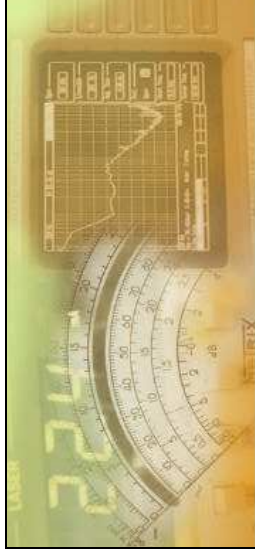


Unità 3
Strumenti analogici per DC e AC



Strumenti analogici per DC e AC

Strumenti elettromeccanici in D.C



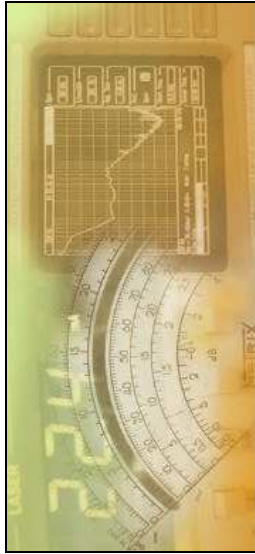
Indice unità 3

- Strumenti elettromeccanici in D.C.
- Strumenti elettromeccanici in A.C.



Indice

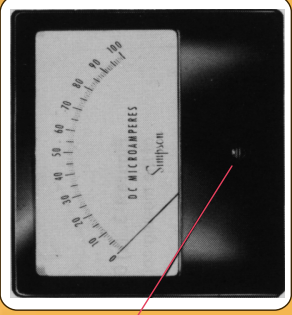
- Galvanometri
 - struttura e funzionamento
 - comportamento dinamico
- Amperometri
- Voltmetri
- Classe di accuratezza



Strumenti elettromeccanici in D.C

Galvanometri

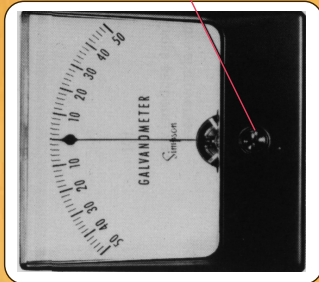
Strumenti indicatori con zero a inizio scala



regolazione di zero

7

Strumenti indicatori con zero centrale

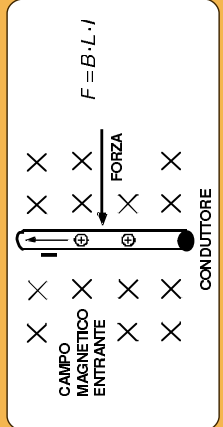


regolazione di zero

6

Principio operativo del galvanometro

➤ Forza di Lorentz che agisce su un conduttore percorso da corrente I immerso in un campo magnetico B



CAMPO MAGNETICO ENTRANTE

FORZA

$F = B \cdot L \cdot I$

CONDUTTORE

8

Struttura del galvanometro 1/3

$$C_{motrice} = F \cdot D \cdot \cos \delta$$

$$= I \cdot B \cdot L \cdot D \cdot \cos(\delta)$$

È funzione dell'angolo δ

Struttura del galvanometro 3/3

➤ Il campo radiale è ottenuto inserendo un cilindretto di materiale ferromagnetico tra le espansioni polari

Struttura del galvanometro 2/3

- La coppia motrice C_m dipende dall'angolo δ
- Se si vuole mantenerla costante, occorre rendere B parallelo al piano della spira, per qualunque valore di δ , cosicché F risulti sempre perpendicolare al piano della spira.
- Occorre pertanto realizzare una geometria di **campo radiale**

Galvanometro D'Arsonval 1/2

SOALA GRADUATA
 MAGNETE PERMANENTE
 BOBINA MOBILE
 MOLLE DI RICAMBIO
 TERMINALE DI USCITA
 TERMINALE DI INGRESSO

Galvanometro D'Arsonval 2/2

$$C_{matrice}(I) = B \cdot (2NL) \cdot I \cdot R$$

$$= B \cdot S \cdot N \cdot I = K_E \cdot I$$

$$C_{resistente}(\delta) = K_{Mg} \cdot \delta$$

N=n. di spire della bobina mobile
2R=braccio della coppia
L=lunghezza del conduttore immerso in B
K_{Mg}=costante elastica della molla a spirale
δ= angolo di rotazione della bobina mobile

All'equilibrio $\delta = \frac{K_E}{K_M} \cdot I = K \cdot I$

13

Molle di richiamo

> Negli strumenti con sospensione a perno le molle sono a spirale, un estremo è collegato al telaio dello strumento, l'altro estremo è fissato al perno rotante

> Le molle di richiamo hanno anche il compito di portare la corrente all'organo mobile

> La corrente che percorre le molle deve essere limitata per evitare un riscaldamento eccessivo con conseguente deviazione dell'indice dovuta alla dilatazione

15

Alcuni valori tipici

> $B = 0.15 - 0.5 \text{ Wb/m}^2$
 > $N = 20 - 100 \text{ SPIRE}$
 > **Risoluzione:**

- strumenti commerciali $1 \mu A$
- strumenti di laboratorio fino a $10^{-13} A$

14

Dinamica dell'equipaggio mobile

$$J \frac{d^2\delta}{dt^2} + K_V \frac{d\delta}{dt} + K_M \delta = C_m$$

J = momento d inerzia
K_v = coefficiente di sovrappeso viscoso
K_m = costante elastica molla di richiamo
C_m = coppia motrice

16

Comportamento dinamico

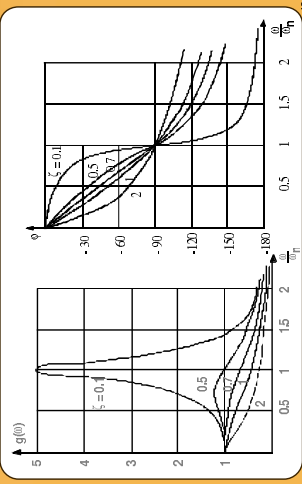
Σ La funzione di trasferimento fra la coppia motrice e la posizione dell'indice è del 2° ordine e vale:

$$T(s) = \frac{\delta(s)}{C_m(s)} = \frac{1}{Js^2 + K_Vs + K_M} \quad G = \frac{1}{K_M} \quad K_V = \frac{1}{K_M J}$$

$$T(s) = \frac{G}{1 + 2\zeta \frac{s}{\omega_n} + \left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2} \quad \zeta = 2\sqrt{K_M J} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_M}{J}}$$

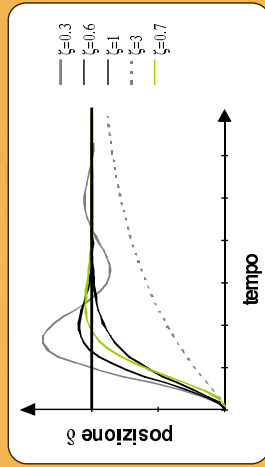
17

Risposta in frequenza



19

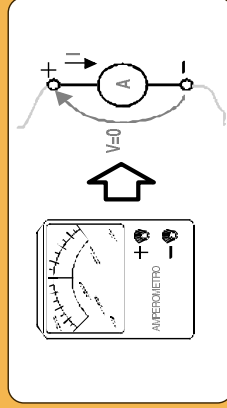
Risposta al gradino



18

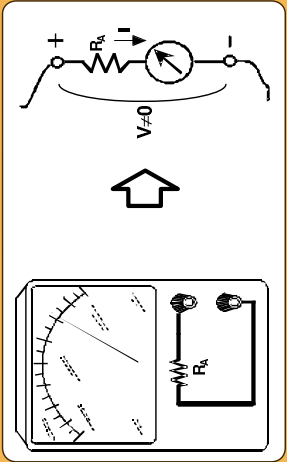
Galvanometro ideale

Σ Si inserisce in **serie** nel circuito, idealmente si comporta come un corto circuito e quindi non perturba la corrente in misura



20

Galvanometro reale



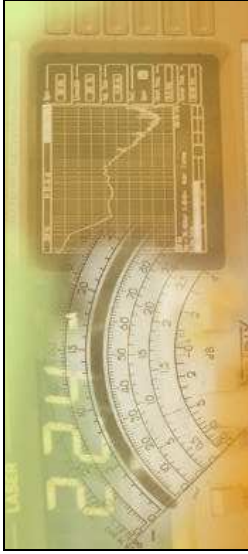
21

Amperometro reale

> **Amperometri** se hanno una portata di 1 ÷ 100 A
 > **Milliamperometri** se portata dei milliampere (mA)
 > **Microamperometri** se portata dei ficroampere (µA)

| Valori tipici portata | resistenza interna |
|-----------------------|--------------------|
| 50 µ A | 1000-5000 Ω |
| 500 µ A | 100-1000 Ω |
| 1 mA | 30-120 Ω |
| 10 mA | 1-4 Ω |

22

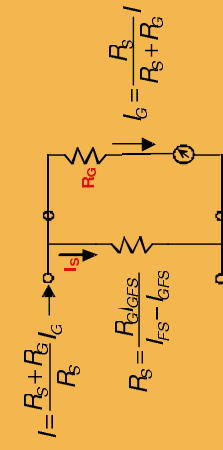


Amperometri

Strumenti elettromeccanici in D.C

Amperometro in D.C.

> Per variare la portata della corrente si inserisce una resistenza R_s di shunt in parallelo al galvanometro



23

Amperometro a più portate

$$I = \frac{R_f + R_G}{R_f} I_G$$

25

Voltmetro per D.C. ideale

27

Strumenti elettromeccanici in D.C

Voltmetri

Voltmetro per D.C. reale

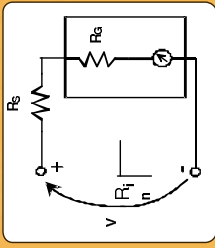
$$R_{\text{serie}} = \frac{V_{FS} - R_G}{I_{FS}}$$

$$V = (R_{\text{serie}} + R_G) \cdot I_G$$

Il valore di R_{serie} si calcola in funzione della portata voluta V_{FS} e della corrente di fondo scala del galvanometro I_{GFS}

28

Voltmetri per D.C.: R_{in}



$$V_{FS} = (R_S + R_G) \cdot I_{FS}$$

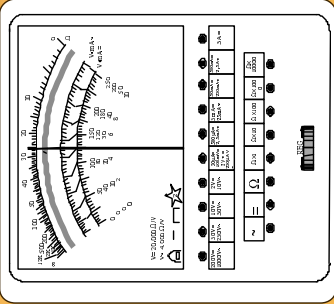
$$\frac{(R_S + R_G)}{V_{FS}} = \frac{1}{I_{FS}} = K_{\Omega/V}$$

$K_{\Omega/V}$ è anche impropriamente chiamato sensibilità del voltmetro

Σ La resistenza di ingresso è data come:
 $R_{in} = K_{\Omega/V} \times V_{FS} = V_{FS} / I_{FS}$

31

Strumenti "universali" (Tester)

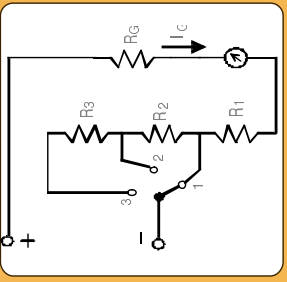


Misurano normalmente:



- V_{DC}
- I_{DC}
- V_{AC}
- I_{AC}
- Resistenze

31

Voltmetro per D.C. a più portate



30

Strumenti elettromeccanici in D.C

Classe di accuratezza

Classe di accuratezza C_L

> C_L esprime l'incertezza relativa riferita al fondo scala espressa in percento

$$C_L = (\Delta V_{fs} / V_{fs}) \times 100$$

> Classi:

- 0,05 ÷ 0,1 strumenti campione da laboratorio
- 0,2 ÷ 0,5 strumenti da laboratorio
- 1; 1,5; 2,5; 5 strumenti industriali e da quadro

33

Valutazione dell'incertezza strumentale 1/2

> L'incertezza assoluta ΔV_{fs} si mantiene costante per qualunque lettura V_L della stessa scala

35

Incertezza assoluta sul V_{fs}

> Dalla classe C_L si calcola la semi ampiezza della fascia di incertezza assoluta al fondo scala ΔV_{fs}

$$\Delta V_{fs} = C_L \times V_{fs} / 100$$

34

Valutazione dell'incertezza strumentale 2/2

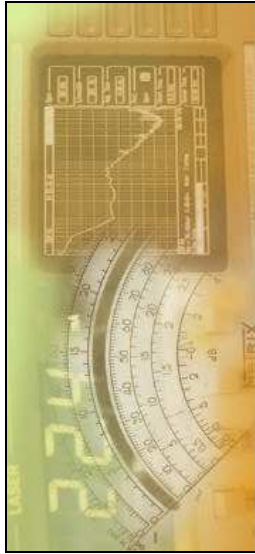
> L'incertezza strumentale relativa a una lettura V_L risulta

- $\triangleright \epsilon_L = (\Delta V_{fs} / V_L) \times 100 = C_L \times V_{fs} / V_L$

> ϵ_L è tanto maggiore quanto più piccola è V_L

> È buona norma cambiare portata se la lettura è inferiore a $1/3 V_{fs}$ (in queste condizioni infatti l'incertezza $\epsilon_L > 3 C_L \%$)

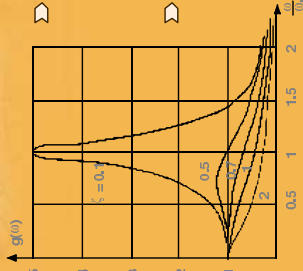
36



Strumenti analogici per DC e AC

Strumenti elettromeccanici in A.C

Misuratori in regime A.C. 1/3



➤ Il galvanometro, e quindi anche l'ampereometro ed il voltmetro sono strumenti in grado di misurare una **D.C.**
 ➤ La loro risposta è corretta solo in D.C. o per frequenze molto inferiori alla pulsazione di risonanza ω_0 .

39

Indice

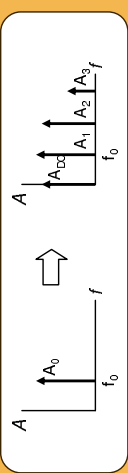
➤ **Strumenti elettromeccanici in A.C.**

- Voltmetri a valore medio
- Voltmetri a valore di cresta (o di picco)
- Voltmetri a valore efficace

40

Misuratori in regime A.C. 2/3

➤ Se si vuole misurare un segnale sinusoidale ideale (e quindi con D.C.=0) occorre creare, partendo dalla sinusoide, una componente continua A_{DC} significativa dei parametri della sinusoide.
 ➤ L'operazione richiede un **circuito non lineare** che modifichi lo spettro della sinusoide.



40

Misuratori in regime A.C. 3/3

> Lo strumento elettromeccanico misurerà solo la componente continua
 > Se la frequenza fondamentale $f_0 \gg f_n$, frequenza di taglio dello strumento a bobina mobile le componenti $f_0, 2f_0, 3f_0$ non provocano deflessione.

Misuratori AC con raddrizzatore

L'indicazione dello strumento è costante

Strumenti elettromeccanici in A.C

Voltmetri a valore medio

Strumenti a valore medio

> Per tale motivo questi strumenti di misura sono chiamati strumenti a "valore medio"
 > Si intende infatti per **valore medio convenzionale** "la componente continua di una sinusoide raddrizzata"

$$V_m \equiv \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt$$

$$v(t) = V_p \sin \frac{2\pi}{T} t$$

Circuiti raddrizzatori a diodi

a) Raddrizzamento a singola semionda

b) Raddrizzamento a doppia semionda

Taratura della scala 1/3

> Poiché, in regime sinusoidale, per l'utente è più comodo avere una indicazione in termini di valore efficace, il costruttore dello strumento tara la scala in V_{eff} .

> Nel caso di raddrizzamento a singola semionda si legge V_{let}

$$V_{let} = V_{eff} = \frac{V_m \pi}{\sqrt{2}} \cong 2,22 V_m$$

La scala dello strumento è moltiplicata per un fattore 2,22

Strumenti a valore medio

> Nel caso di raddrizzamento a semplice semionda si ottiene:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = \frac{V_p}{\pi}$$

> Nel caso di raddrizzamento a doppia semionda invece si ottiene:

$$V_m = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = \frac{2 V_p}{\pi}$$

Taratura della scala 2/3

> Nel caso di raddrizzamento a doppia semionda si legge V_{let}

$$V_{let} = V_{eff} = \frac{V_m \pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11 V_m$$

La scala dello strumento è moltiplicata per un fattore 1,11

Taratura della scala 3/3

$$v(t) = V_p \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$V_{eff} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

51

Segnali non sinusoidali 2/2

➤ Lo strumento continua a misurare correttamente il valore medio convenzionale che si può ottenere da V_{let} effettuando l'operazione inversa alla taratura

➤ Per una forma d'onda qualsiasi si ricava

- $V_m = V_{let} / 1,11$ nel caso di raddrizzatore doppio
- $V_m = V_{let} / 2,22$, nel caso di raddrizzatore semplice

➤ È pertanto necessario conoscere il tipo di raddrizzatore usato per una corretta misura del **valore medio convenzionale**

51

Segnali non sinusoidali 1/2

➤ Se la grandezza da misurare non è sinusoidale, il valore letto V_{let} sulla scala non è il suo valore efficace, ma è il suo valore medio convenzionale moltiplicato per il fattore di taratura cioè:

- $V_m \times 1,11$ nel caso di raddrizzatore doppio
- $V_m \times 2,22$, nel caso di raddrizzatore semplice

➤ infatti col segnale non sinusoidale non valgono più le relazioni tra **valore medio convenzionale** e **valore efficace**

52

Esempio: Voltmetro a singola semionda 1/2

➤ Il valore di tensione indicato sulla scala dall'indice dello strumento è $V_{let} = 10V$

➤ Calcolo del valore medio convenzionale dalla lettura:

$$V_m = \frac{V_{let}}{2,22} = 4,5V$$

52

Esempio: Voltmetro a singola semionda 2/2

\triangleright Noto che la f.d.o. è triangolare valore massimo V_{max} , il valore medio convenzionale vale:

$$V_m = \frac{V_{max}}{4}$$

\triangleright S può pertanto risalire al valore V_{max}

$$V_{max} = 4V_m = 18V$$

\triangleright E quindi al valore V_{eff}

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} = \frac{V_{max}}{\sqrt{3}} \cong 10.4V$$

Voltmetri a valore di cresta (o di picco) 1/5

\triangleright Nei voltmetri cosiddetti a valore di cresta, il circuito non lineare genera una componente continua che è pari al valore di picco V_M del segnale

\triangleright Nel caso di **diodo ideale e voltmetro ideale** si ottiene:

Strumenti elettromeccanici in A.C

Voltmetri a valore di cresta

Voltmetri a valore di cresta 2/5

\triangleright Nel caso di **diodo reale e voltmetro** con resistenza R_V tale che $CR_V \gg T$

\triangleright Si ha una caduta ai capi del diodo in conduzione e C si scarica su R_V quando il diodo è bloccato

Voltmetri a valore di cresta 3/5

➤ Il voltmetro in D.C. misura una tensione $V_{DC} \approx V_M$ (leggermente inferiore) in quanto V_i non riesce a raggiungere il valore V_M

57

Voltmetri a valore di cresta 5/5

➤ Se si inverte la polarità del diodo si ha:

58

Voltmetri a valore di cresta 4/5

➤ Nei voltmetri in pratica si utilizza una variante al circuito di cresta

➤ Il Voltmetro in D.C. misura la $V_{DC} \approx V_M$ (con la corretta polarità)

59

Strumenti elettromeccanici in A.C

Voltmetri a valore efficace

Voltmetri a valore efficace 1/2

- Misurano il valore efficace del segnale $v(t)$, qualunque forma d'onda esso abbia

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T v(t)^2 dt}$$

61

Utilizzo

- **In tutti i casi** di:
- forme d'onda periodiche **non sinusoidali**
 - forme d'onda sinusoidali **distorte**
 - tensioni di **rumore**
- Per il quali l'indicazione dei voltmetri a valore medio o a valore di cresta **non è corretta**
- Il Voltmetro a valore efficace da l'**indicazione corretta del valore efficace**

63

Voltmetri a valore efficace 2/2

- Il valore efficace V_{eff} della tensione associata ad un segnale $v(t)$, ha un significato energetico

- La potenza media prodotta da una tensione $v(t)$, periodica di periodo T , applicata a un resistore R è:

$$P = \frac{1}{T} \int_T \frac{v(t)^2}{R} dt$$

62

Tipi di voltmetri a V_{eff} 1/2

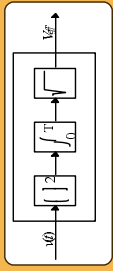
Applicazioni industriali (frequenza 50 Hz)

- **Voltmetri a ferro mobile**: la coppia motrice generata dalla attrazione fra un equipaggio mobile ferromagnetico posto all'interno di una bobina, nella quale scorre la corrente in misura
- **Voltmetri elettrodinamici**: la coppia motrice generata dal campo magnetico prodotto da bobina fissa e da una bobina mobile entrambe percorse dalla corrente in misura
- **Robustezza ma bassa accuratezza**

64

Tipi di voltmetri a $V_{eff} 2/2$

- > **Applicazioni elettronica di segnale**
- > **Elaborazione analogica** del segnale, secondo la definizione di V_{eff}

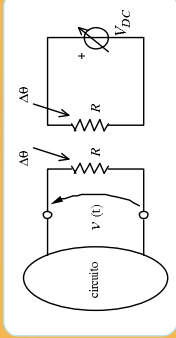


- > **Conversione elettrotermica:**
 - conversione della tensione alternata \Rightarrow quantità di calore \Rightarrow variazione di temperatura di un resistore \Rightarrow tensione continua
 - Soluzione più utilizzata

65

Conversione elettro-termica

- > La misura della V_{DC} permette di ricavare V_{eff}



- > Si è operata una conversione da tensione alternata a tensione continua

67

Voltmetri a conversione elettro-termica

- > Una tensione $v(t)$, ai capi di un resistore R , per l'effetto Joule, provoca incremento di temperatura $\Delta\theta$
- > Si provoca lo stesso incremento $\Delta\theta$ mediante una tensione continua V_{DC} applicata ad un uguale resistore R
- > Poiché sono uguali le potenze dissipate

$$\frac{V_{eff}^2}{R} = \frac{V_{DC}^2}{R}$$

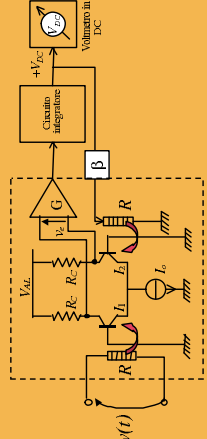
> Quindi:

$$V_{eff} = V_{DC}$$

66

Schema di principio 1/2

- > Operazione di aggiustamento della temperatura del resistore ausiliario mediante circuito integrato
- > La temperatura dei resistori varia la V_{be} dei transistori



68

Schema di principio 2/2

- Squilibrio di temperatura ⇒ Segnale di errore
- Sistema controreazionato ⇒ Annulla errore ⇒
Eguaglianza temperature

69

Problemi 2/2

- Problemi di banda dell'amplificatore
 - Att.ne sinusoidale distorta ⇒ banda elevata, rispetto alla fondamentale
- Problemi di dinamica dell'amplificatore
 - F.d.o.: impulsive piccolo V_{eff} ma elevata ampiezza massima

71

Problemi 1/2

- La $v(t)$ deve poter essere amplificata
- Occorre amplificatore con **attenuatore tarato** all'ingresso dello strumento

70