 = 10000 \text{ Hz}$$

ad un livello di tensione $V_g = 2 \text{ Veff}$

-L'attenuatore deve essere regolato per un'attenuazione di:

$$\text{att} = V_g / V_i = 2 \text{ Veff} / 20 \text{ mV eff} = 100 \text{ volte (40 dB)}$$

-Il millivoltmetro, disposto per misure di tensioni alternate deve essere preparato o per un fondo scala di 3 volt, successivamente dovrà essere commutato per un fondo inferiore.

-L'oscilloscopio dovrà essere tarato per visualizzare segnali d'ampiezza di circa 10 Vpp.

Predisposizioni alla misura:

Nelle misure di risposta in frequenza è indispensabile che il circuito in prova ed i collegamenti tra questo e la strumentazione siano eseguiti con cura. Dato che il guadagno in giuoco nel nostro esempio non è molto elevato, sarà sufficiente controllare che la piastra schermante, sottostante il circuito (cp), sia stata correttamente collegata alla massa dello stesso e che tutti i collegamenti tra gli strumenti e il (cp) siano stati fatti con cavetti schermati.

Esecuzione della misura:

La misura deve iniziare collegando il millivoltmetro all'uscita dell'amplificatore avendo cura di collegarvi contemporaneamente anche l'ingresso dell'oscilloscopio. Dopo questa operazione si deve verificare, su quest'ultimo, che la forma d'onda del segnale d'uscita dall'amplificatore sia netta e precisa, senza ondulazioni anomale o deformazioni di qualsiasi natura. Una volta eseguito il controllo oscilloscopio, si procede alla lettura della tensione indicata dal voltmetro; supponiamo di leggere:

$$V_{um} = 4.2 \text{ Veff}$$

Avendo disposto inizialmente il generatore alla frequenza di 10000 Hz inizieremo la compilazione di una tabella di coppie di valori così come sotto indicato che completeremo con tutte le coppie, frequenza-tensione, ottenute variando la frequenza del generatore da 10000 Hz a 24000 Hz e da 10000 Hz a 4000 Hz ad intervalli di 1000 Hz e rilevando le conseguenti tensioni in uscita da (cp):

Frequenza del segnale d'ingresso Hz	Ampiezza del segnale d'uscita in volt eff.
10000	4.2

Tra i tutti i punti rilevati della curva di risposta dovremmo aggiungere le due coppie comprendenti le frequenze di taglio F1 ed F2 per le quali il livello scende da 4.2 V eff a 2.9 V eff (punti a -3 dB). Con tutte le coppie di valori misurate si deve tracciare, su carta millimetrata, una curva rappresentativa della risposta del (cp) per verificarne la conformità dell'andamento con i dati di base.

Osservazione:

Se i dati di base prevedessero un controllo della risposta per valori d'attenuazione di molto superiori ad 1/20, la misura della tensione d'uscita non sarebbe più fattibile con un millivoltmetro ordinario. Questo strumento rileverebbe non soltanto il segnale attenuato dalla risposta del (cp), ma anche il rumore di questo, falsando i valori di lettura. Il problema è superabile soltanto con l'impiego di un voltmetro selettivo invece del millivoltmetro comune; con questo diverso strumento si dovrà, di volta in volta, sintonizzarsi sulla frequenza emessa dal generatore per rilevarla all'uscita di (cp) priva di segnali interferenti grazie alle caratteristiche selettive del nuovo apparecchio.

9.7.6 Misure della dinamica e della linearità

Le misure della dinamica e della linearità dei circuiti analogici possono riguardare indifferentemente amplificatori, rivelatori, filtri di banda attivi, adattatori d'impedenza.

La dinamica è la caratteristica con la quale si evidenzia quale variazione è consentita tra il livello minimo ed il livello massimo d'uscita di un qualsiasi dispositivo sopra menzionato.

La linearità indica la proporzionalità tra il segnale d'ingresso e quello d'uscita e la sua misura deve sempre accompagnare il controllo della dinamica.

Per eseguire questo tipo di misure i rilievi di laboratorio devono essere completati da idonei grafici di controllo. Con i grafici si giudica se quanto ricavato dalle misure è conforme ai dati di progetto. Per renderci conto dell'insieme delle operazioni di misura procediamo all'esercizio seguente che prende in esame un circuito rivelatore:

Dati di base:

Supponiamo di operare su di un circuito rivelatore (ingresso in tensione alternata e uscita in tensione continua) caratterizzato dai seguenti dati di progetto:

-frequenza di lavoro F1 = 5000 Hz (+/- 500 Hz)

-guadagno: G = 100 +/- 10 % (40 dB +/- 1dB) (inteso come rapporto tra Vucc / Vi eff)

-tensione massima d'uscita senza carico Vmax = 10 Vcc.

Si controlli la dinamica Vmax >10 Vcc e la linearità , entro 10%, nel campo di tensione d'ingresso compreso tra Vi min.= 10mVeff e Vi. max =100mV eff.

Preparazione alla misura:

Per le misure della dinamica e della linearità si può impiegare ancora il circuito tracciato in figura 9.13 secondo quanto di seguito illustrato:

La misura deve essere preparata mediante la definizione delle coppie di tensione V_i ; V_u , minima e massima, in conformità dei dati di base.

Per la coppia al massimo livello abbiamo:

$$\begin{aligned}V_{i,max} &= 100 \text{ mV}_{eff} \\V_{u,max} &= 10V_{cc}\end{aligned}$$

Per la coppia al minimo livello abbiamo:

$$\begin{aligned}V_{i,min} &= 10\text{mV}_{eff}. \\V_{u, min} &= V_{i min} * G = 10\text{mV}_{eff} * 100 = 1 V_{cc}\end{aligned}$$

-Il generatore deve essere regolato per una tensione d'uscita di 1 V_{eff} a 5000 Hz

-L'attenuatore deve essere regolato, inizialmente, per un'attenuazione di:

$$att = V_g / V_i = 1 \text{ V}_{eff} / 10 \text{ mV}_{eff} = 100 \text{ volte (40 dB)}$$

-Il millivoltmetro disposto, inizialmente, per misure di tensioni continue deve essere preparato per un fondo scala di 3 volt, successivamente dovrà essere commutato per un fondo scala superiore.

-L'impiego dell'oscilloscopio non è utile.

Predisposizioni alla misura:

Nelle misure di dinamica e linearità è indispensabile che il circuito in prova ed i collegamenti tra questo e la strumentazione siano eseguiti con estrema cura. Dato che il guadagno in giuoco nel nostro esempio non è molto elevato, sarà sufficiente controllare che la piastra schermante, sottostante il circuito (cp), sia stata correttamente collegata alla massa dello stesso e che tutti i collegamenti tra gli strumenti e il (cp) siano stati fatti con cavetti schermati.

Esecuzione della misura:

La misura deve iniziare con un controllo preventivo del livello applicato all'ingresso dell'amplificatore con un voltmetro elettronico disposto in c.a. ; detto livello deve risultare di 10 mV eff. Ed eventuali differenze da questo valore devono essere recuperate variando il livello del generatore (gr). Successivamente si procede alla prima lettura della tensione continua indicata dal voltmetro; supponiamo di leggere:

$$V_u = 0.95 V_{cc}$$

Si trascrivono i valori della prima coppia di tensioni : $V_{i1} = 10\text{mV}_{eff}$; $V_{u1} = 0.95 V_{cc}$

Agendo sull'attenuatore si riduce l'attenuazione del 50% (6 dB) e si legge la nuova tensione d'uscita:

$$V_u = 1.9 V_{cc}$$

Si trascrivono i valori della seconda coppia di tensioni : $V_{i2} = 20\text{mV}_{eff}$; $V_{u1} = 1.85 V_{cc}$

Agendo sull'attenuatore, si riduce l'attenuazione di un altro 50% (6 dB) e si legge la nuova tensione d'uscita:

$$V_u = 3.8 V_{cc}$$

Si trascrivono i valori della terza coppia di tensioni : $V_{i3} = 40\text{mVeff}$; $V_{u3} = 3.8 V_{cc}$

Si procede con un decremento d'attenuazione del 50% e si compone la coppia:

$$V_{i4} = 80\text{mVeff}; V_{u4} = 7.7 V_{cc}$$

Essendo giunti poco distanti da $V_{umax} = 10 V_{cc}$ si riduce ora l'attenuazione del 10% a passo (1 dB) ottenendo le coppie:

$$V_{i5} = 88 \text{ mVeff}; V_{u5} = 8.3 V_{cc}$$

$$V_{i6} = 96.8 \text{ mVeff}; V_{u6} = 9.1 V_{cc}$$

$$V_{i7} = 106.4 \text{ mVeff}; V_{u7} = 10 V_{cc}$$

$$V_{i8} = 117 \text{ mVeff}; V_{u8} = 11 V_{cc}$$

$$V_{i9} = 128 \text{ mVeff}; V_{u9} = 11.5 V_{cc}$$

$$V_{i10} = 141 \text{ mVeff}; V_{u10} = 11.5 V_{cc}$$

Con la serie delle dieci coppie si costruisce il diagramma di figura 9.14 dal quale giudicare la dinamica e la linearità del rivelatore:

Nella figura si osservano la serie dei dieci punti tracciati in corrispondenza delle dieci coppie, i punti non sono perfettamente allineati perché nell'esercizio abbiamo volutamente introdotto errori di valutazione nelle misure delle tensioni continue d'uscita (ciò accade normalmente durante le misure). Nel grafico abbiamo unito i punti con una spezzata per veder meglio l'andamento del fenomeno.

Valutazione della dinamica:

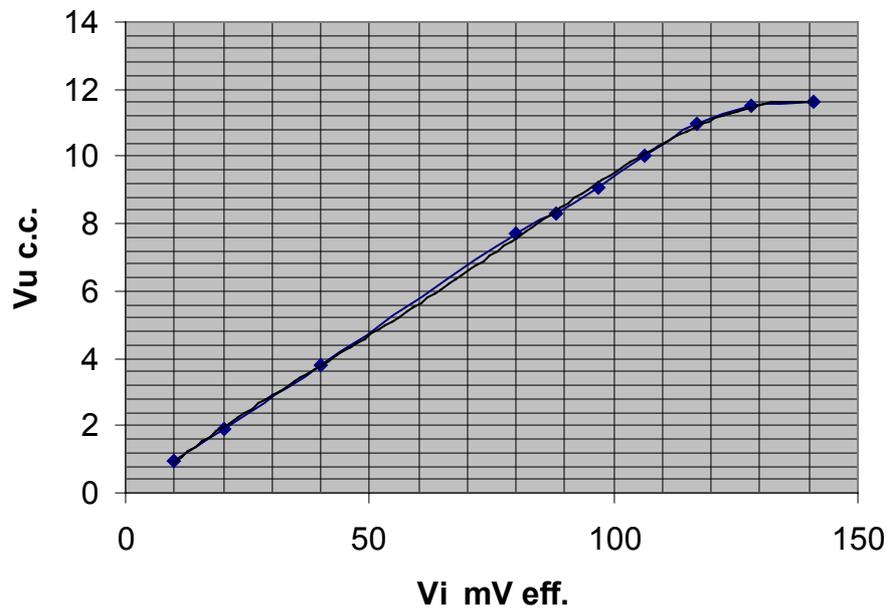
Dall'esame del grafico si osserva che la tensione d'uscita varia regolarmente (dinamica del segnale) tra il minimo di $1 V_{cc}$ per $V_i = 10 \text{ mV eff.}$ al massimo di $10 V_{cc}$ per $V_i = 100 \text{ mV eff.}$ oltre i 100 mV eff d'ingresso la tensione continua d'uscita non cresce più e piega attestandosi a valori di circa $11.5 V_{cc}$; la dinamica rispetta quindi i dati di base.

Valutazione della linearità:

Una linea di tendenza (confronto per la linearità) è stata tracciata a tratto unito per valutare la linearità della curva nell'intervallo compreso tra 10 mVeff e 100 mV eff d'ingresso; il confronto è positivo dato che i punti si discostano dalla linea meno del 10% indicato dai dati di base.

figura 9.14

Dinamica e linearità



9.7.7 Misure della distorsione

Le misure della distorsione nei circuiti analogici possono riguardare indifferentemente amplificatori e generatori. La distorsione è un fenomeno per il quale una forma d'onda che transita in un amplificatore o che è generata da un oscillatore non presenta più la forma originale.

Questa anomalia può essere causata da diversi fattori; i più comuni, per gli amplificatori, sono da ricercare nelle errate polarizzazioni in corrente continua, nell'eccesso d'ampiezza dei segnali, nel cattivo funzionamento di componenti semiconduttori. Nel caso di distorsione negli oscillatori L.C. si devono cercare, tra le possibili cause, una riduzione anomala del coefficiente di merito del circuito risonante.

Per eseguire questo tipo di misure si possono impiegare adatti strumenti, detti distorsiometri, con i quali si rileva la distorsione globale indicata in percentuale. Rilievi più complessi si possono eseguire con gli analizzatori di spettro che consentono la visione del segnale e di tutte le componenti armoniche che lo deformano.

Non essendo gli strumenti sopra indicati nella dotazione di un piccolo laboratorio vediamo come operare per avere un'indicazione della distorsione utilizzando mezzi ordinari quali l'oscilloscopio ed una cuffia telefonica.

Per renderci conto dell'insieme delle semplici operazioni per la ricerca della distorsione procediamo all'esercizio seguente che prende in esame un circuito amplificatore (si osservi che i controlli della distorsione negli amplificatori è bene eseguirli al massimo livello d'uscita):

Dati di base:

Come controllo finale di collaudo determinare, al massimo livello d'uscita, la presenza di distorsione in un amplificatore avente le seguenti caratteristiche:

Guadagno $G = 100$ volte (40 dB)

Risposta in frequenza 100 Hz – 40000 Hz

Resistenza di carico massima $R_c = 2000$ ohm

Tensione massima d'uscita $V_u = 5$ Veff.

Tensioni di alimentazione $V_{al} = +/- 10$ V

Operazioni di controllo:

Dopo aver collegato l'amplificatore secondo lo schema di misura di figura 9.13 si disponga alla sua uscita una resistenza di carico $R_c = 2000$ ohm; si regoli il generatore ad un livello d'uscita $V_g = 1$ Veff ad una frequenza udibile, ad esempio 400 Hz.

Si porti in saturazione l'amplificatore in modo che presenti, volutamente, la massima distorsione possibile per limitazione d'ampiezza: per ottenere ciò dall'amplificatore predisporre l'attenuatore per una riduzione d'ampiezza Att. pari al rapporto:

$$Att = V_g * G / |V_{al}|$$

$$Att = 1 \text{ Veff} * 100 / 10V_{cc} = 10 \text{ volte (20 dB)}$$

Si visualizzi sull'oscilloscopio la forma d'onda, limitata in ampiezza, presente all'uscita dell'amplificatore e si eseguano i seguenti controlli:

-verificare che l'amplificatore saturi simmetricamente sia verso + V_{al} che verso - V_{al} .

-aumentare l'attenuazione al valore:

$$Att = V_g * G / V_u$$

$$Att = 1 \text{ Veff} * 100 / 5 = 20 \text{ volte (26 dB)}$$

controllare visivamente che non ci siano segni di un'iniziale limitazione d'ampiezza sui picchi del segnale (se l'amplificatore lavora correttamente tali segni non ci devono essere).

Verificare inoltre che nella forma d'onda non compaiano deformazioni del profilo che dovrà essere di tipo sinusoidale.

-in sostituzione della resistenza di carico R_c collegare, mediante adatto partitore resistivo che non rappresenti un carico superiore a 2000 ohm, una cuffia telefonica all'uscita dell'amplificatore ed ascoltare la nota del segnale, questa dovrà risultare pura.

Osservazioni:

Un controllo del tipo indicato è sufficiente ad evidenziare, soltanto qualitativamente, il comportamento generale dell'amplificatore nei confronti dei fenomeni distorsivi più evidenti; se le misure non evidenzieranno alcuna anomalia potremo ritenere il circuito privo di distorsioni apprezzabili. Se invece i rilievi indicheranno qualche anomalia si dovrà procedere ad un esame del circuito elettronico per trovare la causa della distorsione.

È chiaro che piccole percentuali di distorsione non possono essere apprezzate dall'indagine illustrata e che se questo fosse l'inderogabile obiettivo della misura sarebbe necessario ricorrere agli strumenti specializzati dei quali si è accennato all'inizio.

9.7.8 Misure del rumore proprio

Le misure del rumore proprio nei circuiti analogici riguardano prevalentemente gli amplificatori; in questi dovrà essere misurata una particolare tensione alternata in uscita con la quale calcolare il livello equivalente di rumore d'ingresso. È infatti il rumore d'ingresso che rappresenta la grandezza, comunemente accettata, che indica il livello del rumore proprio di un amplificatore espresso in $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Le misure possono essere divise in due tipi:

-rilievo della tensione di rumore in uscita mediante voltmetro selettivo; in questo caso la misura porta al tracciamento, per punti, dello spettro del rumore.

-rilievo della tensione di rumore in uscita, con un millivoltmetro in c.a, da eseguire su tutta la banda di rumore generata dall'amplificatore.

In ogni caso le misure devono essere eseguite sulla base dello schema di figura 9.13 con il quale, inizialmente, eseguire un accurato controllo dei guadagni e della risposta in frequenza, così come indicato nei precedenti paragrafi 9.7.4 e 9.7.5.

Dopo il rilievo del guadagno si deve spegnere il generatore e scollegare l'attenuatore dall'ingresso del preamplificatore. Eseguite queste due operazioni si deve, sempre, sovrapporre al circuito un adatto coperchio metallico, da collegare a massa, che, assieme alla piastra sottostante, crei una protezione elettrostatica totale del circuito stesso.

Nel caso della disponibilità di un voltmetro selettivo si dovrà rilevare il livello di rumore in uscita nella banda caratteristica dell'amplificatore, suddividendola in almeno 10 intervalli di frequenza uguali. Nel caso d'impiego di un millivoltmetro ordinario si eseguirà un'unica misura.

Vediamo ora due esempi per illustrare la tipologia delle misure e dei computi.

Esempio 1

Dati di base:

Sia da rilevare, con un voltmetro selettivo, il rumore di un preamplificatore del quale si siano già rilevate le seguenti caratteristiche:

Guadagno costante di 30 volte (29.5 dB) tra 1000 Hz e 15000 Hz.

Predisposizioni:

Dopo il rilievo del guadagno si deve spegnere il generatore e scollegare l'attenuatore dall'ingresso del preamplificatore. Eseguite queste due operazioni si deve, sempre, sovrapporre al circuito un adatto coperchio metallico, da collegare a massa, che, assieme alla piastra sottostante, crei una protezione elettrostatica totale del circuito stesso.

Rilievo del rumore:

Disposto il voltmetro selettivo con una banda di misura della larghezza di 100 Hz si eseguono 10 rilievi di tensione all'uscita dell'amplificatore alle frequenze di: 1000 Hz, 2500 Hz, 4000 Hz, 5500 Hz, 7000 Hz, 8500 Hz, 10000 Hz, 11500 Hz, 13000 Hz, 15000 Hz. Supponiamo che le letture abbiano portato ai valori indicati nella tabella seguente:

Freq. Hz	Vnu in uscita livello in mVeff in banda 100 Hz
1000	3.5
2500	3
4000	2.8
5500	2.5
7000	2
8500	1.5
10000	1.2
11500	1
13000	0.8
15000	0.5

Si deve ora costruire una seconda tabella per riportare, a calcolo, i livelli misurati all'uscita come livelli d'ingresso espressi in $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ secondo l'espressione:

$$Vni = Vnu / (G * \sqrt{Ba})$$

Dove

Vni = tensione di rumore riportata all'ingresso espressa in $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ (è detta densità spettrale del rumore d'ingresso).

Vnu = tensione misurata con il voltmetro selettivo impostato con banda d'analisi Ba

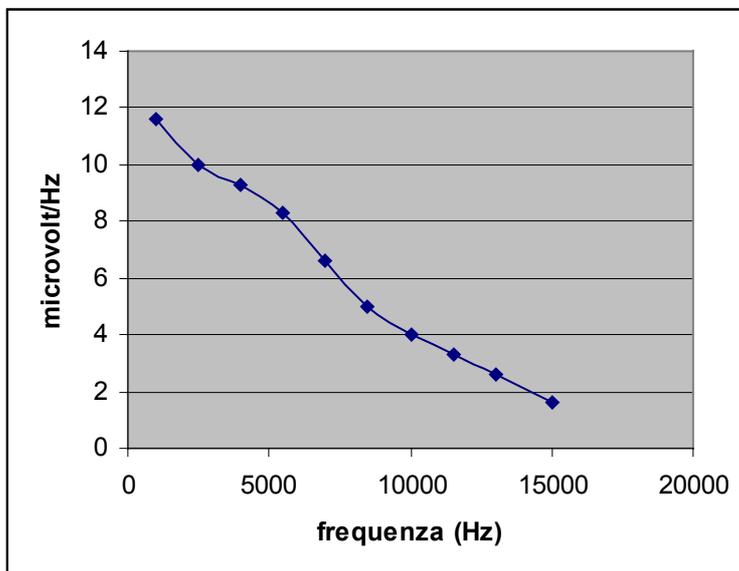
G = guadagno dell'amplificatore alle varie frequenze dalla banda

Freq. Hz	Vnu in uscita livello in mVeff in banda 100 Hz	Vni in $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$. (livello di rumore riportato all'ingresso)
1000	3.5	11.6
2500	3	10
4000	2.8	9.3
5500	2.5	8.3
7000	2	6.6
8500	1.5	5
10000	1.2	4
11500	1	3.3
13000	0.8	2.6

15000	0.5	1.6
-------	-----	-----

Dalla tabella si può tracciare una curva dello spettro del rumore d'ingresso come riportato in figura 9.15:

figura 9.15



Esempio 2

Dati di base:

Sia da rilevare con un voltmetro ordinario il rumore di un preamplificatore del quale si siano già rilevate le seguenti caratteristiche:

Guadagno costante di 100 volte (40 dB) tra 5000 Hz e 10000 Hz.

Predisposizioni:

Dopo il rilievo del guadagno si deve spegnere il generatore e scollegare l'attenuatore dall'ingresso del preamplificatore. Eseguite queste due operazioni si deve, sempre, sovrapporre al circuito un adatto coperchio metallico, da collegare a massa, che, assieme alla piastra sottostante, crei una protezione elettrostatica totale del circuito stesso.

Rilievo del rumore:

Disposto il millivoltmetro all'uscita dell'amplificatore ci si accerta con l'oscilloscopio che le tensioni sotto misura abbiano l'aspetto caratteristico dei segnali di rumore. Si predispongono la scala del millivoltmetro in modo che la tensione da misurare porti l'indice a circa 1/3 del fondo scala, si esegue la misura; supponiamo che il rilievo indichi un livello di 20 mV eff.

Ora si deve calcolare quale rumore spettrale è presente all'ingresso dell'amplificatore con l'espressione:

$$V_{ni} = V_{nuo} / (G * \sqrt{Bp})$$

Dove

V_{ni} = tensione di rumore riportata all'ingresso espressa in $\mu V/\sqrt{Hz}$ (è detta densità spettrale del rumore d'ingresso).

V_{nuo} = tensione misurata con il millivoltmetro ordinario

G = guadagno dell'amplificatore alle varie frequenze della banda

Bp = banda di risposta del preamplificatore

Applicando la formula si ha infine il risultato cercato

$$V_{ni} = V_{nuo} / (G * \sqrt{Bp}) = 20 \text{ mVeff} / [100 * \sqrt{(10000 - 5000)}] = 2.8 \text{ mV}/\sqrt{Hz}$$

