

**Aprile 2000**

# **Misure Elettroniche**

**Esercitazioni di laboratorio**

**(4 ore)**

**Enrico Rubiola**

# Contents

<b>1</b>	<b>Usò dell'oscilloscopio</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Misure di tensione alternata</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Misure su alimentatori stabilizzati</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Ponte bolometrico</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Misure su risonatori</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Voltmetri dc</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Wattmetro e voltmetro a vero valore rms</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Misure di frequenza</b>	<b>46</b>
	<b>Tabelle utili</b>	<b>51</b>
	<b>Generatore di forme d'onda</b>	<b>52</b>

## Capitolo 1

# Uso dell'oscilloscopio

### Avvertenza:

- se procedete spediti, fate pure tutte le esperienze suggerite
- ♣ se dovete risparmiare un po' di tempo saltate le esperienze ♣
- ◇ se siete in difficoltà cercate di fare almeno le esperienze ◇

### 1.1 Traccia

Utilizzare il segnale A0 (forma d'onda 0, uscita A) del generatore di segnali (circuit stampato).

Mettere il canale di ingresso in posizione gnd, in modo da visualizzare solo una linea orizzontale, e centrare la traccia rispetto allo schermo. Riportare l'ingresso in posizione accoppiamento ac (ac).

Regolare l'oscilloscopio in modo da visualizzare una sola traccia in modo che un periodo del segnale occupi la maggior parte possibile dello schermo, sia in orizzontale che in verticale (senza scalibrare gli assi).

### 1.2 Ampiezza ◇

Utilizzare il segnale A0 (forma d'onda 0, uscita A) del generatore di segnali (circuit stampato).

Misurare l'ampiezza del segnale; usare *anche* i cursori se disponibili.

Valutare l'incertezza assoluta e relativa della misura. Attenzione, l'incertezza ha una componente fissa, che dipende solo dalla sensibilità, ed una proporzionale alla lettura. La misurazione dell'ampiezza picco-picco è più agevole e precisa rispetto a quella dell'ampiezza di picco. Perché?

Verificare l'effetto del comando uncal sul canale Y1, e riportare lo strumento in posizione normale, con il canale calibrato.

### 1.3 Periodo e frequenza ◇

Utilizzare il segnale A0 del generatore di segnali (circuit stampato).

Misurare la frequenza del segnale dalla durata del periodo. Usare anche i cursori se disponibili.

Sovraccaricando il canale di ingresso dell'oscilloscopio la traccia esce dallo schermo, ma gli attraversamenti per lo zero sono più ripidi, e quindi meglio identificabili. La traccia è ancora centrata verticalmente?

Valutare l'incertezza assoluta relativa della misura di periodo, e riportarla sulla misura di frequenza. Nelle misure di tempo l'incertezza è definita in modo analogo a quello visto per l'ampiezza.

Provare l'effetto del comando uncal sulla base dei tempi principale (A). Perché non è più possibile misurare la frequenza?

Al termine, riportare il guadagno in posizione tale da visualizzare l'intero segnale, e la base tempi in posizione normale.

### **1.4 Scale e risoluzione**

Quale è la risoluzione, in tempo e in ampiezza, dell'oscilloscopio regolato come al paragrafo *Traccia*?

Quali sono la sensibilità e la velocità di scansione massime e minime?

### **1.5 Duty cycle** ◇

Utilizzare il segnale B4 del generatore di segnali (circuit stampato).

Misurare il duty cycle del segnale. Poiché si deve misurare un rapporto di tempi e non un tempo singolo, può essere conveniente scalibrare la base dei tempi in modo che il segnale occupi l'intera estensione orizzontale dello schermo.

Di quanti quadretti si sposta verticalmente la traccia, e in che direzione, passando dall'accoppiamento dc all'accoppiamento ac? Calcolare prima di verificare.

### **1.6 Trigger (1)** ◇

Utilizzare il segnale A4 del generatore di segnali (circuit stampato), collegato al canale Y1 dell'oscilloscopio.

Verificare che la sorgente di trigger sia il canale Y1. Provare l'effetto dei comandi slope e level del trigger dell'oscilloscopio.

Predisporre ora la sorgente di trigger sul canale Y2. Perché non si riesce a tenere ferma la traccia agendo sul livello e sulla pendenza del trigger?

Provare la differenza di comportamento dell'oscilloscopio quando il trigger è in modo auto e norm usando come sorgente sia il canale Y1 sia Y2, e quando il livello trigger è regolato su soglie eccessivamente alte o basse rispetto al segnale. Giustificare il comportamento dell'oscilloscopio.

Su molti oscilloscopi ci sono i comandi hf-rej, lf-rej, tv-v, tv-h e fix. A cosa servono? Provarne l'effetto, anche in combinazione con la regolazione del livello di trigger.

### **1.7 Trigger (2)**

Utilizzare il segnale B6 del generatore di segnali (circuit stampato), collegato al canale Y1 dell'oscilloscopio.

Per avere la massima pendenza del segnale è vantaggioso regolare il livello di trigger attorno a 0 V. Ciò pone dei problemi in quanto, anche se non evidente, c'è sempre del rumore sovrapposto al segnale. Come deve essere regolato l'oscilloscopio se si vuole ottenere un'immagine stabile?

### **1.8 Sonda** ◇

Volete misurare l'uscita di un generatore ad onda quadra con frequenza variabile e con impedenza di uscita di 1 k $\Omega$  (sui banchi tale generatore non c'è; mettere un resistore esterno in serie al generatore di funzioni).

Provate a collegare tale generatore all'oscilloscopio prima con un semplice cavo coassiale, poi con una sonda compensata. Che tipo di effetto "malefico" ha il cavo coassiale e in quali condizioni si manifesta? Che vantaggio c'è ad usare la sonda compensata?

### **1.9 Doppia traccia** ◇

Collegare l'uscita A del generatore di segnali (circuit stampato) al canale Y1 dell'oscilloscopio e l'uscita B al canale Y2. Predisporre il generatore per la forma d'onda 0.

Regolare l'oscilloscopio in modo da visualizzare entrambi i segnali sganciando la base dei tempi sullo zero crescente del segnale Y1.

Che differenza c'è tra il modo chop e il modo alt di visualizzare le due tracce? Quale dei due può essere "scomodo" con scansioni lente (es. 20 ms/div o più)?

Che cosa fa il comando vert (talvolta chiamato norm) della sorgente di trigger? Agisce allo stesso modo in chop e alternate?

### **1.10 Fase (1)** ◇

Collegare l'uscita A del generatore di segnali (circuit stampato) al canale Y1 dell'oscilloscopio e l'uscita B al canale Y2. Predisporre il generatore per la forma d'onda 0.

Misurare lo sfasamento tra i segnali convertendo in gradi il ritardo tra le due tracce.

Anche qui la misura può essere più agevole se si sovraccaricano i canali di ingresso dell'oscilloscopio.

Ai fini della precisione, sarebbe vantaggioso fare l'operazione in due tempi, misurando periodo e ritardo con velocità di scansione diverse?

### **1.11 Fase (2)** ◇

La misurazione dello sfasamento può essere più agevole se si scalibra la base dei tempi in modo da far occupare all'intero periodo del segnale esattamente 8 divisioni orizzontali dello schermo (ogni divisione rappresenta 45°); in alternativa, è possibile regolare la base tempi in modo che il periodo occupi l'intero schermo, ottenendo una precisione un po' migliore, a discapito della comodità di lettura. Provare, con gli stessi segnali usati al punto precedente.

È buona regola ricordarsi di rimettere la base dei tempi in posizione normale (calibrata) al termine delle operazioni. Ciò evita errori grossolani, dovuti a semplice disattenzione.

### 1.12 Fase (3) ♣

Se si disponesse di un oscilloscopio con un solo canale, per misurare lo sfasamento si dovrebbe ricorrere al trigger esterno.

Collegare il riferimento (uscita A del generatore) all'ingresso trigger esterno (su molti oscilloscopi è il canale Y3) e il segnale (uscita B del generatore) al canale Y1 dell'oscilloscopio, usando le forme d'onda 0. Regolare il trigger per slope + e level 0 V, e misurare lo sfasamento.

(Suggerimenti per regolare a 0 V la soglia di trigger: (i) mandare il riferimento a Y1, regolare la soglia, poi riportare il riferimento all'ingresso per trigger esterno; in alternativa, (ii) probabilmente c'è il comando fix.

### 1.13 Fase (4) ♣

L'equazione dell'ellisse, in forma parametrica, può essere scritta come

$$\begin{aligned}x(t) &= a \sin(\omega t) \\y(t) &= b \sin(\omega t + \varphi)\end{aligned}$$

Collegare l'uscita A del generatore all'asse x (solitamente canale Y1) e l'uscita B all'asse y (solitamente Y2); predisporre il generatore per la forma d'onda 0 e l'oscilloscopio in modo X-Y.

Misurare lo sfasamento  $\varphi$ .

Il modo più ovvio consiste nel leggere il valore di  $x$  quando  $y = 0$ , o viceversa secondo la convenienza. Si ricordi di leggere i segnali più ampi possibile sullo schermo, a vantaggio della precisione.

Se vi fosse una graduazione diagonale sullo schermo, ci sarebbe qualche vantaggio nel leggere la lunghezza dei due assi dell'ellisse?

### 1.14 Rapporto di frequenze 1:2 ◇

Collegare il canale Y1 dell'oscilloscopio all'uscita A del generatore di segnali e il canale Y2 all'uscita B, predisponendo il generatore per la coppia di forme d'onda 1.

Se il trigger è sul canale Y2, possono comparire ambiguità di sincronizzazione (più probabilmente se la doppia traccia è attivata in modo chop, piuttosto che alt). Perché? (Si provi anche il comando holdoff).

Osservare che l'unica soluzione sicura consiste nel sincronizzare la base tempi sul segnale a frequenza più lenta.

Cosa succede usando l'oscilloscopio in modo x-y e perché?

### 1.15 Rapporto di frequenze 2:3 ♣

Con la stessa configurazione del punto precedente, si passi alla coppia di forme d'onda 2. In questo caso può non essere sufficiente sincronizzare la base tempi sul segnale a frequenza più bassa (perché le due frequenze non sono una multipla intera dell'altra), però è utile. Per sincronizzare correttamente l'oscilloscopio si deve probabilmente ricorrere al comando holdoff.

Cosa succede usando l'oscilloscopio in modo X-Y e perché?

### 1.16 Disturbo ♣

Utilizzare il segnale A6 del generatore di segnali (circuitto stampato), collegato al canale Y1 dell'oscilloscopio.

Il periodo del segnale è costituito da due impulsi rettangolari. Sull'impulso più ampio è presente un disturbo.

Regolare l'oscilloscopio in modo da far partire la traccia sul fronte di salita dell'impulso più ampio per visualizzare il disturbo.

Con l'obbiettivo di espandere il disturbo sullo schermo in modo da poterlo osservare al meglio, vi può essere qualche vantaggio nello scegliere opportunamente l'accoppiamento ac o dc del canale di ingresso?

Misurare ampiezza, durata e posizione del disturbo senza ricorrere alla doppia base tempi. Valutare l'incertezza della misura della durata del disturbo.

### 1.17 Doppia base tempi ◇

Procedere come al punto precedente, ma usando la doppia base tempi per espandere quanto possibile il disturbo. Con le stesse ipotesi, valutare l'incertezza relativa della misura della durata del disturbo.

Si ricordi che la doppia base tempi può funzionare in modo *triggered* o *run after delay*. Quale è il modo migliore per questa misurazione?

### 1.18 Intervallo di tempo con doppia base tempi ♣

Collegare l'uscita A del generatore di segnali al canale Y1 dell'oscilloscopio e l'uscita B al canale Y2. Predisporre il generatore per la forma d'onda 6.

Sganciare la base dei tempi sul fronte di salita più ampio del segnale Y1 e misurare l'intervallo fra tale fronte e il primo zero decrescente del segnale Y2. Sovraccaricare l'asse Y2 e usare la doppia base tempi per espandere la zona di interesse del segnale. Il ritardo si ottiene come somma del ritardo letto sullo schermo e del ritardo della seconda base tempi rispetto alla prima ...

### 1.19 Tempo di salita (1) ◇

Collegare l'uscita trigger (talvolta chiamata sync) del generatore di funzioni (Wavetek, Global, o altro strumento disponibile) al canale Y1 dell'oscilloscopio, e predisporre il generatore per una frequenza di circa 100 kHz.

Misurare il tempo di salita del segnale. L'ampiezza della traccia può essere regolata in modo che coincida con i riferimenti 0% e 100%, presenti sullo schermo della maggior parte degli oscilloscopi.

### 1.20 Adattamento di impedenza ♣

Nella misura suggerita al punto precedente vi è disadattamento di impedenza tra il cavo coassiale e l'oscilloscopio. Infatti generatore e cavo hanno un'impedenza di 50 Ω, mentre l'oscilloscopio ha un'impedenza di ingresso di 1 MΩ. Il disadattamento di impedenza è causa riflessioni intervallate del doppio della lunghezza elettrica del cavo, corrispondenti al percorso di andata e ritorno. Queste ultime si manifestano come irregolarità del tratto orizzontale dell'onda quadra, subito dopo il fronte di salita, simili ad "overshoot".

Si vuole verificare se le irregolarità osservate sullo schermo sono da attribuirsi ad un overshoot del generatore, o se sono la "firma" del disadattamento di impedenza.

Si calcoli il ritardo della riflessione rispetto al fronte di salita, stimando la lunghezza del cavo e conoscendo il fattore di velocità (0.66 per il cavo RG-58), e lo si confronti con il valore rilevato sullo schermo. Si provi anche a cambiare la lunghezza del cavo coassiale. Si verifichi l'effetto di una terminazione resistiva da 50 Ω collegata in parallelo all'ingresso dell'oscilloscopio.

### 1.21 Tempo di salita (2) ◇

Sempre nelle stesse condizioni sperimentali, e con la terminazione resistiva collegata in parallelo all'ingresso dell'oscilloscopio, misurare il tempo di salita del segnale. Applicare la correzione basata sulla formula

$$t_v^2 = t_s^2 + t_o^2$$

dove  $t_v$  è il tempo di salita visualizzato,  $t_s$  è il tempo di salita del segnale,  $t_o$  il tempo di salita dell'oscilloscopio, ricavato con la consueta formula  $BT \simeq 0.35$ . Visti i risultati del calcolo, la correzione è necessaria?

### 1.22 Tempo di salita (3) ♣

Su molti oscilloscopi è possibile ridurre la banda passante, aumentando conseguentemente il tempo di salita. Solitamente il comando è etichettato BW e riduce la banda a 20 MHz.

Se il comando è disponibile, procedere come al punto precedente ma usando la banda passante ridotta. Confrontare l'entità della correzione con quella ottenuta con la banda passante massima.



### **1.23 Tempo di salita (4) ♣**

Un'incertezza sulla banda dell'oscilloscopio si riflette sulla correzione da applicare al tempo di salita visualizzato, e quindi sulla precisione della misura.

Calcolare le incertezze relative delle misure dei tempi di salita viste ai punti precedenti ammettendo che la banda dell'oscilloscopio sia nota con incertezza del 5%.

### **1.24 Banda passante ♣**

Un amplificatore ha la banda passante piatta tra due frequenze di taglio,  $f_1$  inferiore e  $f_2$  superiore, dovute a poli semplici. Tale amplificatore ha una risposta all'onda quadra simile al segnale B7 del generatore (circuito stampato). Determinare le due frequenze di taglio.

## Capitolo 2

# Misure di tensione alternata

### Suggerimenti pratici

L'oscilloscopio può restare sempre collegato al generatore di segnali mentre si fanno le misurazioni con i voltmetri. Usare il raccordo "T" e "I" collegati assieme come nodo di ripartizione del segnale proveniente dal generatore verso l'oscilloscopio e il voltmetro.

Evitare di forzare i cavi coassiali per far entrare le banane nelle boccole dei multimetri. Se è il caso, usare come raccordo i cavetti banana/banana o i cocodrilli (ICE).

### 2.1 Conversioni e incertezze

#### 2.1.1 Onda sinusoidale

Utilizzare il segnale A0 (forma d'onda 0, uscita A) del generatore di segnali (circuit stampato).

Misurare la tensione con i tre voltmetri (valore efficace, medio e di picco) e con l'oscilloscopio; convertire in valore efficace la lettura di quest'ultimo. Associare alle letture l'incertezza.

Riportare le misure su un grafico e verificare la compatibilità.

#### 2.1.2 Onda triangolare

Utilizzare il segnale A3 (forma d'onda 3, uscita A) del generatore di segnali (circuit stampato).

Misurare la tensione con i tre voltmetri (valore efficace, medio e di picco) e con l'oscilloscopio. Convertire tutte le letture in tensione efficace e calcolare le incertezze.

Riportare le misure su un grafico e verificare la compatibilità.

#### 2.1.3 Onda quadra

Utilizzare il segnale B3 del generatore di segnali (circuit stampato).

Misurare la tensione con i tre voltmetri (valore efficace, medio e di picco) e con l'oscilloscopio. Convertire tutte le letture in tensione efficace e calcolare le incertezze.

Riportare le misure su un grafico e verificare la compatibilità.

#### 2.1.4 Forme d'onda arbitrarie

Utilizzare il segnale A8 del generatore di segnali (circuit stampato).

Misurare la tensione con i tre voltmetri (valore efficace, medio e di picco) e con l'oscilloscopio.

Convertire tutte le letture in tensione di picco e calcolare le incertezze. Riportare le misure su un grafico e verificare la compatibilità.

## 2.2 Duty cycle

Per l'onda rettangolare il duty cycle è definito come rapporto tra la durata della sola parte positiva e l'intero periodo del segnale. Per l'onda triangolare, esso è definito come rapporto tra la durata della parte con pendenza positiva e il periodo del segnale.

### 2.2.1 Voltmetro in continua

Misurare con l'oscilloscopio (accoppiato in continua) l'ampiezza e i duty cycle del segnale B4. Calcolare la lettura attesa del voltmetro in continua, che è il valore medio del segnale (attenzione: il voltmetro in continua all'interno non ha il raddrizzatore).

Misurare con il voltmetro digitale e verificare il risultato.

Si ricordi che il voltmetro per tensione continua, per il generico segnale  $v(t)$ , fornisce una lettura  $V_M$  data da

$$V_M = \frac{1}{T} \int_T v(t) dt$$

dove  $T$  è la durata della misurazione, che supporremo molto maggiore del periodo del segnale da misurare.

### 2.2.2 Voltmetro a valore medio

Misurare il segnale B4 con il voltmetro a valore medio in alternata, senza il condensatore in serie (attenzione: il voltmetro è a una o due semionde?). Giustificare con i calcoli la differenza tra le letture del voltmetro e dell'oscilloscopio.

### 2.2.3 Voltmetro a valore efficace

Misurare il segnale B4 con il voltmetro a valore efficace, con il condensatore in serie. Giustificare con i calcoli la differenza tra le letture del voltmetro e dell'oscilloscopio.

### 2.2.4 Onda triangolare

Con procedimenti analoghi a quelli suggeriti ai punti precedenti, è possibile misurare il duty cycle di un'onda triangolare asimmetrica A4? Perché?

## 2.3 Limiti di funzionamento

Per misurare le risposte in frequenza si utilizzi come sorgente il generatore di funzioni, servendosi dell'oscilloscopio per verificare che l'ampiezza del segnale resti costante. Si può infatti supporre che la lettura dell'oscilloscopio, che ha una banda considerevolmente più larga di quella dei voltmetri disponibili, non dipenda dalla frequenza. Effettuando una misurazione di variazioni, il limite dell'oscilloscopio è dato dalla risoluzione piuttosto che dalla precisione.

Nel tracciare i grafici si proceda rapidamente, annotando un solo valore nel campo di frequenze dove la lettura è evidentemente costante. Trattandosi di voltmetri, cercare le frequenze a  $-3$  dB — come per i doppi bipoli — ha poco senso; il fenomeno da osservare è invece l'errore che compare ai limiti della banda, limitando le misure alle frequenze per

le quali la variazione della lettura raggiunge orientativamente il 10–15%, cosa che rende scarsamente utilizzabile lo strumento.

### **2.3.1 Risposta in frequenza del voltmetro a valore medio**

Tracciare il grafico degli errori sistematici dipendenti dalla frequenza per il voltmetro a valore medio, portata 10 V. Utilizzare un segnale di ampiezza adeguata al fondo scala.

In molti strumenti analogici la risposta in frequenza dipende dalla portata. Perché?

### **2.3.2 Risposta in frequenza del voltmetro a valore efficace**

Tracciare il grafico degli errori sistematici dipendenti dalla frequenza per il voltmetro a valore efficace, portata 10 V fondo scala.

### **2.3.3 Risposta in frequenza del voltmetro di picco**

Tracciare il grafico degli errori sistematici dipendenti dalla frequenza per la sonda voltmetrica di picco. Utilizzare un segnale di ampiezza  $1 V_{\text{rms}}$ .

Perché il voltmetro di picco è limitato alle basse frequenze? Pensando allo schema della sonda, che cosa si perderebbe, e perché, se si volesse estendere il campo di funzionamento verso le basse frequenze?

### **2.3.4 Nonlinearità del voltmetro di picco**

Tracciare il grafico degli errori sistematici dipendenti dall'ampiezza per la sonda voltmetrica di picco. Utilizzare un segnale sinusoidale a 1 kHz, di ampiezza tra 0.2 e  $5 V_{\text{rms}}$ , servendosi del voltmetro a valore medio come riferimento.

Pensando allo schema della sonda, quale componente è il principale responsabile della nonlinearità riscontrata?

## **2.4 Varie**

### **2.4.1 Sinusoide raddrizzata**

Il segnale A0 del generatore (circuito stampato) è una sinusoide. Il segnale A5 è la stessa sinusoide, ma raddrizzata.

Misurarne il segnale A0 con il voltmetro a valore efficace e il segnale A5 con il multmetro digitale in continua (valore medio). Che relazione c'è tra le due letture?

Si tenga presente che nei due casi il segnale ha la stessa frequenza, è prodotto con lo stesso convertitore analogico / digitale ed ha le stesse ampiezze istantanee, a meno del segno.

### **2.4.2 Onda intera o semionda?**

Il modo più ovvio per verificare se il voltmetro a valore medio senza condensatore in serie è del tipo a onda intera o a semionda consiste nel misurare due volte una tensione continua,

invertendo i puntali. Se in una delle due posizioni la lancetta resta ferma sullo zero lo strumento è a semionda, altrimenti è a onda intera.

È possibile, con il materiale presente sul banco, arrivare alla conclusione con *una sola lettura*, quindi senza invertire i puntali?

#### **2.4.3 Segnale “a scala”**

Misurare la tensione del segnale B8 del generatore (circuito stampato) con il voltmetro a valore efficace. Confrontare con la misura del valore efficace ottenuta da calcoli basati sulla lettura dell'oscilloscopio.

Ripetere l'esperienza con il voltmetro a valore medio (attenzione alla costante strumentale).

#### **2.4.4 Resistenza di ingresso**

Quanto vale la resistenza di ingresso del voltmetro a valore medio per le portate di fondo scala 2 V (ICE), 3 V (Simpson), 4 V (ICE) e 10 V (ICE e Simpson)?

#### **2.4.5 Simboli**

Soprattutto sui voltmetri analogici, spesso ai bordi del quadrante si trovano alcuni simboli:  $\square$  o  $\perp$  e una stella a cinque punte, talvolta con un numero al centro. Cosa significano?

## Capitolo 3

# Misure su alimentatori stabilizzati

### Cautele da adottare

Questo gruppo di esperimenti comporta di dover maneggiare potenze elettriche rilevanti (fino a decine di watt) che presentano rischi di danno agli strumenti. In particolare:

- i multimetri, quando sono usati come **amperometri**, si rompono con facilità se sovraccaricati,
- i resistori di carico si bruciano se sovraccaricati,
- il condensatori elettrolitici hanno una polarità obbligata,
- lo stadio d'uscita degli amplificatori non deve essere messo in cortocircuito, né ricevere una tensione continua,
- in molti strumenti la **massa** è collegata alla **terra** dell'impianto elettrico di alimentazione; tramite le masse degli strumenti, collegate assieme attraverso la terra, è possibile fare cortocircuiti. Attenzione ...

### 3.1 Resistenza interna dell'alimentatore triplo

**Alimentatore Philips PE 1542.** Usare una delle sezioni a tensione regolabile come alimentatore in prova, l'altra come alimentatore di riferimento. Regolare l'alimentatore in prova per una tensione di 14–15 V e per la massima corrente erogabile. Utilizzare come carico  $R_1 = 16.5 \Omega$ .

**Alimentatore Topward TPS 4000.** Usare la sezione a tensione fissa (5 V) come alimentatore in prova e una delle sezioni a tensione variabile come alimentatore di riferimento. Utilizzare come carico  $R_1 = 6.8 \Omega$ .

**Alimentatore Labornetzgerät LPS 3303A.** ...

#### Per tutti gli alimentatori

Dei due multimetri disponibili, quello analogico deve essere usato come amperometro mentre quello digitale, che è più preciso, come voltmetro. Perché?

Nello schema di figura 3.1 viene utilizzato un alimentatore di riferimento. A cosa serve, come deve essere regolato, e a quali ipotesi deve soddisfare per svolgere la sua funzione?

Tracciare la caratteristica dell'alimentatore sul piano V-I indicando i punti di lavoro e le grandezze misurate.

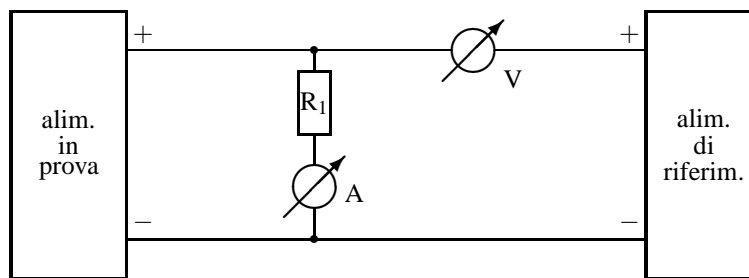


Figure 3.1: Schema di principio per la misurazione della resistenza interna di un alimentatore stabilizzato.

### 3.1.1 Incertezza e risoluzione

Valutare l'incertezza, assoluta e relativa, della misura di resistenza assumendo come ipotesi semplificativa che le uniche cause siano il voltmetro e l'amperometro.

Calcolare la risoluzione della misura di resistenza procedendo in modo analogo. Per l'amperometro analogico, in mancanza di specifiche si può adottare come valore convenzionale della risoluzione metà dell'incertezza. Per il voltmetro digitale, nell'esperimento in questione probabilmente non è corretto usare direttamente la risoluzione dello strumento, essendo la misura limitata dalle fluttuazioni. Ci si deve pertanto riferire al valore della fluttuazione.

La tolleranza dei resistori usati come carico interviene o meno nell'incertezza della misura? Se sì, in che modo?

Facoltativo: tentare una stima dell'incertezza considerando il sistema nella sua globalità, quindi includendo la stabilità delle e altre considerazioni.

### 3.1.2 Quesiti

Se si ignorasse il problema delle resistenze di contatto (e la relativa soluzione), ammettendo che la resistenza di ogni contatto sia di  $10\text{ m}\Omega$  e che le resistenze dei cavi siano trascurabili, quale errore si commetterebbe nella valutazione della resistenza interna dell'alimentatore? Nella realtà, si tratta di errori sistematici o di vere e proprie incertezze?

Se si disponesse solo di un voltmetro con resistenza interna di  $10\ \Omega$  (strumenti simili probabilmente esistono solo nella fantasia) quale sarebbe l'errore sistematico, assoluto e relativo, di misura della resistenza interna dell'alimentatore dovuto al consumo del voltmetro? Come si può rendere minimo tale errore di consumo?

### 3.1.3 Morsetti voltmetrici e amperometrici

Modificare il circuito della misura precedente in modo da sbagliare (appositamente!) i collegamenti voltmetrici e amperometrici, introducendo così su entrambi i morsetti dell'alimentatore in prova degli errori dovuti alle resistenze di contatto.

Confrontare la misura con quella ottenuta con il circuito montato correttamente.

### 3.1.4 Resistenza dei contatti

Con il materiale a disposizione per l'esercitazione, misurare la resistenza di contatto tra una boccola dell'alimentatore e una banana. Attenzione, si può sfruttare il limitatore di corrente dell'alimentatore per realizzare una soluzione particolarmente semplice.

Valutare l'incertezza della misura.

In casi particolari — specialmente ove si debbano trattare basse tensioni e alte correnti — presentano 4 morsetti, due di *potenza* e due detti di *sensing*, questi ultimi usati per misurare la tensione realmente presente ai capi del carico. Si giustifichi questo tipo di soluzione alla luce delle esperienze fatte.

## 3.2 Impedenza dell'alimentatore singolo

Misurare il modulo dell'impedenza interna dell'alimentatore singolo (Roland PS 1325 o Vega BIG 2030) seguendo lo schema indicato in figura 3.2, tenendo presente che tale alimentatore ha una tensione nominale di 12–13 V, e una corrente massima erogabile di 1 A.

La misura sarà fatta a 100 Hz, 1 kHz e 10 kHz, cominciando da 1 kHz.

Prima montare il circuito si progetti la misura disegnando il punto di lavoro dinamico sul piano V-I e calcolando i valori (di picco ed efficaci) delle tensioni e delle correnti in gioco (esclusa, ovviamente, la tensione alternata presente ai capi dell'alimentatore).  $R_1$  può essere scelta tra 16.5, 28 e 120  $\Omega$ .

**Amplificatore Marantz PM 230.** Usare il canale sinistro (Left) e collegare il generatore di segnali all'ingresso CD. Predisporre l'amplificatore, agendo su un apposito comando presente sul pannello frontale, per l'ingresso CD. Escludere i filtri "loudness" ecc., e regolare i controlli di tono a metà corsa.

Dei due morsetti di uscita, il nero è la massa, il rosso è il segnale.

Attenzione alla regolazione della potenza: l'amplificatore può erogare 60 W su 8  $\Omega$ , eccessivi per la misura e sufficienti a provocare danni. Con tutti i comandi al centro (inclusi il volume e il bilanciamento) si ottiene la massima potenza con circa 650 mV<sub>eff</sub> all'ingresso CD.

**Amplificatore Thema GT 15.** Usare l'ingresso "low" e l'uscita "H. Phone". Regolare i controlli di tono a metà corsa.

L'amplificatore ha due controlli di volume in cascata ("gain" e "master") che devono essere regolati in modo opportuno per evitare saturazioni degli stadi intermedi del circuito. Si raccomanda di controllare il segnale d'uscita con l'oscilloscopio. Regolando il gain a metà corsa e il master a 9/10 si ottiene la massima potenza (12 W su 8  $\Omega$ ) con 140 mV<sub>eff</sub> all'ingresso low.

### Montaggio del circuito

È opportuno usare i contatti a forchetta per i circuiti di potenza in alternata e in continua, collegando l'oscilloscopio all'alimentatore con un cavo BNC/banane.



Il circuito deve essere montato e regolato correttamente. Per evitare errori che, date le potenze in gioco potrebbero rivelarsi distruttivi per alcuni componenti o strumenti, si raccomanda la procedura seguente.

1. Montare il solo circuito in continua, composto dall'alimentatore in prova, il diodo di protezione (al quale risulta collegato anche il condensatore elettrolitico), il resistore di carico e l'amperometro. Accertarsi che tutto funzioni, quindi che correnti e tensioni siano quelle desiderate.
2. A parte, montare il solo circuito in alternata composto dal generatore di segnali, dall'amplificatore e dal carico ( $6.8 + 1 \Omega$ , con il resistore da  $1 \Omega$  collegato alla massa dell'amplificatore), ricordando i suggerimenti specifici per l'amplificatore presente sul banco.
3. Prima di alimentare l'amplificatore controllare la frequenza (1 kHz) ed il livello d'uscita del generatore di segnali, regolare il controllo di volume dell'amplificatore al minimo. Poi accendere l'amplificatore.

Regolare il volume dell'amplificatore e il livello d'uscita del generatore di segnali in modo da ottenere la corrente desiderata. Valendosi dell'oscilloscopio collegato in parallelo al resistore da  $1 \Omega$  (attenzione alle masse!) accertarsi che non vi siano saturazioni.

4. Staccare il resistore da  $1 \Omega$  dalla massa dell'amplificatore e collegarlo, tramite il condensatore elettrolitico, all'alimentatore. Collegare la massa dell'amplificatore all'alimentatore. A questo punto il circuito è pronto e necessita solo di una regolazione più fine per ottenere la corrente alternata desiderata.

Cambiando frequenza sarà sufficiente ritoccare la regolazione della corrente alternata.

### 3.2.1 Quesiti

In linea di principio la separazione dei circuiti voltmetrici ed amperometrici per eliminare gli errori dovuti alle resistenze di contatto dovrebbe essere applicata sia sull'alimentatore sia sul resistore tarato da  $1 \Omega$ . In quale dei due punti del circuito è più importante, e perché? Di conseguenza, se per ragioni di disponibilità di materiali si deve rinunciare alla distinzione tra morsetti voltmetrici e amperometrici sull'alimentatore o sul resistore, quale si privilegia? Ammettendo che le resistenze di ogni contatto siano di  $10 \text{ m}\Omega$ , valutare gli errori in entrambi i casi.

Il diodo di protezione, posto in serie all'alimentatore, causa errori? Perché?

La corrente alternata prodotta dall'amplificatore si ripartisce tra l'alimentatore ed il circuito in continua. Questo provoca errori di misura dell'impedenza? Se sì, di che entità?

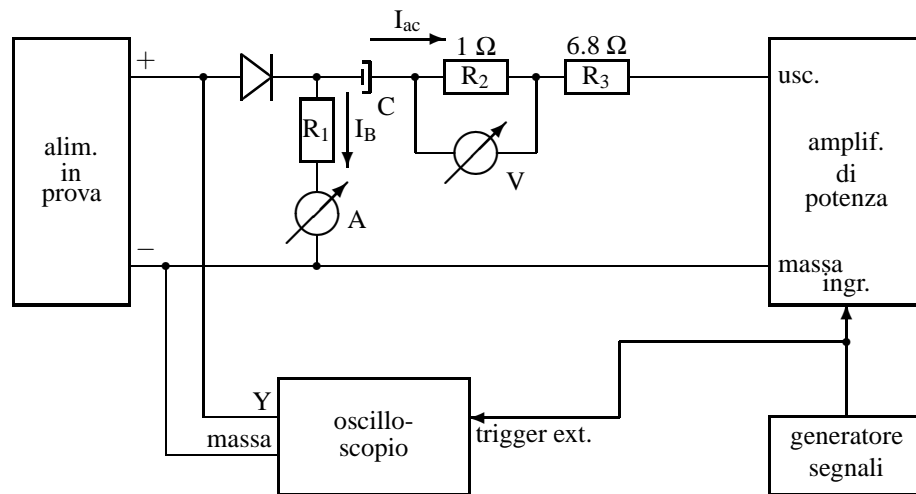


Figure 3.2: Schema di principio per la misurazione del modulo dell'impedenza interna di un alimentatore stabilizzato.

### 3.3 Misura di resistenza in commutazione

Misurare la resistenza interna dell'alimentatore singolo (Roland PS 1325 o Vega BIG 2030) seguendo lo schema indicato in figura 3.3. Usare inizialmente una frequenza di commutazione dell'ordine del centinaio di Hertz (onda quadra).

Il transistore deve lavorare in commutazione (saturato o interdetto). All'oscilloscopio, accoppiato in ac, si vede la differenza tra le tensioni a vuoto e sotto carico.

Se il transistore non lavora in commutazione, la corrente non è più determinata dal resistore di collettore, ed il transistore si surriscalda. Per prima cosa è quindi necessario regolare il generatore di funzioni (ampiezza e offset) in modo da pilotare opportunamente il transistore. Si verifichino i punti di lavoro controllando la forma d'onda ed i livelli di tensione sul collettore con l'oscilloscopio.

Suggerimento: quando il transistore è saturato la corrente di collettore dipende solo dal carico, ed è *indipendente* dalla corrente di base, almeno per piccole variazioni. Quando è interdetto, la tensione di collettore è uguale alla tensione di alimentazione.

Osservando la forma d'onda sull'alimentatore, probabilmente è necessario usare il trigger esterno, ricavato preferibilmente da un'apposita uscita sul generatore di segnali o, in mancanza, dal collettore del transistore.

#### 3.3.1 Incertezza e risoluzione

Considerando l'incertezza dell'oscilloscopio e dei componenti del circuito interruttore, e facendo *ragionevoli* ipotesi su eventuali parametri mancanti, valutare l'incertezza assoluta e relativa di misura della resistenza interna. Valutare la risoluzione della misura.

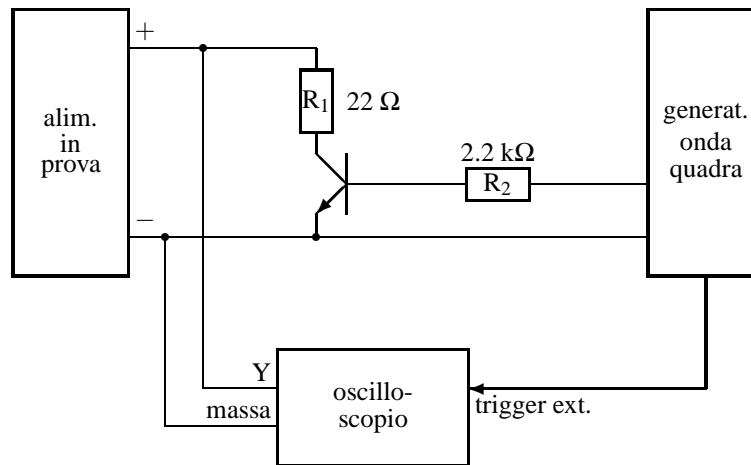


Figure 3.3: Schema di principio per la misurazione della resistenza interna e del tempo di riassetto di un alimentatore stabilizzato.

### 3.3.2 Quesiti

Tentare un confronto con il metodo inizialmente proposto, nel quale il carico viene commutato manualmente. Poiché i dati non sono direttamente confrontabili in quanto si riferiscono ad alimentatori diversi, ci si limiti a confrontare i metodi. In particolare si consideri l'incertezza della misura e la stabilità.

Alcuni alimentatori sono caratterizzati da una bassa resistenza interna ed una bassa stabilità della tensione di uscita rispetto alla temperatura. I componenti serie 78xx, ad esempio, hanno una resistenza tipica di  $5\text{ m}\Omega$  e un coefficiente di temperatura di  $1.1\text{ mV}/^\circ\text{C}$ ; il transistore regolatore di tensione è termicamente accoppiato con il riferimento di tensione e causa variazioni di tensione in funzione della corrente di carico. Se si dovesse misurare la resistenza di uno di tali dispositivi, quale dei due metodi si dovrebbe adottare, e perché?

Con lo schema proposto e con i componenti disponibili, è possibile ridurre l'incertezza valendosi di un amperometro in continua (multimetro analogico)? Meditare, calcolare e sperimentare.

## Capitolo 4

# Ponte bolometrico

### 4.1 Caratterizzazione del bolometro

In questa esercitazione si utilizzerà una lampadina a filamento — la cui resistenza è funzione della temperatura, e quindi della potenza dissipata — come bolometro.

I parametri di maggiore interesse sono la resistenza apparente ( $R_a = V/I$ ) e la resistenza differenziale ( $R_d = dV/dI$ ) al variare della potenza dissipata.

#### 4.1.1 Misure in continua

La misura dei parametri verrà fatta secondo lo schema di figura 4.1, per valori della tensione continua  $V_{dc}$  tra 0 e 4 V a passi di 0.5 V. La resistenza in continua può essere misurata direttamente dalle letture del voltmetro e dell'ampmetro.

Dalla tabella delle tensioni e correnti misurate si ricavano la resistenza apparente e differenziale, e le si riportino su un grafico.

#### 4.1.2 Misure in regime dinamico

Si misuri la resistenza dinamica del bolometro seguendo lo schema di fig. 4.2. La resistenza può essere misurata dalle letture di  $V_i$  e  $V_o$ , ottenute con l'oscilloscopio. Si consiglia di usare una frequenza di 100 kHz e un'ampiezza di circa 180 mV<sub>rms</sub> (500 mV<sub>pp</sub>). In prima approssimazione si può trascurare i contributi dell'induttore e del condensatore, considerandoli rispettivamente un circuito aperto ed un cortocircuito per la corrente alternata.

Il risultato di queste misure avrà la forma di una tabella e di un grafico della resistenza in funzione della potenza dissipata dal bolometro.

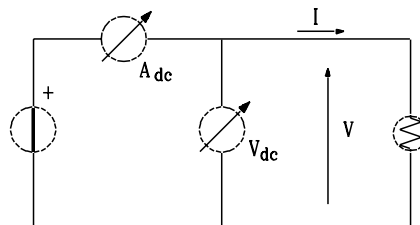


Figure 4.1: Schema per la caratterizzazione del bolometro in continua.

## 4.2 Realizzazione del ponte bolometrico

Il ponte bolometrico (figura 4.3) è in equilibrio quando  $V_d=0$  cosa che avviene se si verifica la condizione

$$V_d = V_1 - V_2 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_a = 0$$

che coinvolge la resistenza apparente del bolometro.

Si costruisca il ponte assegnando i valori alle resistenze in modo da raggiungere l'equilibrio in assenza di segnale a radiofrequenza.

Ai fini dell'esercitazione non è importante un progetto ottimo, ma piuttosto un progetto "ragionevole". Come valori orientativi, si può partire da valori di  $V_1$  tra 1.5 e 2–2.5 V,  $R_2 = R_4 = 220 \Omega$ , e  $R_3$  scelta tra i valori normalizzati per portare il ponte quanto più possibile vicino all'equilibrio; è utile che  $R_5$  sia del valore sufficientemente alto da poter alimentare il ponte con 14–16 V (valore orientativo 1.5 k $\Omega$ ). Una piccola variazione di  $V_a$ , ottenuta regolando l'alimentatore, permetterà di equilibrare il ponte.

C'è un reale vantaggio ad avere un ponte con le quattro resistenze uguali?

Il guadagno  $g$  del ponte è definito come

$$g = \frac{dV_d}{dR_1}$$

dove  $R_1$  è il valore della resistenza apparente del bolometro. Il significato di  $g$  è capacità del ponte di rivelare una variazione di  $R_1$  con un'indicazione del voltmetro.

Che relazioni devono sussistere tra le resistenze perché il guadagno sia massimo?

Quali sono i vantaggi e gli svantaggi conseguenti al tentativo di rendere massima la tensione  $V_a$ ? Suggestimenti: si pensi al guadagno del ponte, alla massima potenza a radiofrequenza che può essere misurata, alla sensibilità del bolometro alla variazione di potenza a radiofrequenza.

## 4.3 Misure di potenza

Con i valori dei componenti e dei vari parametri scelti, si calcoli la massima potenza  $P_{rf}$  che si può applicare al ponte per il suo funzionamento in condizioni limite e in condizioni "ragionevoli".

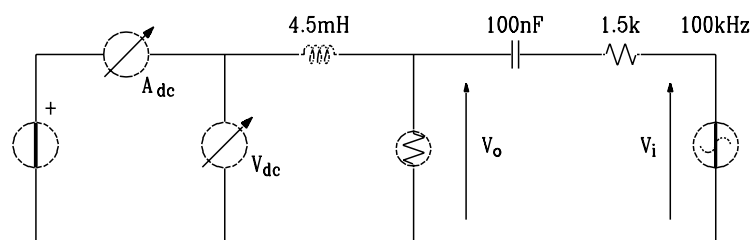


Figure 4.2: Schema per la caratterizzazione del bolometro in regime dinamico.

In assenza di radiofrequenza, si porti il ponte all'equilibrio agendo sull'alimentatore regolabile. Si applichi ora il segnale alla frequenza di 100 kHz e si riporti il ponte all'equilibrio. Leggendo le correnti di alimentazione  $I_{dc}$  con e senza segnale, si calcoli la potenza del segnale alternato dissipata dal bolometro.

La misura deve essere ripetuta per 3 valori di  $P_{rf}$ , al centro e verso gli estremi della dinamica.

#### 4.3.1 Risoluzione e incertezza

Riutilizzando i risultati delle prime misure effettuate, calcolare la sensibilità del bolometro  $dR_1/dP$ , dove  $P$  è la potenza dissipata complessiva. Dal progetto del ponte è noto il guadagno  $g = dV_d/dR_1$ . Si combinino i due valori per ottenere la sensibilità  $s$  del ponte bolometrico definita come

$$s = \frac{dV_d}{dP_{rf}}$$

Tenendo in conto solo la risoluzione del voltmetro usato per rivelare l'equilibrio, quale è la risoluzione della misura di potenza? Si trovi il risultato numerico per la misura al centro della dinamica. Attenzione, l'equilibrio del ponte deve essere raggiunto due volte, con e senza radiofrequenza.

Con le stesse ipotesi e nelle stesse condizioni, si calcoli la risoluzione dovuta al solo contributo dell'amperometro.

Si sa dare valutazione realistica della risoluzione della misura, considerando anche la stabilità dell'equilibrio  $V_d=0$ ?

Trascurando i problemi di adattamento di impedenza fra la sorgente e il bolometro, e considerando le reattanze come ideali (cortocircuito o circuito aperto, secondo il caso) si valuti la precisione complessiva della misura di potenza.

Le induttanze di bolcco dell'alternata e i condensatori di blocco della continua, per i loro valori, in realtà non rappresentano reattanze ideali. Si sa dare un'ordine di grandezza della loro influenza sulla precisione della misura?

Copyright 2000 di Enrico Rubiola. Tutti i diritti riservati.

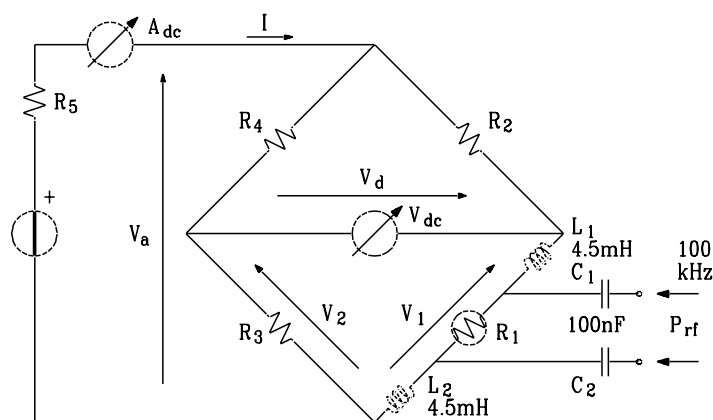


Figure 4.3: Schema del ponte bolometrico.

#### 4.4 Ponte bolometrico con riequilibrio in bassa frequenza

Lo schema del ponte bolometrico con riequilibrio in bassa frequenza è riportato in figura 4.4.

In assenza di radiofrequenza, il ponte è all'equilibrio con una corrente di bassa frequenza  $I_{ac}=I_1$ . Applicando il segnale a radiofrequenza, si deve riequilibrare il ponte riducendo la corrente di bassa frequenza fino al valore  $I_{ac}=I_2$ . La potenza a radiofrequenza si ricava per differenza delle dissipazioni prodotte da  $I_1$  e  $I_2$  nel bolometro.

I valori di  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  potranno essere gli stessi dell'esperienza precedente. Si dovrà modificare  $R_5$  e la tensione dell'alimentatore in continua per adattare il ponte al nuovo regime di funzionamento, e dimensionare la tensione  $V_a$  del generatore a 500 Hz.

**Solo per i banchi dotati di alimentatore Philips.** Nel calcolare il punto di funzionamento e i valori necessari, si tenga presente che le sezioni regolabili fino a 20 V devono essere usate per la scheda generatore di segnali. Si deve quindi usare la sezione regolabile fino a 7 V per alimentare il ponte.

**Solo per i banchi dotati di alimentatore Topward.** L'alimentatore Topward deve essere usato per la scheda generatore di segnali. Si deve quindi usare l'alimentatore ausiliario, ad una sola sezione, per alimentare il ponte.

**Per tutti i banchi.** Per problemi di disponibilità di strumenti, il generatore di funzioni deve essere utilizzato per generare il segnale a 100 kHz da misurare come radiofrequenza. Il generatore a bassa frequenza deve essere realizzato con la schedina generatore di segnali, della quale si utilizzerà il segnale A1, e l'amplificatore di potenza, Marantz o Thema, seguendo lo schema di figura 4.5. Poiché la potenza degli amplificatori è assai esuberante, si raccomanda di provare lo schema di figura 4.5 prima di collegarlo al ponte. Si faccia attenzione al dimensionamento di  $R_6$  (che può essere scelto tra i valori di 120  $\Omega$  e 28  $\Omega$ ) per avere

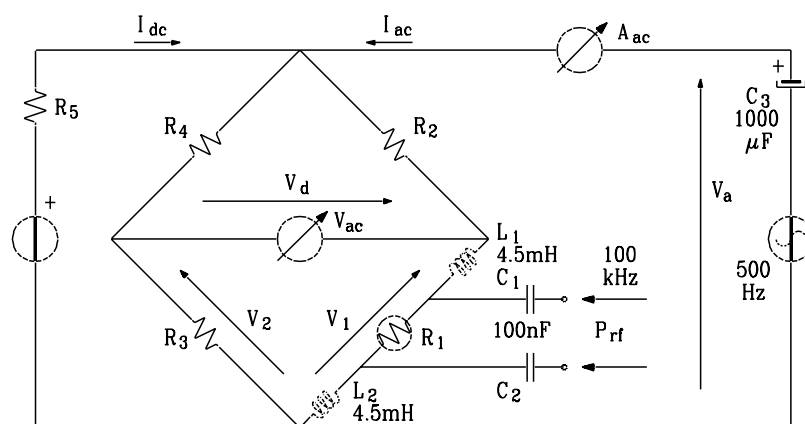


Figure 4.4: schema del ponte bolometrico con riequilibrio in bassa frequenza.

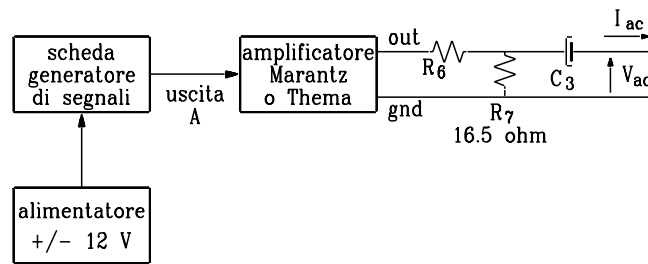


Figure 4.5: schema generatore di bassa frequenza utilizzato per equilibrare il ponte bolometrico.

un campo di regolazione ragionevole per la  $V_{ac}$ . Si raccomanda di misurare il segnale con l'oscilloscopio.

**Amplificatore Marantz PM 230.** Usare il canale sinistro (Left) e collegare il generatore di segnali all'ingresso CD. Predisporre l'amplificatore, agendo su un apposito comando presente sul pannello frontale, per l'ingresso CD. Escludere i filtri "loudness" ecc., e regolare i controlli di tono a metà corsa.

Dei due morsetti di uscita, il nero è la massa, il rosso è il segnale.

Attenzione alla regolazione della potenza: l'amplificatore può erogare 60 W su 8  $\Omega$ , eccessivi per la misura e sufficienti a provocare danni. Con tutti i comandi al centro (inclusi il volume e il bilanciamento) si ottiene la massima potenza con circa 650 mV<sub>eff</sub> all'ingresso CD.

Per l'esperienza da svolgere è opportuno regolare il bilanciamento quasi a fondo corsa "dalla parte sbagliata", privilegiando quindi il canale destro (non utilizzato) e riducendo la potenza sul canale sinistro. Si utilizzerà il controllo di volume per regolare l'ampiezza di uscita.

**Amplificatore Thema GT 15** Usare l'ingresso "low" e l'uscita "H. Phone". Regolare i controlli di tono a metà corsa.

L'amplificatore ha due controlli di volume in cascata ("gain" e "master") che devono essere regolati in modo opportuno per evitare saturazioni degli stadi intermedi del circuito. Si raccomanda quindi di controllare la forma d'onda del segnale d'uscita con l'oscilloscopio. Regolando il gain a metà corsa e il master a 9/10 si ottiene la massima potenza (12 W su 8  $\Omega$ ) con 140 mV<sub>eff</sub> all'ingresso low.

Per l'esperienza da svolgere è opportuno regolare i controlli dei toni acuti (treble) e bassi (bass) a 0/10 e il controllo dei toni medi (middle) a 5/10. Regolare il controllo di guadagno (gain) a 1/10 e usare come controllo di ampiezza il controllo di volume principale (master).



## 4.5 Misure di potenza

Che vantaggi presenta il ponte bolometrico con riequilibrio in bassa frequenza (figura 4.4) rispetto allo schema visto precedentemente?

La misura di potenza a radiofrequenza è ottenuta per differenza della parte della potenza a bassa frequenza che viene dissipata dal bolometro nelle due condizioni, in presenza e in assenza di segnale a radiofrequenza, ma sempre con il ponte all'equilibrio. Attenzione, la corrente di bassa frequenza, e quindi la potenza, persa attraverso  $R_5$  nel nostro caso non è trascurabile.

Con i valori dei componenti e dei vari parametri scelti, si calcoli la massima potenza  $P_{rf}$  che si può applicare al ponte per il suo funzionamento. Che cosa si può "guadagnare" dimensionando opportunamente la tensione del generatore a bassa frequenza?

Regolando il generatore di funzioni per le tensioni di uscita di  $100 \text{ mV}_{\text{eff}}$ ,  $300 \text{ mV}_{\text{eff}}$ ,  $1 \text{ V}_{\text{eff}}$ , sempre a  $100 \text{ kHz}$ , si misuri la potenza rf dissipata dal bolometro.

### 4.5.1 Risoluzione e incertezza

In modo analogo a quanto è stato fatto per il ponte con riequilibrio in continua, si calcoli la sensibilità  $s$  del ponte, definita allo stesso modo.

Tenendo in conto solo la risoluzione del voltmetro usato per rivelare l'equilibrio, quale è la risoluzione della misura di potenza?

Si dia il risultato numerico per una misura al centro della dinamica. Attenzione, l'equilibrio del ponte deve essere raggiunto due volte, con e senza radiofrequenza.

Ricordando che anche altri strumenti, oltre al voltmetro in continua, concorrono alla risoluzione della misura, si dia una valutazione realistica della risoluzione della misura, tenendo in conto anche la stabilità dello zero.

Trascurando i problemi di adattamento di impedenza, e considerando le reattanze come ideali (cortocircuito o circuito aperto, secondo il caso) si valuti la precisione complessiva della misura di potenza.

Le induttanze di bocco dell'alternata e i condensatori di blocco della continua, per i loro valori, non sono componenti ideali. Si sa dare un'ordine di grandezza della loro influenza sulla precisione della misura?

## Capitolo 5

# Misure su risonatori

### 5.1 Misura semplice

Un primo schema di misura del risonatore è quello riportato in figura 5.1, nel quale  $C_s = 10 \text{ nF}$  e  $L_s = 4.5 \text{ mH}$ . Calcolare, trascurando  $R_s$  e ammettendo che i componenti abbiano il valore nominale, la frequenza di risonanza e l'impedenza caratteristica del risonatore.

Calcolare il Q del risonatore come coefficiente di sovratensione misurando la tensione a vuoto  $V_0$  del generatore e  $V_C$  alla risonanza. Su quali assunzioni è basata questa misura? Nelle condizioni sperimentali proposte tali assunzioni sono valide? In quali condizioni lo sarebbero?

Suggerimenti: resistenza del generatore e resistenza dell'oscilloscopio (quest'ultima può essere trasformata in una resistenza in serie all'induttore secondo le equivalenze indicate in figura 5.2); tentare una valutazione degli effetti.

### 5.2 Risonanza (schema 1)

Con lo schema di figura 5.1 il risonatore, quando è portato alla risonanza, mette il generatore "in cortocircuito" sulla resistenza interna dell'induttore  $R_s$ . Verificare cosa succede alla tensione  $V_g$  (canale 2 dell'oscilloscopio) mentre si porta il circuito alla risonanza.

Un primo rimedio (figura 5.3) consiste nel ridurre l'impedenza di uscita del generatore con un partitore resistivo. Si suggerisce di usare  $R_2 = 47 \text{ } \Omega$  e  $R_1$  tra 2.2 e 4.7  $\Omega$ . In queste condizioni quale è la resistenza equivalente del generatore visto dal risonatore? Quali sono vantaggi e svantaggi di un basso valore di  $R_1$ ?

Si misuri  $V'_g$  con il risonatore scollegato e  $V_C$  alla risonanza, con il circuito completo. Calcolare il Q del risonatore come coefficiente di sovratensione utilizzando questi risultati. Quale errore si commette usando il valore di  $V'_g$  a vuoto?

Copyright 2000 di Enrico Rubiola. Tutti i diritti riservati.

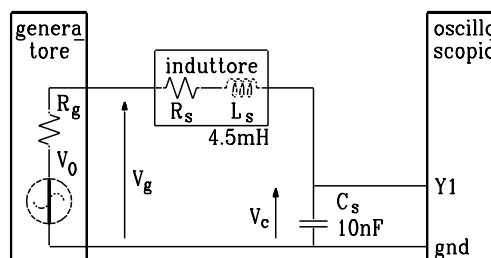


Figure 5.1: Primo schema di misura della risonanza.

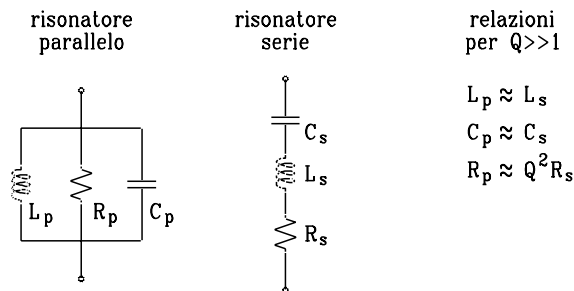


Figure 5.2: Equivalenze tra risonatori parallelo e serie.

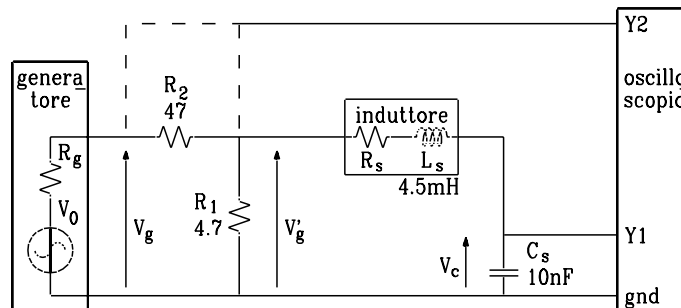


Figure 5.3: Schema con riduzione dell'impedenza del generatore.

Calcolare la variazione di  $V_g$  quando si porta il circuito alla risonanza, e verificare.

Gli errori introdotti trascurando l'impedenza di ingresso dell'oscilloscopio sono significativi? Che valore dovrebbe avere tale impedenza per provocare un errore piccolo, ma chiaramente visibile?

### 5.3 Risonanza (schema 2)

Quando l'impedenza dello strumento con cui si misura la tensione non può essere considerata infinita, può essere utile uno schema del tipo indicato in figura 5.4. Che resistenza vede il risonatore?

Per misurare il  $Q$  è necessario misurare la corrente alla risonanza tramite la tensione ai capi di  $R_3$ . Tale corrente è legata al totale delle resistenze del circuito. La corrente alla risonanza da la resistenza totale del circuito, dalla quale si ricava  $R_s$  per differenza sottraendo tutte le resistenze esterne al risonatore. Conoscendo  $R_s$ ,  $L_s$  e la frequenza di risonanza si calcola  $Q$ . Ammettendo di conoscere la resistenza del generatore con un'incertezza del 10%, con che incertezza si misura  $R_s$ ?

Che vantaggio c'è a misurare  $V_g$  sotto carico, quindi alla frequenza di risonanza? È possibile rendere precisione della misura indipendente dalla precisione con cui si conosce  $R_g$ ? Come?

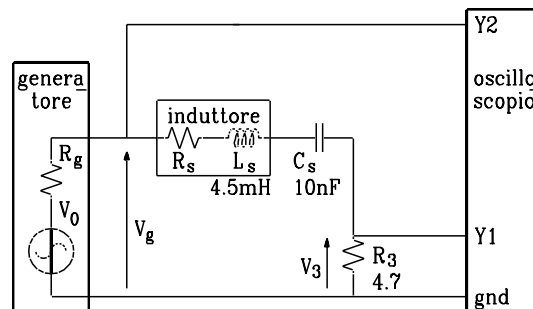


Figure 5.4: Misura amperometrica.

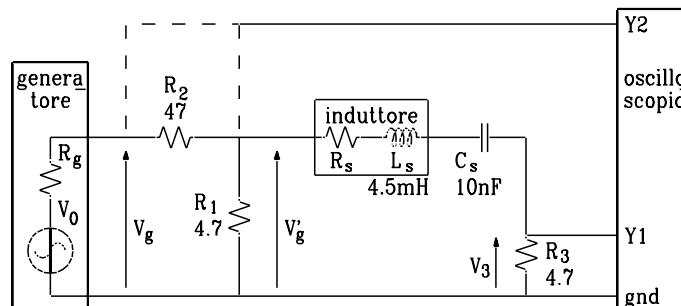


Figure 5.5: Schema con riduzione dell'impedenza del generatore e misura di tipo amperometrico.

#### 5.4 Schema del Q-metro

Quale degli schemi visti è concettualmente più simile allo schema del Q-metro?

In che cosa consistono le differenze principali e perché un Q-metro "vero" funziona meglio degli schemi visti?

Perché nel Q-metro si usa un amperometro in serie al generatore non un voltmetro in parallelo?

#### 5.5 Risonanza (schema 3)

I problemi visti nelle esperienze precedenti portano allo schema di figura 5.5. Che cosa si dovrebbe fare per usare uno strumento con impedenza di ingresso di  $50 \Omega$  al posto dell'oscilloscopio?

Valendosi delle misure di  $V'_g$  e  $V_3$ , calcolare il Q del risonatore caricato. In questo caso la dissipazione di potenza è dovuta alla resistenza interna dell'induttore e alle resistenze collocate esternamente al risonatore.

Calcolare il Q intrinseco del risonatore, che si avrebbe se non ci fossero le resistenze esterne all'induttore.

Ammettendo che i componenti reattivi abbiano il valore nominale, che i resistori abbiano un'incertezza del 5% e considerando l'incertezza dell'oscilloscopio, calcolare l'incertezza

di misura del  $Q$  intrinseco.

### 5.6 Larghezza di banda (ampiezza)

Con lo schema di figura 5.3, misurare la frequenza di risonanza valendosi delle due frequenze alle quali l'ampiezza dell'oscillazione è 3 dB minore della massima. Misurare le frequenze con il contatore e le ampiezze con l'oscilloscopio.

Ricordando che la curva di risposta di ampiezza del risonatore nell'intorno della risonanza è una funzione del tipo  $1/\sqrt{1+\alpha^2}$ , dove  $\alpha \simeq 2Q\Delta f/f$ , calcolare l'incertezza di misura della frequenza di risonanza. Quale strumento è il principale responsabile dell'incertezza?

Calcolare il  $Q$  del risonatore caricato, quindi senza correggere per l'effetto delle resistenze esterne al risonatore, e l'incertezza di misura.

### 5.7 Larghezza di banda (fase)

Sempre con lo stesso schema di figura 5.3, misurare il  $Q$  del risonatore caricato valendosi delle due frequenze alle quali la fase è  $\pm 45^\circ$ .

Ricordando che la curva di risposta di fase del risonatore nell'intorno della risonanza è una funzione del tipo  $\arctan(\alpha)$ , calcolare l'incertezza di misura della frequenza di risonanza.

### 5.8 Smorzamento

Una stima del  $Q$  del risonatore si può ottenere dalla risposta all'impulso. La risposta è un segnale cisoidale il cui inviluppo decade di 1 np (corrispondente ad un fattore 1/e in tensione) rispetto all'ampiezza iniziale dopo  $Q/\pi$  cicli dell'oscillazione.

In pratica l'impulso può essere sostituito da un'onda quadra a frequenza molto più bassa di quella della risonanza e sottomultipla di ordine dispari. Perché?

Usare lo schema di figura 5.3 sincronizzando l'oscilloscopio con l'onda quadra del generatore. È opportuno che l'inviluppo della cisoide possa decadere (quasi) completamente durante il semiperiodo dell'onda quadra, in modo che al fronte successivo il circuito risonante sia a riposo. (In mancanza di idee su come procedere, si parta da 100–200 Hz).

Le relazioni indicate in figura 5.2 indicano l'equivalenza tra resistenza serie e parallelo ai fini della dissipazione di potenza, e quindi del  $Q$  del risonatore. Inserire un resistore da 10  $\Omega$  in serie al risonatore e misurare il  $Q$ . Calcolare il valore di resistenza equivalente che messo in parallelo ad uno dei due elementi reattivi produca lo stesso abbassamento del  $Q$ . Verificare, ovviamente togliendo il resistore da 10  $\Omega$ .

### 5.9 Misura di L conoscendo C

Calcolare il valore dell'induttanza  $L$  ammettendo che il condensatore abbia il valore nominale, e servendosi della misura della frequenza di risonanza (paragrafo 5.6). Calcolare

l'incertezza del valore di induttanza così ottenuto. Cosa succede se  $C$  ha un'incertezza del 10%?

### **5.10 Misura di $C$ conoscendo $L$**

Calcolare il valore della capacità  $C$  ammettendo che l'induttore abbia il valore nominale, e servendosi della misura della frequenza di risonanza (paragrafo 5.6). Calcolare l'incertezza del valore di capacità così ottenuto. Cosa succede se  $L$  ha un'incertezza del 10%?

### **5.11 Misura di $C$ conoscendo $L$ (caso reale)**

Nelle misure viste ai due punti precedenti si è tacitamente ammesso che il circuito di prova sia ideale. Si supponga ora che nel circuito vi sia una capacità parassita verso massa di valore incognito, tale da rendere inaffidabile il valore letto sul condensatore.

Come si può misurare l'induttanza servendosi di un condensatore di riferimento (1 nF), che naturalmente non alteri le capacità parassite del circuito?

Ammettendo ora che il condensatore di riferimento abbia un'incertezza del 10%, con quale incertezza si può misurare l'induttanza? Se è necessario conoscere le incertezze di misura di frequenze di risonanza si ricordi quanto è stato fatto al paragrafo 5.6).

Chi se la sente provi a misurare con lo stesso metodo la capacità di uno dei cavi coassiali disponibili sul banco. Suggerimento: se la capacità da misurare è troppo piccola si può rimediare alzando la frequenza di risonanza.

## Capitolo 6

# Voltmetri dc

### Istruzioni generali per i montaggi

Nella figura 6.1 (pagina 32) è riportato uno schema di massima del montaggio. Si raccomanda di rispettare almeno le posizioni dei collegamenti di alimentazione per rendere più agevole il lavoro di assistenza.

La basetta è divisa in due sezioni. Si usi la sezione superiore per il circuito, la sezione inferiore per i punti di test, portando i collegamenti man mano che si rendono necessari. Ciò sveltisce le operazioni di collegamento dell'oscilloscopio e del contatore, senza spostare cavi.

I due bracci di alimentazione,  $\pm 15$  V, devono essere stabilizzati rispetto a massa ciascuno con un condensatore da 100 nF.

Ogni volta che si fa una modifica al circuito si spenga l'alimentatore.

Si faccia attenzione al NE555 e al REF01, che si danneggiano facilmente in caso di collegamenti errati verso una tensione negativa rispetto a massa.

### 6.1 Montaggio del voltmetro a doppia integrazione

Lo schema è riportato nella figura 6.2 (pagina 33). Per il montaggio, che *deve* essere fatto a passi in modo da poter collegare tra loro blocchi semplici e funzionanti, si usi la procedura seguente.

1. Collegare le alimentazioni alla basetta e regolare l'alimentatore per  $\pm 15$  V.
2. Inserire i circuiti integrati, collegare e verificare le alimentazioni.
3. Montare il partitore della tensione incognita (R1, R2, C1). Verificare che la tensione sul punto **A** possa essere regolata tra 0 e  $-9.5$  V circa agendo su R2.
4. Montare il generatore di tensione di riferimento (REF01). Verificare che la tensione sul pin 6 sia 10 V. **Attenzione:** cortocircuiti verso il negativo dell'alimentazione possono rompere il REF01.
5. Montare il circuito del commutatore (SW06, R8, R9), collegato ai due circuiti precedenti. Agendo sui pin di controllo (8 e 9), all'uscita si deve trovare la tensione di riferimento (livello logico 0, 0 V) o la tensione incognita (livello logico 1, +15 V).
6. Montare l'integratore (LM747, R3, R4, C2), adottando provvisoriamente un valore di 100 nF per C2, e collegarlo all'uscita del commutatore. Agendo manualmente sul commutatore, sull'uscita **C** si deve osservare, con l'oscilloscopio, una rampa di

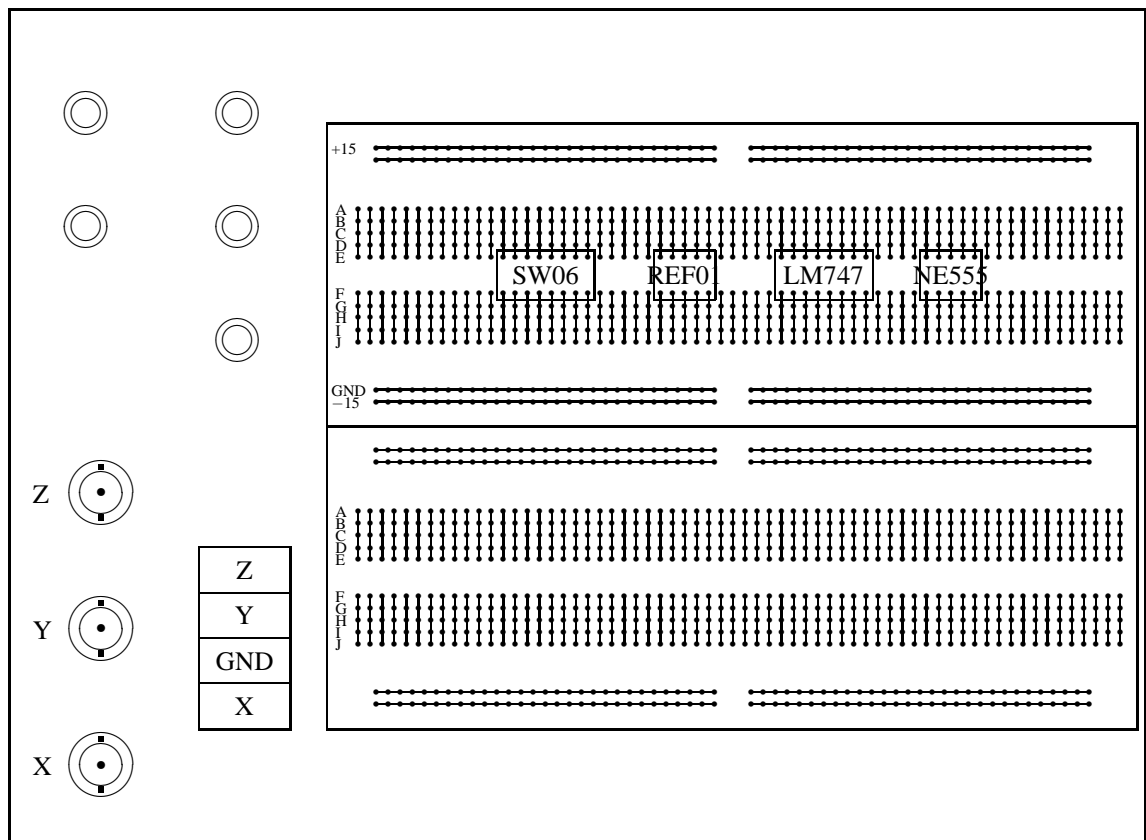


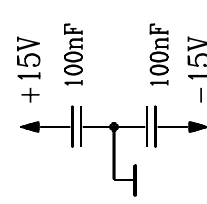
Figure 6.1: Schema di massima dei montaggi.




pendenza opportuna. Al termine della verifica sostituire C2 con un condensatore da 10 nF (valore definitivo).

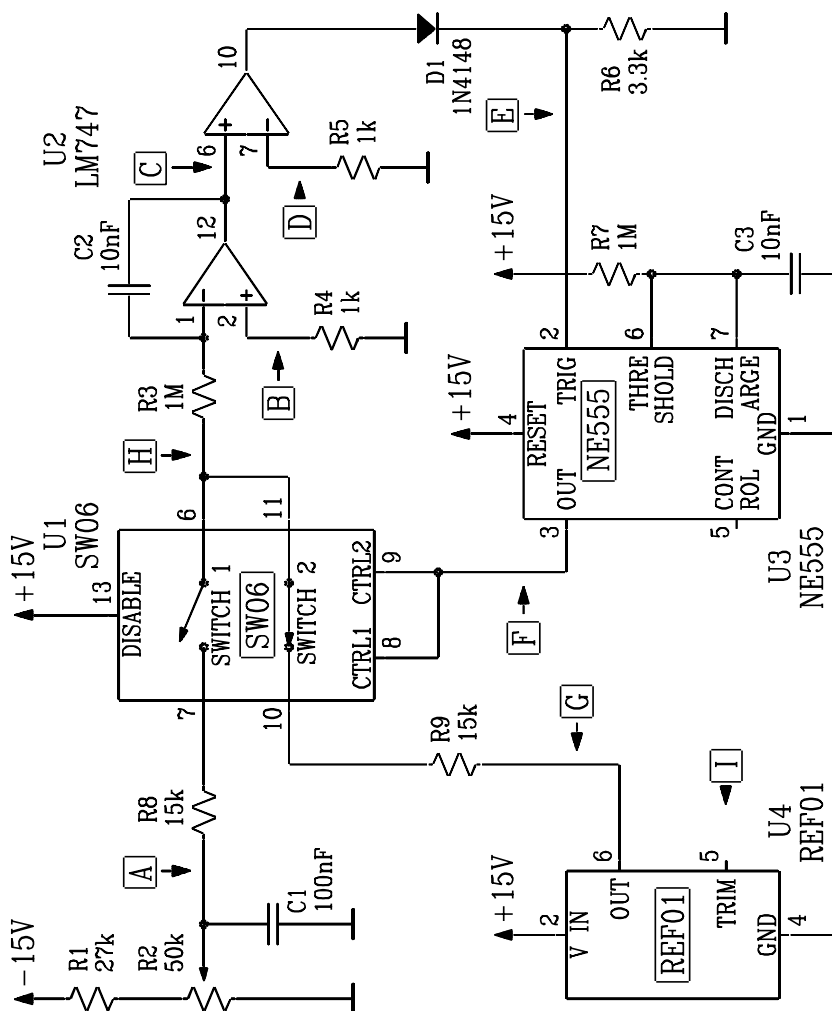
7. Montare il comparatore (LM747, R5, R6, D1). Prima di collegarlo all'uscita dell'integratore, verificarne il comportamento con una tensione positiva o negativa sull'ingresso.
8. Montare e verificare il monostabile, con il diodo e il resistore che ne proteggono l'ingresso. **Attenzione:** il NE555 si rompe se ai suoi pin è applicata una tensione negativa rispetto a massa. Nella verifica, ci si può aiutare pilotando il monostabile con il generatore di funzioni, osservando la tensione d'uscita (pin 3).
9. Chiudere l'anello di reazione collegando l'uscita del monostabile all'ingresso di controllo del commutatore.



ALIMENTAZIONI			
CHIP	+15	GND	-15
LM747	9,13	-	4
NE555	8	1	-
SW06	12	4	5
REF01	2	4	-



Circuiti integrati visti dall'alto	
	
	



Copyright 2000 di Enrico Rubiola. Tutti i diritti riservati.

Figure 6.2: Schema del voltmetro a doppia integrazione.

## 6.2 Esperienze sul voltmetro a doppia integrazione

### 6.2.1 Osservazione del funzionamento

Collegare i due canali dell'oscilloscopio all'uscita dell'integratore **C** e all'uscita del monostabile **F**. Sganciare la base tempi con quest'ultimo segnale, sul fronte con pendenza positiva.

Osservare qualitativamente il corretto funzionamento del circuito al variare della tensione di ingresso.

### 6.2.2 Risoluzione

La misura della tensione si ricava con il contatore collegato all'uscita del monostabile. Si misurano le durate di "1" e "0" in modo start-stop, cambiando le pendenze del trigger del contatore (attenzione, su molti strumenti c'è un comando — etichettato com — che consente di mettere in parallelo gli ingressi). La tensione  $V_x$ , presente sul punto **A**, si ricava dal rapporto tra le durate di "1" e "0", e dal valore della tensione di riferimento  $V_r$ .

Quale è la risoluzione del voltmetro realizzato? Ad evitare errori di interpretazione, la risoluzione è la capacità dello strumento di rivelare se il misurando —  $V_x$  — è cambiato, pur senza consentire la misura del cambiamento. Pertanto, se ultime cifre del contatore non sono stabili, la risoluzione del voltmetro è peggiore del valore che si calcola considerando  $\pm 1$  sulla cifra meno significativa del contatore.

### 6.2.3 Diagramma di taratura

Confrontare la misura di tensione con la lettura del voltmetro digitale (Philips o Hewlett Packard) usato come riferimento. Ricavare l'errore assoluto e relativo per 5 valori equispaziati della tensione incognita e tracciarne i grafici.

### 6.2.4 Costante di tempo dell'integratore

Un errore nella costante di tempo dell'integratore interviene o meno nella misura di tensione?

Verificare (qualitativamente con l'oscilloscopio e con migliore precisione valendosi del contatore), provando ad alterare prima il resistore (inserire un resistore da 8.2 M $\Omega$  in parallelo a R3), poi il condensatore (inserire un condensatore da 1 nF in parallelo a C2).

### 6.2.5 Offset dell'integratore

In che modo l'offset dell'integratore contribuisce all'errore della misura di tensione? L'errore dipende o meno dalla tensione incognita  $V_x$ ?

La verifica sperimentale può essere fatta imponendo una tensione sul punto **B** tramite un resistore verso il positivo dell'alimentazione. Una prima verifica qualitativa può essere fatta con l'oscilloscopio, con un offset di circa 1 V (resistore da 15 k $\Omega$ ). Per una verifica più accurata, fatta con il contatore, è opportuno un offset inferiore, 100 mV, ottenuto con un resistore da 150 k $\Omega$ .

### 6.2.6 Offset del comparatore

In che modo l'offset del comparatore contribuisce all'errore della misura di tensione? L'errore dipende o meno dalla tensione  $V_x$ ?

La verifica sperimentale può essere fatta in modo qualitativo e quantitativo come descritto al punto precedente, imponendo l'offset nel punto **[D]** del circuito.

### 6.2.7 Durata del tempo di integrazione

La tensione incognita viene integrata per un tempo  $T_1$  determinato dal monostabile. Un errore sulla durata di  $T_1$  ha come conseguenza un errore di misura della tensione?

Si verifichi con le procedure già viste, ponendo un condensatore da 1 nF in parallelo a  $C_3$ .

### 6.2.8 Tensione di riferimento

Quale è la conseguenza di un errore della tensione di riferimento sulla misura della tensione  $V_x$ ?

La verifica sperimentale può essere fatta agendo sull'ingresso trim del REF01 (punto **[I]**). Se l'ingresso trim è collegato a massa la tensione d'uscita sale, se è collegato all'uscita dello stesso REF01, la tensione scende.

### 6.2.9 Reiezione dei disturbi

Perchè, e sotto quali ipotesi, il voltmetro a integrazione è "insensibile" alle componenti alternate sovrapposte alla tensione continua da misurare?

Come deve essere progettato un voltmetro per la minima sensibilità ai disturbi causati dalla rete di alimentazione (50 Hz e multipli)? Pensando allo schema proposto, dove sarebbe più ragionevole intervenire?

Si verifichino qualitativamente gli effetti di un disturbo costituito da una tensione alternata sovrapposta a  $V_x$ , limitandosi a cercare i punti di massimo e minimo relativi della sensibilità, procedendo come segue.

1. Regolare  $V_x$  circa a metà dell'escursione.
2. Togliere  $C_1$  dalla basetta (attenuerebbe eccessivamente il disturbo).
3. Regolare il generatore di segnali per una tensione di  $6 V_p$  e accertarsi che il generatore abbia offset di 0 V.
4. Iniettare il segnale del generatore nel punto **[A]** tramite un resistore da 10 k $\Omega$  in serie ad un condensatore da 100 nF. **Attenzione:** non mandare una tensione continua sull'uscita del generatore di segnali.

Il disturbo così introdotto si manifesta come una disuniformità della pendenza della rampa dell'integratore (punto **[C]**) e come *jitter* dell'istante di fine integrazione della tensione di riferimento (punto **[F]**).

Calcolare per quali frequenze del segnale interferente ci si aspettano i massimi e minimi di errore del voltmetro, e procedere alla verifica sperimentale.

Cosa cambia al variare di  $V_x$ ?

### 6.3 Montaggio del voltmetro a conversione V/f

Il montaggio di questo circuito (figura 6.3 a pagina 37) è particolarmente agevolato dalla possibilità di riutilizzare la maggior parte dei blocchi già realizzati e collaudati. Si proceda come segue, partendo dallo schema precedente.

1. Spostare R3 dal commutatore al partitore che genera  $V_x$ .
2. Spostare il collegamento dall'integratore al comparatore (l'integratore ora va all'ingresso invertente) e rimuovere R5.
3. Spostare la tensione di riferimento dal commutatore all'ingresso del comparatore.
4. Staccare il monostabile dal commutatore e collegarlo, tramite R10, all'integratore.
5. Sostituire R7, che determina la durata dell'impulso del monostabile.

### 6.4 Esperienze sul voltmetro a conversione V/f

#### 6.4.1 Osservazione del funzionamento

Collegare i due canali dell'oscilloscopio all'uscita **C** dell'integratore e all'uscita **F** del monostabile. Sganciare la base tempi su quest'ultimo segnale, con pendenza positiva.

Osservare qualitativamente il corretto funzionamento del circuito al variare della tensione incognita. Si noti che, per ragioni sperimentali legate alla "eccessiva" semplificazione del circuito, probabilmente il voltmetro si blocca per piccole tensioni  $V_x$ , all'incirca tra 0 e  $-0.5$  V.

#### 6.4.2 Risoluzione

La misura della tensione si ricava con il contatore misurando la frequenza degli impulsi del monostabile.

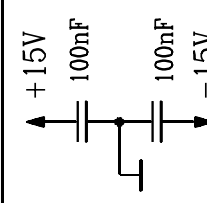
Ricordando i ragionamenti relativi al voltmetro a doppia rampa, quale è la risoluzione del voltmetro realizzato?

#### 6.4.3 Diagramma di taratura

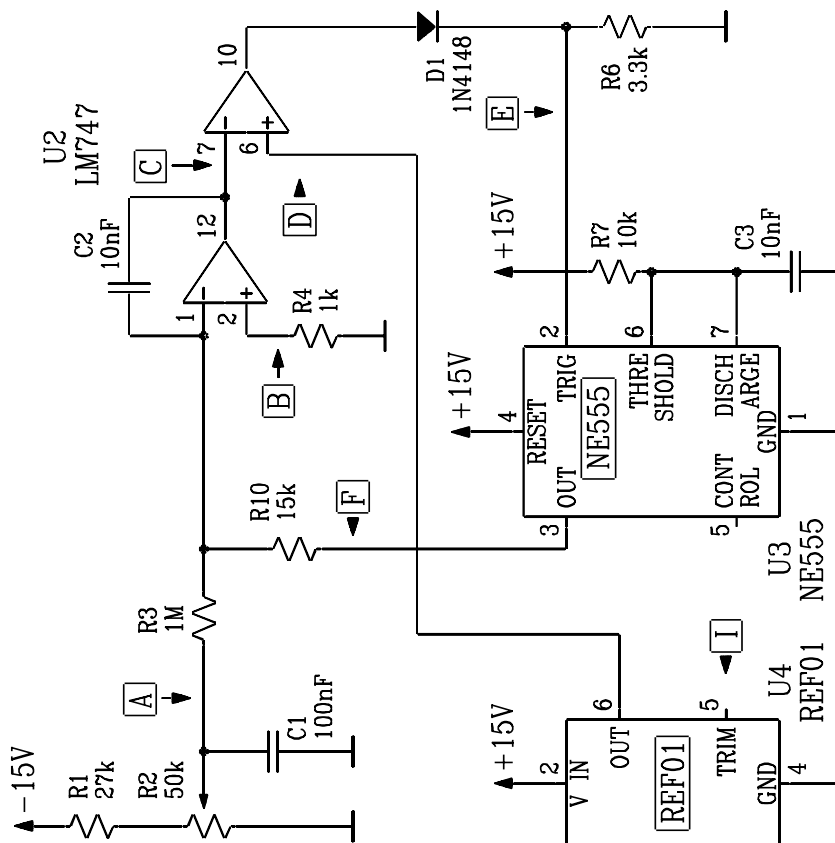
Confrontare la misura di tensione con la lettura del voltmetro digitale (Philips o Hewlett Packard) usato come riferimento. Ricavare l'errore assoluto e relativo per 5 valori sperimentali e tracciarne i grafici.

Nell'eseguire il calcolo di conversione da frequenza letta a tensione misurata, supporre che l'impulso del monostabile assuma il valore della tensione di alimentazione, e che tutti i componenti abbiano i valori nominali.

ALIMENTAZIONI			
CHIP	+15	GND	-15
LM747	9,13	-	4
NE555	8	1	-
REF01	2	4	-



Circuiti integrati visti dall'alto	



Copyright 2000 di Enrico Rubiola. Tutti i diritti riservati.

Figure 6.3: Schema del voltmetro a conversione tensione/frequenza.

#### 6.4.4 Condensatore dell'integratore

Un errore nel condensatore dell'integratore interviene o meno nella misura di tensione?

Verificare, qualitativamente con l'oscilloscopio e con migliore precisione valendosi del contatore, ponendo un un condensatore da 1 nF in parallelo a C2.

#### 6.4.5 Resistore dell'integratore

In che modo intervengono gli errori del resistore R4 sulla misura della tensione  $V_x$ ? Verificare l'effetto alterando i valori del resistore (8.2 M $\Omega$  in parallelo a R3).

#### 6.4.6 Offset dell'integratore

In che modo l'offset dell'integratore contribuisce all'errore della misura di tensione? L'errore dipende o meno dalla tensione  $V_x$ ?

La verifica sperimentale può essere fatta imponendo una tensione sul punto **B** tramite un resistore verso il positivo dell'alimentazione, analogamente a quanto fatto per il voltmetro a doppia rampa. Una prima verifica qualitativa può essere fatta con l'oscilloscopio, con un offset di circa 1 V (resistore da 15 k $\Omega$ ). Per una verifica più accurata, fatta con il contatore, è opportuno un offset inferiore, 100 mV (resistore da 150 k $\Omega$ ).

#### 6.4.7 Tensione di riferimento

Quale è la conseguenza di un errore della tensione di riferimento (REF01) sulla misura della tensione  $V_x$ ?

Se l'ingresso trim è collegato a massa la tensione d'uscita sale, se è collegato all'uscita dello stesso REF01, la tensione scende.

Che analogia c'è tra l'errore della tensione di riferimento e l'offset del comparatore?

#### 6.4.8 Impulso calibrato

Quale è l'effetto di un errore della durata dell'impulso calibrato generato dal monostabile? Si verifichi con le procedure già viste, ponendo un condensatore da 1 nF in parallelo a C3.

Quale è l'effetto di un errore di R10, che determina la corrente dell'impulso? Verificare ponendo in parallelo a R10 un resistore da 150 k $\Omega$ .

#### 6.4.9 Reiezione dei disturbi

Come funziona il meccanismo di reiezione dei disturbi nel voltmetro a conversione tensione / frequenza?

È possibile progettare un voltmetro per la minima sensibilità ai disturbi causati dalla rete di alimentazione (50 Hz e multipli)? Se sì, pensando allo schema proposto, dove sarebbe più ragionevole intervenire?

Si verifichino qualitativamente gli effetti di un disturbo costituito da una tensione alternata sovrapposta a  $V_x$ , limitandosi a cercare i punti di massimo e minimo relativi della sensibilità, procedendo come segue.

1. Regolare  $V_x$  circa a metà dell'escursione.

2. Togliere C1 dalla basetta (attenuerebbe eccessivamente il disturbo).
3. Regolare il generatore di segnali per una tensione di  $6 V_{pp}$  e accertarsi che il generatore abbia offset di 0 V.
4. Iniettare il segnale del generatore nel punto **A** tramite un resistore da  $10 k\Omega$  in serie ad un condensatore da 100 nF. **Attenzione:** non mandare una tensione continua sull'uscita del generatore di segnali).

Il disturbo così introdotto si manifesta come una disuniformità della pendenza della rampa dell'integratore (punto **C**) e come *jitter* degli impulsi all'uscita del monostabile (punto **F**).

Procedere alla verifica sperimentale, al variare della frequenza del segnale interferente. Cosa cambia al variare di  $V_x$ ?

Dopo aver osservato le forme d'onda all'oscilloscopio, e sempre in presenza del segnale interferente, si osservi il jitter di frequenza sul display del contatore, avendo cura di scegliere un tempo di gate ragionevolmente maggiore del periodo del segnale generato dal monostabile. Si giustifichi il comportamento del circuito.

Perché i convertitori tensione / frequenza "veri", che si trovano su alcuni cataloghi di componenti, hanno una frequenza a fondo scala di 1–2 MHz e talvolta anche di più?

## Capitolo 7

# Wattmetro e voltmetro a vero valore rms

### Cautele da adottare

Si raccomanda particolare attenzione nei riguardi del **LT 1088** (Fig. 7.1), componente costoso, di difficile reperibilità e “permaloso”. In particolare, i punti delicati sono:

1. Le resistenze hanno dissipazione max. 375 mW.  
Quindi la tensione max. è 4 V su 50  $\Omega$ , 9 V su 250  $\Omega$ .
2. I diodi di misura sono delicati.  
Corrente max. 15 mA. Tensione inversa max. 3.5 V.
3. Nell’ambito di ciascuna sezione, sia la resistenza sia il diodo sono ricavati *sul silicio*.  
Pertanto vi sono dei *diodi parassiti* verso il *substrato* (bulk). Vedi fig. 7.1.

**Ragionate sugli schemi e tenete un margine di sicurezza!**

Copyright 2000 di Enrico Rubiola. Tutti i diritti riservati.

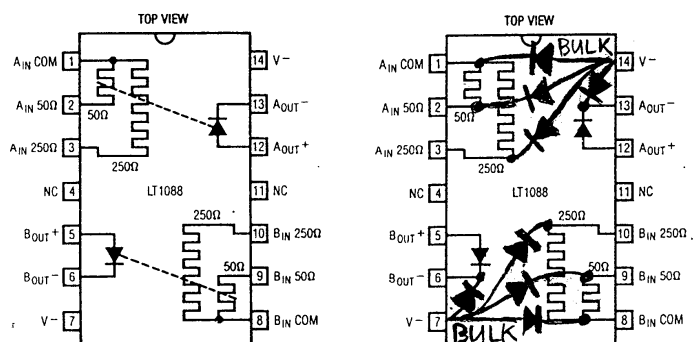


Figure 7.1: Schema del LT 1088 e relativi diodi parassiti.



## 7.1 Voltmetro a valore efficace

### 7.1.1 Montaggio e verifiche preliminari

Il circuito da realizzare (figura 7.2) consente di verificare l'equivalenza energetica del valore efficace di una tensione alternata con una continua di uguale valore.

Montate inizialmente la parte centrale del circuito, con i due diodi e la relativa alimentazione; per il momento non collegate il generatore e l'alimentatore di riferimento.

Calibrate il circuito regolando R1 in modo da equilibrare la tensione sui due diodi: la tensione tra i punti **A** e **B** deve essere la più bassa possibile.

Connettete i due ingressi (punti **C** e **D**) in parallelo ad un unico alimentatore di riferimento in continua, come evidenziato in fig. 7.3. Regolandone la tensione tra 0 e 5 V (*non superate questo valore*) osservate che il circuito si sbilancia, e compare una tensione tra i punti **A** e **B**. Perché?

Regolate ora l'alimentatore di riferimento per una tensione di 2.5 V sui punti **C** e **D** (a metà della dinamica del vostro circuito). Ripetete la calibrazione agendo su R1 fino a equilibrare la tensione sui due diodi.

### 7.1.2 Verifica del funzionamento

Collegate il generatore di funzioni e l'alimentatore di riferimento come in figura 7.2. Ora il voltmetro a sostituzione è pronto per l'uso.

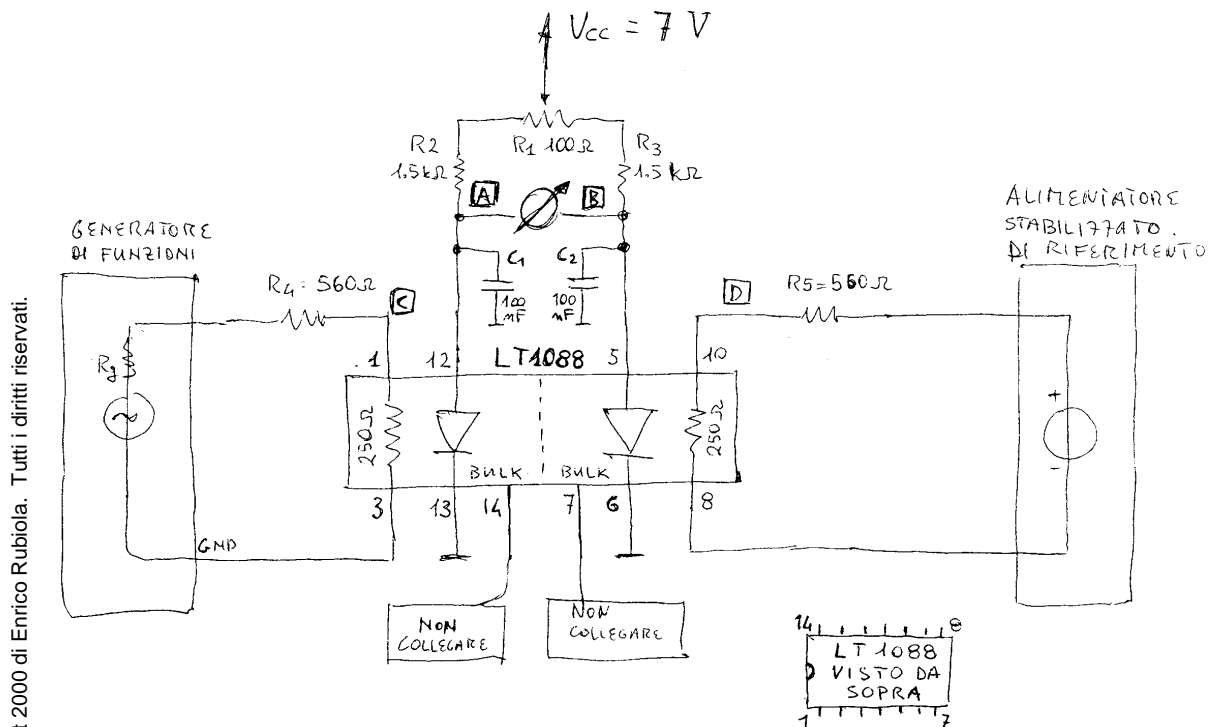


Figure 7.2: Schema del Voltmetro a valore efficace ad equilibrio manuale.

Collegate l'oscilloscopio al punto **C**. Regolate il generatore di funzioni per un'uscita sinusoidale di 6 V picco-picco. Regolate ora l'alimentatore di riferimento fino ad annullare la tensione differenziale tra i diodi (punti **A** e **B**). Che relazione c'è tra la tensione alternata nel punto **C** e la tensione continua nel punto **D**? Perché?

Ripetete l'esperimento precedente impostando sul generatore di funzioni le forme d'onda triangolare e quadra, sempre di ampiezza 6 V picco-picco.

## 7.2 Voltmetro rms

### 7.2.1 Montaggio e verifiche preliminari

Montate il circuito di figura 7.4, che consente il bilanciamento automatico della tensione differenziale sui diodi.

La regolazione del circuito deve essere fatta in due fasi. Per il momento, il generatore di funzioni non deve essere collegato.

1. *Regolazione dell'offset*, che consiste nell'equilibrare la tensione sui diodi. Per questo mettete R10 a metà corsa e regolate R1 in modo da ottenere una piccola tensione positiva, 10–40 mV, all'uscita **D**. (Nota: la presenza di tale offset è necessaria perché l'amplificatore operazionale è ad alimentazione singola, non per ragioni legate al funzionamento del circuito.)
2. *Regolazione del guadagno*. Inserite all'ingresso un alimentatore stabilizzato regolato in modo da avere una tensione di 5 V nel punto **C**. Regolate R10 in modo da avere all'uscita **D** lo stesso valore di tensione di **C**.

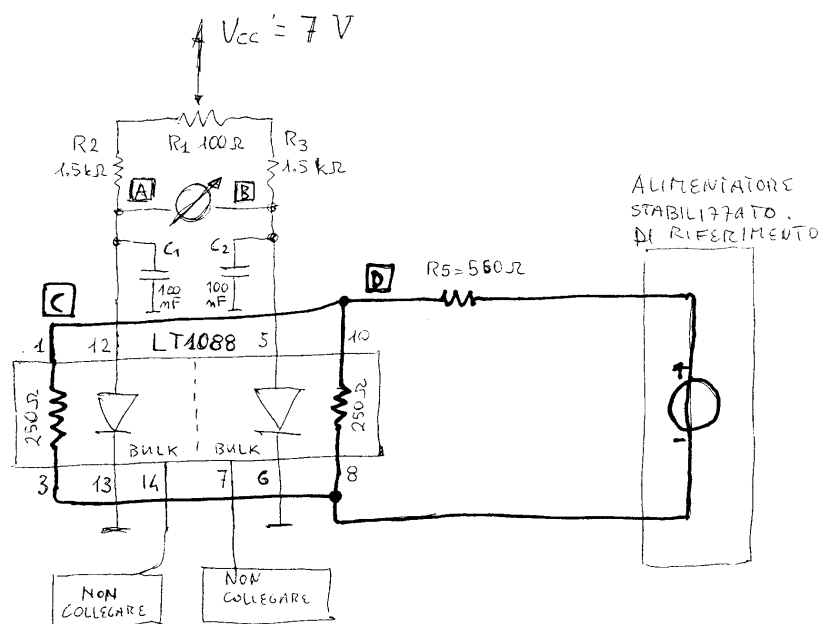


Figure 7.3: Collegamenti provvisori.

Al termine, togliete l'alimentatore dall'ingresso e verificate che la tensione sull'uscita **D** ritorni vicino a zero, come al punto 1 (regolazione dell'offset).

### 7.2.2 Verifica del funzionamento

Collegate il generatore di funzioni come in figura 7.4 e verificate che la tensione continua all'uscita **D** sia uguale al valore efficace del segnale presente sul punto **C**.

Ripetete la verifica per le tre forme d'onda disponibili — sinusoidale, triangolare e quadra — con valori di tensione *all'uscita del generatore di funzioni* tra 1 e 5 V (ad es. 1, 3 e 5).

### 7.2.3 Frequenza

Per come è costruito il LT 1088, quale pensate che sia la frequenza massima di funzionamento? E da quali fenomeni pensate che sia limitata?

Nel montaggio su basetta, che cosa cambia?

Con un segnale sinusoidale di ampiezza costante di 3 V picco-picco (misurata all'uscita del generatore di funzioni), verificate cosa succede al variare della frequenza.

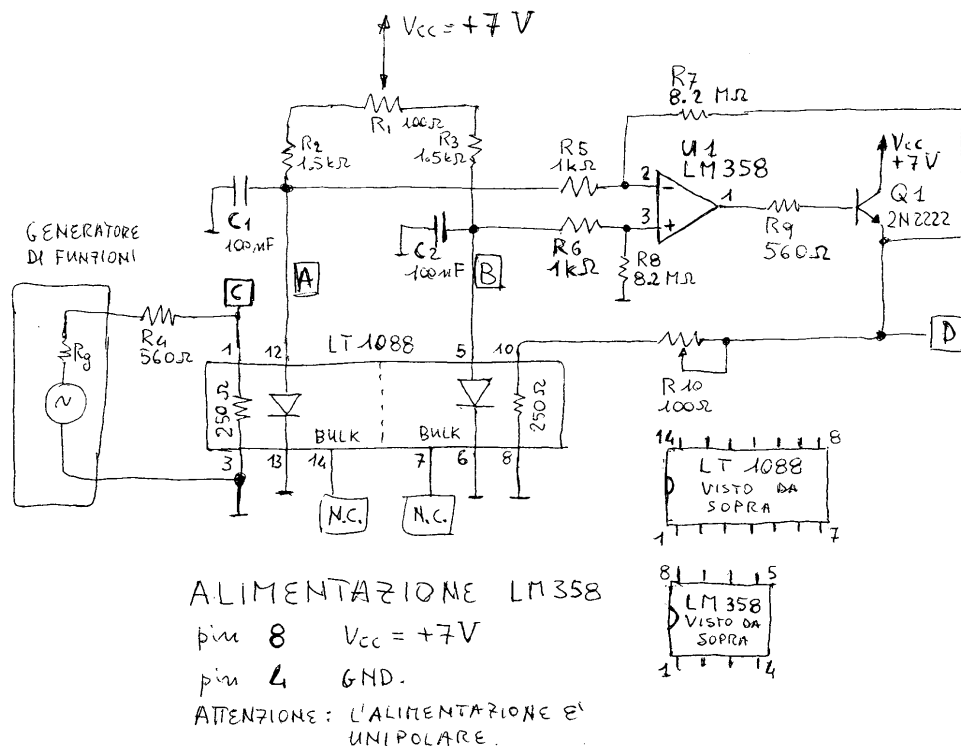


Figure 7.4: Schema del Voltmetro rms.

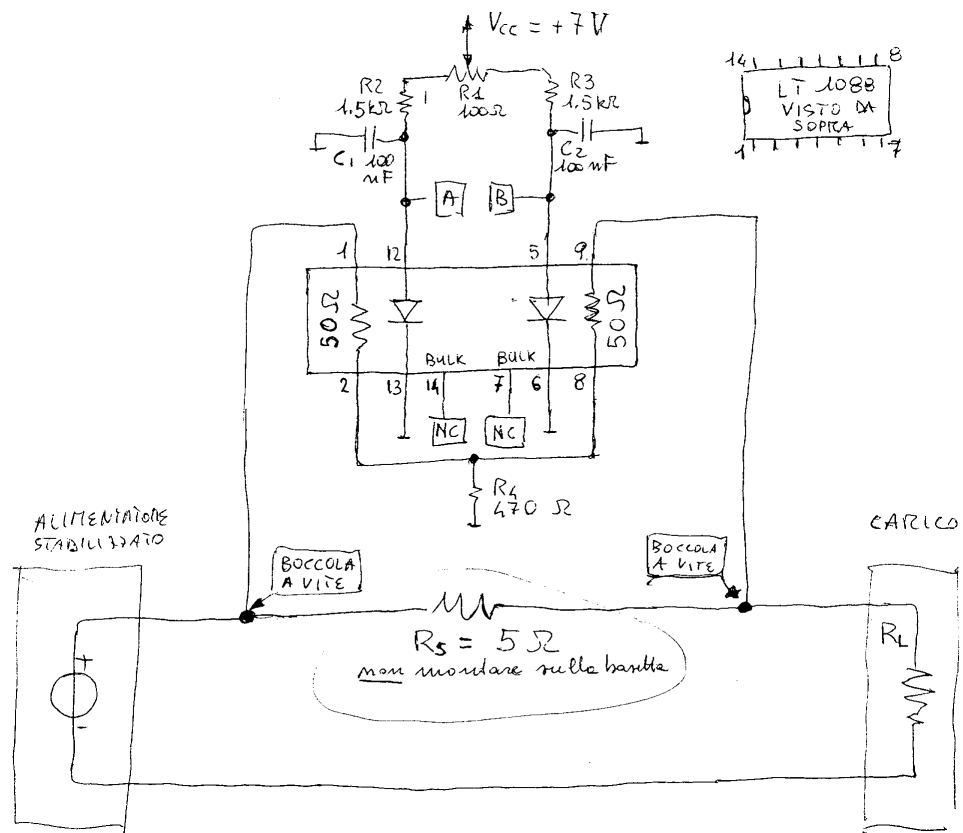


Figure 7.5: Schema del wattmetro termoelettrico.

### 7.2.4 Tensioni alternate e continue

Procedendo con molta cautela per non sovraccaricare il vostro voltmetro (e per non danneggiarlo!), provate a regolare l'offset del generatore di funzioni. Ovviamente, dovete trovare

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{V_{\text{ac}}^2 + V_{\text{dc}}^2}$$

**Attenzione:** staccate il generatore di funzioni prima di regolare l'offset. In molti generatori, agendo sulla manopola ci si ritrova improvvisamente il valore massimo positivo o negativo.

## 7.3 Wattmetro termoelettrico

### 7.3.1 Montaggio e verifiche preliminari

Montate il wattmetro secondo lo schema di figura 7.5.

**Attenzione:** La resistenza  $R_5$  deve essere montata sulle boccole a vite e non nei fori della basetta come gli altri componenti. Altrimenti c'è pericolo di danneggiare la basetta con valori eccessivi di corrente.

Inizialmente calibrate il circuito con potenza nulla al carico, quindi staccando l'alimentatore a sinistra nello schema e il carico. Regolate  $R_1$  in modo da equilibrare la tensione sui due diodi: la tensione tra i punti **A** e **B** deve essere la più bassa possibile.

Connettete ora l'alimentatore (a sinistra nello schema), ma non ancora il carico. Verificate che, per tensioni di ingresso tra 0 e 8 V, la tensione tra i punti **A** e **B** rimanga attorno a 0 V.

### 7.3.2 Costante di calibrazione

La lettura della tensione  $V_{AB}$  tra i punti **A** e **B** è proporzionale alla potenza che dall'alimentatore va al carico ( $V_{AB} = kP$ ). Non avendo sufficienti informazioni sul LT 1088, nel nostro caso  $k$  è una costante sperimentale. Determinate il valore di  $k$  in una situazione di riferimento nella quale usate come carico il resistore a filo da  $28\ \Omega$  e regolate l'alimentatore a 4 V. Essendo  $P = V^2/R$ , per confronto ricavate  $k$ . Non fidatevi dei valori nominali, ma misurate la resistenza e la tensione.

### 7.3.3 Verifica della linearità

Usando come carico il resistore a filo da  $28\ \Omega$ , misurate  $V_{AB}$  in funzione della tensione al carico, per valori tra 0 V e 8 V a passi di 2 V. Combinando tali valori con la costante  $k$  che avete determinato, ricavate la potenza letta dal vostro wattmetro. Confrontate poi tale lettura con la potenza ricavata da  $P = V^2/R$ .

Ripetete l'esperienza usando come carico gli altri due resistori a filo, da  $16.5\ \Omega$  e da  $120\ \Omega$ .

## Capitolo 8

# Misure di frequenza

### 8.1 Uso del contatore

#### 8.1.1 La prima misura di frequenza

Quando si cerca di misurare con un contatore un segnale analogico con frequenza *bassa*, capita abbastanza di frequente che lo strumento dia delle letture grossolanamente sbagliate nel senso che la lettura è molto più alta della frequenza che vi aspettate di misurare. In questi casi, osservando il segnale all'oscilloscopio vi accorgete di una evidente discrepanza della lettura di frequenza. Questo problema ha a che fare con la regolazione del trigger, ma si verifica *anche* quando la soglia è ragionevolmente lontana dal valore di picco, positivo o negativo, del segnale. Usando il segnale A0 (forma d'onda 0, uscita A) del generatore di segnali (circuiti stampati), riuscite a mettere in evidenza il problema e a spiegarlo?

Eventualmente date un'occhiata su un'altro banco, dotato di un contatore diverso dal vostro.

#### 8.1.2 Varie funzioni del contatore

I contatori universali sono dotati di numerose funzioni. Provatele seguendo la traccia indicata.

1. Periodo (segnale A0).
2. Periodo medio (segnale A0).
3. Intervallo di tempo, ed eventualmente sfasamento (segnali A0 e B0).
4. Intervallo di tempo medio (segnali A0 e B0).
5. Durata di impulso (segnale B4). Eventualmente misurate un intervallo di tempo con i canali in parallelo.
6. Rapporto di frequenze (segnali A1 e B1, oppure A2 e B2)

#### 8.1.3 Risoluzione delle misure con il contatore

In molti contatori avete la regolazione del tempo di *gate*, dalla quale dipende l'incertezza di quantizzazione. Provando a regolare tale tempo, provate a giustificare il numero delle cifre presentate sul display. Sempre con la lettura della *frequenza*, il vostro contatore funziona come misuratore di frequenza o di periodo?

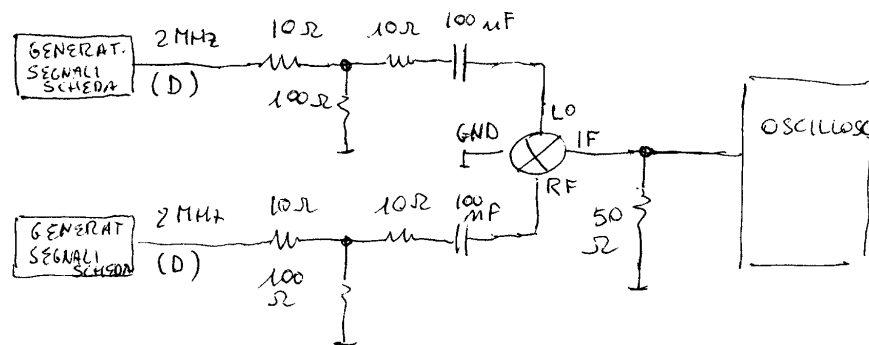


Figure 8.1: Schema della misura di frequenza con battimento. Nello schema il segnale dei generatori viene attenuato e privato della **componente continua**.

## 8.2 Confronto di frequenza con l'oscilloscopio

Collegate ai canali Y1 e Y2 dell'oscilloscopio due segnali alla stessa frequenza nominale attorno a 488 Hz, ma con uno scarto di frequenza. Tali segnali possono essere A0, B0 oppure C, provenienti da due diversi generatori (circuiti stampati); ovviamente, poiché avete un solo generatore, avete bisogno della collaborazione dei vostri vicini.

Sganciando il trigger con il canale Y1, la traccia 1 sta ferma mentre la traccia 2 scorre sullo schermo. Misurate con l'oscilloscopio e con il vostro orologio da polso la velocità di scorrimento, oppure dal tempo impiegato per compiere una traslazione di un intero periodo, e calcolate lo scarto di frequenza tra i due segnali.

Misurate ora le stesse due frequenze con un contatore e verificate se ottenete lo stesso valore.

Ricordando che state lavorando in collaborazione con il gruppo del tavolo accanto e che state misurando lo scarto tra gli stessi segnali, confrontate i risultati.

### 8.2.1 Risoluzione della misura

Cercate di rendervi conto di cosa sia la risoluzione della misura di intervallo di tempo con la quale avete ricavato lo scarto di frequenza. Probabilmente è limitata dalla vostra capacità di decidere in quale istante una traccia passa per un punto desiderato dello schermo oppure coincide con l'altra. Ottenuta tale risoluzione, calcolate la risoluzione con cui stimate lo scarto di frequenza.

### 8.2.2 Sintesi di frequenza

I generatori di segnali (circuiti stampati) sono dei sintetizzatori, e quindi tutti i segnali di uscita sono in rapporto razionale con un unico segnale di clock interno alla frequenza  $f_c = 2$  MHz, disponibile all'uscita D (vedi paragrafo 8.2).

Dopo aver trovato lo scarto tra le frequenze di uscita, calcolate lo scarto assoluto (quindi espresso in Hertz) delle due frequenze di clock.

Nota: la frequenza di uscita è ricavata dal quarzo a 2 MHz con un divisore a modulo 4096. Comunque verificate con il contatore.

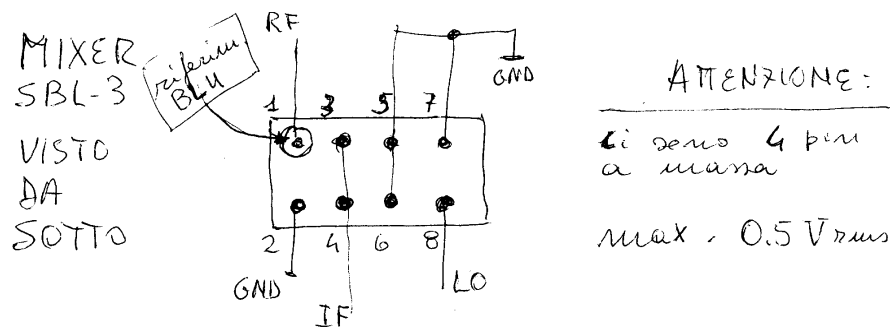


Figure 8.2: Mixer doppio bilanciato SBL-3

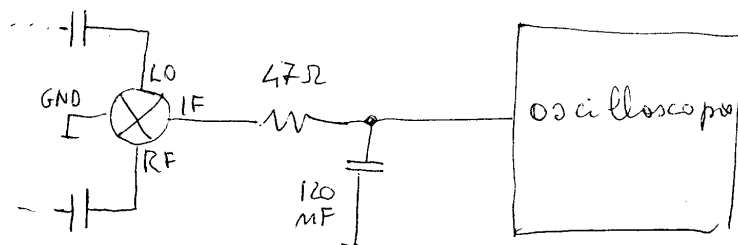


Figure 8.3: Filtraggio del segnale per eliminare la componente alla frequenza  $2f$ .

### 8.3 Misura con battimento

Se provate a ripetere gli esperimenti indicati ai paragrafi precedenti operando alla frequenza di 2 MHz (uscita D del generatore), vi accorgete che le operazioni risultano impossibili. Lo scarto di frequenza è eccessivo e i segnali scorrono troppo velocemente sullo schermo. Neppure le figure di Lissajous vi possono aiutare.

Provate allora ad usare un mixer per osservare la frequenza di battimento, seguendo lo schema di figura 8.1. I collegamenti del mixer sono in figura 8.2

**Attenzione:** il mixer è “permaloso” e si rompe se all’ingresso riceve una *continua* oppure un segnale di *ampiezza eccessiva*. Attenetevi alle indicazioni.

Con un po’ di abilità sperimentale nell’uso del trigger, all’uscita del mixer vedete i due segnali, alle frequenze somma e differenza.

Per vedere bene il segnale alla frequenza differenza è opportuno aggiungere un filtro passa basso, come in figura 8.3. Con l’oscilloscopio potete ora misurare agevolmente la frequenza di battimento.

Confrontate il valore dello scarto di frequenza con quello ottenuto precedentemente.

### 8.4 Campioni di frequenza in termostato

#### 8.4.1 Confronto di frequenza (1)

Ripetete ora l’esperimento precedente (punto 3) usando i segnali provenienti da due campioni di frequenza a 5 MHz. Usate però uno schema un po’ diverso, perché non c’è bisogno



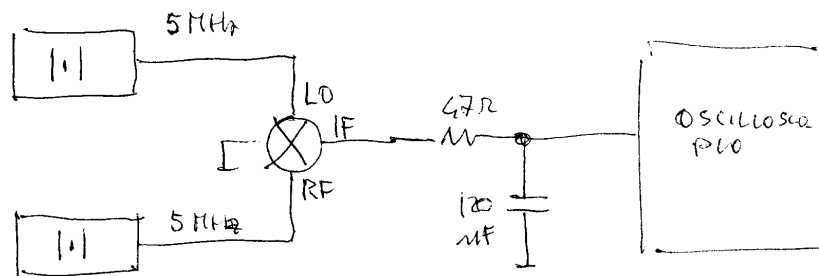


Figure 8.4: Schema del confronto di frequenza tra i due oscillatori a quarzo.

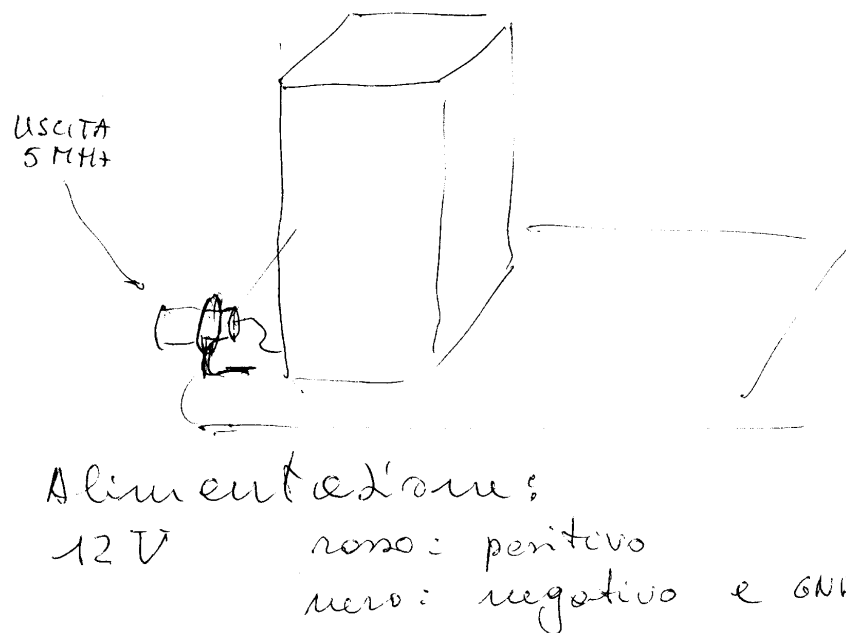


Figure 8.5: Campione di frequenza a quarzo in termostato

Copyright 2000 di Enrico Rubiola. Tutti i diritti riservati.

di attenuare i segnali (fig. 8.4). Le indicazioni relative al quarzo disponibile sono in figura 8.5

Tali campioni hanno all'interno un termostato che stabilizza la temperatura del quarzo che, per ovvie ragioni di praticità opera ad una temperatura tipicamente attorno a 70 °C. Nella fase iniziale di riscaldamento l'assorbimento di corrente è alto, mentre la frequenza è grossolanamente sbagliata. Poi l'assorbimento cala, e il campione è pronto per essere usato.

Quando accendete gli oscillatori, osservate la variazione di frequenza durante il riscaldamento.

Successivamente, quando gli oscillatori sono a regime, misurate la differenza di frequenza.

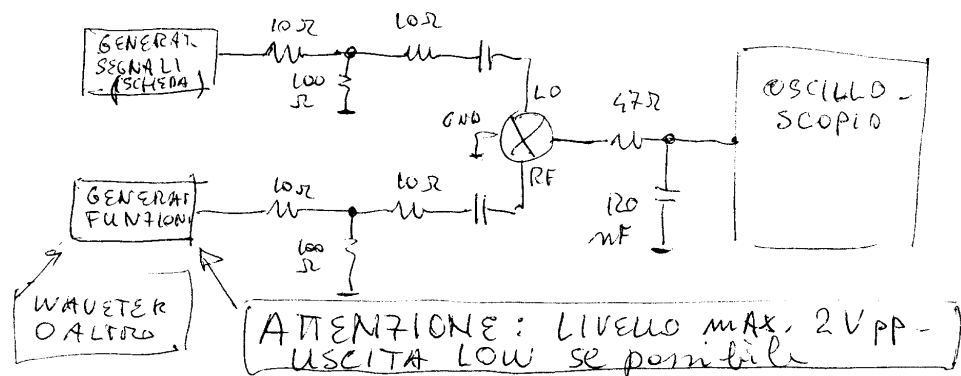


Figure 8.6: Schema del confronto di frequenza tra i due oscillatori a quarzo.

#### 8.4.2 Confronto di frequenza (2)

Procedendo in modo simile al punto 2, osservate lo scorrimento di una delle due tracce. Confrontando i campioni in termostato, la differenza di frequenza è sufficientemente bassa da consentire l'esperienza a 5 MHz. (Ricordate che con gli oscillatori dei generatori di segnali non si riusciva...)

### 8.5 Rumore di frequenza

Osservate all'oscilloscopio il segnale di uscita del generatore di funzioni (Wavetek, Tabor o altro) regolato attorno a 2 MHz. Sapete che c'è del rumore di frequenza, ma non riuscite ad evidenziare il fenomeno.

Usate allora il battimento, secondo lo schema di figura 8.6. Regolando il generatore alla frequenza opportuna, con la frequenza di battimento di alcuni kilohertz, potete osservare all'oscilloscopio le fluttuazioni della frequenza differenza.

## Tabelle utili

codice dei colori			
nero	0	$10^0$	
marrone	1	$10^1$	1%
rosso	2	$10^2$	2%
arancio	3	$10^3$	
giallo	4	$10^4$	
verde	5	$10^5$	
blu	6	$10^6$	
viola	7	$10^7$	
grigio	8	$10^8$	
bianco	9	$10^9$	
oro		$10^{-1}$	5%
argento			10%

## Condensatori

La capacità dei condensatori è spesso indicata in picofarad con un codice a tre cifre del tipo xyz dove

x e y sono le cifre significative della capacità  
z è il moltiplicatore, da intendersi come  $\times 10^z$ .

Esempio: 224 corrisponde a  $22 \times 10^4$  pF, ovvero 220 nF.

Il suffisso k, talvolta presente, indica che condensatore è ceramico (*non* si tratta di una moltiplicazione per 1000).

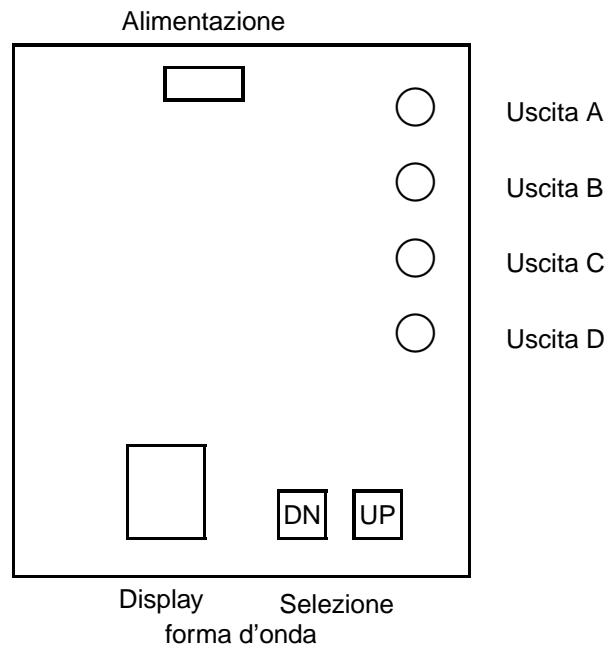
Un altro modo è quello di indicare la capacità in microfarad.

Esempio, .01 indica  $0.01 \mu\text{F} = 10$  nF; si noti l'assenza dello zero prima del punto decimale.

## Diode

La fascetta solitamente indica il catodo (la corrente fluisce dall'anodo al catodo). Non fidarsi, ma provare il diodo con un multimetro e una tensione di polarità nota, ricavata ad esempio dall'alimentatore.

## Generatore di forme d'onda



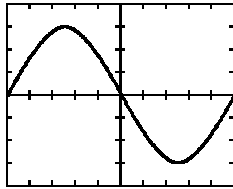
### Uso

Il display indica il numero corrispondente alla forma d'onda, rappresentato con una singola cifra esadecimale (da 0 a F). Il numero, e quindi la forma d'onda, può essere cambiato agendo sui pulsanti UP (incrementa) e DN (decrementa); l'azione dei pulsanti è ciclica, a modulo 16.

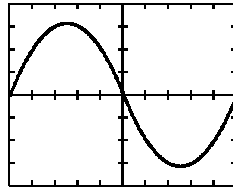
**Alimentazione:** simmetrica  $\pm 12..15$  V (rosso +12, nero -12, verde massa).

**Attenzione:** regolare l'alimentatore *prima* di collegare il generatore di segnali. Poi assicurarsi che l'alimentatore sia *spento* mentre si collegano i cavi. Le sezioni dell'alimentatore sono completamente indipendenti, e vanno collegate tra loro per formare la *massa* dell'alimentazione simmetrica. Il morsetto di *terra* dell'alimentatore è collegato alla terra dell'impianto elettrico, e *non* è collegato a massa.

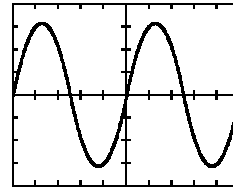
Forme d'onda



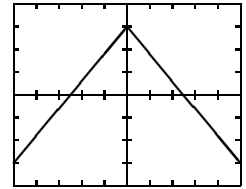
A 0



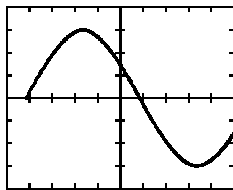
A 1



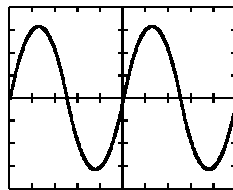
A 2



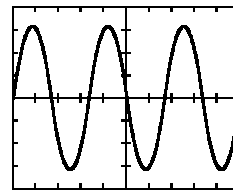
A 3



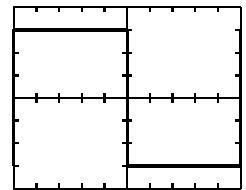
B 0



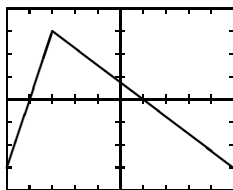
B 1



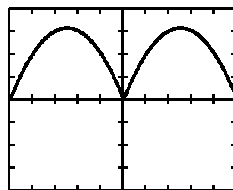
B 2



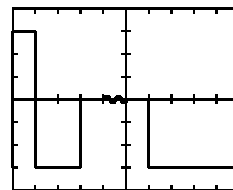
B 3



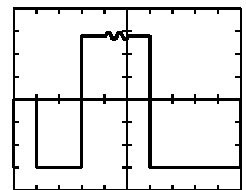
A 4



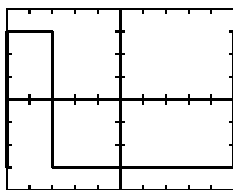
A 5



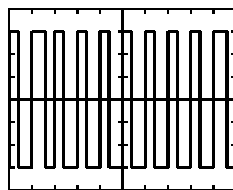
A 6



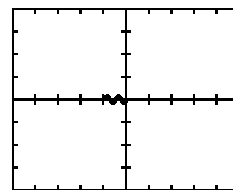
A 7



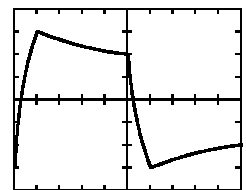
B 4



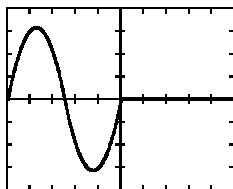
B 5



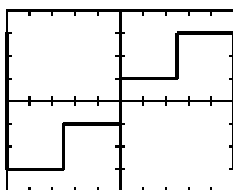
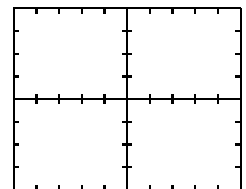
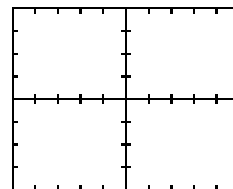
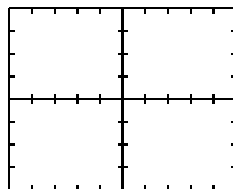
B 6



B 7



A 8



B 8

