

Generalità sui sensori

Parte 2

Alcuni parametri di scelta dei trasduttori

Criteri generali:

- Banda passante
- Segnale fornito
- Compatibilità strutturale e di installazione
- Costo
- ...

Trasduttori tipici per misure strutturali:

- Potenzimetri
- LVDT
- Estensimetri elettrici
- Celle di carico
- Accelerometri

Misure di spostamento

A contatto (misura di movimento relativo tra due parti del sensore):

- Potenzimetri
- LVDT
- Encoder

Non a contatto (misura del movimento relativo tra il sensore e l'oggetto della misura)

- Capacitivi

Misure di spostamento

Il **potenziometro** è un dispositivo elettrico equivalente ad un [partitore di tensione](#) resistivo variabile (cioè a due [resistori](#) collegati in serie, aventi la somma dei due valori di resistenza costante, ma di cui può variare il valore relativo).



- Potenziometri (strumenti di ordine zero)

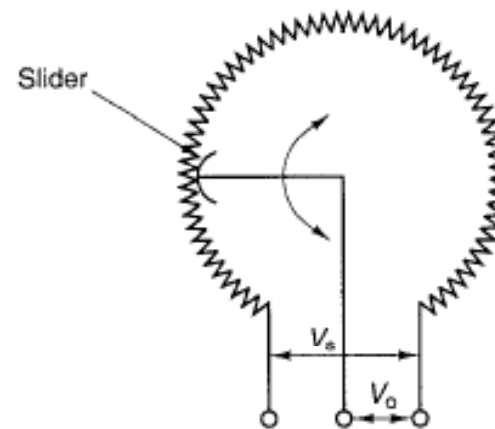
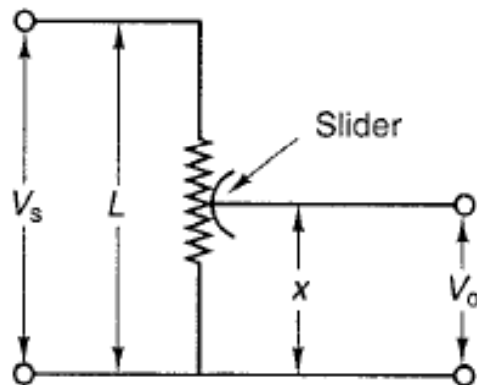
$$i = \frac{V_S}{R_L}$$

$$V_O = R_x i = \frac{R_x}{R_L} V_S$$

$$\frac{R_x}{R_L} = \frac{x}{L}$$

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{R_x}{R_L} = \frac{x}{L}$$

$$V_O = \frac{R_x}{R_L} V_S = \frac{x}{L} V_S$$



Misure di spostamento

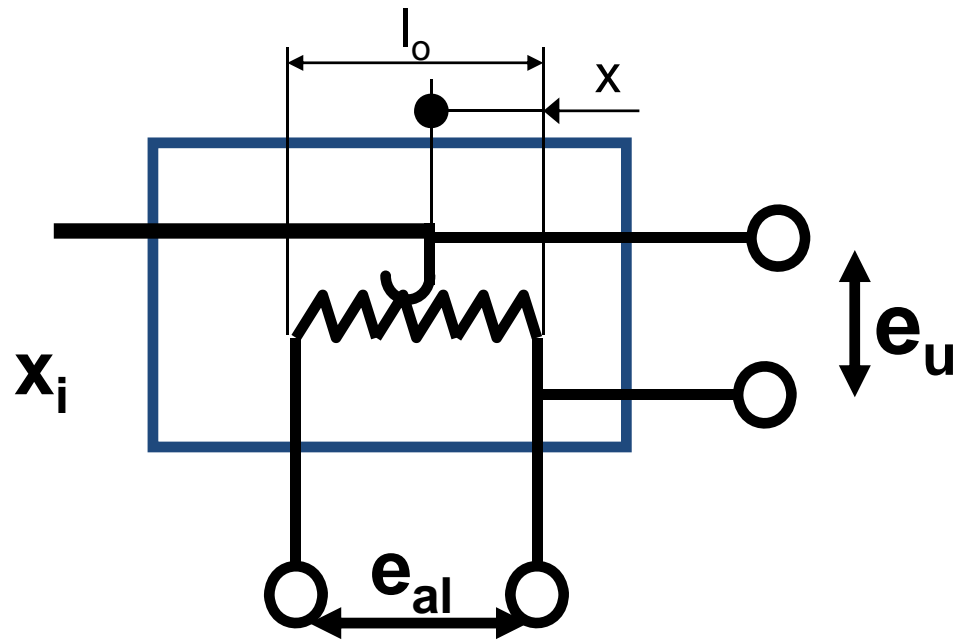
A spire

Risoluzione finita
(numero di spire)

A strato resistivo

Risoluzione infinita
(virtualmente)

Potenziometro



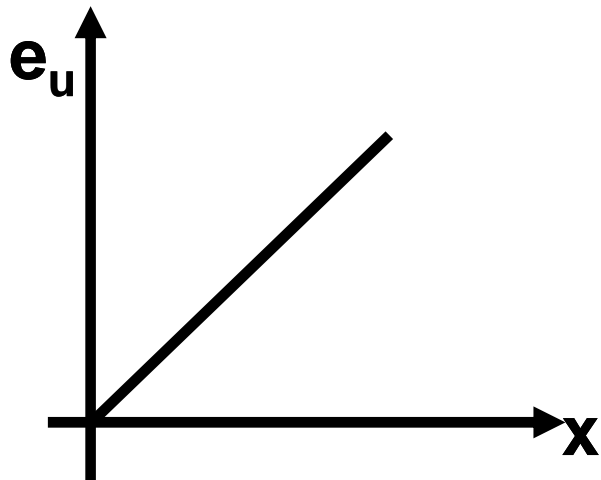
$$e_u = R_x i$$

$$i = e_{ai} / R_P$$

$$R_x = R_P \frac{x}{l_0}$$

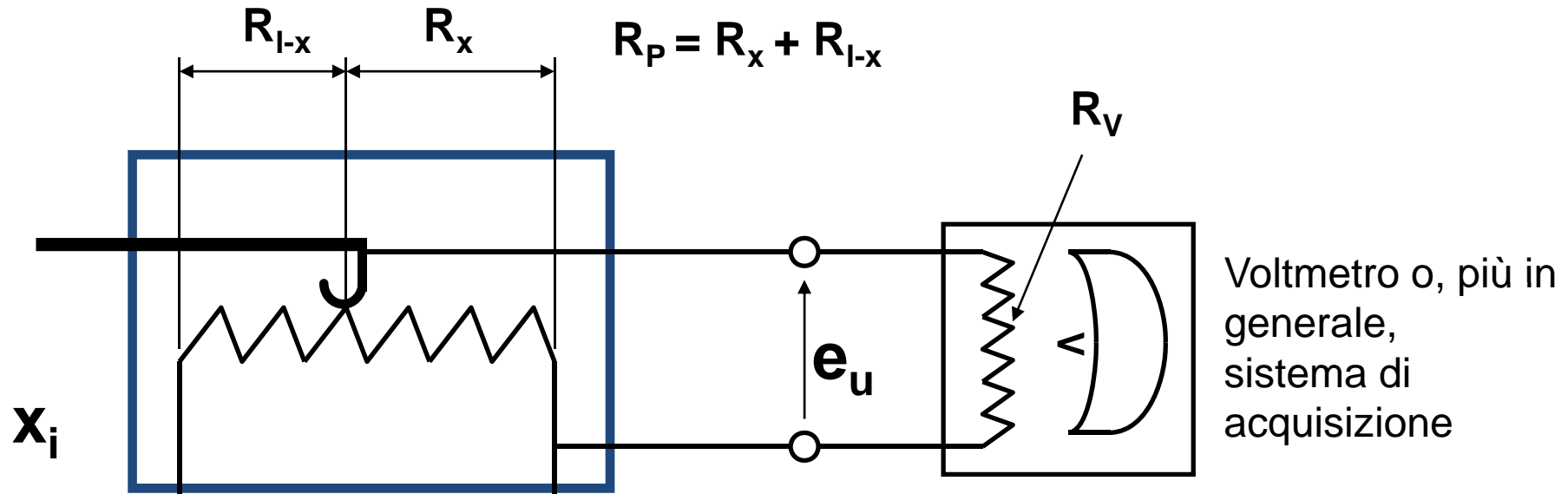
$$e_u = \frac{x}{l_0} e_{ai}$$

$$x = \frac{e_u}{e_a} l_0$$

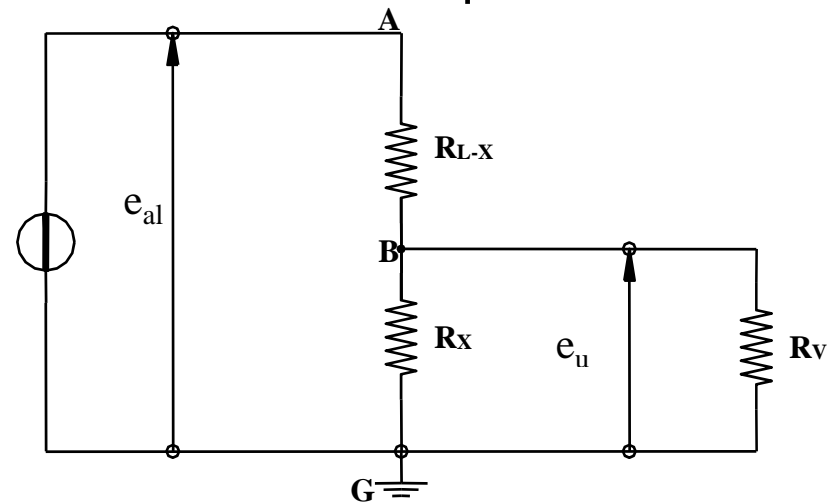


Comportamento lineare
trascurando effetto di carico o
Inserzione.

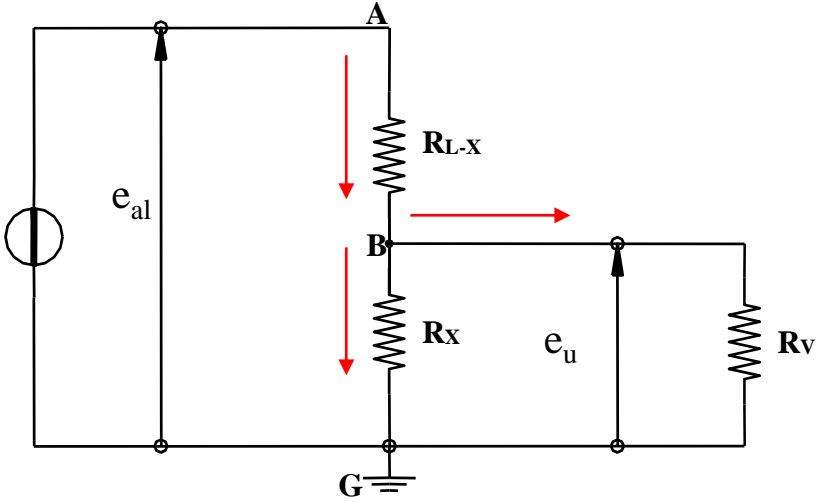
Potenziometro



Rete di impedenze



Potenziometro

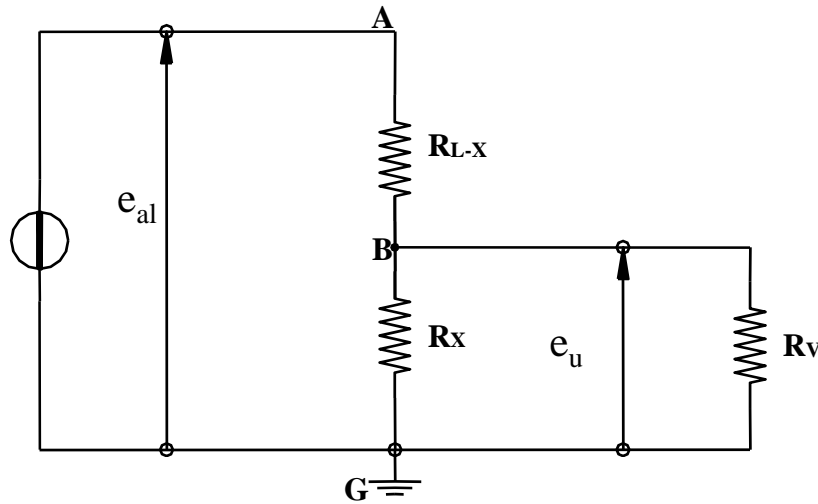


$$\left\{ \begin{aligned} I_{AB} &= I_{BG} + I_V = \frac{e_u}{R_x} + \frac{e_u}{R_V} \\ I_{AB} &= \frac{e_{al} - e_u}{R_P - R_x} \\ R_x &= R_P \frac{x}{l_0} \end{aligned} \right.$$

$$\frac{e_{al} - e_u}{R_P - R_x} = \frac{e_u}{R_x} + \frac{e_u}{R_V}$$

$$\frac{e_{al} - e_u}{R_P - R_P \frac{x}{l_0}} = \frac{e_u}{R_P \frac{x}{l_0}} + \frac{e_u}{R_V} \quad \Rightarrow \quad \frac{e_{al}}{R_P \left(1 - \frac{x}{l_0}\right)} = \frac{e_u}{R_P \left(1 - \frac{x}{l_0}\right)} + \frac{e_u}{R_P \frac{x}{l_0}} + \frac{e_u}{R_V}$$

Potenziometro

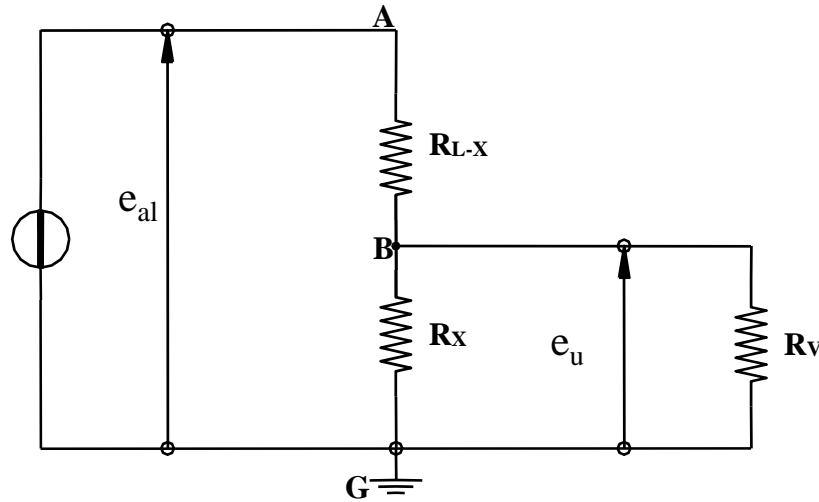


$$\frac{e_{al}}{R_P \left(1 - \frac{x}{l_0}\right)} = \frac{e_u}{R_P \left(1 - \frac{x}{l_0}\right)} + \frac{e_u}{R_P \frac{x}{l_0}} + \frac{e_u}{R_V}$$

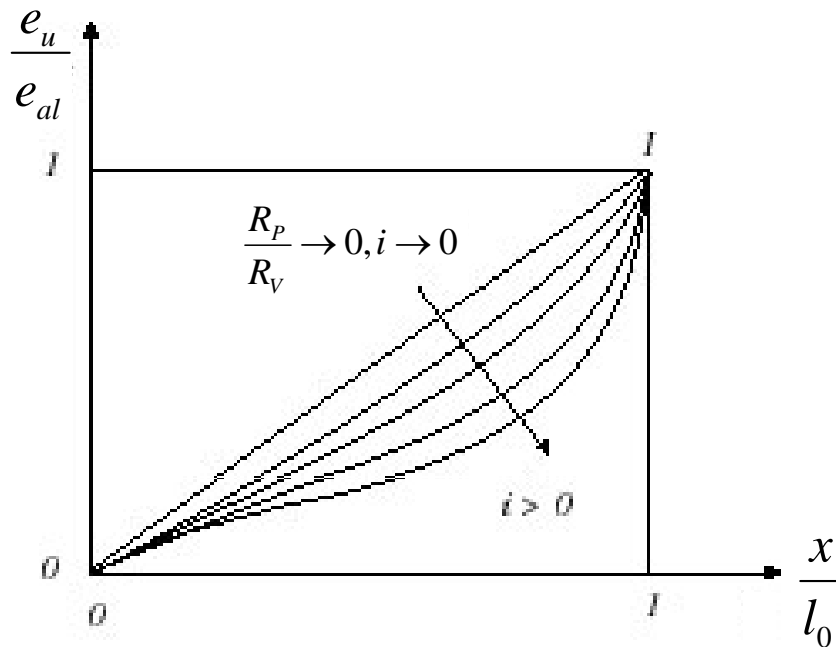
$$\frac{e_{al}}{\left(1 - \frac{x}{l_0}\right)} = \frac{e_u}{\left(1 - \frac{x}{l_0}\right)} + \frac{e_u}{\frac{x}{l_0}} + \frac{e_u}{\frac{R_V}{R_P}}$$

$$\cancel{\frac{e_{al}}{\left(1 - \frac{x}{l_0}\right)}} = e_u \left(\frac{\frac{R_V}{R_P} \frac{x}{l_0} + \frac{R_V}{R_P} \left(1 - \frac{x}{l_0}\right) + \frac{x}{l_0} \left(1 - \frac{x}{l_0}\right)}{\cancel{\left(1 - \frac{x}{l_0}\right)} \cancel{\left(\frac{x}{l_0}\right)} \left(\frac{R_V}{R_P}\right)} \right)$$

Potenziometro

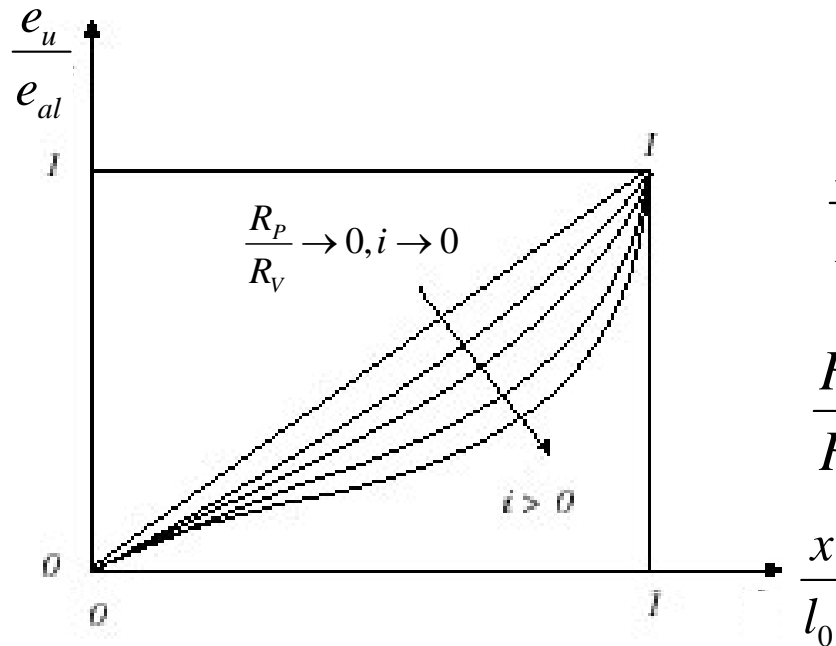


$$\frac{e_u}{e_{al}} = \frac{\left(\frac{x}{l_0} \right) \left(\frac{R_v}{R_p} \right)}{\frac{R_v}{R_p} \left(\frac{x}{l_0} + 1 - \frac{x}{l_0} \right) + \frac{x}{l_0} \left(1 - \frac{x}{l_0} \right)}$$



$$\frac{e_u}{e_{al}} = \frac{1}{\frac{1}{x} + \frac{R_p}{R_v} \left(1 - \frac{x}{l_0} \right)}$$

Potenziometro



$$\frac{R_P}{R_V} = 1 \quad \text{Errore di linearità max} = 12\% \text{ fs}$$

$$\frac{R_P}{R_V} = 0.1 \quad \text{Errore di linearità max} = 1.5\% \text{ fs}$$

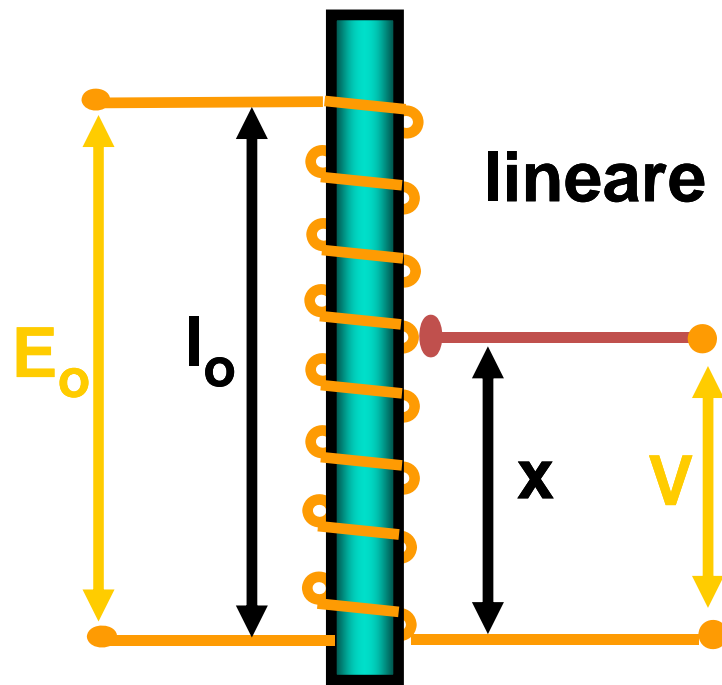
$$\frac{R_P}{R_V} < 0.1 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{lin_{MAX}} \approx 15 \frac{R_P}{R_V} \%$$

$$e_{al_{MAX}} = \sqrt{R_P P}$$

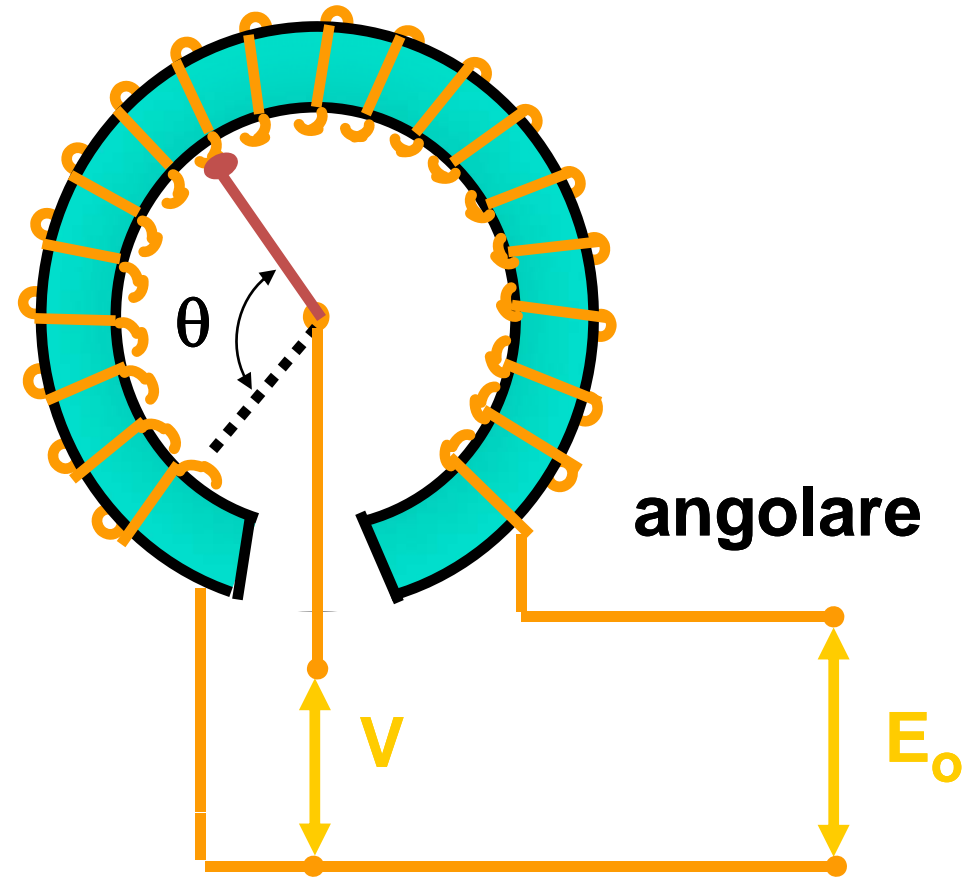
Dove P è la potenza [W]
dissipabile (data dal costruttore)

\Rightarrow Limite della sensibilità

POTENZIOMETRI RESISTIVI A SPIRE: tipologie



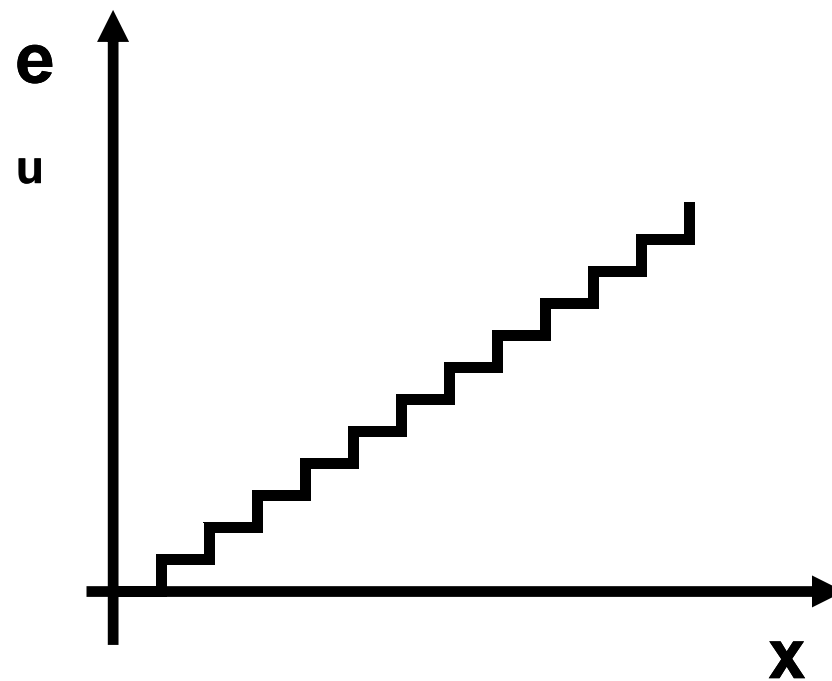
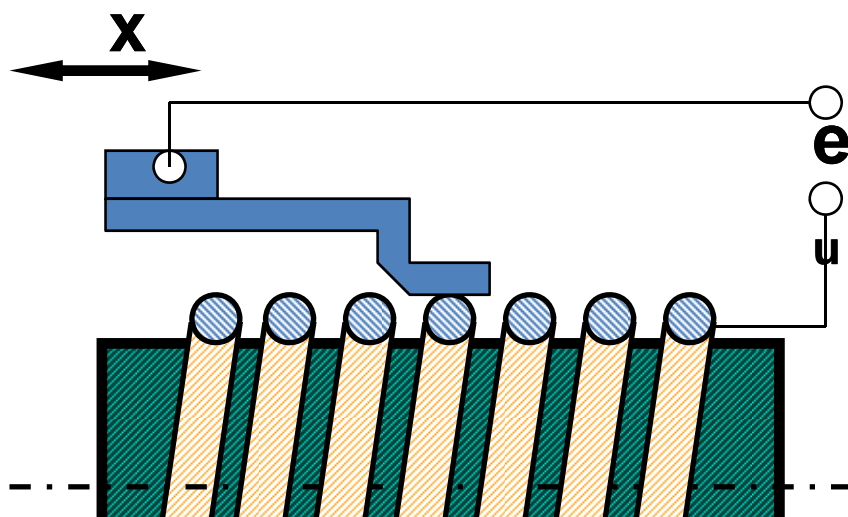
Risoluzione TIPICA 0.05mm



Risoluzione TIPICA $\frac{3^\circ \div 6^\circ}{D}$

D in mm

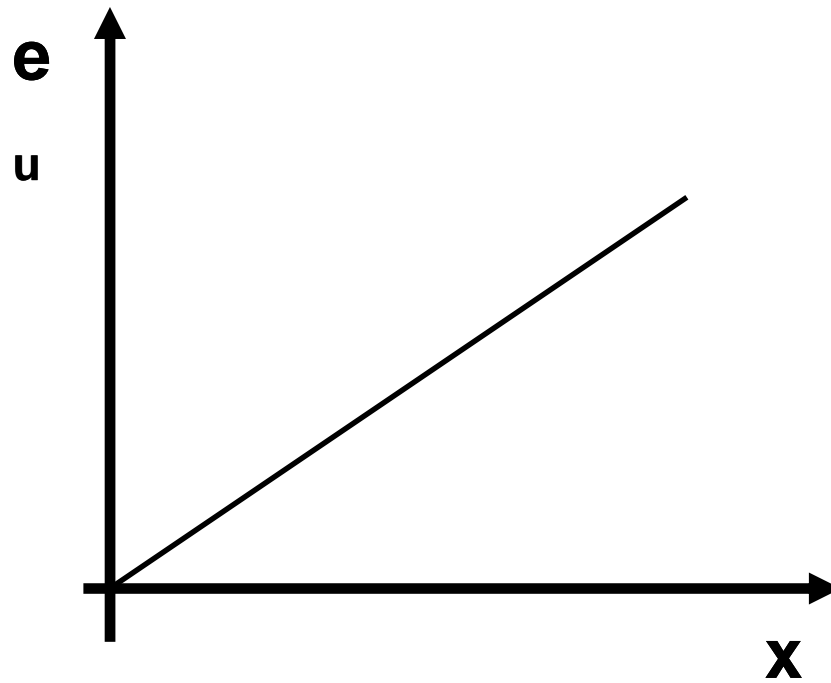
POTENZIOMETRI RESISTIVI A SPIRE



Risoluzione: $\frac{l_0}{n}$

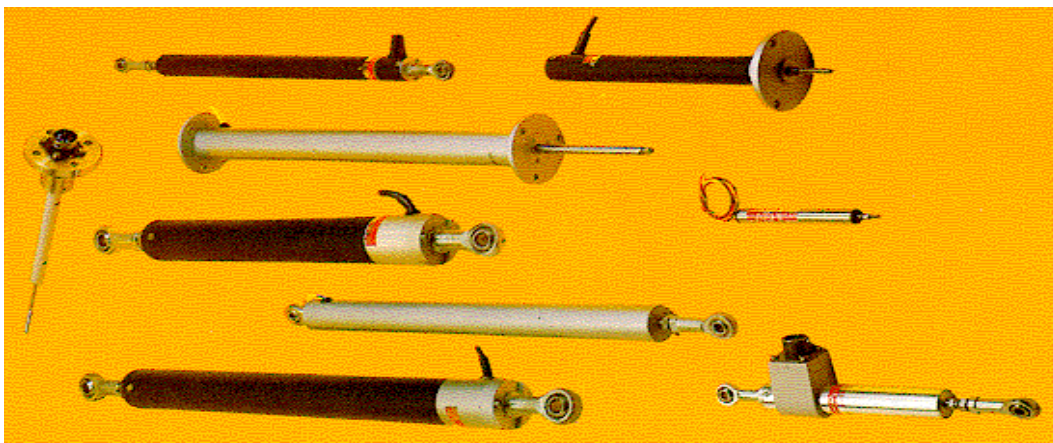
n: numero di spire

POTENZIOMETRI RESISTIVI A STRATO



Risoluzione: infinita (teorica)

Misure di spostamento



Lineari



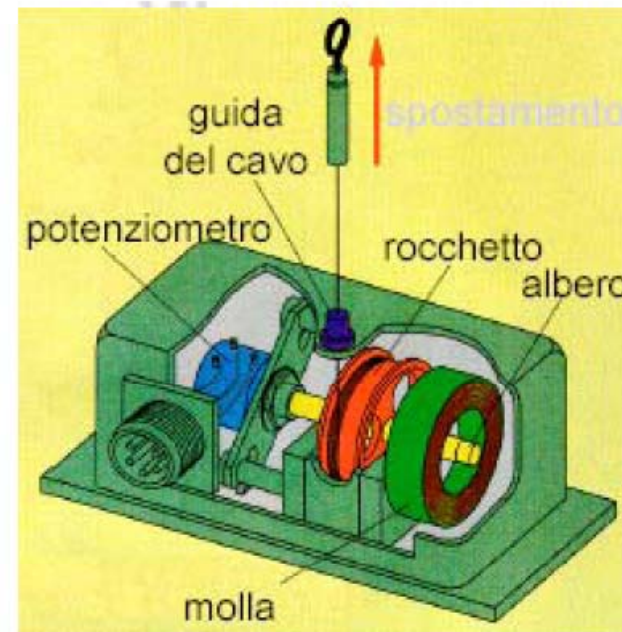
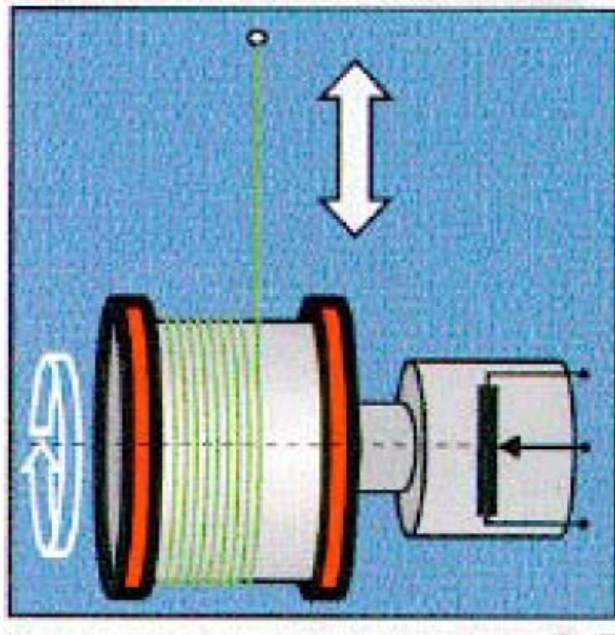
Angolari

Misure di spostamento

VALORI TIPICI	Lineare	Angolare
Portata	2 ÷ 2000 mm	1 ÷ 60 giro
Risoluzione	infinita ? (a strato)	infinita ? (a strato)
	0,1% ÷ 1% f.s. (a spire)	0,05% ÷ 1% f.s. (a spire)
Linearità	± 0,1% ÷ 0,3%	± 0,1% ÷ 0,5%
Resistenza	0,5 ÷ 10 kΩ / 25 mm	0,5 ÷ 20 kΩ / 25 mm
Vita a fatica	10 ⁸ cicli	10 ⁸ cicli
Velocità massima	1 m/s	3000 °/s

Misure di spostamento

E' possibile eseguire misure lineari con un potenziometri angolare:
Potenziometro a filo (wire potentiometer)



Il filo disaccoppia sensore e oggetto di misura nella direzione perpendicolare al filo ma è difficile da allineare

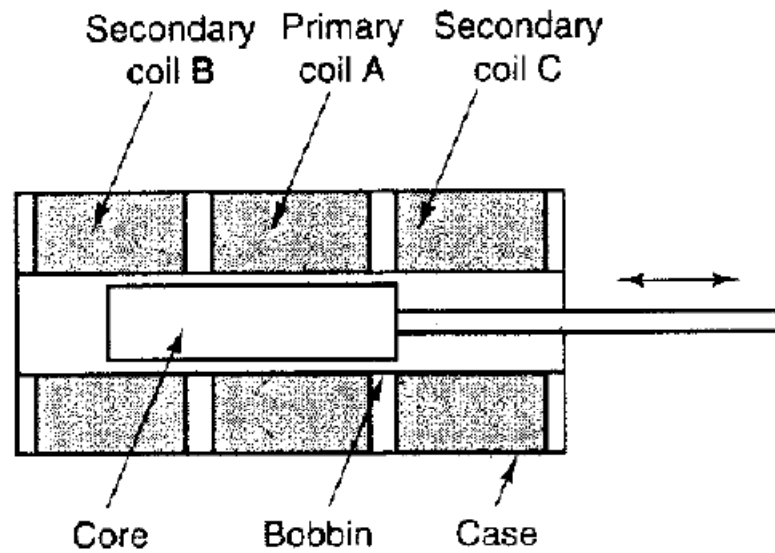
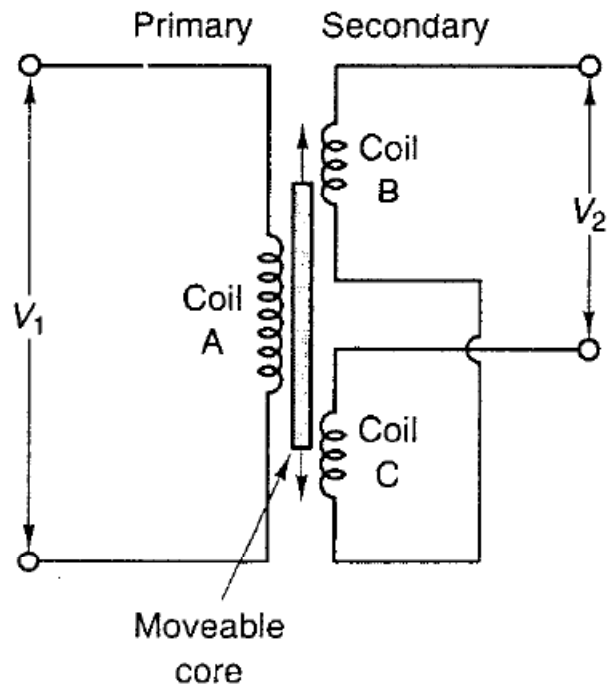
Misure di spostamento

Potenzimetri a filo (wire potentiometer)

LIMITI	Dispositivi normali	Dispositivi speciali
Tensione cavo	2 ÷ 10 N	50 N
Vel. max	< 10 m/s	25 m/s
Acc. Max	<35 g estrazione	50 g
	<25 g avvolgimento	
Velocità massima	1 m/s	3000 °/s

Misure di spostamento

- LVDT (Trasformatore lineare differenziale)



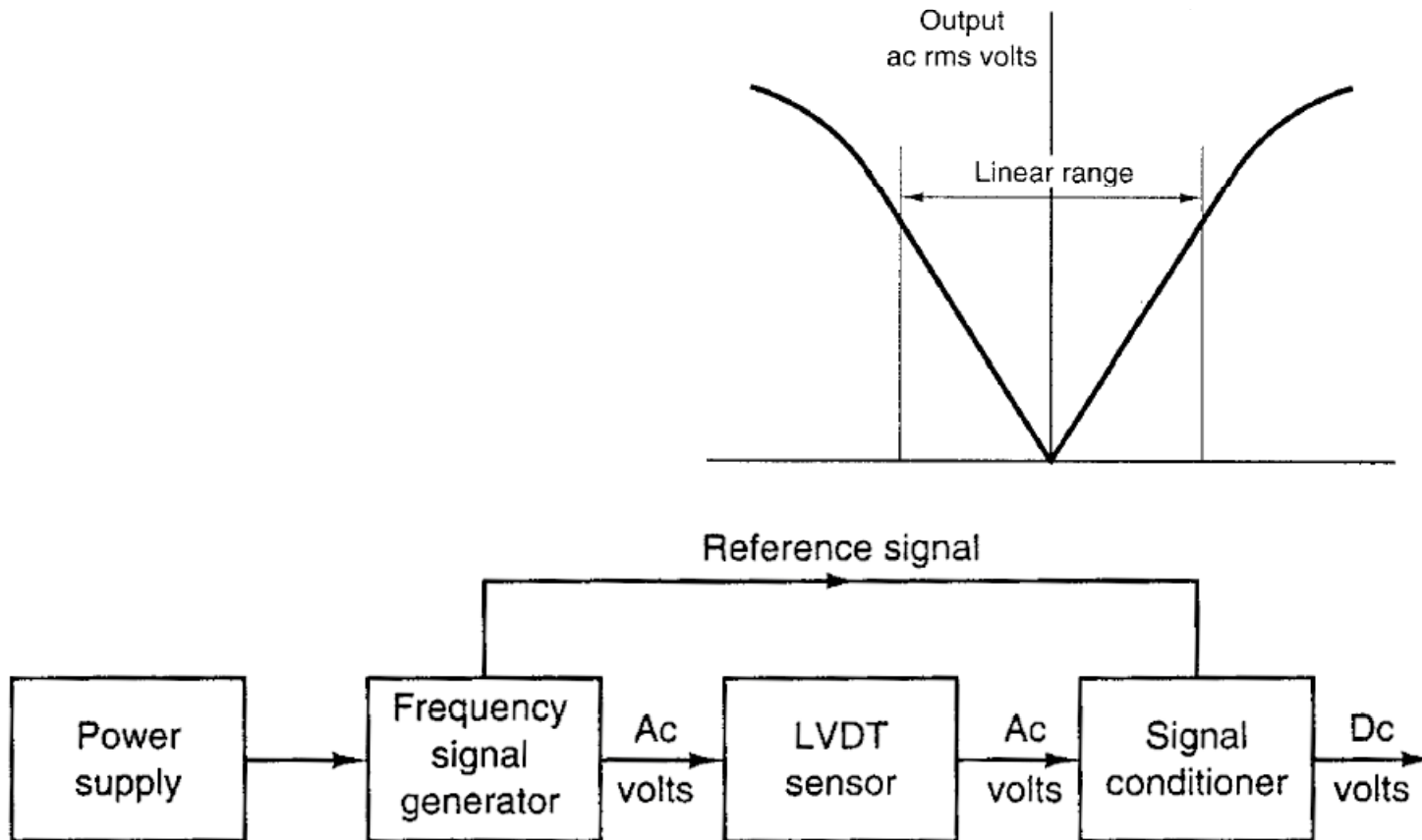
Misure di spostamento

L'avvolgimento primario dell'LVDT è alimentato in AC (1-10 kHz, 0.5-10 V) da un apposito oscillatore.

Il flusso magnetico prodotto si accoppia attraverso l'equipaggio mobile con gli avvolgimenti secondari.

La differenza delle tensioni indotte è proporzionale allo spostamento dell'equipaggio mobile dal centro

Misure di spostamento



Misure di spostamento

Vantaggi di un LVDT:

- Robustezza meccanica e ambientale
- Basso attrito, quindi alta sensibilità e risoluzione
- Vita a fatica virtualmente infinita
- Sensibilità incrociata praticamente nulla
- Misura assoluta
- Ripetibilità dello zero

Valori tipici:

Portata:	sonda a molla	$\pm 2,5 \div 7,5$ mm
	sonda libera	$\pm 1,25 \div 250$ mm
Sensibilità:	(tipo ac - ac):	$3 \div 250$ mV/V/mm
	(tipo dc -dc):	$0,04 \div 8$ V/mm
Linearità (f.s.):		$< \pm 0,25\%$

Misure di spostamento

RVDT: Rotary Variable Differential Transformer

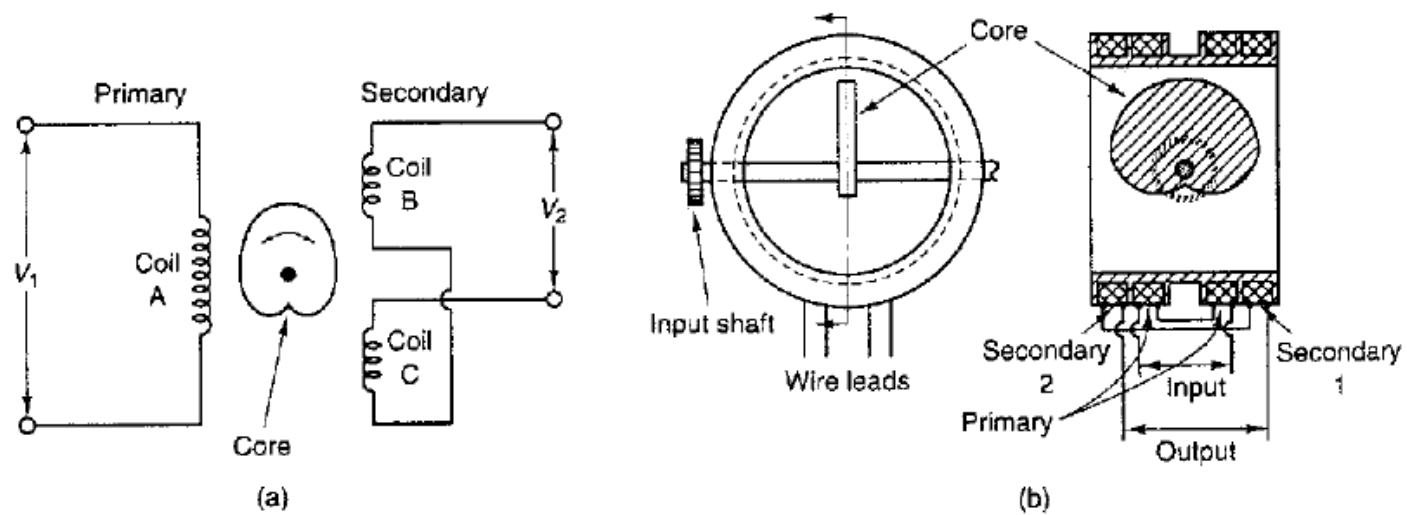


Figure 8.14 Rotary variable differential transformer: (a) schematic; (b) simplified construction.

[(b) Based on Herceg, 1976.]

Misure di spostamento

RVDT

Valori tipici:

Portata: $\pm 30^\circ \div 40^\circ$

Sensibilità (tipo ac - ac): $2 \div 3 \text{ mV/V}^\circ$
(tipo dc - dc): 125 mV/°

Linearità (f.s.): $< \pm 0,3\%$



Misure di spostamento non a contatto

- Trasduttori capacitivi

$$C = K\varepsilon \frac{A}{D}$$

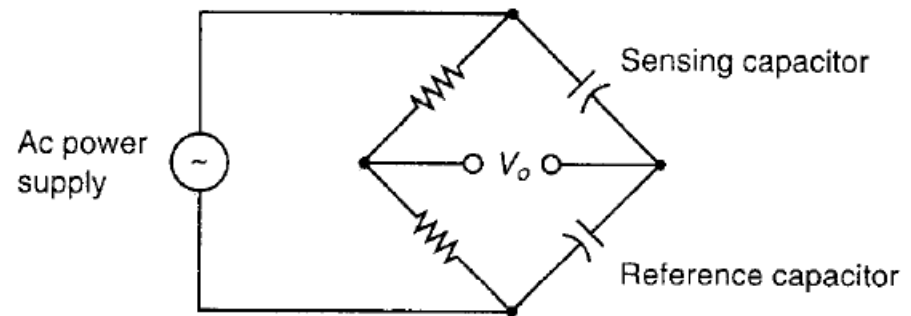
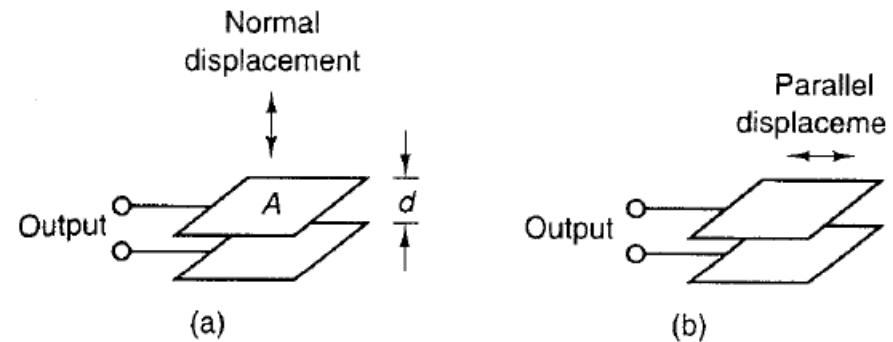
C = capacità [pF]

K = costante dielettrica dell'aria [pF/m]

ε = costante dielettrica del materiale tra le armature [pF/m]

A = area delle armature

D = distanza tra le armature



Misure di spostamento non a contatto

- Trasduttori capacitivi

La capacità può essere fatta variare linearmente con:

- la distanza degli elettrodi

- l'area affacciata degli elettrodi

Misure di spostamento non a contatto

- Trasduttori capacitivi

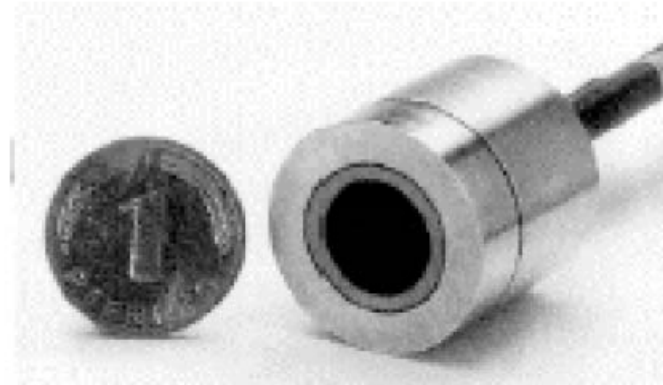
VALORI TIPICI:

Portata: 0,05 ÷ 10 mm

Sensibilità: 1 ÷ 200 V/mm

Risoluzione: 0,02 % f.s.

Linearità: > ± 0,2 % f.s.



Misure di spostamento non a contatto

- Trasduttori capacitivi

Svantaggi:

- sensibili alle variazioni di capacità del cavo
- sensibili alle variazioni delle caratteristiche del dielettrico (acqua, olio, umidità)
- elevata impedenza

Vantaggi:

- elevata sensibilità e stabilità
- poco sensibili alle variazioni di temperatura
- target non conduttore

Misure di spostamento non a contatto

- Trasduttori induttivi a correnti parassite
 - bobina alimentata con corrente alternata (≈ 1 MHz)
 - la bobina genera un campo elettromagnetico oscillante
 - sul conduttore nascono correnti parassite
 - l'intensità delle correnti è proporzionale alla distanza.

VALORI TIPICI:

Portata: 0.25-2.0 mm 1-4 mm

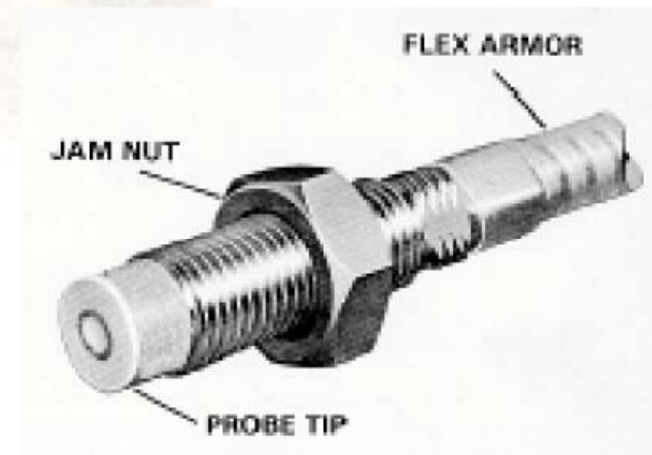
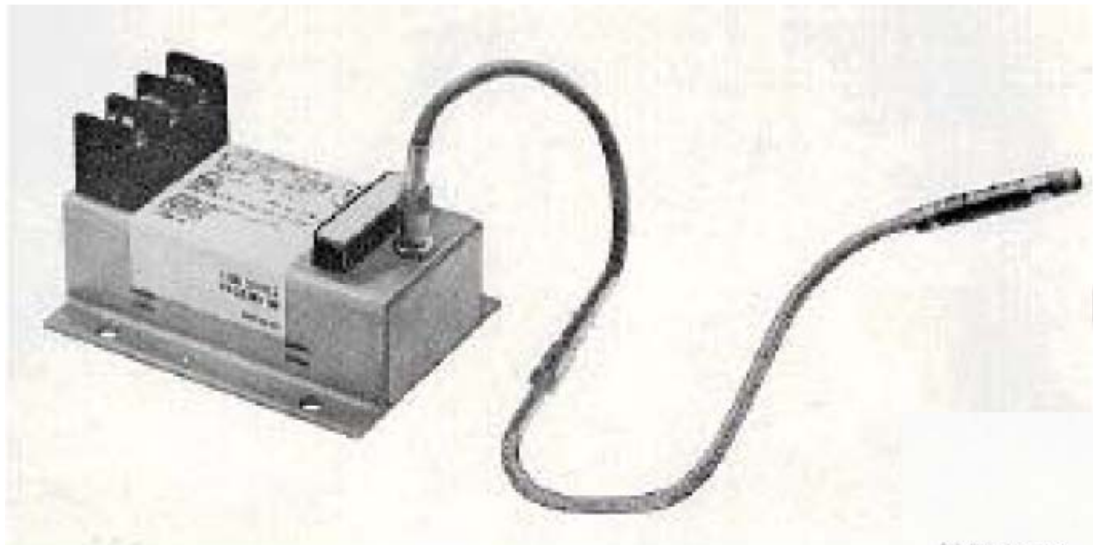
Sensibilità: 8 ÷ 4 V/mm

Diametro sonda: 5 ÷ 14 mm

Linearità: < 0,05 ÷ 0.2 mm

Misure di spostamento non a contatto

- Trasduttori induttivi a correnti parassite

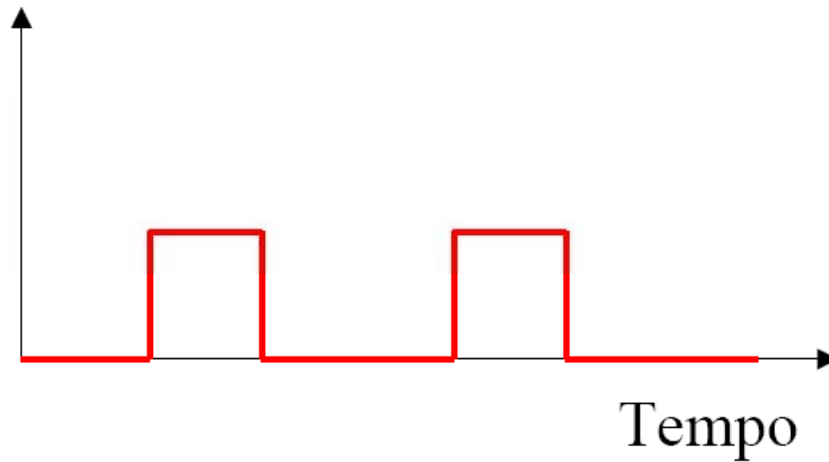


Misure di spostamento digitali

- Encoder

Il segnale di uscita è costituito da una successione di N impulsi per giro
(N = numero di incisioni)

Uscita



Misure di spostamento digitali

Encoder

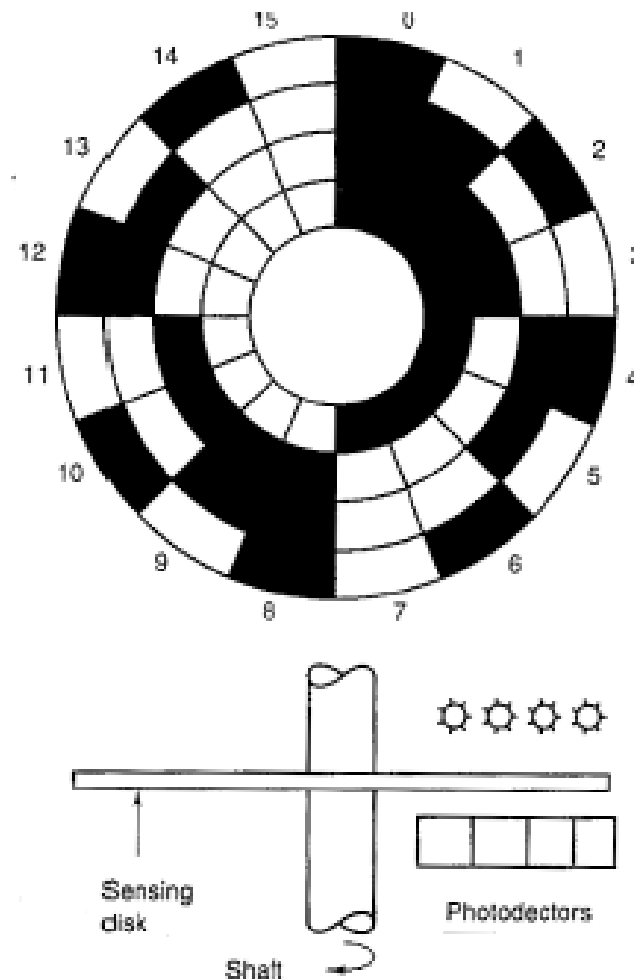
- Il numero massimo di incisioni dipende dal diametro del disco:
1-9000
- La risoluzione angolare è data dal numero di incisioni sul giro
(N impulsi per giro)
- Il conteggio degli impulsi fornisce la rotazione $\theta = n \cdot 360/N$
- Possono essere utilizzati per misurare la velocità angolare di un albero misurando Δt

$$\omega = \Delta\theta / \Delta t$$

Misure di spostamento digitali

Encoder assoluto

- Disco codificato con n piste (bit) che vengono lette simultaneamente fornendo un'uscita in codice (binario, Gray)
- Per ogni settore angolare si ha un codice differente
- Con un solo disco il numero di settori angolari N è pari a: $N = 2^n$
- Le piste vengono lette da N fotorilevatori indipendenti



Misure di spostamento digitali

Limitazione sulle velocità massime (considerazione generale sulla massima frequenza)

La capacità dei cavi limita la frequenza massima in quanto il cavo funziona come un condensatore che, caricandosi e scaricandosi, arrotonda i fronti d'onda e rende impossibile la misura

Misure di velocità

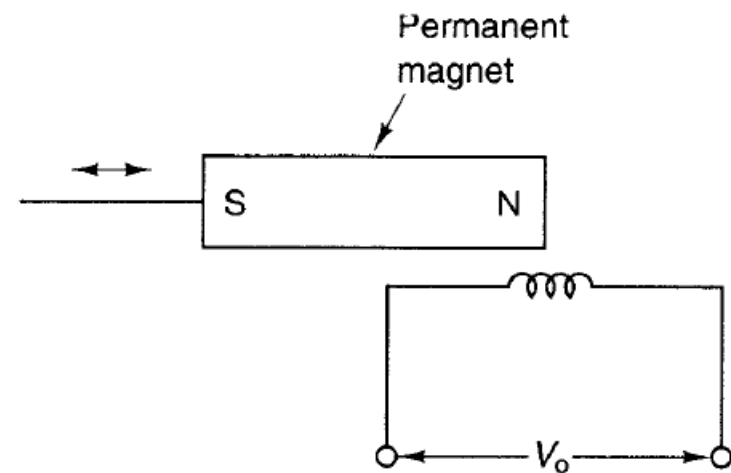
- LVT Trasduttore lineare di velocità

$$E = Blv$$

E = tensione in uscita

B = densità' flusso magnetico

l = lunghezza conduttore



Misure di velocità

- LVT Trasduttore lineare di velocità

Valori tipici:

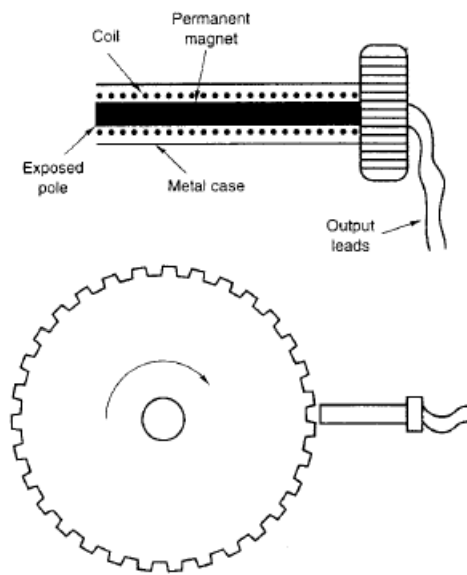
- sensibilità: 2 - 20 mV/ mms-1
- intervallo di linearità: 10 - 500 mm
- linearità: $\pm 1\%$ f.s.

Caratteristiche:

- autoalimentati
- elevato guadagno (anche senza amplificatori)
- nessun contatto tra bobine e nucleo (attrito molto basso e usura praticamente nulla)

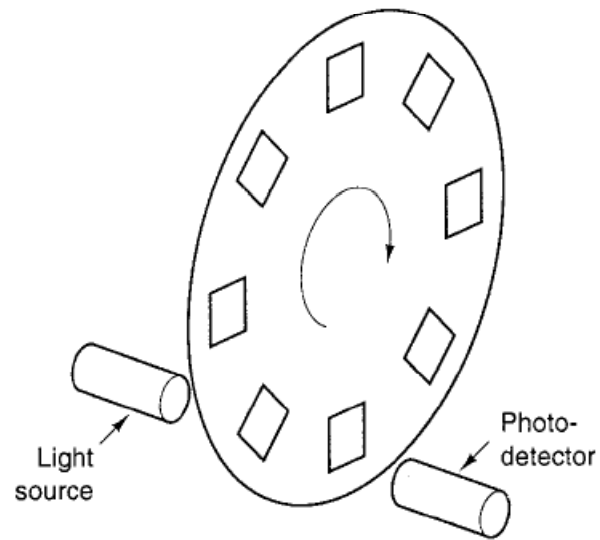
Misure di velocità

- Pick-up magnetico o ottico



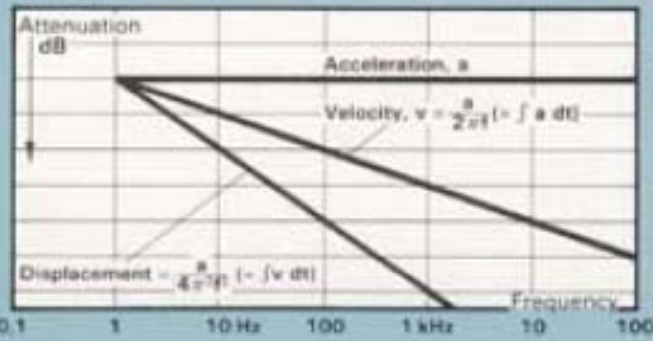
Misure di velocità

- Tachimetrica

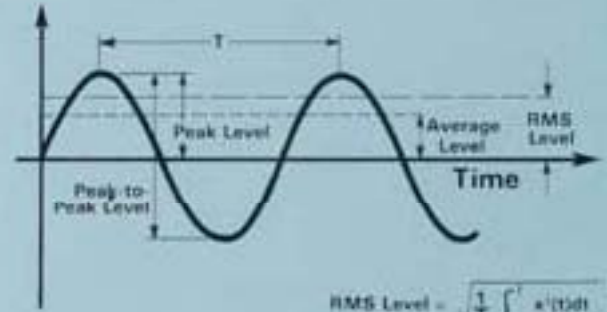


Misure di accelerazione

- Accelerometri piezoelettrici
- Accelerometri piezoresistivi
- Servo accelerometri



Units to ISO 1000	
Displacement:	m, mm, μm
Velocity:	m/s, mm/s (or ms^{-1} , mms^{-1})
Acceleration:	m/s^2 (ms^{-2}) (Note: $1g = 9.81 \text{ m/s}^2$)



$$\text{RMS Level} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

$$\text{Average Level} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt$$

Logarithmic Scales and Decibels

Rec. No. _____
 Date _____
 Sign _____
 GP 0124 Multiply Freq. Scale by _____ Zero Level: _____

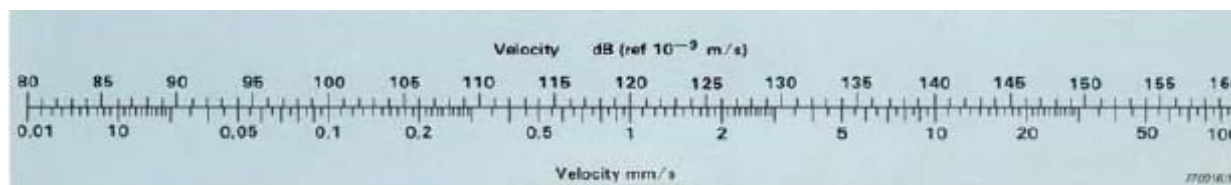
For Amplitude Ratios:

$$N(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{a_{\text{meas}}}{a_{\text{ref}}} \right)$$

Number of Decibels (N) is derived from the ratio of the Measured Level (a_{meas}) to the Reference Level (a_{ref}).

Decibel Reference Levels (ISO R 1683)

Quantity	Definition	Ref. level
Vibratory Acc. Level	$L_a = 20 \log_{10}(a/a_0)$ dB	$a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$
Vibratory Vel. Level	$L_v = 20 \log_{10}(v/v_0)$ dB	$v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$
Vibratory Force Level	$L_f = 20 \log_{10}(F/F_0)$ dB	$F_0 = 10^{-6} \text{ N}$

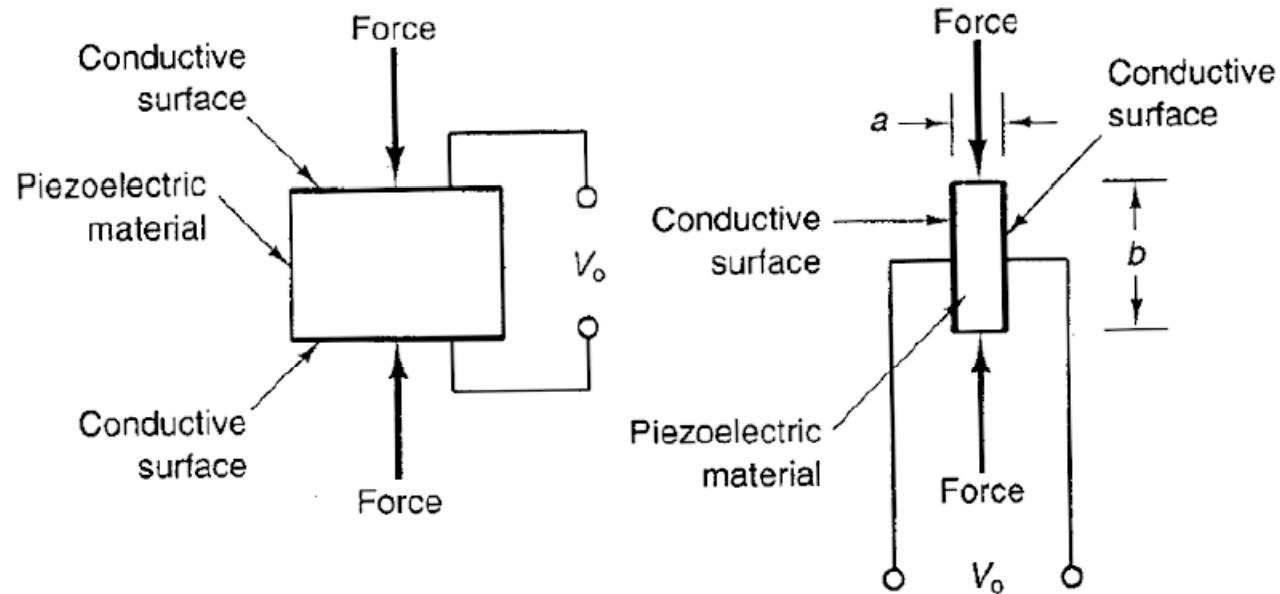


Misure di accelerazione

- Accelerometri piezoelettrici

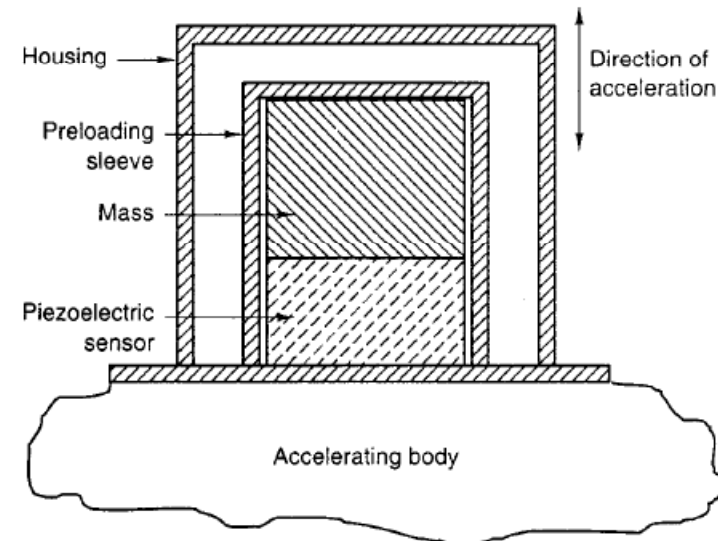
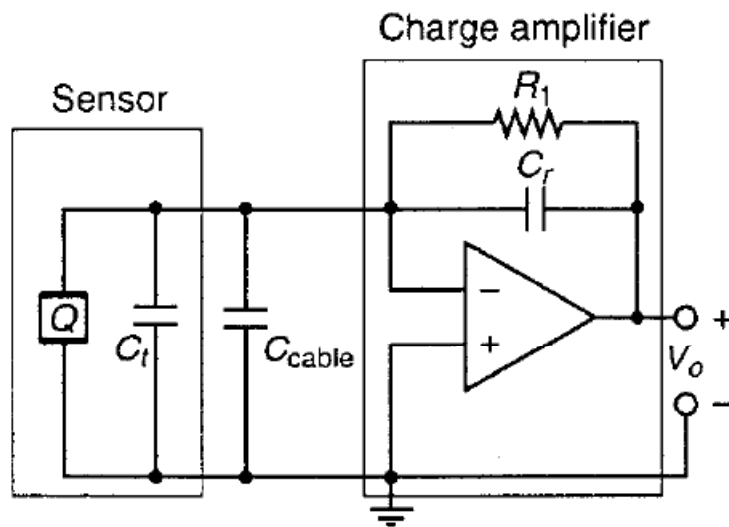
$$q = K_p F \quad V_o = S_v p t$$

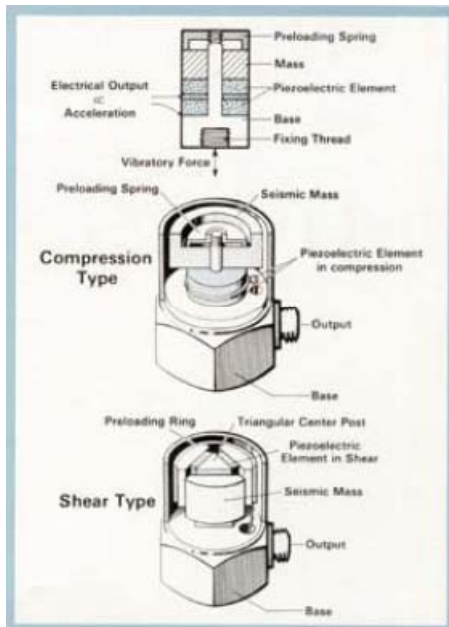
q =carica, K_p =cost.piezoelettrica, F =forza, S_v =sensibilità in tensione, p =pressione, t =spessore



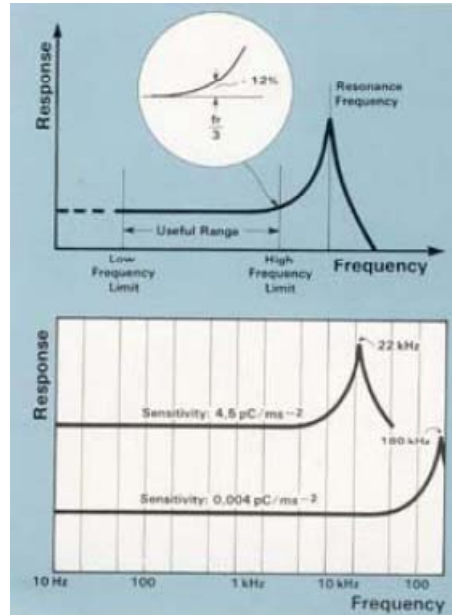
Misure di accelerazione

- Accelerometri piezoelettrici

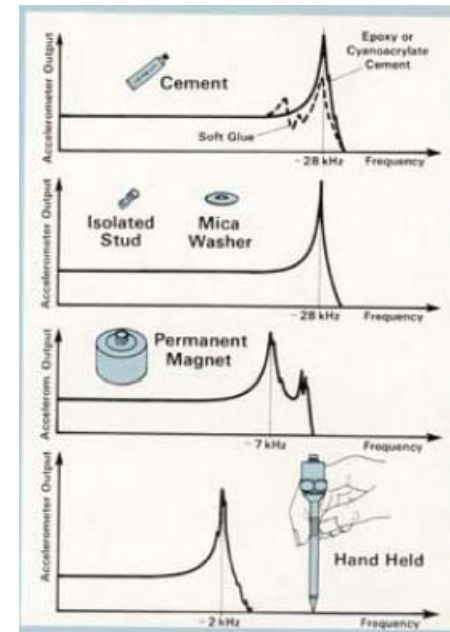




Accelerometer Characteristics (Sensitivity, Mass and Dynamic Range)

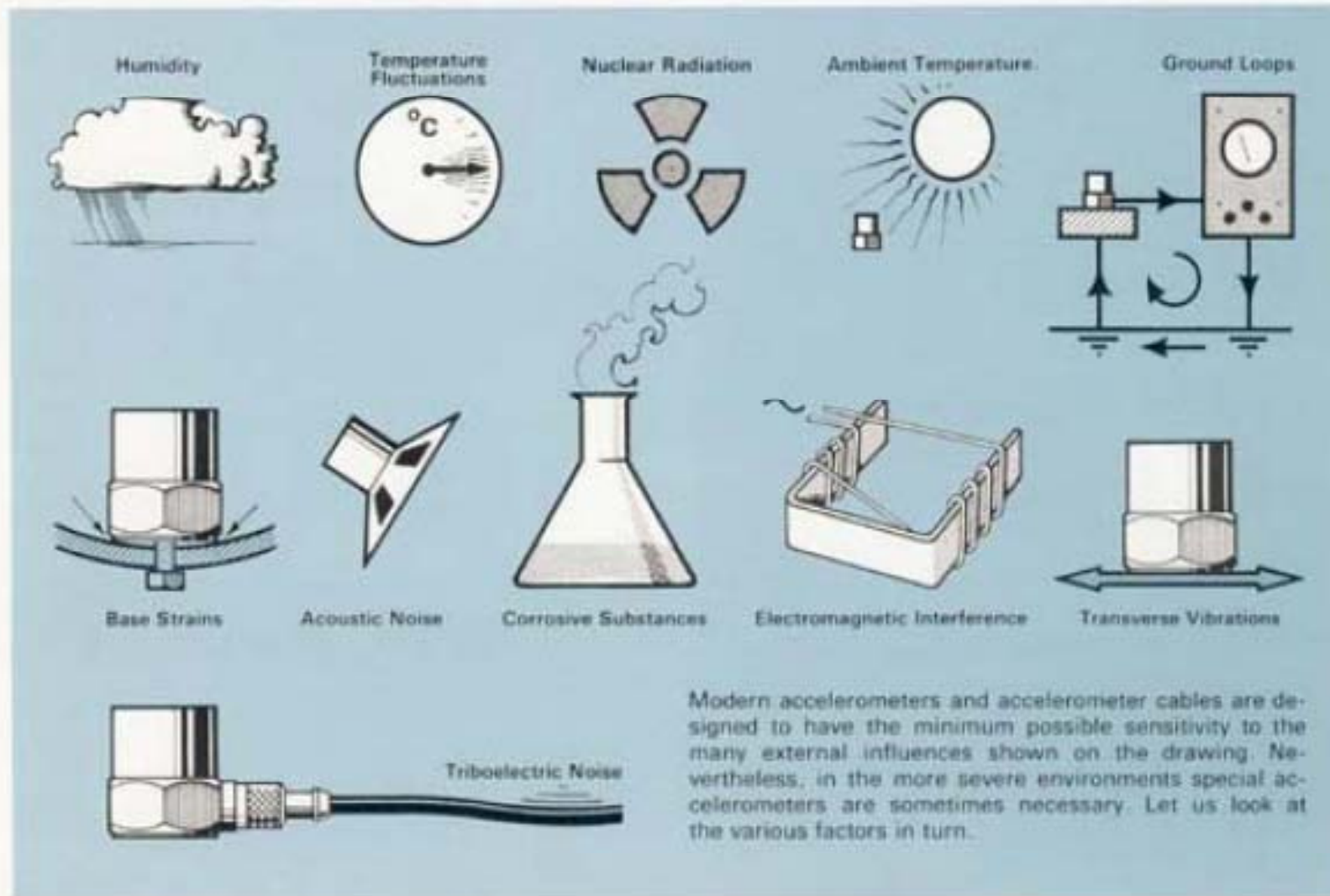


Accelerometer Frequency Range Considerations



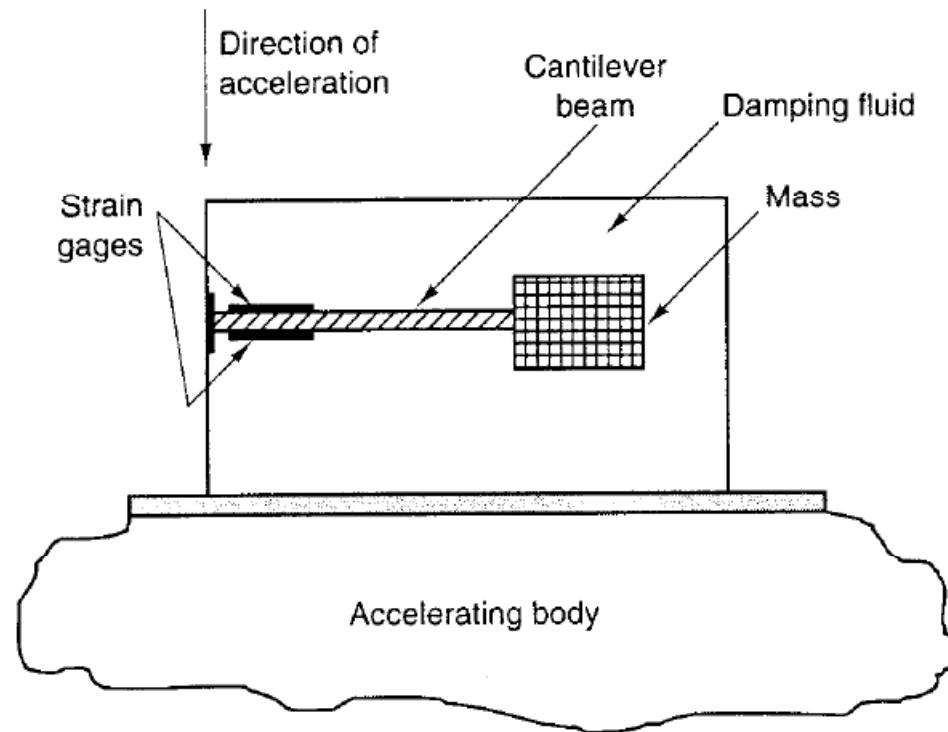
Choosing a Mounting Position for the Accelerometer

The Influence of Environment — General



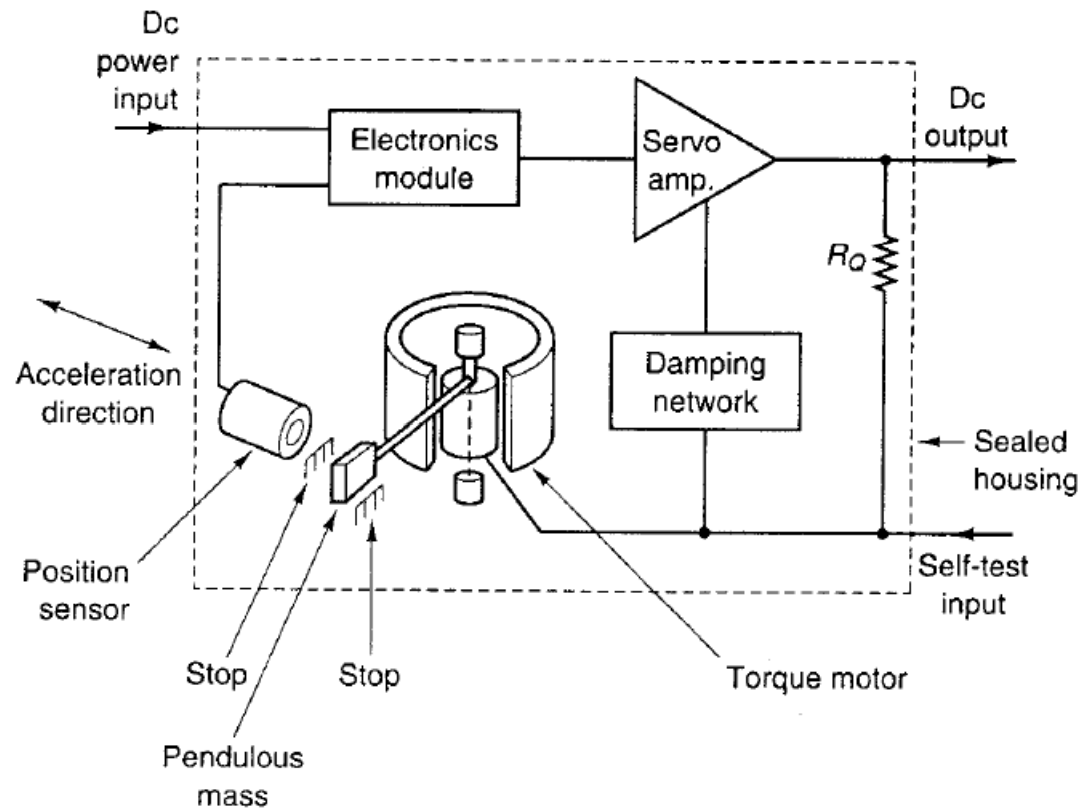
Misure di accelerazione

- Accelerometri resistivi



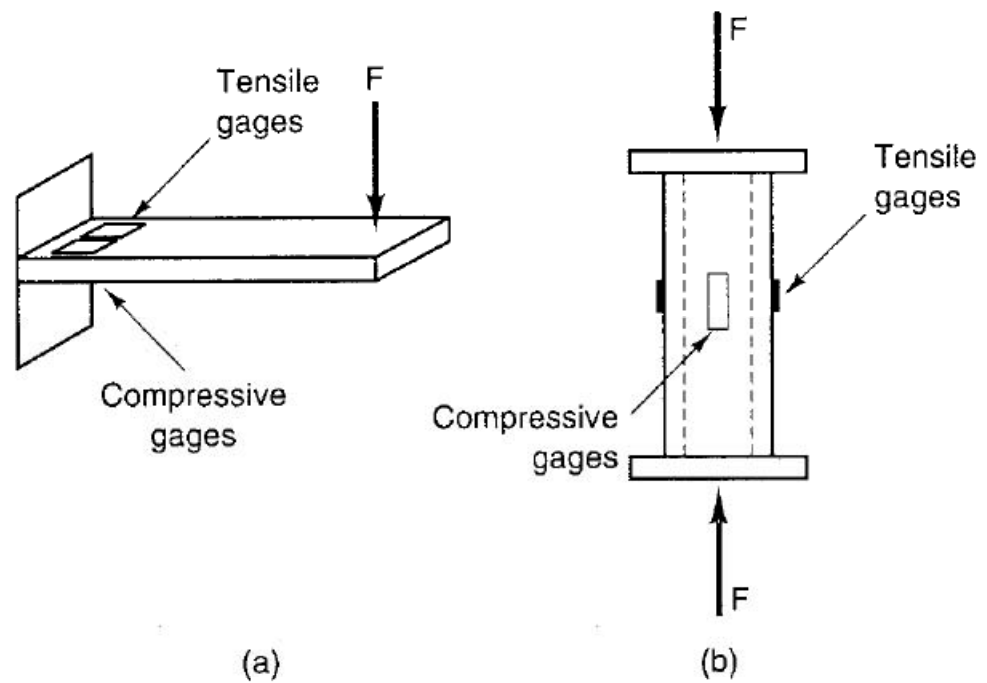
Misure di accelerazione

- Servoaccelerometri



Misure di forza

- Celle di carico estensimetriche (statiche) o piezoelettriche (dinamiche)



Misure di forza

- Celle di carico

