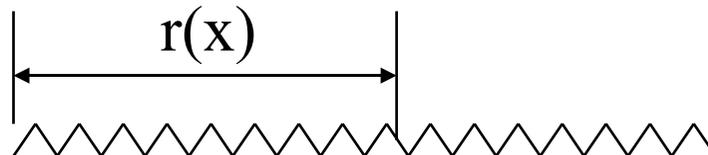

TRASDUTTORI

TRASDUTTORI

- Trasformazione di segnali fisici di natura diversa in segnali elettrici.
- Basati su principi fisici (es. potenziometro, distanza da un riferimento).
- Quale grandezza fisica misura e quale grandezza elettrica emette.
- Ordine di grandezza della misura fisica ($\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow$ termocoppia, piccole variazioni di $T \Rightarrow$ termoresistenze).
- Dinamica del segnale elettrico emesso (amplificazione, raddrizzamento, ...).
- Data-sheet
- Risoluzione (es. potenziometro)



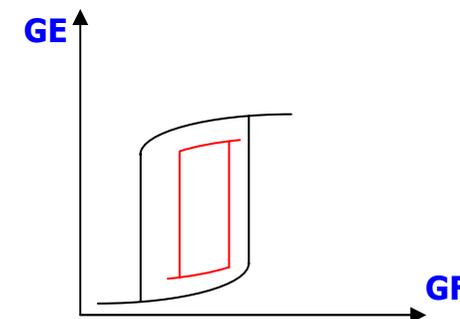
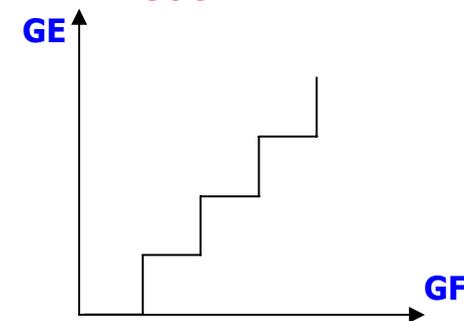
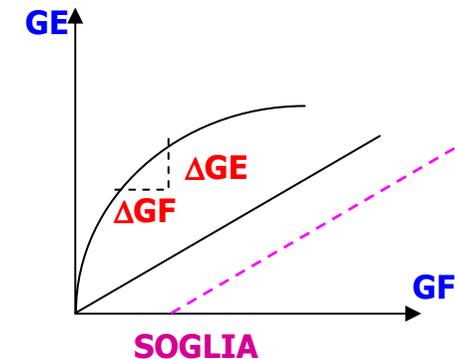
CARATTERISTICHE TRASDUTTORI

STATICHE

- **RELAZIONE INGRESSO-USCITA: il problema della linearità**
- **SENSIBILITÀ ($\Delta GE/\Delta GF$) (costante nel caso ideale, altrimenti compensazione)**
- **SOGLIA DI FUNZIONAMENTO (trasduttore pressione)**

- **RISOLUZIONE (minima variazione della grandezza fisica valutabile)**

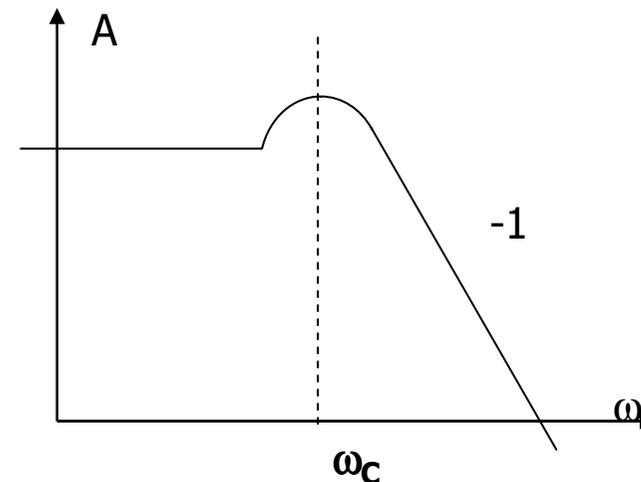
- **ISTERESI (memoria dipendente anche dal fondo scala)**
- **CONDIZIONI AMBIENTALI (temperatura, pressione, bande di valori)**



CARATTERISTICHE TRASDUTTORI

DINAMICHE

- La loro utilità dipende dalle costanti di tempo del processo
- **FUNZIONE DI TRASFERIMENTO E FREQUENZA DI TAGLIO**
stabilità
velocità di risposta (es. forno a microonde e termocoppia)
- **AFFIDABILITÀ:**
funzionamento in condizioni di lavoro previste
graceful degradation
reversibilità in presenza di sovraccarico.



TRASDUTTORI DI POSIZIONE LINEARI

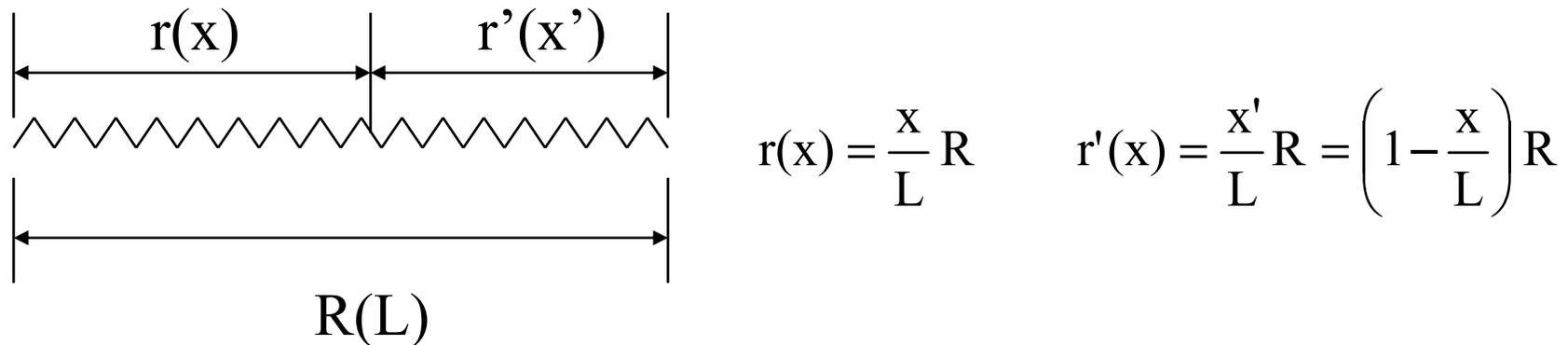
Sensibili o meno alla coordinata di un oggetto anche se fermo (parametrici)

Distinguiamo:

- **TRASDUTTORI DI POSIZIONE LINEARE A VARIAZIONE RESISTIVA O CAPACITIVA** (potenziometro a filo avvolto, elettro-ottico, capacitivo)
- **TRASDUTTORI DI POSIZIONE LINEARE A VARIAZIONE DI ACCOPPIAMENTO MAGNETICO** (differenziale, a riluttanza variabile)
- **TRASDUTTORI DI POSIZIONE ANGOLARE** (potenziometro, synchro, encoder assoluto ed incrementale)

POTENZIOMETRO A FILO AVVOLTO

Sensibile alla coordinata di un oggetto anche se è fermo. Il trasduttore sarà parametrico esprimendo la variazione di un parametro rispetto alla variazione della resistenza



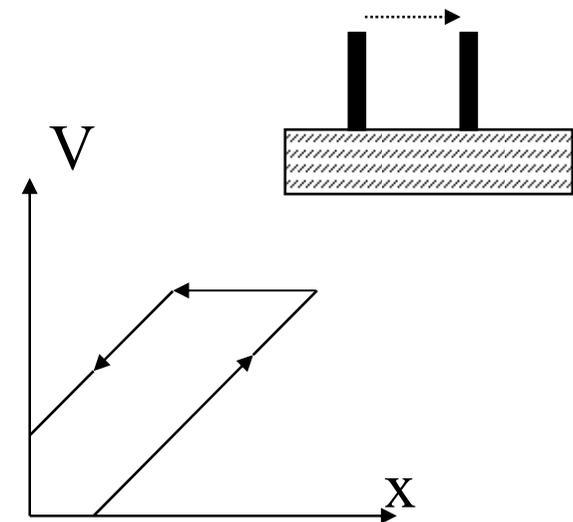
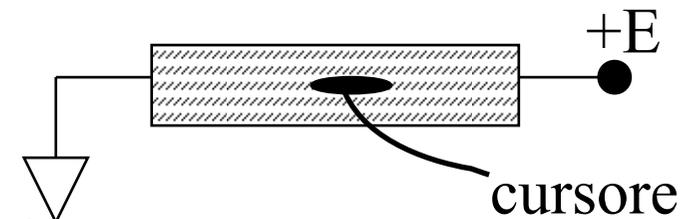
Se il potenziometro è attraversato da una corrente costante la misura di resistenza diventa una misura di tensione

$$V = \frac{r E}{r + r'} = \frac{\frac{xR}{L} E}{R} = \frac{x}{L} E \quad \Rightarrow \quad V \propto x$$

POTENZIOMETRO A FILO AVVOLTO: Problemi

• RISOLUZIONE:

- a) variazione non continua della resistenza, ma *a gradino*. Si potrebbe usare una *resistenza a carbone*, ma invecchiamento, abrasioni e temperatura possono inficiare la misura;
- b) impedenza di uscita variabile e massima al centro ($R/4$). Utilizzo di un buffer di disaccoppiamento;
- c) sensibilità alla temperatura? No, se la variazione è omogenea su tutto il trasduttore.

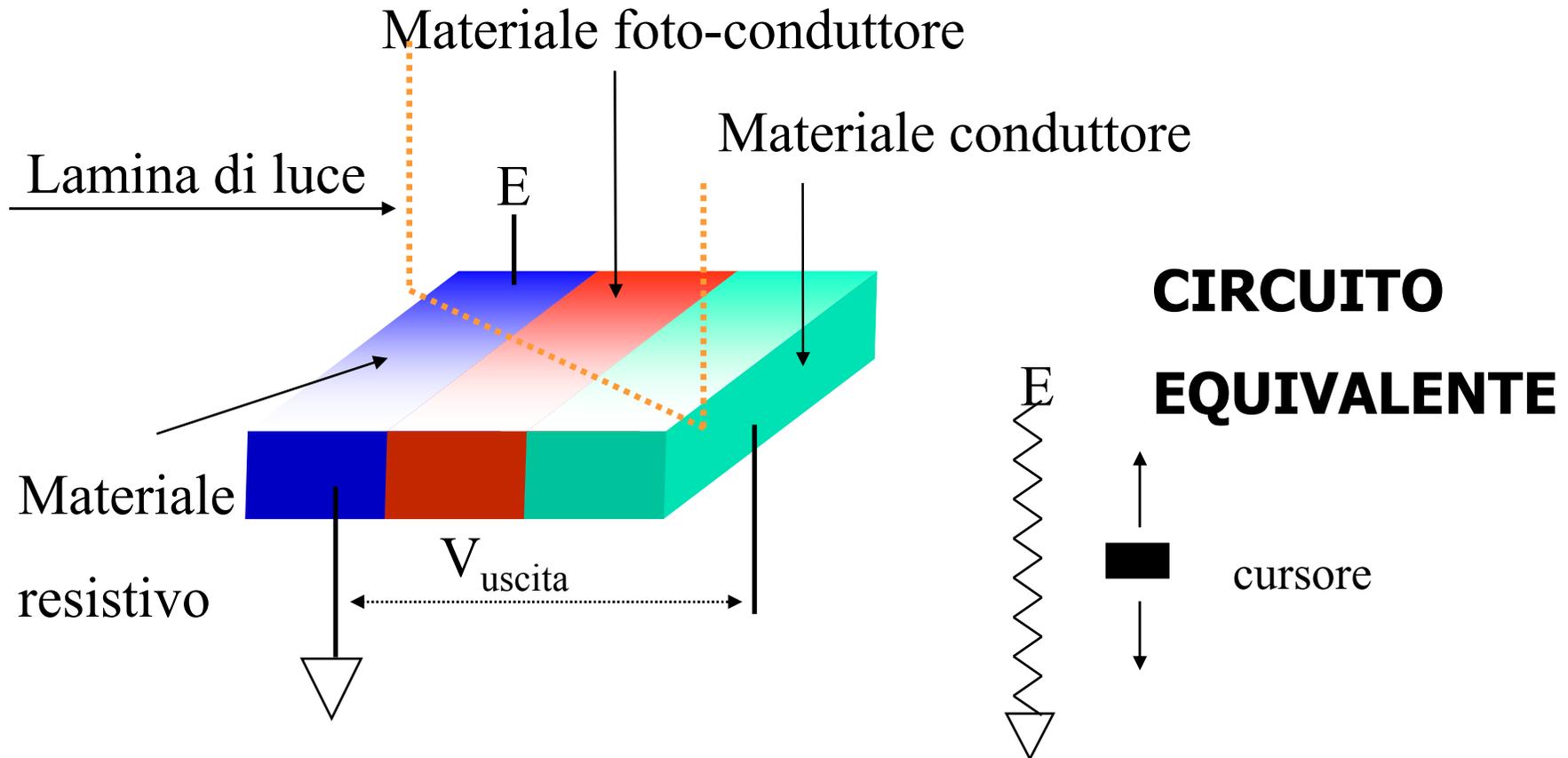


• EFFETTO DI CARICO SULL'OGGETTO FISICO

- a) l'attrito tra cursore e superficie, crea una soglia al di sotto della quale il trasduttore non misura;
- b) effetto dell'elasticità del cursore: possibile isteresi

TRASDUTTORE ELETTRICO-OTTICO

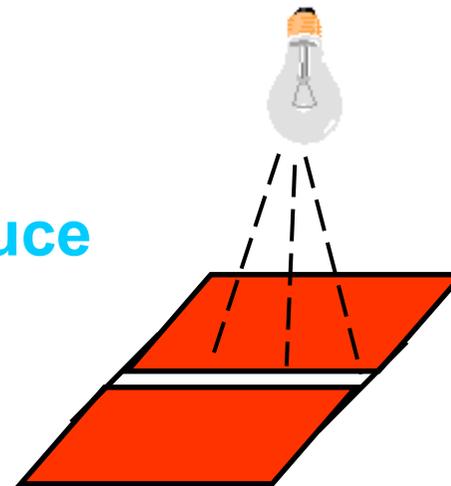
Il collegamento tra cursore e potenziometro è realizzato con materiale foto-elettrico.



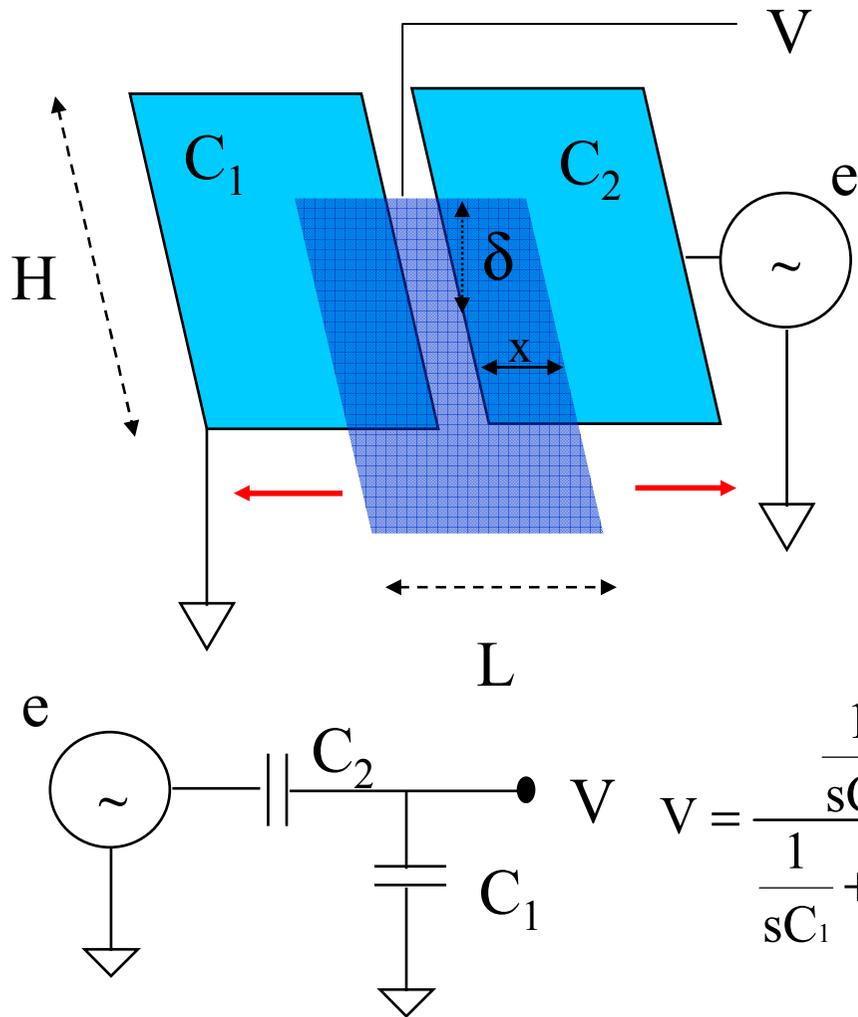
TRASDUTTORE ELETTRICO-OTTICO

- **Resistenza di collegamento dovuta al materiale fotoconduttivo \Rightarrow buffer.**
- **Vantaggi: assenza di contatti meccanici (attrito)**
- **Svantaggi: richiede il buio + complessità di costruzione.**

Realizzazione della lamina di luce



“POTENZIOMETRO” CAPACITIVO



Armatura mobile
sovrapposta a due fisse

$$C_1 = \frac{H(L-x)}{\delta} \epsilon_0 \quad C_2 = \frac{Hx}{\delta} \epsilon_0$$

$$V = \frac{\frac{1}{sC_1}}{\frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2}} e = \frac{C_2}{C_1 + C_2} e = \frac{\frac{Hx}{\delta} \epsilon_0}{\frac{Hx}{\delta} \epsilon_0 + \frac{H(L-x)}{\delta} \epsilon_0} e = \frac{x}{L} e$$

“POTENZIOMETRO” CAPACITIVO

- **Impedenza di uscita**

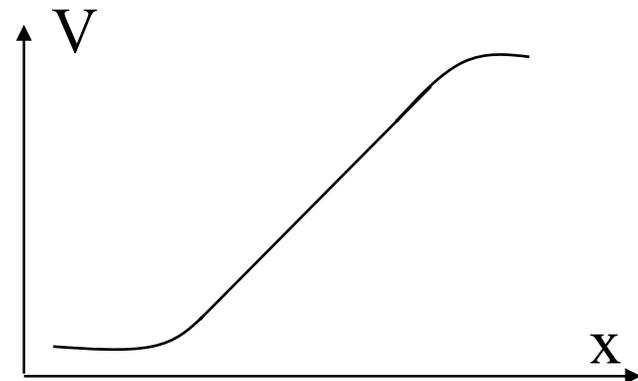
$$Z_o = \frac{1}{s[C_1 + C_2]} = \frac{\delta}{sHL\epsilon_0}$$

Elevata a causa di ϵ_0 ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Alzare la frequenza provoca problemi di raddrizzamento e misura.

- **Effetti di bordo**

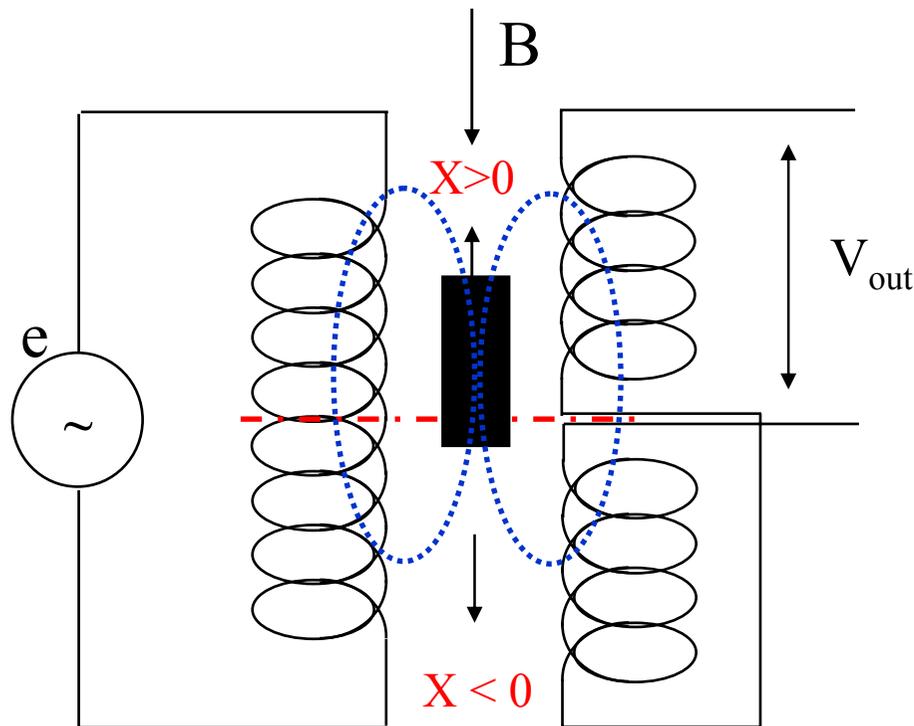
Quanto più le armature sono vicine, tanto più al di sotto e al di sopra di una certa distanza la curva si appiattisce.



- **Assenza di contatti striscianti e vita media + lunga**

TRASDUTTORI A VARIAZIONE DI ACC. MAGNETICO

TRASDUTTORE DIFFERENZIALE



Un primario e due secondari con un nucleo mobile di materiale ferromagnetico, la cui posizione è la variabile da misurare.

I secondari sono in serie ma in opposizione di fase $V_{out} = V_1 - V_2$

Si deduce la direzione di spostamento a seconda che V_{out} sia in fase o meno con e

$\Phi(B)$ = flusso di B presente ragionevolmente SOLO dove c'è il nucleo (approssimazione).

TRASDUTTORE DIFFERENZIALE

- Per ogni spira di una bobina il flusso di B è:

$$\Phi = BS \quad (S \text{ sezione di una spira e anche del nucleo})$$

- Il flusso concatenato a ogni bobina è rapportato al n° di spire attraversate dalle linee di forza del campo magnetico (N_1 sono quelle del primo solenoide nel secondario e N_2 del secondo):

$$\Phi_1 = \Phi N_1 \quad \Phi_2 = \Phi N_2$$

- Per la legge di Faraday-Neumann una variazione di flusso induce una f.e.m nella bobina attraversata dalle linee di forza del campo magnetico.

$$\text{f.e.m.} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{quindi } V_1 = - s\Phi N_1 \quad \text{e } V_2 = - s\Phi N_2$$

- Vale anche il viceversa: una f.e.m variabile nel tempo provoca un flusso di campo magnetico la cui derivata moltiplicata per il n° di spire attraversate è pari alla f.e.m.

TRASDUTTORE DIFFERENZIALE

$$e = -N_p s \Phi = -n_p L s \Phi$$

n_p densità di spire del primario affacciate sul nucleo.

$$N_1 = n_s \left[\frac{L}{2} + x \right] \quad e \quad N_2 = n_s \left[\frac{L}{2} - x \right]$$

Dove n_s densità di spire del secondario affacciate sul nucleo e L lunghezza del nucleo.

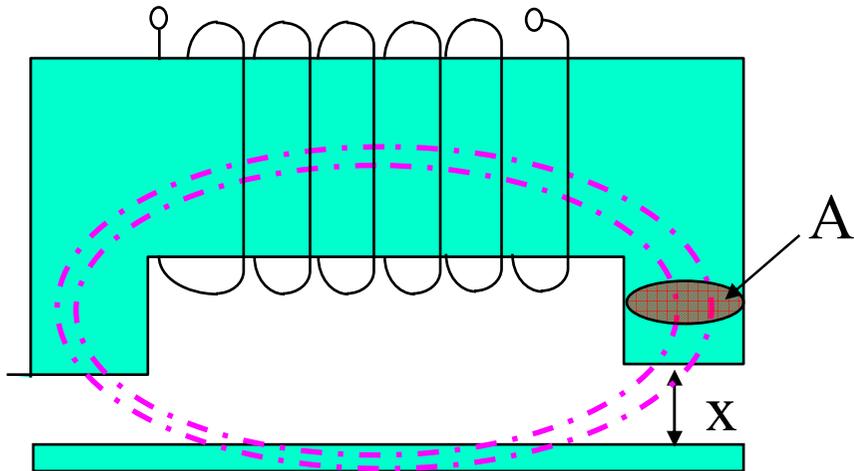
Sostituendo si ottiene:

$$V = V_1 - V_2 = \frac{2n_s}{n_p} \frac{x}{L} e$$

Cioè ancora una relazione di tipo lineare tra la tensione misurata e lo spostamento del nucleo rispetto alla posizione di riferimento (differenziale). Spesso, inoltre, $n_s = n_p$.

Da utilizzarsi a basse frequenze perché l'impedenza di uscita è più bassa ($j\omega Z_L$).

TRASDUTTORE AD INDUTTANZA VARIABILE



Nucleo ferromagnetico a 'C' con lamina mobile ferromagnetica affacciata su di esso.

Più vicina è la lamina, maggiore è il flusso di linee di forza del campo magnetico, e maggiore è l'induttanza del circuito (vedi pagina successiva).

$$R = \text{riluttanza magnetica} = \frac{\text{forza magnetomotrice}}{\text{flusso di } B} = \frac{nI}{\Phi_B}$$

Se il tratto d'aria tra nucleo e lamina è piccolo possiamo considerare il sistema come un circuito ferromagnetico in cui la riluttanza gioca un ruolo paragonabile a quello della resistenza nei circuiti elettrici e a cui si può applicare una definizione simile

TRASDUTTORE AD INDUTTANZA VARIABILE

$$R = \sum_i \frac{L_i}{A_i} \frac{1}{\mu_i}$$

L_i = lunghezza i-simo ramo

A_i = ampiezza sezione i-simo ramo

μ_i = permeabilità i-simo ramo (1 aria, 1000÷10000 materiali ferromagnetici)

Per il circuito in figura ai fini della riluttanza contano i tratti di aria. Quindi:

$$R = \frac{2x}{A\mu_{\text{aria}}}$$

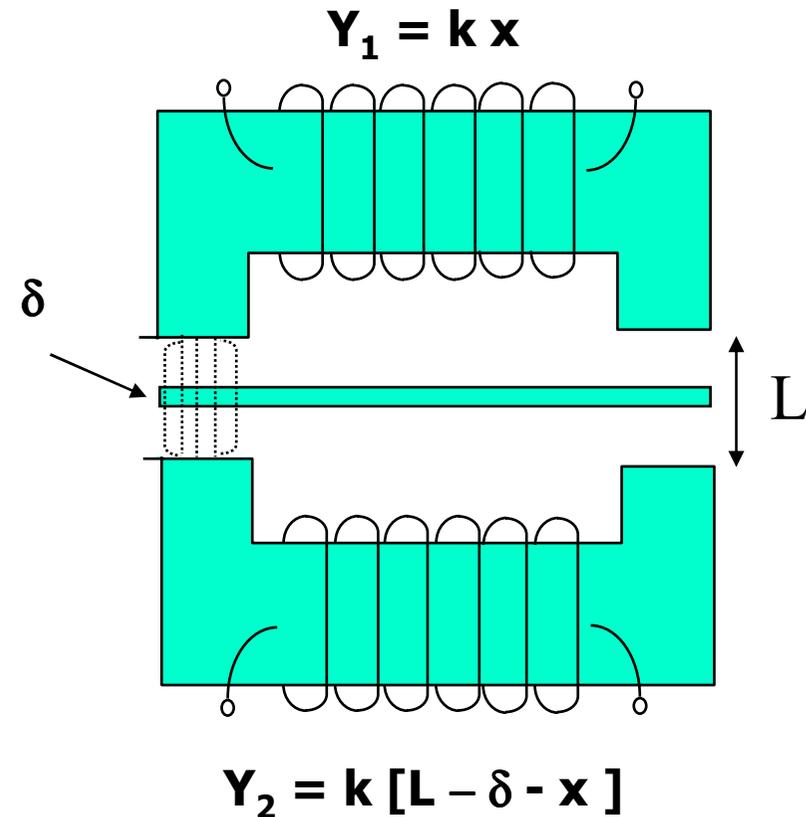
Essendo l'induttanza L pari a:

$$L = \frac{n\Phi_B}{I} = \frac{n^2 I}{R I} = \frac{n^2 A \mu_0}{2x} \quad \Rightarrow \quad Y \text{ (ammettenza)} = \frac{2x}{\omega n^2 A \mu_0}$$

Se ne deduce che fornendo una tensione al circuito e misurando la corrente $I=VY$ ottenuta si ottiene una misura \propto allo spostamento x

TRASDUTTORE AD INDUTTANZA VARIABILE

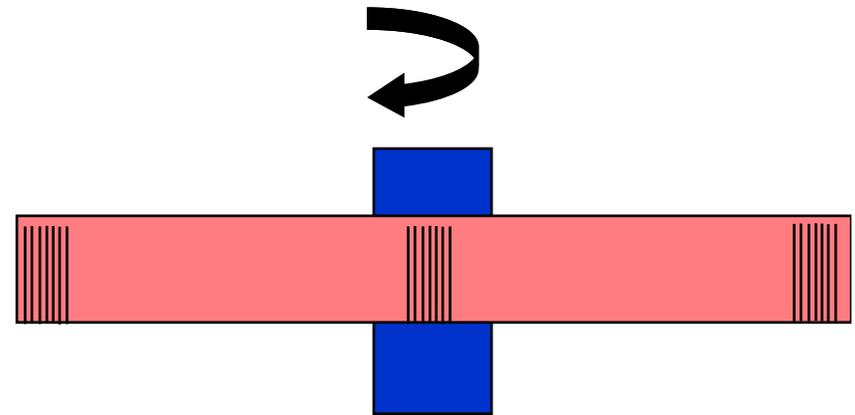
- Utilizzo del trasduttore in coppia.
- All'aumentare della distanza x compensano lo 'sfrangiamento' delle linee di forza che cambiano la sezione A .
- Uso di spire per regolare la sensibilità del trasduttore
- Utilizzo di un circuito ponte per effettuare la misura differenziale.
- Possibilità di misura anche a frequenze relativamente basse
- Applicazione in misura senza contatto di oggetti molto caldi.
- Campo di frequenze dell'ordine di 100Hz-1 KHz.



TRASDUTTORI DI POSIZIONE ANGOLARE

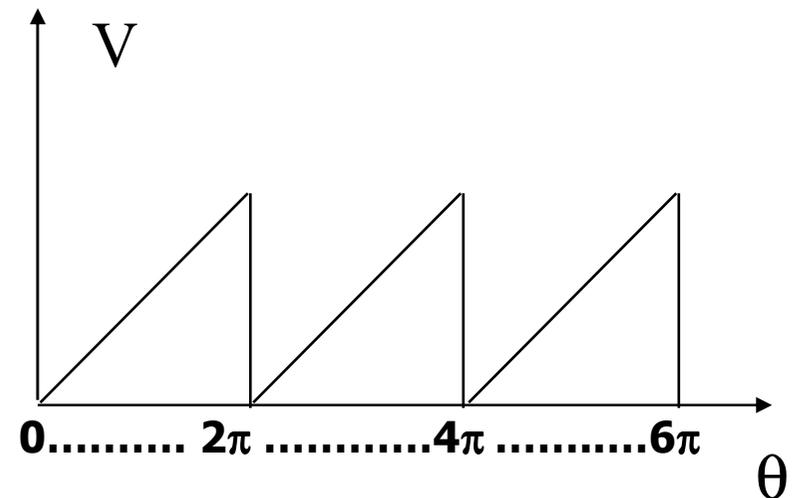
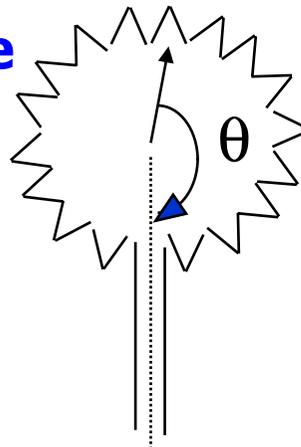
Situazione non agevole (es. posizione di un oggetto mobile su rotaia) per consentire l'utilizzo di un trasduttore di posizione lineare

Conversione da posizione lineare a posizione angolare tramite viti con portaoggetti rotanti. Posizione corrispondente a più angoli giri.



Potenziometro circolare

$$V = \frac{\vartheta}{2\pi} E \quad \text{con } \vartheta < 2\pi$$



bassa dinamica d'ingresso

presenza di una "zona di non misura"

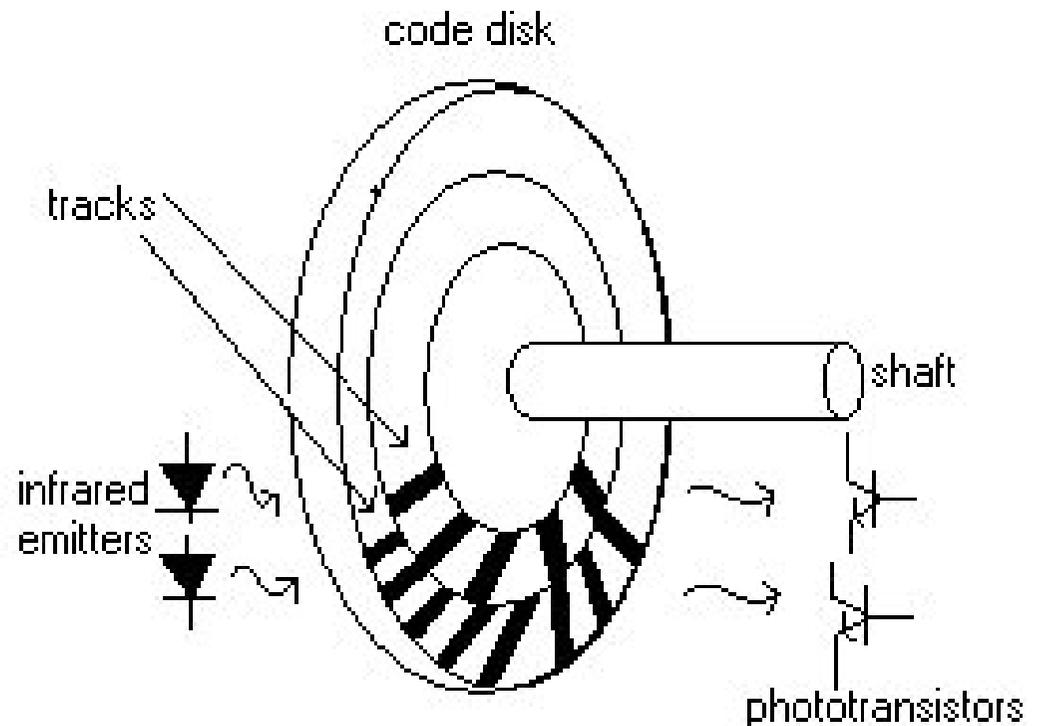
possibile ambiguità

ENCODERS (sistemi di misurazione ottica)

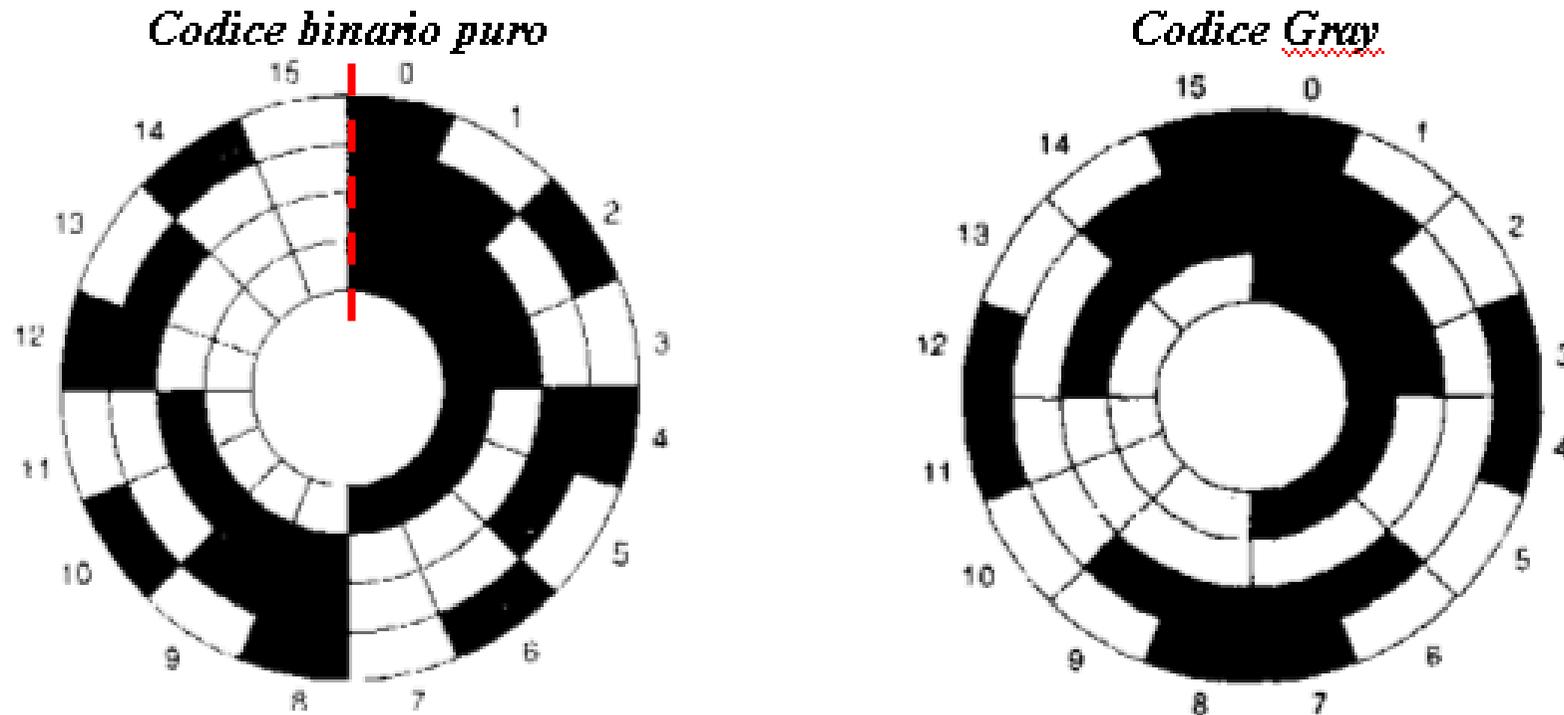
Disco costituito da finestre trasparenti alternate ad altre opache al passaggio di luce emessa da LED.

Ricezione tramite fototransistor.

Ogni finestra corrisponde ad una informazione binaria.



ENCODER ASSOLUTO



Codifica angolare con 16 valori diversi per ogni angolo \Rightarrow 4 bit : si usano 4 corone concentriche con finestre opache/trasparenti a 1 a 1, a 2 a 2, a 4 a 4 e a 8 a 8. Risoluzione 22.5°

Saranno necessarie 4 coppie LED + fototransistor opportunamente allineate.

Codifica Gray per evitare che 2 o più bit non commutino allo stesso tempo (errori di allineamento ed illuminazione).

ENCODER ASSOLUTI

- Costi non elevati e buona precisione nella determinazione della posizione angolare
- N° di giri?
- Direzione di spostamento?

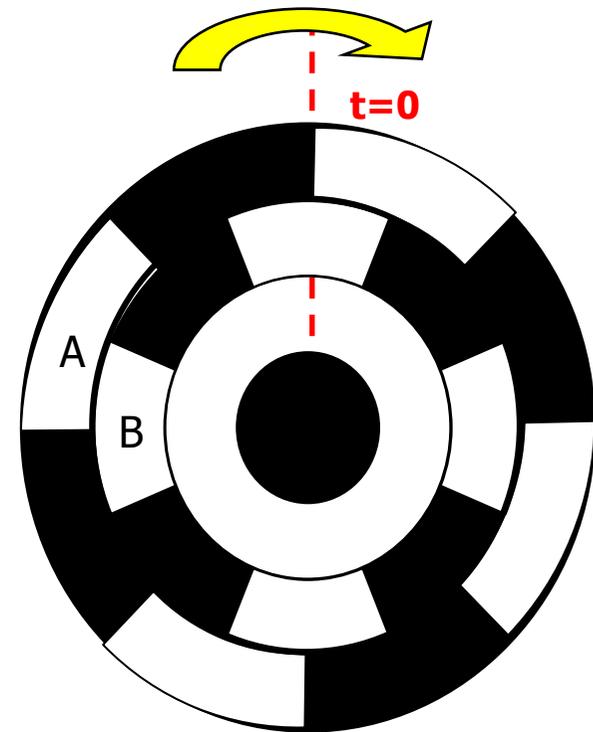
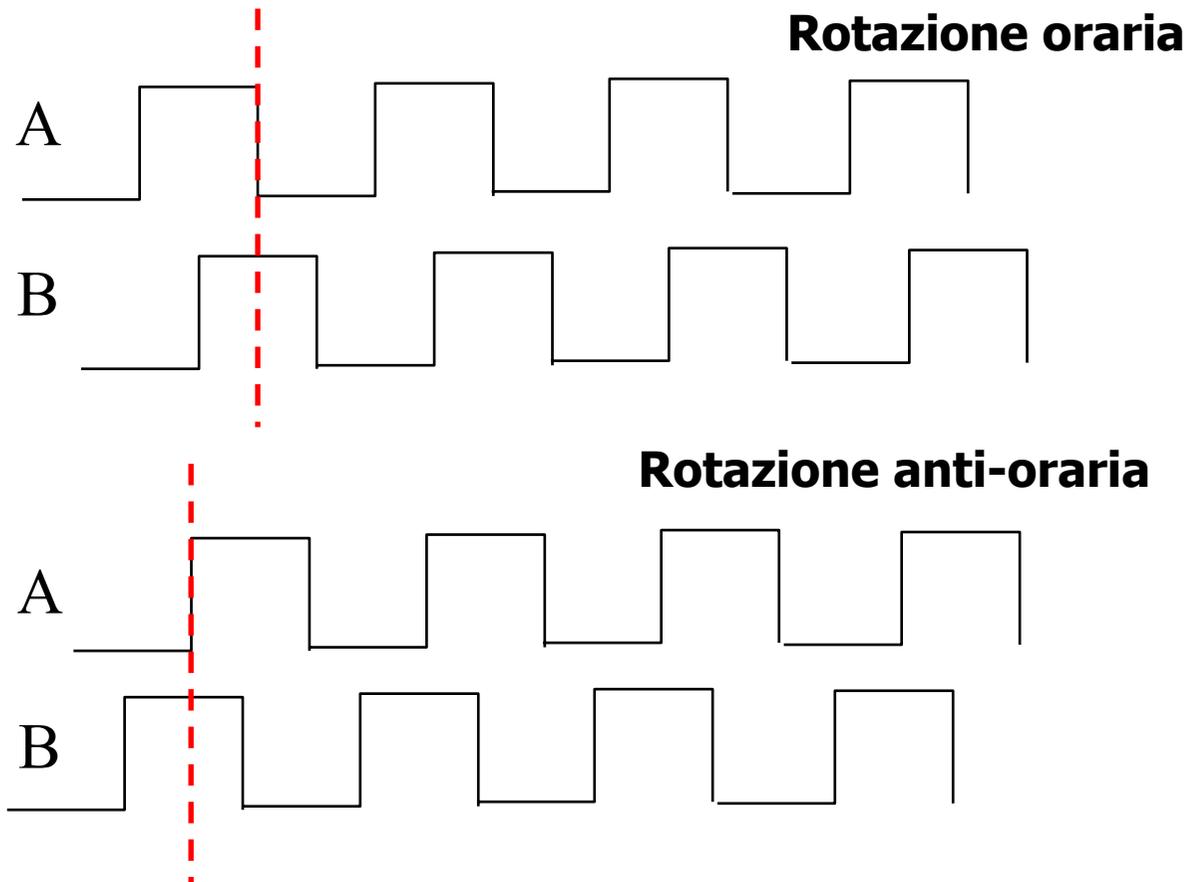
SOLUZIONE

- se la rotazione avviene solo in un senso: conteggio settori esterni tramite contatore hardware (incremento/decremento): quando il conteggio è 16 ho fatto un giro (es. precedente).
- se possibilità di cambiamento di direzione: encoder incrementale.

ENCODER INCREMENTALE

Due corone concentriche sfasate tra loro di $1/4$ di periodo.

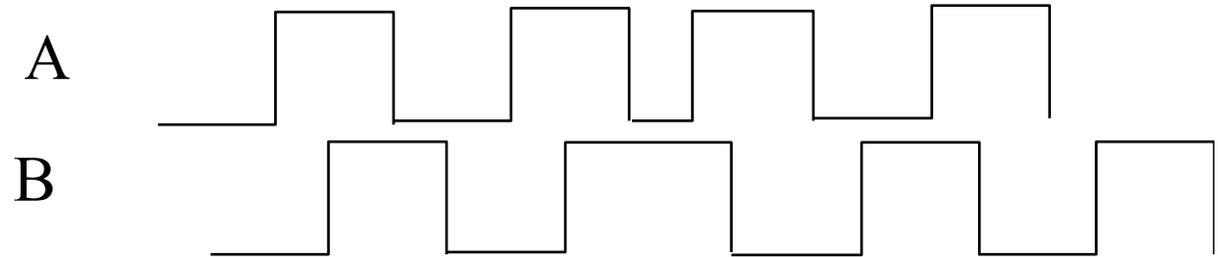
Due coppie di LED/transistor (1 luce, 0 buio).



ENCODER INCREMENTALE

- Minimo angolo misurabile = 1/2 finestra

- Inversione della direzione



- Algoritmo per il conteggio



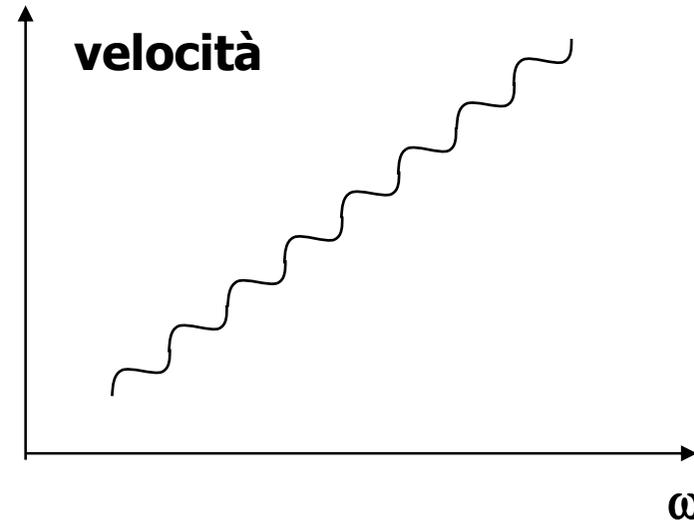
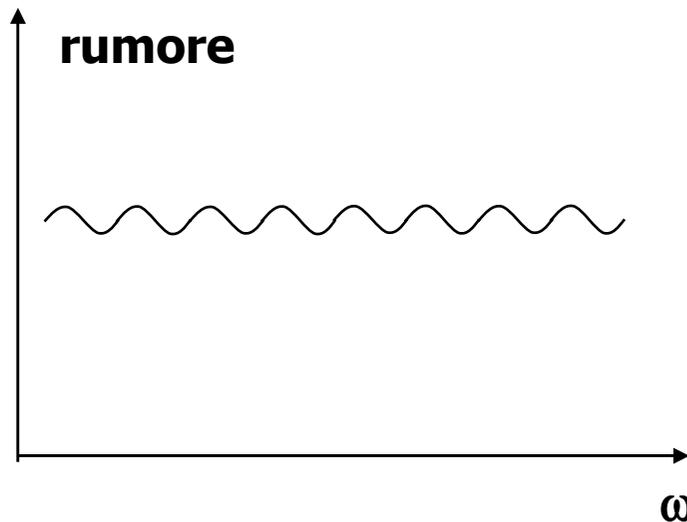
S_1	S_2	S_3
P	0	+1
P	1	-1
N	0	-1
N	1	+1
0	P	-1
1	P	+1
0	N	+1
1	N	-1

- Uscita = impulsi

- Lettura di impulsi da microprocessore

TRASDUTTORI DI VELOCITA'

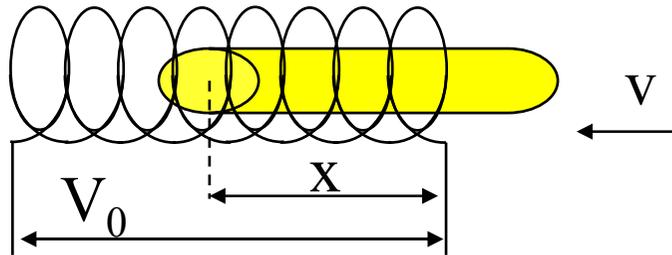
Derivata dell'uscita di un trasduttore di posizione? (e viceversa)



Il rumore agisce alle alte frequenze che vengono esaltate in caso di derivazione. E un filtro LP rischia di tagliare anche le componenti di velocità ad alta frequenza. Inoltre, eventuali non linearità vengono esaltate (es. potenziometro)

Discorso inverso vale a bassa frequenza per la posizione ottenuta da un trasduttore di velocità tramite integrazione (1/s).

TRASDUTTORE DI VELOCITA' LINEARE



Trasduttore elettromagnetico

Nucleo di materiale ferromagnetico mobile all'interno di un solenoide (magnete permanente).

Tensione misurata \propto variazione flusso e quindi alla velocità.

$\Phi_c = N_c \Phi_B$ Φ_B flusso magnete permanente, N_c n° spire concatenate con il magnete
 $N_c = nx$ n numero di spire per unità di lunghezza (densità)

$$V_0 = - \frac{d(N_c \Phi_B)}{dt} = - n \Phi_B \frac{dx}{dt} = - n \Phi_B V$$

•Approssimazioni

•Misura di piccole velocità: se grandi conviene trasformare lo spostamento lineare in angolare e misurare la velocità angolare

CALCOLO VELOCITÀ CON ENCODER - approccio sw

- 2 treni di impulsi A e B
- rilevamento commutazioni
- rilevamento direzione spostamento: avanti (+) o indietro (-)
- utilizzo di contatori (primario ed eventualmente secondario)
- algoritmo (Hp. rotazione oraria > 0)

```
if B commutato
```

```
if B=A count++
```

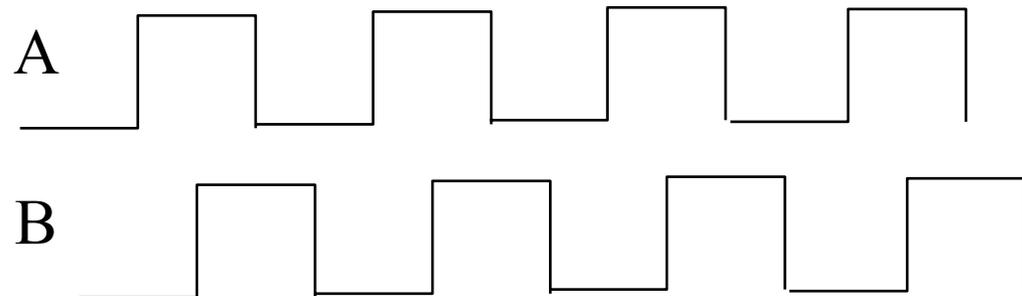
```
else count--
```

```
else if A commutato
```

```
if A=B count --
```

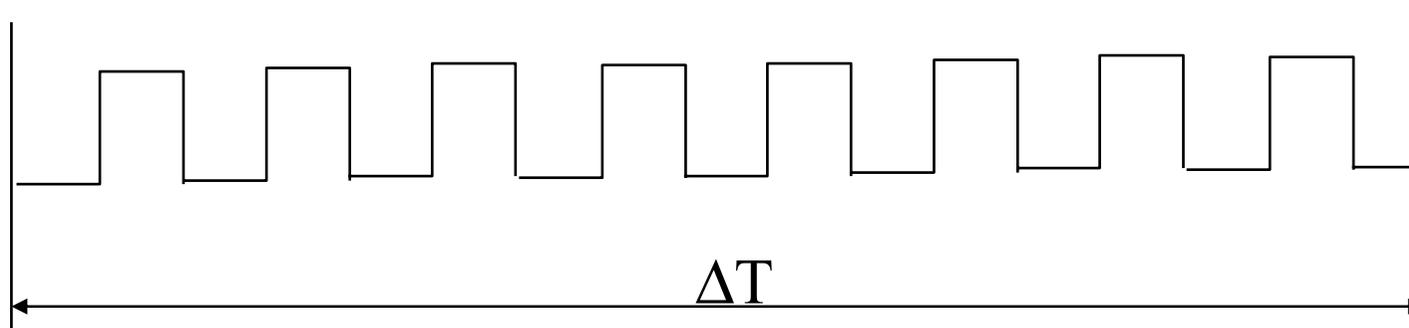
```
else count ++
```

```
end if
```

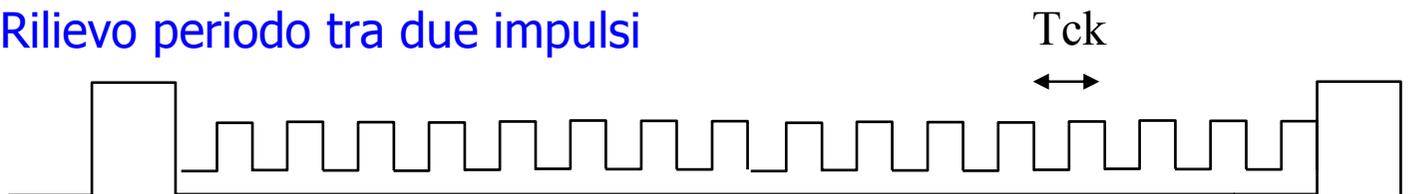


CALCOLO DELLA VELOCITÀ

Conteggio impulsi encoder in un intervallo di tempo noto



Rilievo periodo tra due impulsi

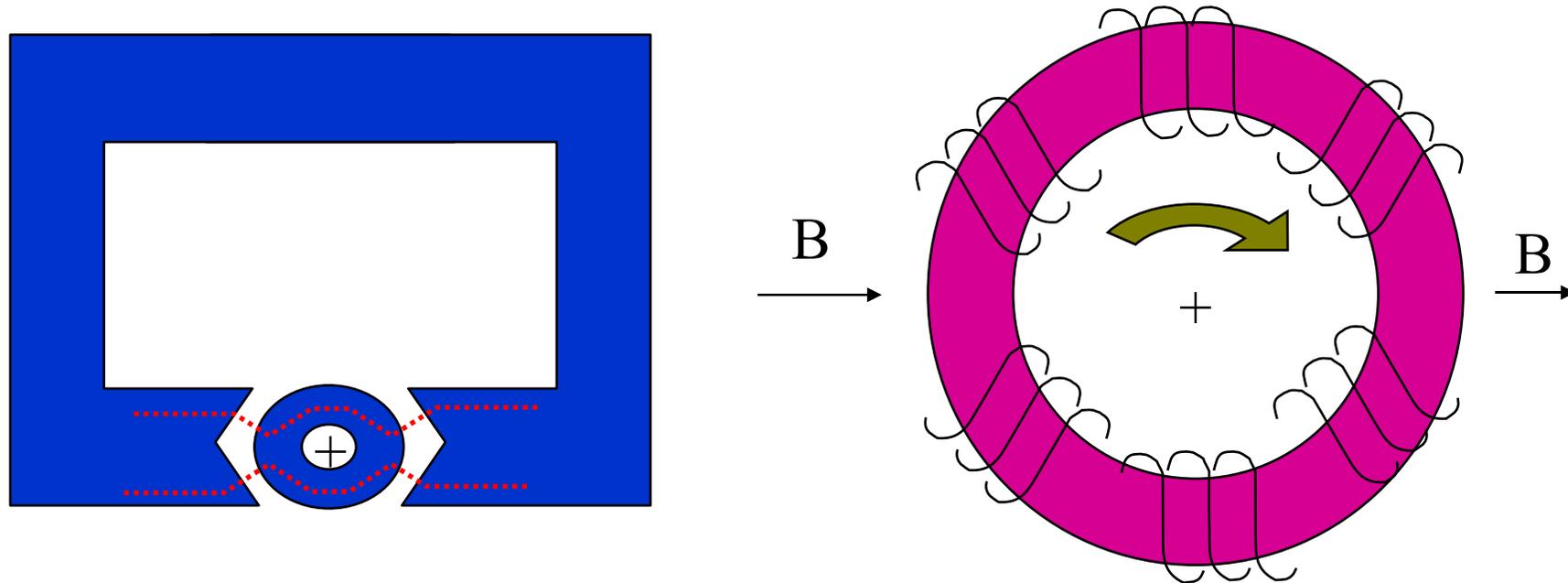


Misura di una velocità media

TRASDUTTORI DI VELOCITA' ANGOLARE

DINAMO TACHIMETRICA (anello di Pacinotti)

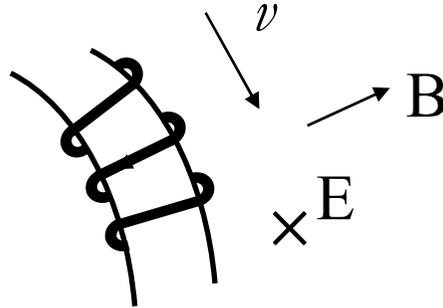
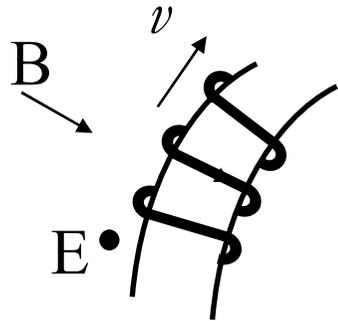
trasforma una velocità in una tensione proporzionale



Le linee di forza si mantengono nel magnete o nell'anello rotante costituito da materiale ad altissima permeabilità magnetica.

L'anello è immerso in campo B che genera per effetto della rotazione un campo E e quindi una f.e.m in ciascuna spira rotante.

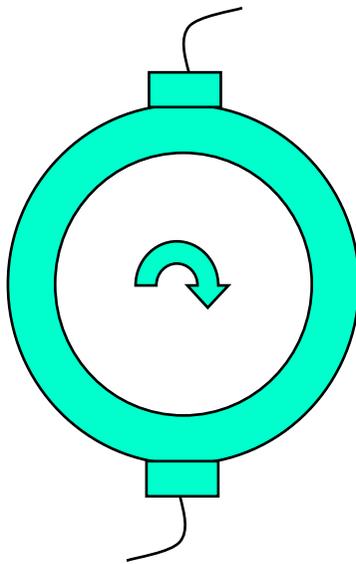
DINAMO TACHIMETRICA



$$E = B \times v$$

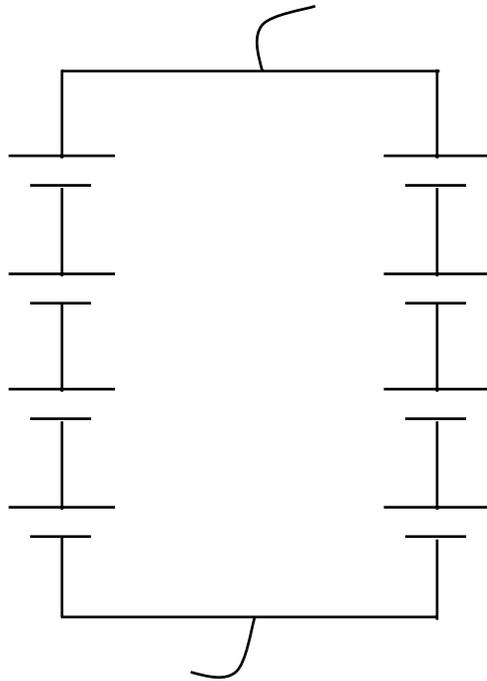
$$V = \int E \cdot dl$$

All'interno delle spire le f.e.m generate dal movimento dell'anello nel campo sono uguali e contrarie \Rightarrow non si ha contributo netto



Se però disponiamo di contatti che prelevano corrente sul lato basso e alto dell'anello (laddove dl è parallelo ad E) misuriamo una f.e.m $\neq 0$

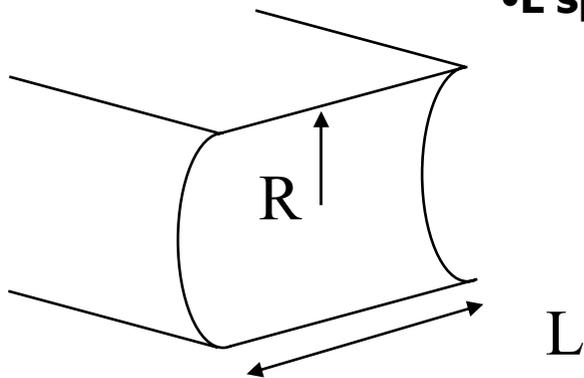
DINAMO TACHIMETRICA



- Si può modellizzare la situazione con una serie di generatori di tensione al posto delle spire, posti in parallelo rispetto ai contatti striscianti.
- Se n = numero totale di spire la tensione V misurata ai capi dei due filamenti è pari a $V_m * n/2$.
- V_m = tensione media indotta in ciascuna spira.

$$V_m = B_m L v \quad \text{con } v \text{ velocità della spira}$$

- B_m campo medio \perp alla superficie dell'anello e a v .
- L spessore dell'anello e lunghezza tratto utile spira.



$$\Phi_B = \int B \, dS = B_m S = \pi R L B_m \quad \text{da cui}$$

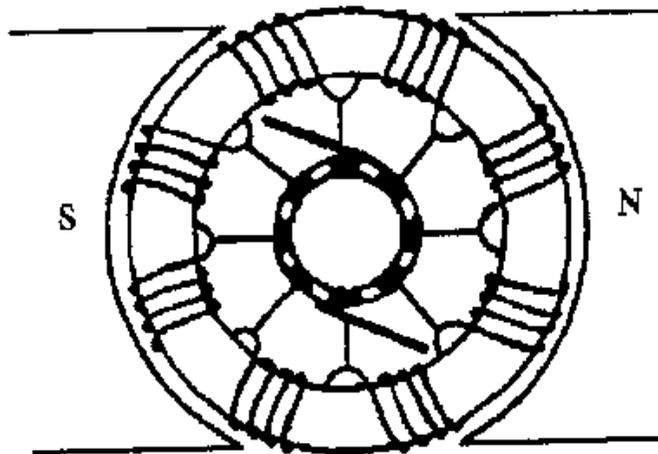
$$V = \frac{n}{2} B_m L v = \frac{n}{2} \frac{\Phi_B}{\pi R} v = \frac{n}{2} \frac{\Phi_B}{\pi R} \omega R = n \Phi_B f$$

DINAMO TACHIMETRICA

Tensioni elevate e utilizzabili immediatamente (10V/1000 rpm)

Impedenza di uscita bassa

Effetto 'ripple' dovuto alla tecnica di connessione (1-2%)



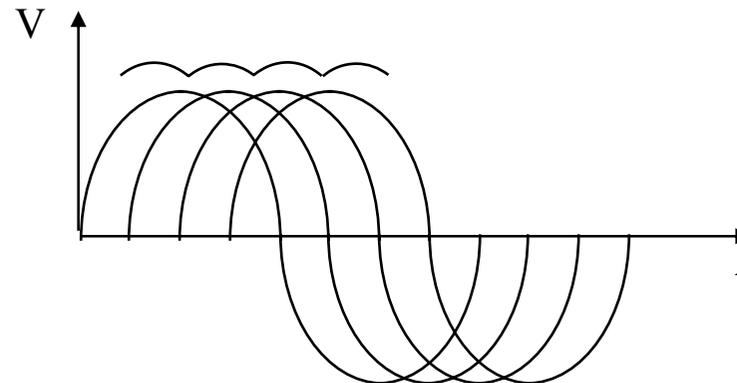
Contatti mobili (spazzole e lamelle)

Brusca variazione al passaggio da una lamella a quella successiva

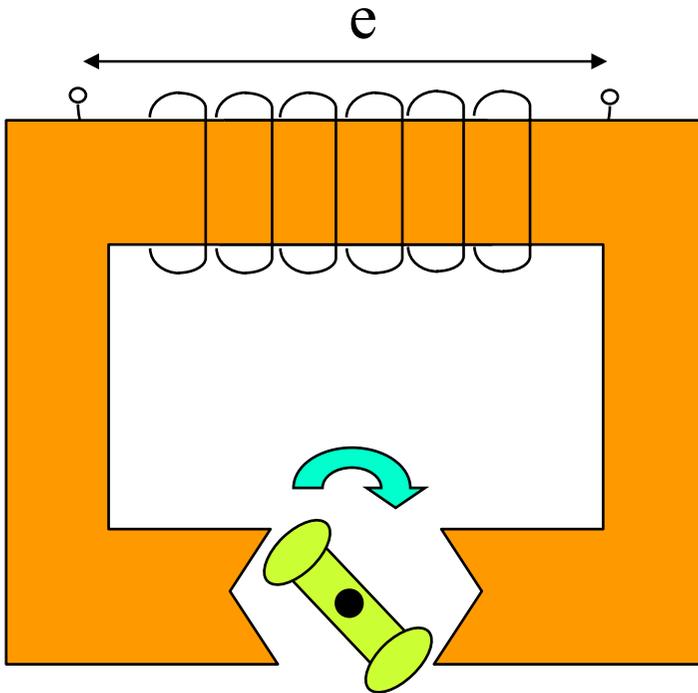
f.e.m indotta sinusoidale se campo B uniforme

No filtraggio perché dipende dalla velocità di rotazione

Uso di generatori privi di contatti per eliminare rumore dovuto ai contatti striscianti

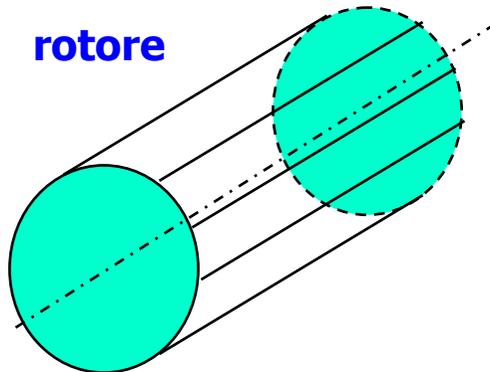


ALTERNATORE TACHIMETRICO



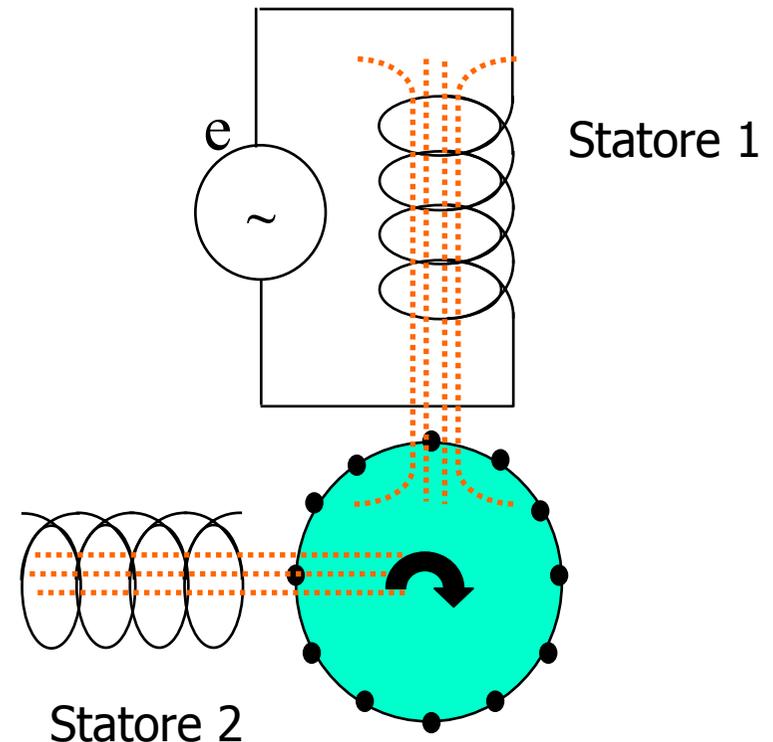
- **Magnete permanente rotante all'interno di 2 espansioni di toro ferromagnetico con avvolgimenti fissi.**
- **Flusso di B varia per effetto dello spostamento del rotore (flusso alternato).**
- $\phi_B = \phi_0 \cos \omega t \Rightarrow e = -n \frac{d\phi_B}{dt} = n\omega \phi_0 \sin \omega t$
- **Doppia dipendenza da ω (problema)**
- **La variabilità di una grandezza rende difficile la misura dell'altra.**
- **Generalmente l'informazione si considera associata alla frequenza del segnale emesso.**

GENERATORE AD INDUZIONE

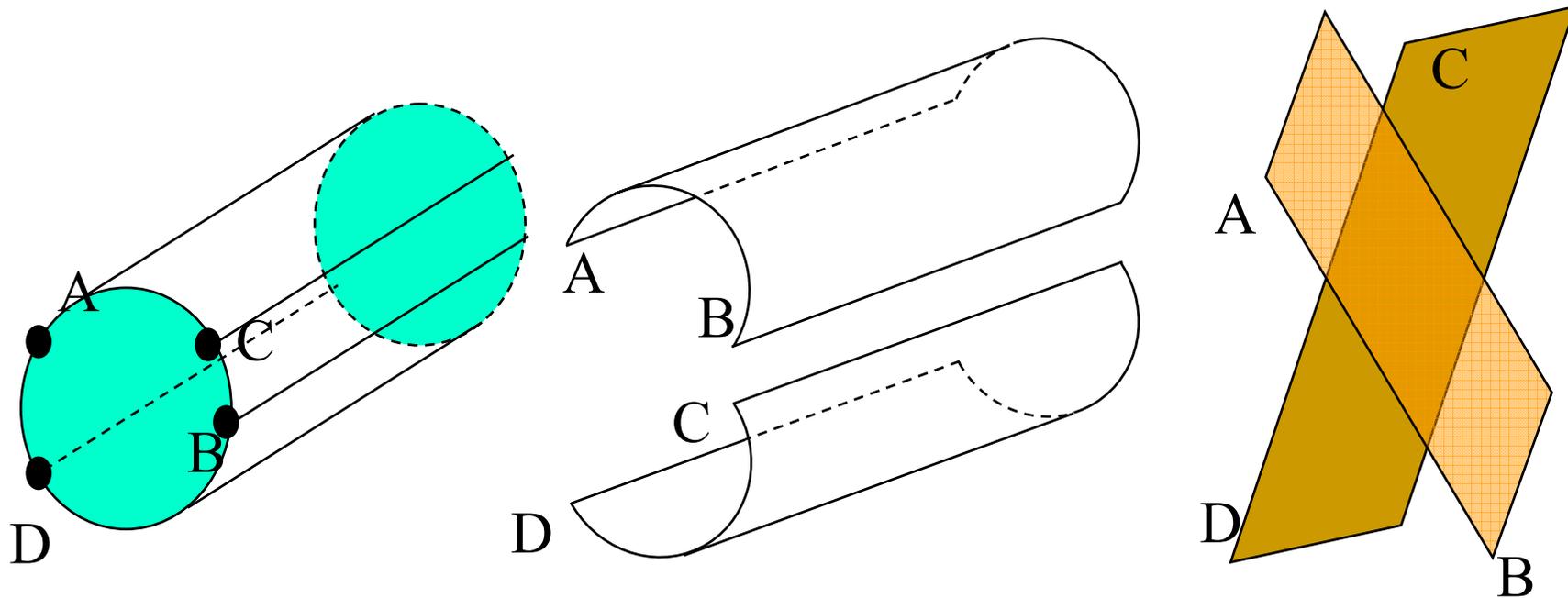


- **Macchina rotante con due avvolgimenti statorici ed 1 rotore a *gabbia di scoiattolo* con conduttori rettilinei e 2 anelli di collegamento.**

- **Per effetto della rotazione nasce un accoppiamento tra i 2 avvolgimenti che genera tensioni indotte nel secondario.**
- **Se il rotore è fermo non c'è tensione.**
- **Il primo avvolgimento statorico è alimentato in alternata. Nasce un campo **B** che crea correnti indotte sui conduttori del rotore (per effetto del movimento).**
- **A sua volta ciò induce una tensione nelle spire del II avvolgimento statorico.**

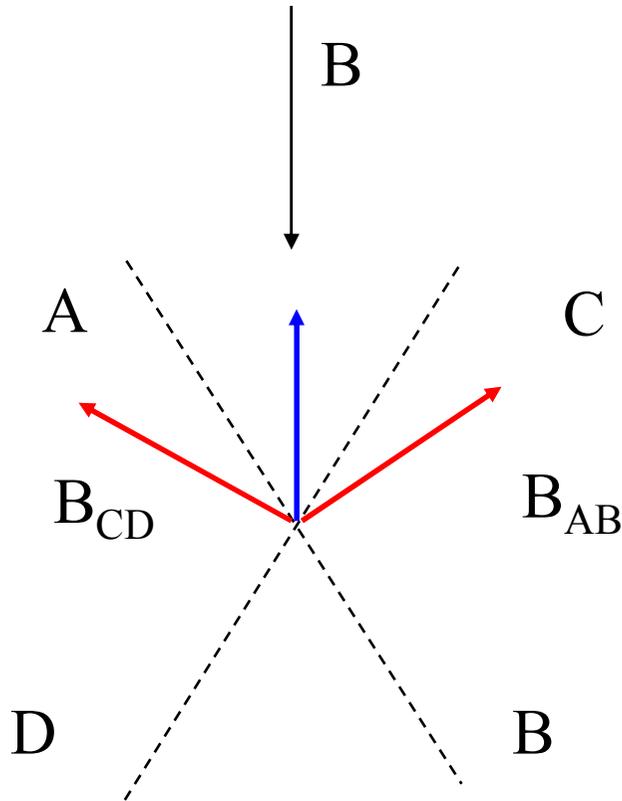


GENERATORE AD INDUZIONE



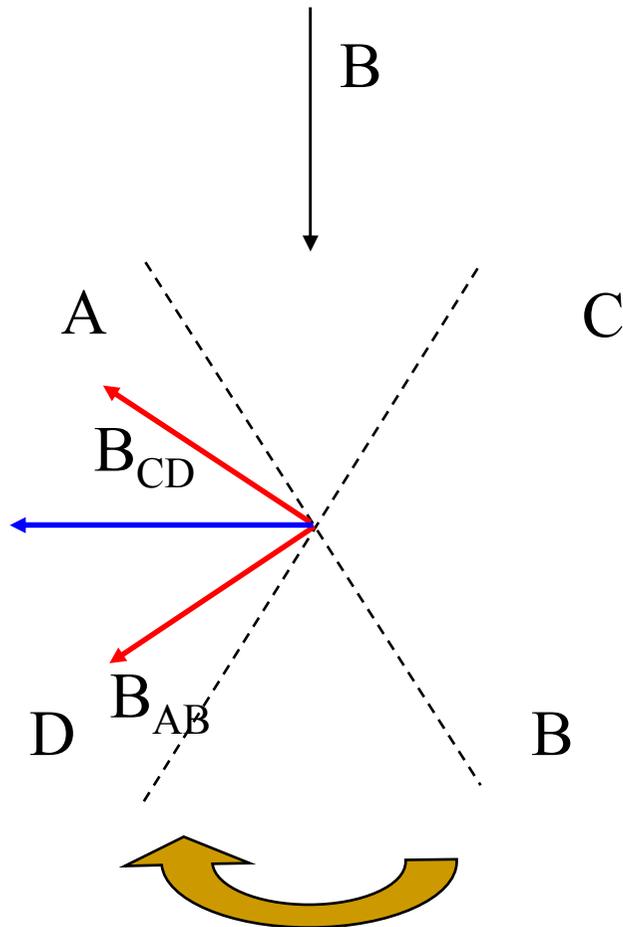
A-B e C-D sono coppie di barre conduttrici simmetriche che individuano 2 superfici semicircolari 'stirando' le quali si ottengono due spire che si 'incrociano' reciprocamente

GENERATORE AD INDUZIONE sez. frontale spire



- **B è diretto verticalmente.**
- **Se la gabbia è ferma, il flusso di B induce una corrente nella spira AB che sviluppa a sua volta un campo B_{AB} indotto tendente ad opporsi alla causa generante (legge di Faraday Neumann + Lenz).**
- **Analogo discorso sulla spira CD.**
- **AB e CD sono simmetrici pertanto B_{AB} e B_{CD} (verticali rispetto al piano della spira) danno una risultante verso l'alto che non si accoppia col II° avvolgimento statorico.**
- **Non c'è corrente nel secondario.**
- **Supponiamo ora che la gabbia ruoti in senso orario**

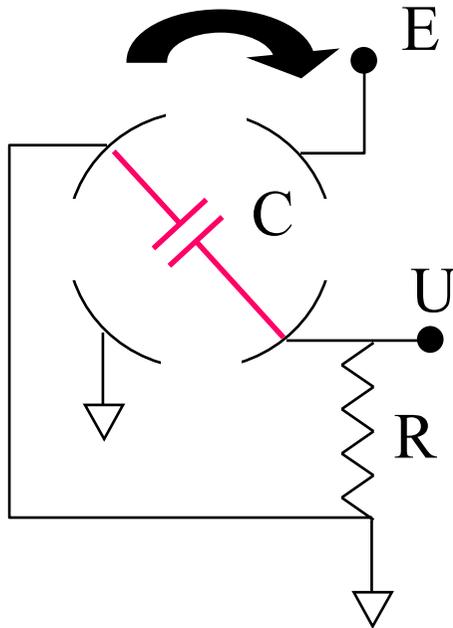
GENERATORE AD INDUZIONE sez. frontale spire



- **B è diretto verticalmente.**
- **Se la gabbia ruota, il flusso di B sulla spira AB tende a diminuire (la spira tende a 'chiudersi').**
- **Questo provoca una corrente nella spira AB e un campo B_{AB} indotto che tende a opporsi alla causa generante e quindi questa volta è diretto verso il basso (rafforza il campo il cui flusso diminuisce).**
- **Sulla spira CD discorso analogo a prima.**
- **Questa volta B_{AB} e B_{CD} (verticali rispetto al piano della spira) danno una risultante orizzontale che si accoppia col II avvolgimento statorico.**
- **C'è corrente indotta nel secondario e quindi una f.e.m con frequenza analoga alla tensione di alimentazione, verso dipendente dal senso di rotazione e ampiezza proporzionale alla velocità.**

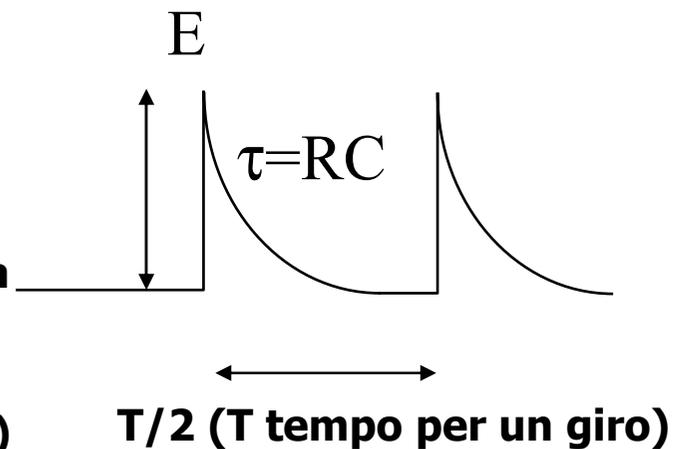
Rete di condizionamento: raddrizzatore sincrono

TRASDUTTORE A CARICA E SCARICA CAPACITIVA

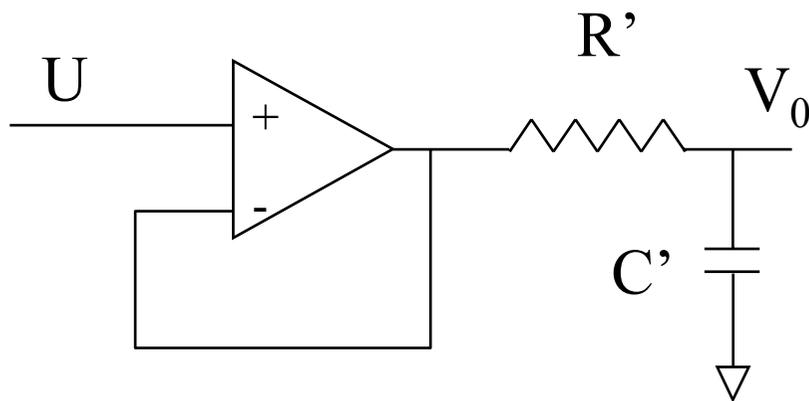


- Uscita con ampiezza costante e frequenza variabile.
- Quando l'anello si mette a girare il condensatore si carica e si scarica alternativamente.
- La carica arriva fino ad E, la scarica avviene sulla R.
- Ad ogni giro il condensatore si carica/scarica 2 volte.

- La frequenza dipende dalla velocità di rotazione (max. $4/T$ circa per consentire la scarica del C)
- Variabile di uscita posizione angolare (rapportata ad un tempo \Rightarrow velocità)
- Utilizzo di un frequenzimetro (contatore impulsi) reversibile per valutare senso di rotazione



TRASDUTTORE A CARICA E SCARICA CAPACITIVA



- In alternativa al frequenzimetro si può utilizzare un integratore approssimato con $R'C' \gg T/2$
- V_0 sarà \cong al valor medio della tensione in uscita al trasduttore
- $V_0 = 2ERC/T = 2fERC$
- f =freq. rotazione

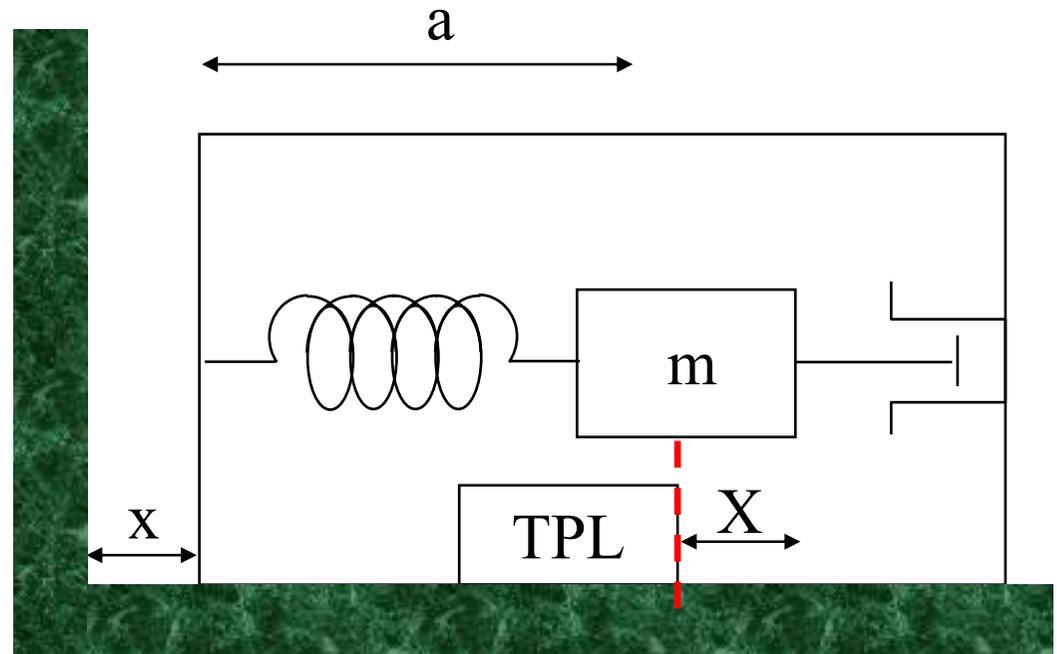
- L'inversione di rotazione provoca una inversione di segno.
- Poca precisione con integratore e limite alla velocità di rotazione (scaricamento in $5RC$ che corrisponde circa a $T/4 \Rightarrow$ attenzione al dimensionamento R e C).
- Miglior precisione con frequenzimetro.

TRASDUTTORI DI ACCELERAZIONE

- **Problemi se l'accelerazione è ottenuta come derivata della velocità.**
- **L'accelerazione è indipendente dal sistema di riferimento scelto.**
- **Non c'è necessità di circuiti di riferimento con base fissa.**
- **Si può misurare l'accelerazione in un punto comodo e integrare per ricavare velocità e posizione. (Problemi a bassa frequenza e uso di hw costoso per ricavare buone precisioni).**

ACCELEROMETRO A MASSA MOBILE

- La massa si sposta in senso opposto a quello dell'accelerazione.
- Pistone di smorzamento per fermare l'oscillazione.
- X spostamento relativo alla massa involucro, x spostamento involucro rispetto rif. fisso.



$$F = ma_m = m(\ddot{x} + \ddot{X})$$

\ddot{x} = accelerazione involucro

$$F = -kX - \gamma\dot{X}$$

γ = coeff. attrito viscoso

$$ma = -(m\ddot{X} + \gamma\dot{X} + kX) \Rightarrow ma = -(ms^2 + \gamma s + k)X$$

$$\frac{X}{a} = -\frac{m}{k} \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{k}s + \frac{m}{k}s^2}$$

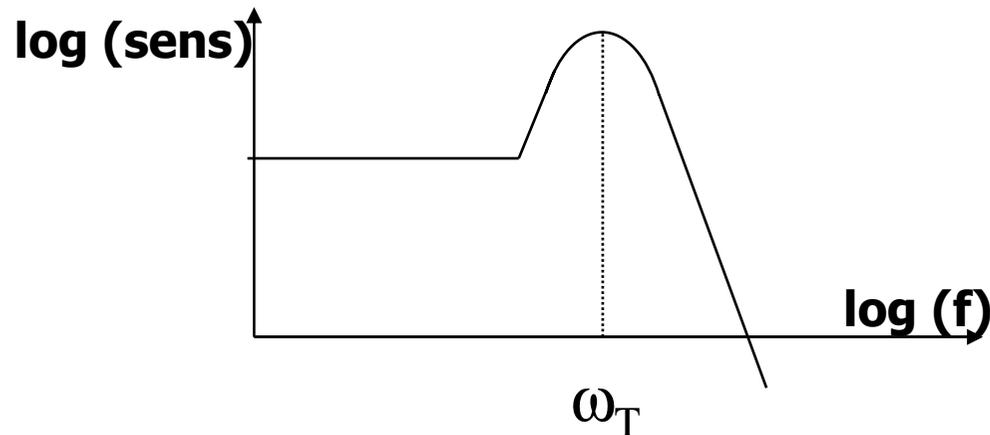
ACCELEROMETRO A MASSA MOBILE

- **In continua ($s=0$)**
$$X = -\frac{m}{k} a$$
 con m/k sensibilità trasduttore

- **Per frequenze variabili**
oscillatore smorzato con polo doppio in
ottenuto calcolando la soluzione del
denominatore con $\gamma = 0$

$$\omega_T = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

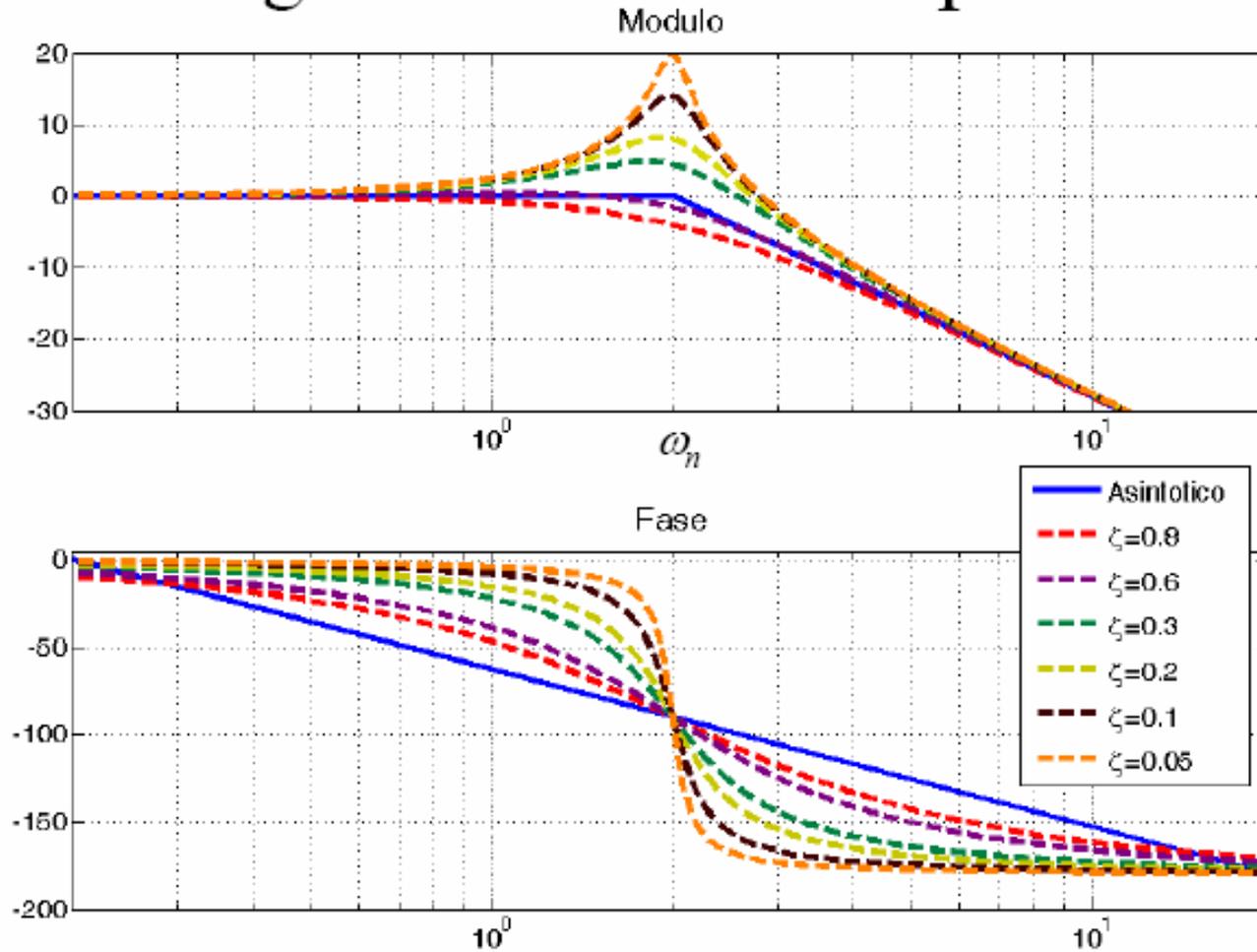
- **La frequenza di oscillazione è inversamente proporzionale alla sensibilità.**



Per usufruire di una sensibilità che non cambia al variare della frequenza costruiamo dispositivi servo-accelerometrici o ricorriamo a materiali piezoelettrici per lavorare ad alte frequenze

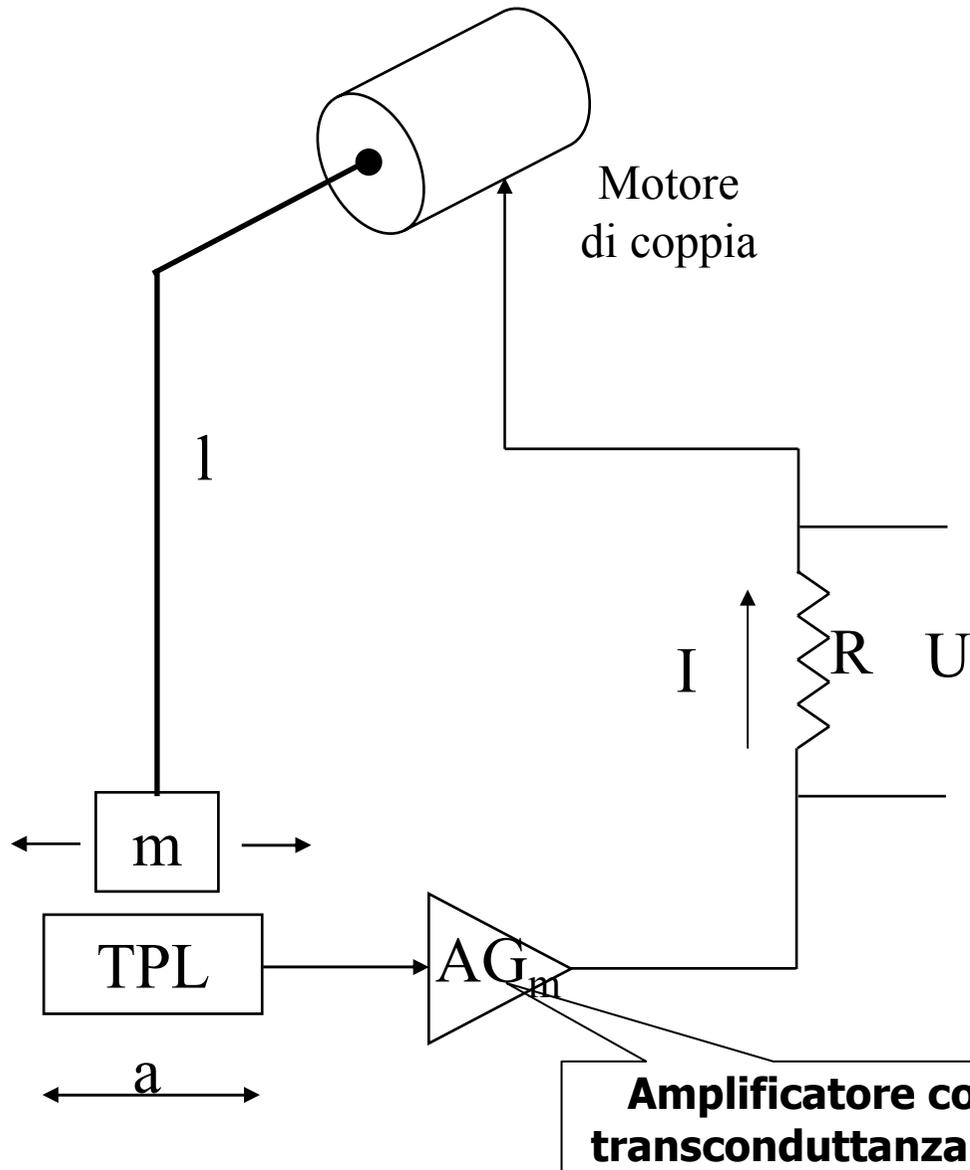
ACCELEROMETRO A MASSA MOBILE

Diagr. Reali Poli Complessi



$$\frac{1}{\left(1 + j \frac{2\zeta\omega}{\omega_n} - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)}$$

SERVOACCELEROMETRO



Sensibilità costante a tutte le freq.

Motore rotante in grado di far compiere alla massa m piccoli spostamenti tramite un albero

a fa ruotare m attorno al rotore

Ogni piccolo spostamento crea una corrente che agisce sul motore in modo da riportare la massa nella posizione originaria

Misuriamo la coppia del motore

$$\Gamma = k_m I \quad k_m \text{ caratteristica del motore}$$

$$\Gamma = m a l \quad \text{coppia dovuta alla massa } m$$

SERVOACCELEROMETRO

In condizioni di stabilità coppia motore = coppia massa oscillante

$$U = RI = R \frac{\Gamma_m}{k_m} = \frac{mRl}{k_m} a \quad \text{Sensibilità costante}$$

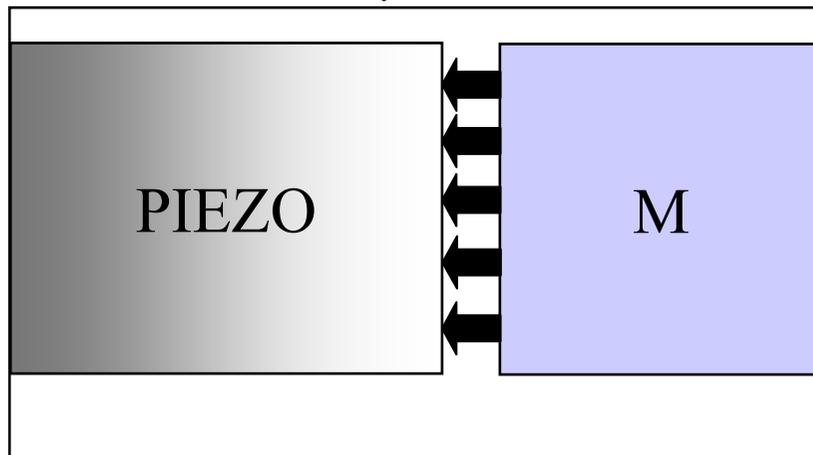
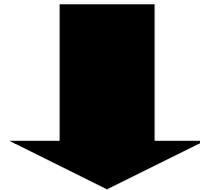
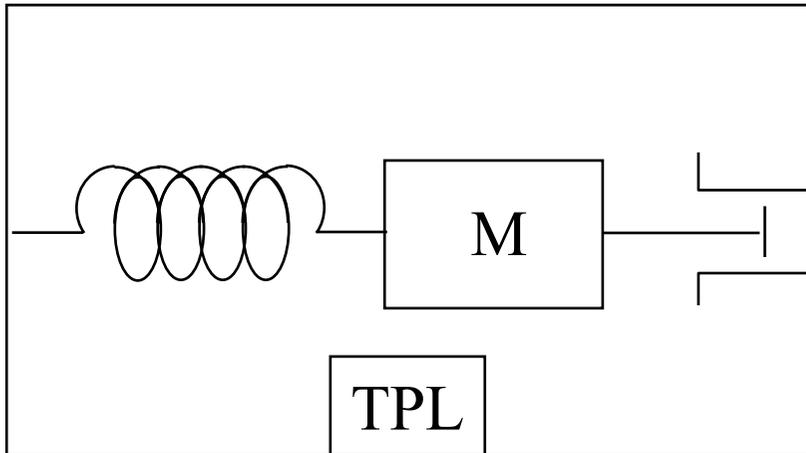
Abbiamo introdotto nel sistema una 'molla' molto sofisticata (fattore di smorzamento) costituita da amplificatore generatore e motore, la cui 'costante elastica' è (S_t sensibilità trasduttore):

$$k_{eq} = \frac{F}{\Delta x} = \frac{\Delta x S_t A Gm \frac{k_m}{1}}{\Delta x} = S_t A Gm \frac{k_m}{1}$$

OSSERVAZIONI

- **Parecchi parametri permettono di variare la sensibilità. Il più manipolabile è la R.**
- **La costante di elasticità dipende da parametri elettrici e non solo meccanici ⇒ miglioramento molla senza variare sensibilità.**
- **Assenza di smorzatore oscillante; componenti di più facile controllo.**
- **In condizioni normali oggetti in posizioni fisse: migliori condizioni di linearità.**
- **TPL può essere lineare su piccoli spostamenti e non lineare oltre.**
- **Limitazioni a frequenze elevate (100 KHz). Utilizzo di accelerometro a ceramica piezoelettrica.**

ACCELEROMETRO PIEZOLETTRICO



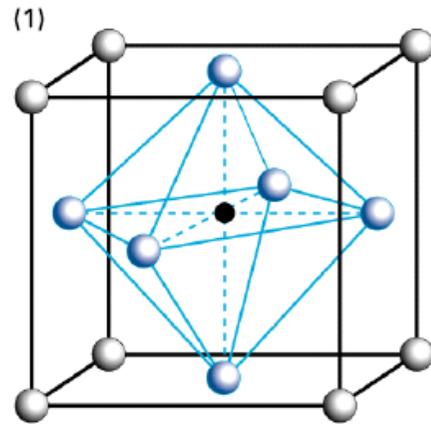
La ceramica piezoelettrica se compressa genera una tensione che può essere misurata.

Alta sensibilità: trasduttore molto rigido con K_{eq} elevata che consente di lavorare a frequenze molto elevate.

$$ma = -m\ddot{X} - k_P X$$

$$\frac{X}{a} = -\frac{m}{k} \frac{1}{1 + \frac{m}{k_P} s^2} \quad \omega_{RIS} = \sqrt{\frac{k_P}{m}}$$

EFFETTO PIEZOLETTRICO



Effetto piezoelettrico: materiale che se compresso genera una tensione che può essere misurata o si può deformare se sottoposto a campo.

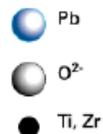
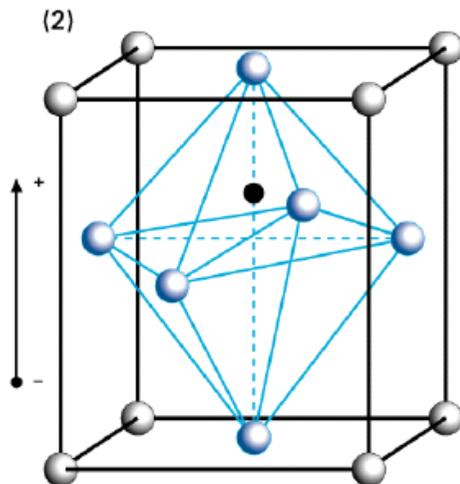
Tipici materiali: titanato di Ba (BaTiO_3) o PZLT Piezo Lead Zirconate Titanate).

La struttura dei cristalli piezo è un reticolo con ai vertici atomi di ossigeno, al centro delle facce atomi di metallo e al centro un atomo pesante confinato in uno spazio angusto di energia minima (fig. 1).

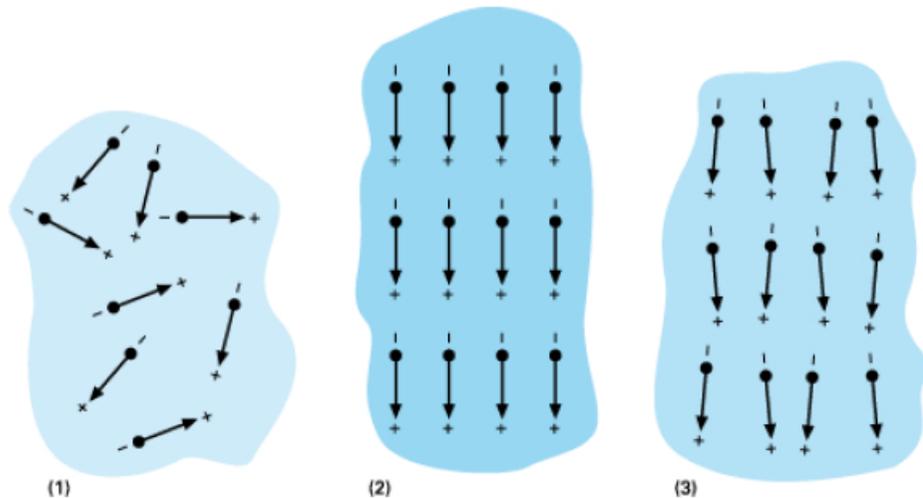
Struttura metastabile.

In presenza di campo elettrico esterno, l'atomo di Titanio o Zirconio si sposta dalla propria configurazione di riposo e causa uno squilibrio (fig. 2) che trasforma il cristallo in un dipolo elettrico.

Il fenomeno si rileva fino ad una temp. caratteristica detta di Curie. Al di sopra la maggior agitazione termica delle particelle ne provoca la scomparsa.



EFFETTO PIEZOLETTRICO



La proprietà suddetta viene usata per ottenere materiali piezo anisotropi.

In natura (fig. 1) i materiali PZT non hanno direzioni preferenziali e quindi hanno poca capacità di deformarsi o di restituire un segnale elettrico se deformati.

Artificialmente, invece, i PZT vengono portati oltre la temperatura di Curie e sottoposti, durante il raffreddamento, ad un intenso campo elettrico che ne orienta i dipoli facendo nascere una polarizzazione stabile (fig. 2).

Questa polarizzazione stabile varia nel complesso la forma del materiale provocando un lieve allungamento. Se ora applichiamo un campo elettrico esterno nel senso della polarizzazione assisteremo ad un contrarsi del materiale poiché la direzione del campo contrasta quella di polarizzazione (fig. 3). Questo fino ad un valore limite del campo detto *coercive field*.

Il fenomeno è duale: pertanto se compresso o sottoposto a trazione, il materiale può provocare l'insorgenza di cariche elettriche sulla sua superficie duali al campo che ne caratterizza la struttura interna.

ACCELEROMETRO PIEZOLETTRICO

Il comportamento di un materiale può essere in generale descritto da:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

• ϵ costante dielettrica del mezzo, D densità di distribuzione della carica sulla superficie di un materiale conduttore immerso in un campo elettrico E

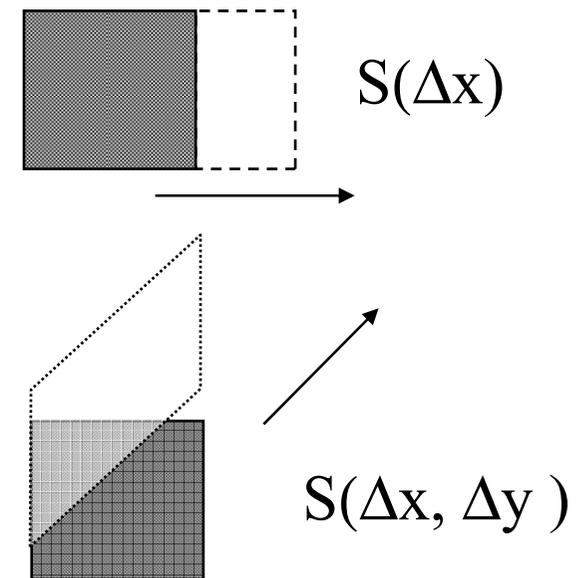
$$\vec{S} = s \vec{T}$$

• S tensore delle deformazioni (matrice 3x3), T tensore degli sforzi, s costante di elasticità (di Hook)

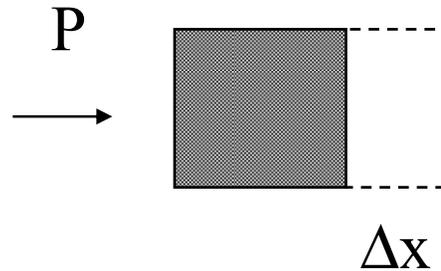
Fissata una direzione di trazione/schiacciamento si può misurare la deformazione di un materiale nelle sue 3 componenti.

Se la trazione è applicata lungo tre assi, ciascun gruppo di componenti lungo le tre direzioni fornisce il tensore S .

Nel nostro caso verranno considerate solo deformazioni in direzione x proprio in considerazione dell'anisotropia.



ACCELEROMETRO PIEZOLETTRICO



$S = sT$ dove $T = P = \text{forza sulla superficie } F/A$
 $S = \text{allungamento } \Delta X/L$, s costante di elasticità

per materiali piezo le equazioni precedenti cambiano:
 un nuovo coefficiente h tiene conto che un'azione
 meccanica crea una diversa distribuzione di cariche.

Supponiamo ora di avere una parete che si muove con
 accelerazione a comprimendo il piezo sulla massa M (o
 viceversa) e determiniamo la sensibilità del trasduttore.

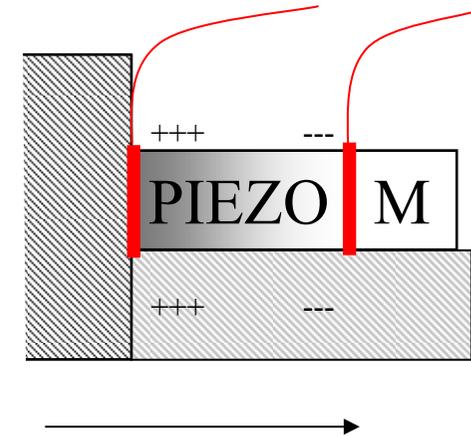
Per effetto dell'accelerazione nasce una forza di
 compressione $F = Ma$ da parte del piezo su M .

Tensione di sforzo $T = Ma/A$ (superficie di contatto).

Si devono usare placchette metalliche per prelevare le
 cariche che si formano. Il cilindretto equivale ad un
 condensatore \Rightarrow no funzionamento in corrente continua.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + h \vec{T}$$

$$\vec{S} = s \vec{T} + h' \vec{E}$$

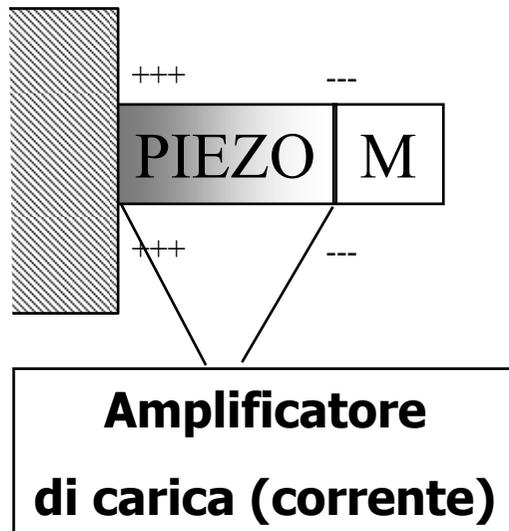


ACCELEROMETRO PIEZOLETTRICO

Come misurare la distribuzione di carica che si viene a creare per effetto della trazione sul materiale piezoelettrico?

2 possibili scelte: amplificatore di corrente o di carica.

1. Amplificatore di carica (corrente), $Z_{in}=0 \Rightarrow E=0$, in condizioni statiche il campo generato dalle cariche dipolari interne al piezo viene costantemente annullato dalla bassa impedenza di ingresso dell'amplificatore. L'unica variazione di carica misurabile è quella dovuta all'effetto meccanico.

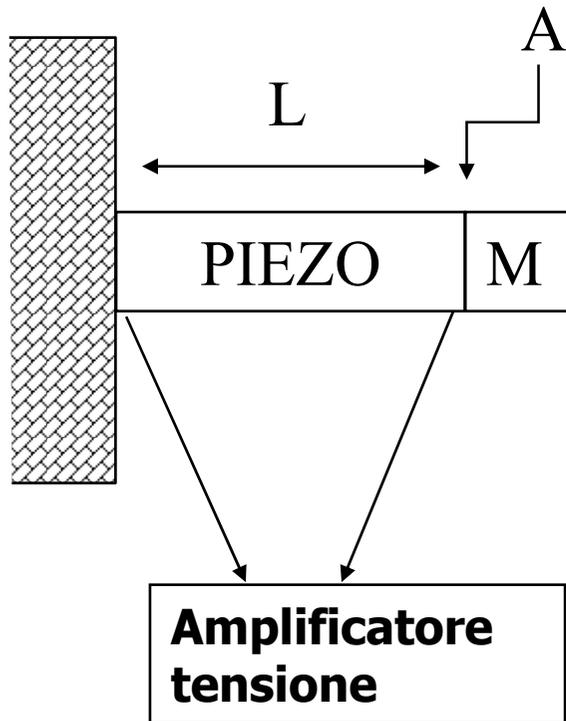


$$D = hT = h \frac{M}{A} a \quad \Rightarrow \quad Q = DA = hMa$$

La corrente misurata dall'amplificatore andrà integrata per avere la carica Q

$$Q = \int I dt$$

ACCELEROMETRO PIEZOELETTRICO



2. amplificatore di tensione, $Z_{in} = \infty$, $D = 0$ (legge di Gauss).

L'amplificatore di tensione ha un'impedenza d'ingresso infinita che impedisce lo spostamento delle cariche (corrente) da un lato all'altro sulla superficie del piezo

$$Q = DA = \int I dt = 0$$

$$E = -\frac{hT}{\varepsilon} = -h \frac{M}{\varepsilon A} a$$

$$V = -LE = h \frac{LM}{\varepsilon A} a = h \frac{M}{C} a$$

Il tipo di rete di condizionamento "esalta" la natura capacitiva del trasduttore.

Altri termini capacitivi (cavi di collegamento) vanno in parallelo a C variando la sensibilità del trasduttore (meglio amplificatore di corrente o tensione?).

ACC. PIEZO con amplificatore di corr/tens: problemi

AMPLIFICATORE DI CORRENTE

- scarica C (di misura) per effetto delle correnti di polarizzazione;
- saturazione amplificatore

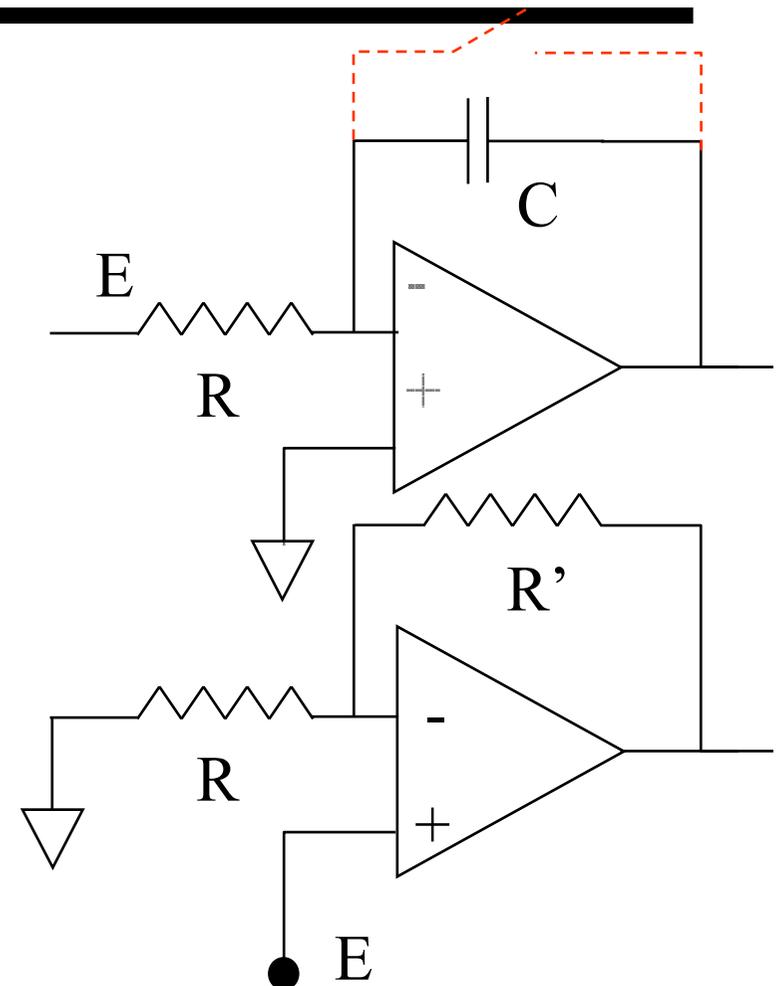
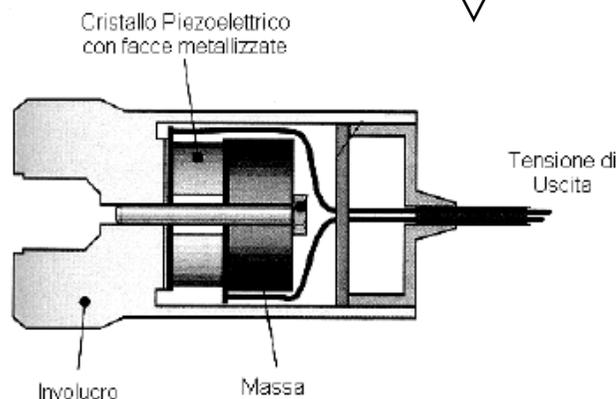
$$Q = \left(-\frac{1}{R} \int E \, dt + \int I_{\text{parassite}} \, dt \right) \frac{1}{C}$$

AMPLIFICATORE DI TENSIONE

- capacità in parallelo disturbano il segnale in uscita (in parallelo al trasduttore che è un C);

CARATTERISTICHE

- USCITA: 4mA-20mA;
- BANDA: 20-1000 Hz;
- SENSIBILITÀ: 0-10 MM/SEC²
- RANGE: fino a 50 g



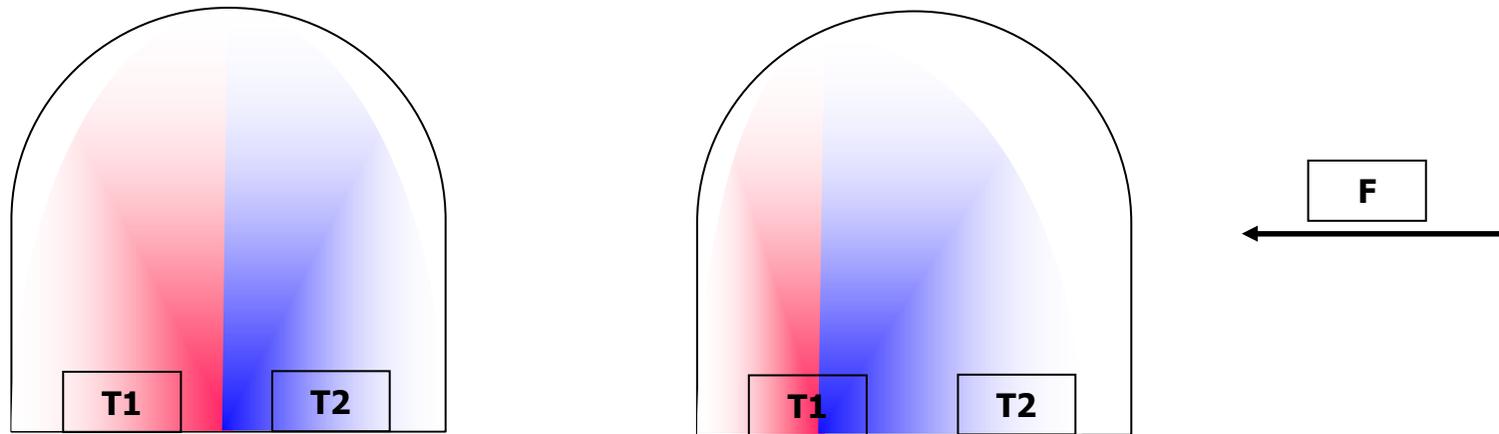
ACCELEROMETRI IN TECNOLOGIA MEMS

- MEMSIC in tecnologia MEMS = un sistema di misura di movimento realizzato con un circuito integrato su silicio.
- MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) = insieme di tutti quegli elementi (sensori, attuatori e dispositivi elettronici), costruiti attraverso un processo di μ lavorazione su strato di silicio.
- Nel caso dell'accelerometro range misura [$\pm 1g \div \pm 100g$].
- Misura sia accelerazioni dinamiche (es. vibrazioni) che statiche (es. dovute alla gravità).
- Risoluzione < del milli-g, almeno a frequenze molto basse.
- Disponibili in contenitori sigillati ermeticamente a basso spessore (2 mm).
- Range di temperatura [$-40^{\circ} \div +105^{\circ}$].

ACC. MEMS: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

- Basati sul trasferimento di calore dovuto a convezione spontanea. Misura dei cambiamenti della distribuzione del calore causati dall'accelerazione.
- Gli accelerometri MEMSIC sono funzionalmente equivalenti a quelli di tipo massa-molla, ma in questo caso la massa di prova è un gas.
- Grandi vantaggi rispetto all'uso delle tradizionali masse solide:
 - il dispositivo non mostra zone morte dovute all'attrito o ad altre fonti di dispersione dell'energia se paragonato ai dispositivi tradizionali;
 - resistenza agli shock fino a 50000 g con significativa riduzione della percentuale di guasti e minori scarti durante la fase di assemblaggio.
- Convezione: una bolla sottile di gas riscaldato "si muove" in conseguenza a forze esterne (accelerazioni, decelerazioni, gravità, vibrazioni, ecc...).
- L'aria fredda possiede una maggiore densità rispetto all'aria calda posta al di sotto di una sorgente di calore perciò ogni cambiamento nel movimento o ogni variazione della gravità ha un'influenza sull'aria fredda più densa della bolla spingendola lontano dal centro della cavità.

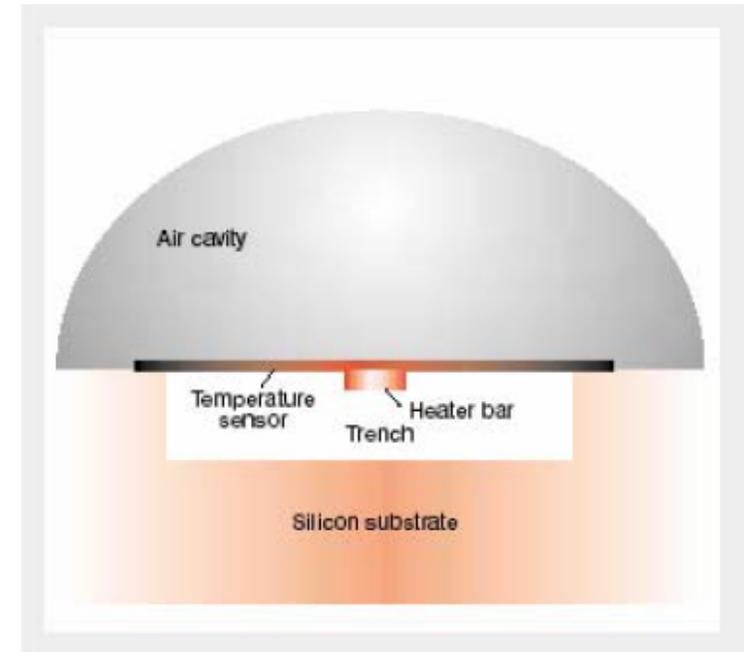
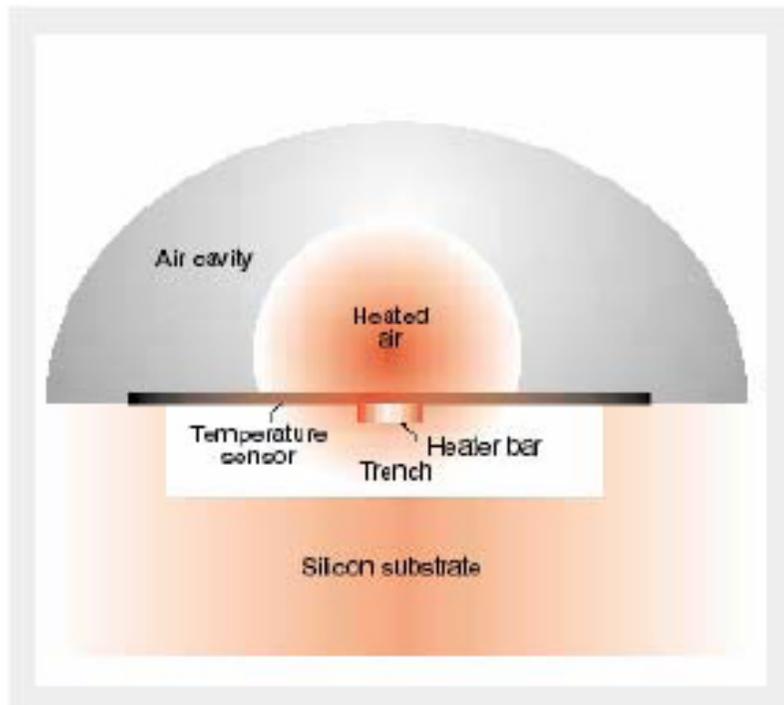
ACC. MEMS: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO



- Applicando una forza esterna (es. una accelerazione) l'aria più fredda e più densa spinge l'aria riscaldata nella direzione dell'accelerazione. La simmetria interna cambia nella stessa direzione del movimento della bolla.
- A sua volta questo fenomeno comporta una differenza di temperatura nell'aria posta al di sotto e attorno a due elementi sensibili.
- Amplificando tale differenza si ha in uscita un segnale differenziale legato alla forza applicata ed alla direzione di applicazione. Tale direzione di applicazione può essere sia orizzontale (accelerazione o decelerazione) che verticale (inclinazioni o *tilt*).

ACC. MEMS: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

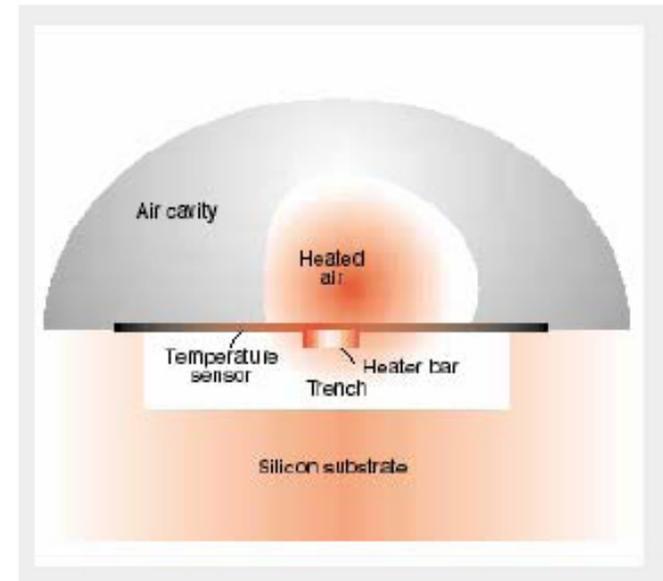
- Una sorgente di calore, centrata nel chip di silicio, è sospesa all'interno di una cavità.
- Due termopile (gruppi di termocoppie) di alluminio/polisilicio, sono equidistanziate sui due lati della sorgente di calore.



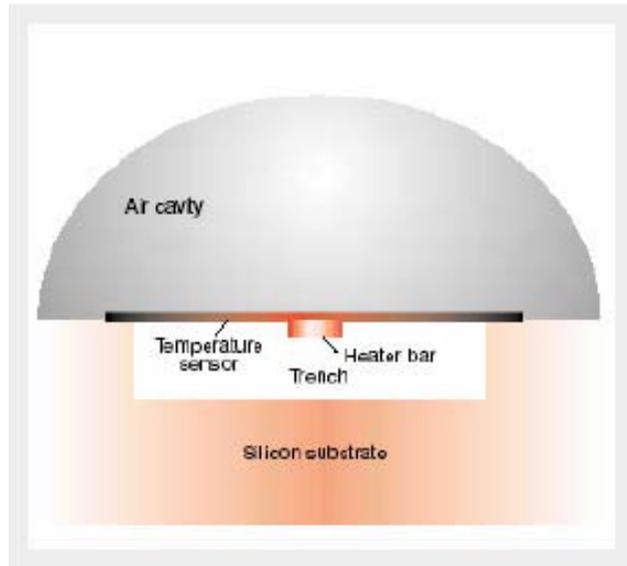
- Quando l'accelerazione è zero la temperatura è la stessa sulle due termopile, facendo sì che abbiano tutte la stessa tensione di uscita (tensione misurata).

ACC. MEMS: PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

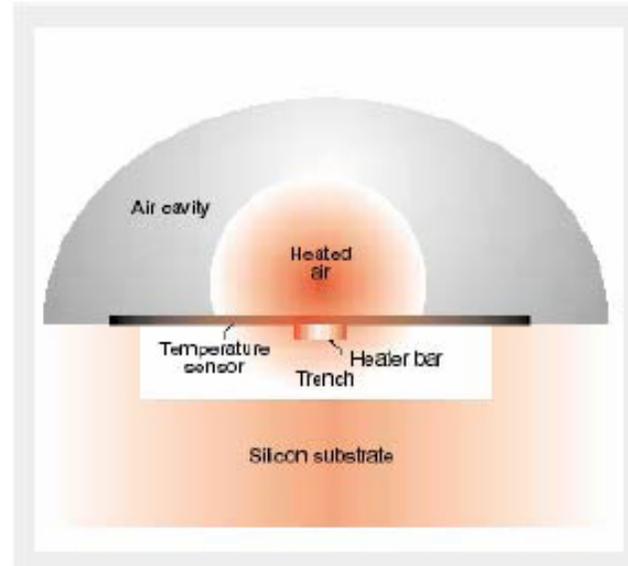
- Un'accelerazione disturberà il profilo di temperatura a causa di una convezione libera di calore, rendendolo asimmetrico.
- La temperatura, e dunque l'uscita di tensione, sarà quindi diversa in ciascuna delle 2 termopile.
- Si ottiene un profilo di temperatura asimmetrico che rispecchia la direzione di spostamento
- La densità maggiore dell'aria fredda spinge la bolla determinando una differenza di temperatura sulle termopile.
- Ciò influenza le resistenze delle termocoppie e questa disomogeneità produce un output proporzionale all'accelerazione o al *tilt*.
- In figura viene rappresentato lo spostamento verso destra della bolla, conseguente all'applicazione di una decelerazione o a una variazione della forza di gravità.



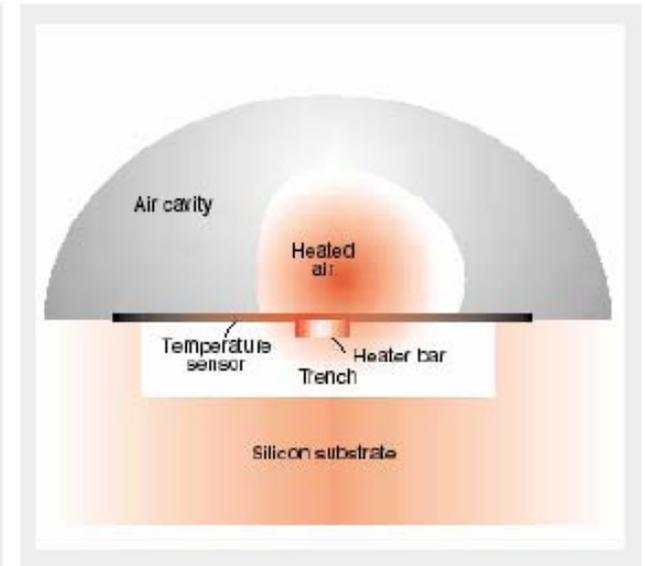
ACCELEROMETRI MEMS: RIASSUNTO



Non alimentato



Alimentato, fermo



Alimentato, con applicazione di un'accelerazione

ACCELEROMETRI MEMS: RIASSUNTO

Sistemi micromeccanici promettenti per sensoristica per beni di consumo.

Console giochi, stabilizzatori di immagini digitali, sensori anti-caduta.

Miniaturizzabilità \Rightarrow indossabilità.

Abbattimento costi \Rightarrow integrazione mercato di massa.

Aspetti critici:

automotive: affidabilità, resistenza a shock, range di temperatura, dimensioni

consumer: low power, resistenza a shock, affidabilità, dimensioni

Produttori:

Texas Instruments, Hewlett Packard, Bosch, ST Microelectronics, Freescale, Seiko, Lexmark.

MISURE DI FORZE E PRESSIONI: ESTENSIMETRI

- **Strain gage: 'cerotti' applicati alle zone che subiscono deformazioni**
- **Ancora il principio piezoresistivo: una R sottoposta a deformazioni cambia il suo valore**

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{un allungamento } \Delta L \text{ provoca una } \Delta R$$

$$\Delta R = \frac{\rho}{A} \Delta L + \frac{L}{A} \Delta \rho - \frac{\rho L}{A^2} \Delta A$$

- Un aumento della lunghezza fa aumentare la resistenza e la resistività, e diminuire la sezione (a parità di volume)

Definiamo:

$$g = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} \quad \text{gage factor}$$

MISURE DI FORZE E PRESSIONI: ESTENSIMETRI

moltiplichiamo l'espressione precedente per $\frac{L}{RdL}$

$$g = \frac{L\rho}{AR} + \frac{L^2}{AR} \frac{\Delta\rho}{\Delta L} - \frac{L}{A} \frac{\Delta A}{\Delta L} = 1 + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}} - \frac{\frac{dA}{A}}{\frac{dL}{L}}$$

- Un allungamento fa diminuire l'area A, non le dimensioni del volume

$$V = AL \quad \text{se } \Delta L > 0 \Rightarrow \Delta(AL) \geq 0$$

$$LdA + AdL \geq 0 \quad (\text{derivazione per parti})$$

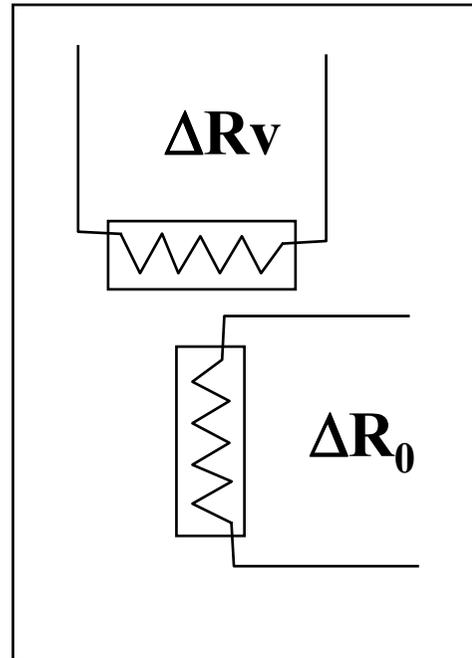
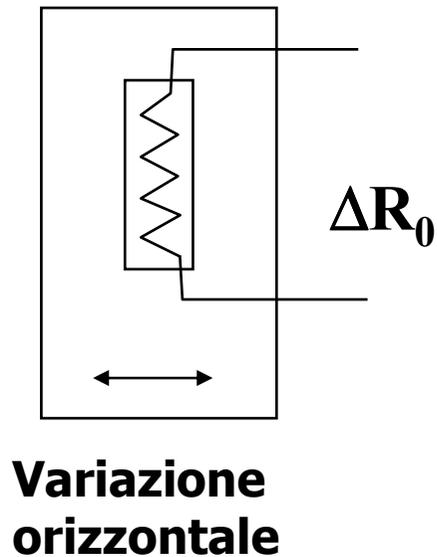
$$-\alpha = \frac{\frac{dA}{A}}{\frac{dL}{L}} < 0 \quad \text{una trazione} \Rightarrow \text{minor sezione}$$

MISURE DI FORZE E PRESSIONI: ESTENSIMETRI

$$g = 1 + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}} + \alpha \quad 0 < \alpha < 1$$

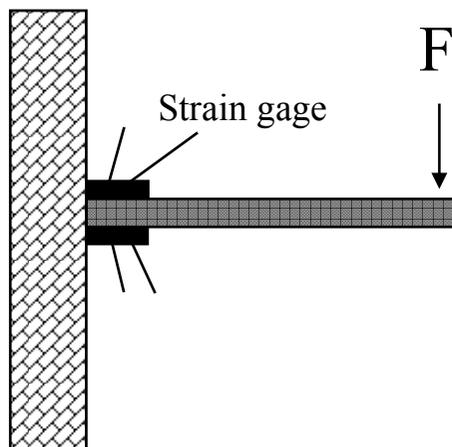
- Il termine più importante è il secondo. Per i metalli g varia tra 0 e 12, per i semiconduttori anche tra 100 e 200 (in questo caso, però, sorgono problemi di sensibilità alla temperatura).
- Utilizzo a coppie (circuito a ponte) per compensare omologhe variazioni della resistenza a fattori ambientali ed esaltare le variazioni differenziali.
- Utilizzo sopra un supporto elastico che non imponga resistenza alla deformazione.
- Misure di deformazioni orizzontali e verticali, di forza, di torsione di coppia.

MISURE DI FORZE E PRESSIONI: ESTENSIMETRI



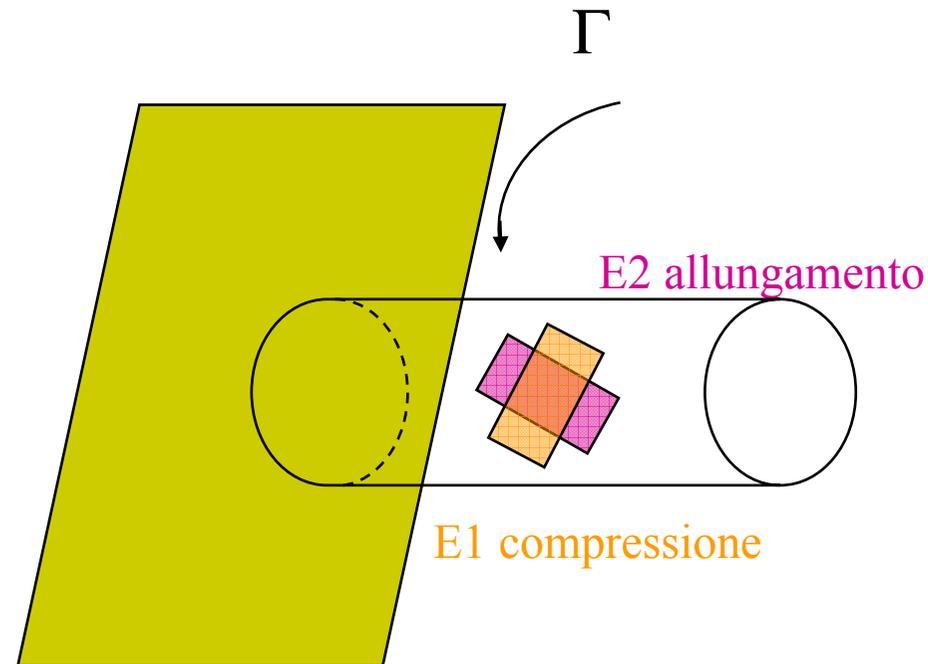
Misura di deformazione

Variazione orizzontale
+ Variazione verticale



Misura di forza: due estensimetri che forniscono 2 deformazioni in allungamento e compressione. Con un circuito ponte evidenzio la differenza nella variazione di R

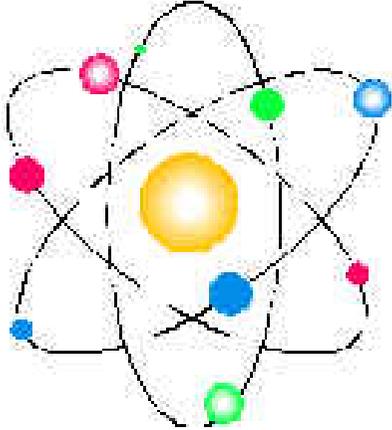
MISURE DI FORZE E PRESSIONI: ESTENSIMETRI



Misura di torsione di albero:

- i due estensimetri misurano 2 deformazioni in allungamento e compressione.
- I valori forniti sono uguali ma di segno opposto.
- Con un circuito ponte evidenzio la differenza nella variazione di R compensando la sensibilità alla temperatura.

TRASDUTTORI DI TEMPERATURA



Effetto Seebeck= per effetto dell'agitazione termica (effetto termoionico), portatori di carica liberi (elettroni nei metalli, lacune ed elettroni nei semiconduttori) possono sfuggire alla banda di conduzione ove si trovano usualmente.

Se un materiale possiede estremità a diversa temperatura ciò provoca la diffusione dei portatori da T alta a T bassa e viceversa, fino a raggiungere un equilibrio termico.

Se la differenza di T tra i terminali è costante tale flusso è continuo. Tuttavia la velocità di diffusione dei portatori è differente essendo legata all'energia degli stessi e quindi alla loro temperatura (legge di Richardson).



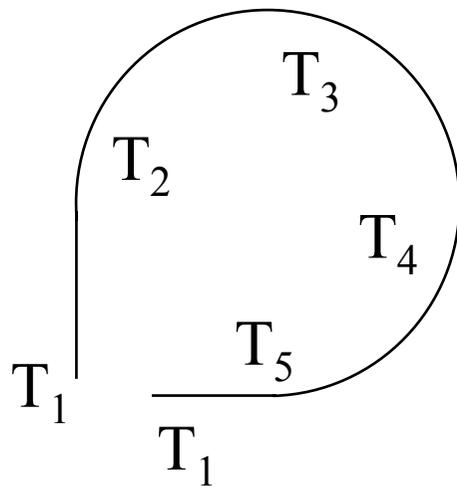
Nasce quindi una maggiore densità di portatori ad una estremità del materiale rispetto l'altra e quindi un campo elettrico.

La circuitazione di questo campo sul materiale conduttore fornisce una ddp \propto alla variazione della temperatura.

$$V = \int E dl = \int k \text{ grad}(T) dl$$

TERMOCOPPIE

Il legame tra f.e.m generata e variazione di temperatura dipende dal materiale usato (rame, costantana, nichel-cromo).

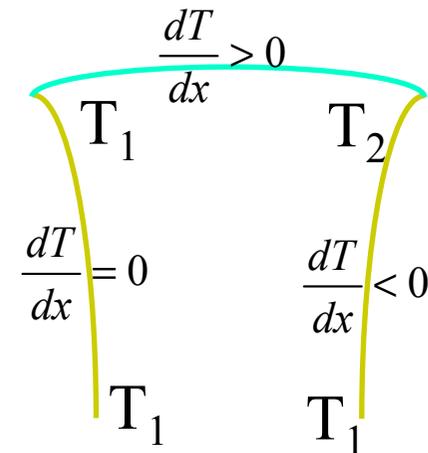


Un conduttore chiuso su se stesso non mette in evidenza nessuna d.d.p. nonostante esistano dV/dx in tutto il conduttore.

Dove sono presenti $\Delta T > 0$ i campi sono diretti in un certo modo, mentre dove $\Delta T < 0$ il campo è opposto \Rightarrow bilancio nullo.

Se supponiamo i materiali diversi, in presenza di gradienti di temperatura ($T_2 > T_1$), nascono campi tra loro diversi e quindi forze elettromotrici che non si compensano.

La d.d.p. che ne nasce può essere messa in relazione alla differenza di temperatura (in prima ipotesi proporzionale).



TERMOCOPPIE

Relazione reale tra V_{tc} e ΔT

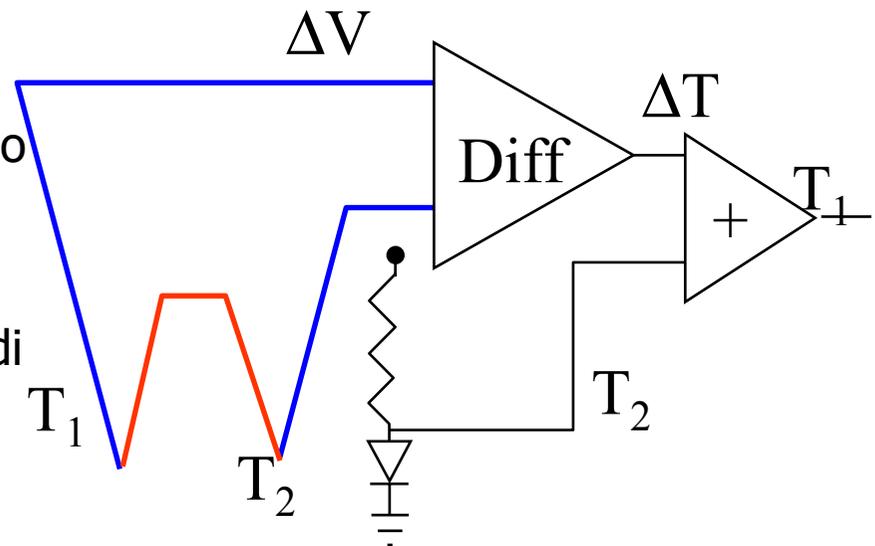
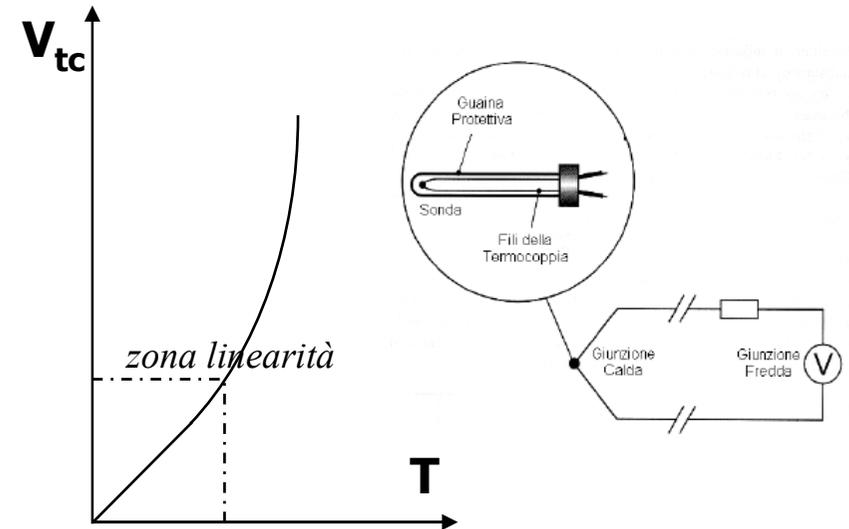
$$V_{tc} = \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2 + \dots$$

In pratica si lavora solo nella zona di linearità. In alternativa si implementano tabelle all'interno del microprocessore dove si 'entra' con la tensione misurata e si ottiene la ΔT cercata.

Spesso però interessa la temperatura assoluta di un ambiente: una delle 2 giunzioni deve essere posta a una temperatura nota (es. vasca con ghiaccio e acqua che lo mantiene a 0° C o utilizzo di un altro trasduttore di temperatura di "riferimento").

Tale tecnica prende il nome di "compensazione di giunto freddo".

Range (-200°C, 2000°C); sensibilità 50µV/°C



TERMOPILE

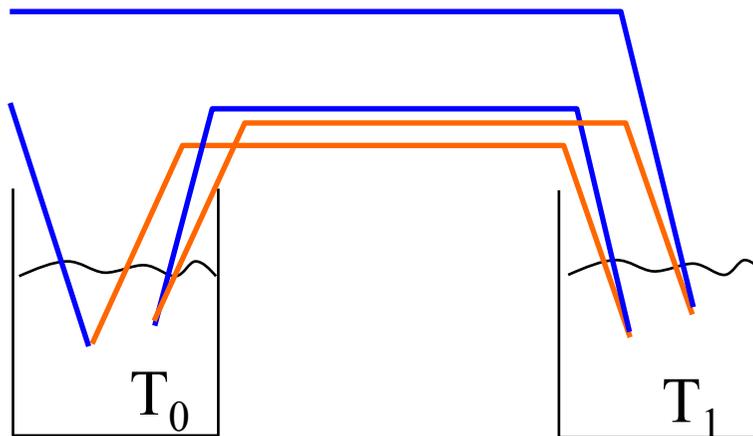
Uso termocoppie per misurare variazioni di temperatura $\approx (100^{\circ}\text{C}-200^{\circ}\text{C})$

Termoresistenze per mantenere la temperatura di riferimento

Tensioni in uscita deboli ($5\div 50 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) \Rightarrow amplificatori e collegamenti corti

Termocoppie in serie \Rightarrow TERMOPILE

— M_2
— M_1



5 tratti di filo con 2 giunzioni
alle due temperature, la
tensione si sviluppa
proporzionalmente

$$V_t = 2\alpha (T_1 - T_0)$$

Limiti di complessità di
collegamento

Circuiti a bassa impedenza con forti correnti (1-2 A)

Sottrazione energia al processo fisico per far funzionare il trasduttore

TERMORESISTENZE E TERMISTORI

Si sfrutta la conversione *temperatura - resistenza*: nelle termoresistenze, a seconda del materiale, la variazione di temperatura può influire (diminuire) il libero cammino medio degli elettroni e in questo senso modificare la resistenza di un materiale conduttore.

Nel caso di semiconduttori (termistori) occorre considerare anche la modulazione dei portatori di carica (aumentano all'aumentare della T), prevalente nel determinare la R.

2 classi di materiali: PTC e NTC

PTC (positive temperature coefficient)

interazione elettr. conduzione e reticolo cristallino: > T, > urti, > resistenza

$$R = R_0 (1 + \alpha(T - T_0)) \quad \text{per } T = T_0 \quad R = R_0 \quad \alpha = dR / (R_0 dT)$$

- α positivo e dipendente dalla T e dal materiale (per il Platino a 0°C è 0.0038)
- si può anche scrivere $R = R_0 (1 + \alpha(T - T_{k0})) = R_0 (1 + (T - T_{k0}) / T_{k0}) = R_0 (T / T_{k0})$ relazione lineare rispetto la T assoluta se $\alpha = 1 / T_{k0}$ (in Kelvin)
- lineari per buoni range di temperatura (PT100 opera tra 0 e 100°)
- sensibilità discreta se paragonata, p. es., a quella degli strain gage

TERMORESISTENZE E TERMISTORI

NTC (negative temperature coefficient)

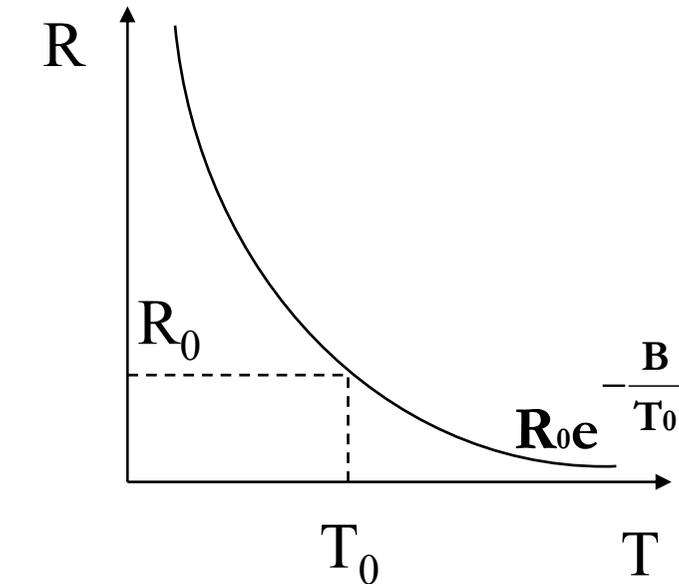
dipendenza da portatori di carica liberi

R diminuisce se T aumenta

Si usa materiale semiconduttore

$$R = R_0 e^{-B \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$$

Sensibilità $\alpha = -\frac{B}{T^2} e^{-B \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$



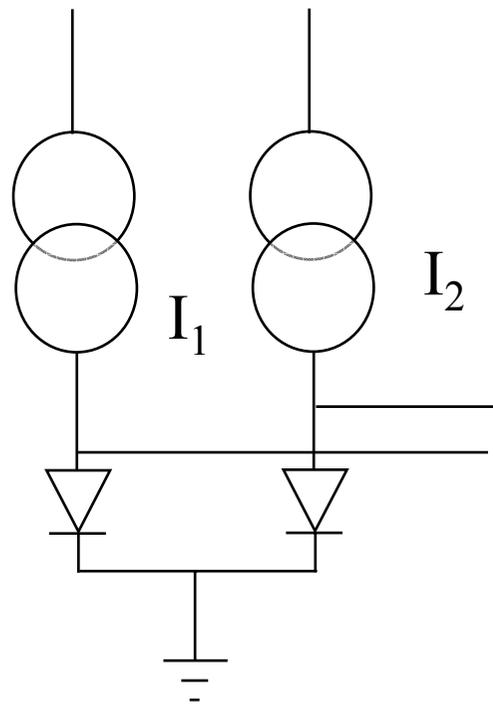
$$\alpha_{T_0} = -\frac{B}{T_0^2}$$

$$B \approx 1000-2000 \quad \alpha_{NTC} \gg \alpha_{PTC}$$

alta sensibilità dipendente dalla temperatura

utilizzo per termostatare temperature di riferimento

TRASDUTTORI INTEGRATI DI TEMPERATURA

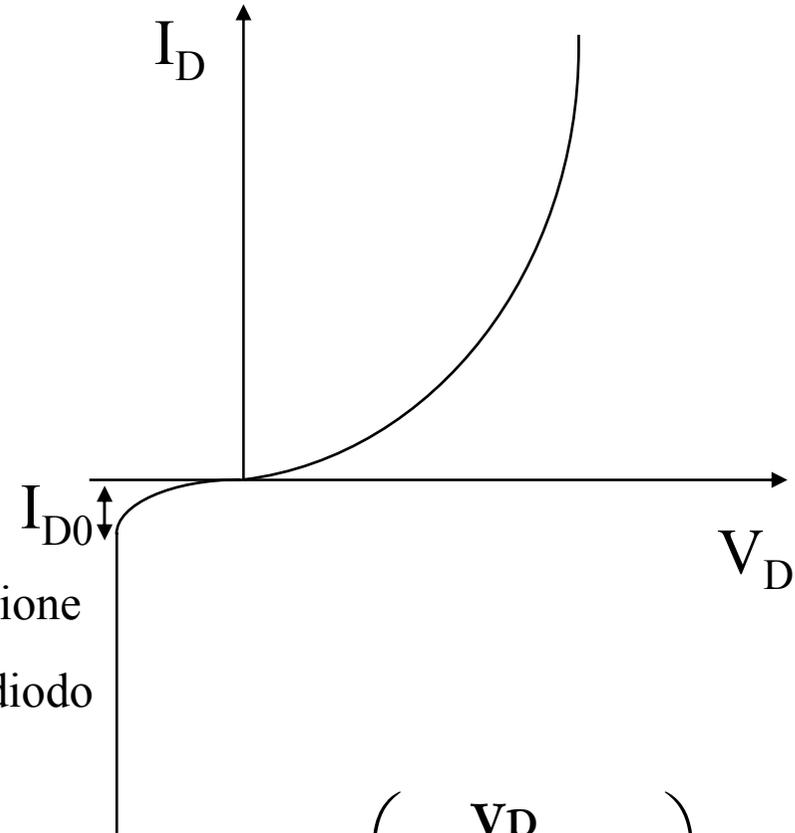


ΔV

corrente di polarizzazione
inversa del diodo

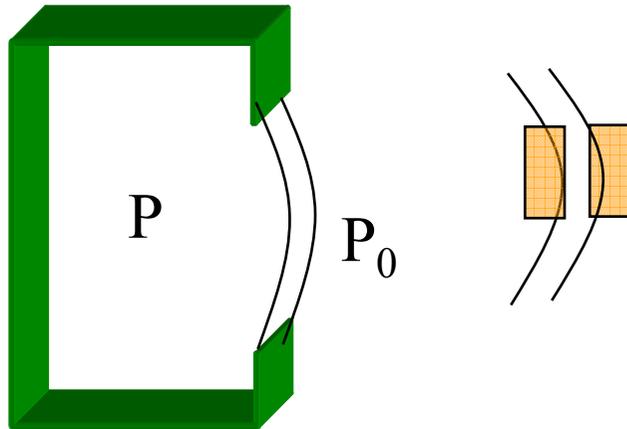
$$\Delta V = \frac{KT}{e} \ln \frac{I_2}{I_1}$$

essendo che
$$I_D = I_{D0} \left(e^{\frac{V_D}{KT/e}} - 1 \right)$$



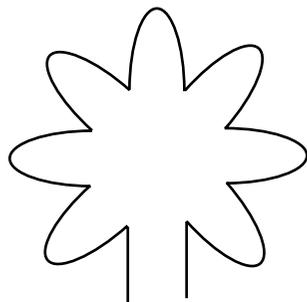
TRASDUTTORI DI PRESSIONE

Si basano sul principio di conversione tra deformazione di una lamina montata su una "camera" e pressione che si vuole misurare.

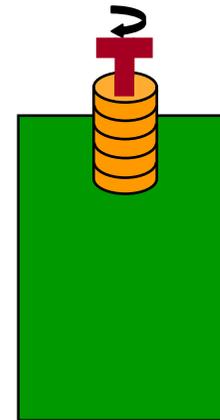


I due estensimetri, posti centralmente, misurano deformazioni opposte in segno \Rightarrow ponte

Taratura: pressione nota e misura della deformazione unitaria per misurare il coefficiente di \propto tra pressione e deformazione unitaria



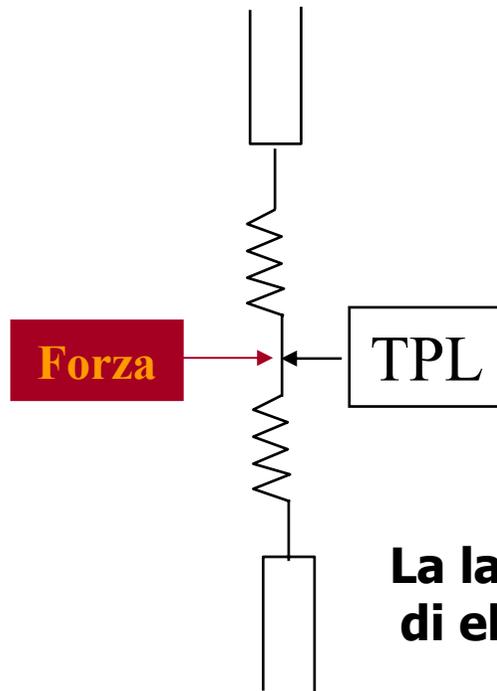
Estensimetri a petalo di margherita per misurare la deformazione in tutte le direzioni (sferica)



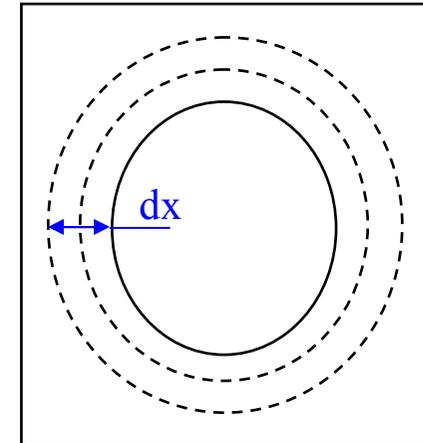
Trasduttore avvitato tramite filettatura alla camera in cui si vuole misurare la pressione

TRASDUTTORI DI PRESSIONE

Possono anche basarsi sul principio di conversione tra spostamento della lamina montata su una "camera" e la pressione che si vuole misurare.



Lamina a "soffietto"
Oscillazioni della lamina
viste dall'alto



La lamina può essere vista come una molla con coefficiente di elasticità k e sezione A di spinta (supposta nota) per cui

$$k = \frac{F}{dx}$$

$$dx = \frac{A}{k} (p - p_0)$$

TRASDUTTORI DI PRESSIONE

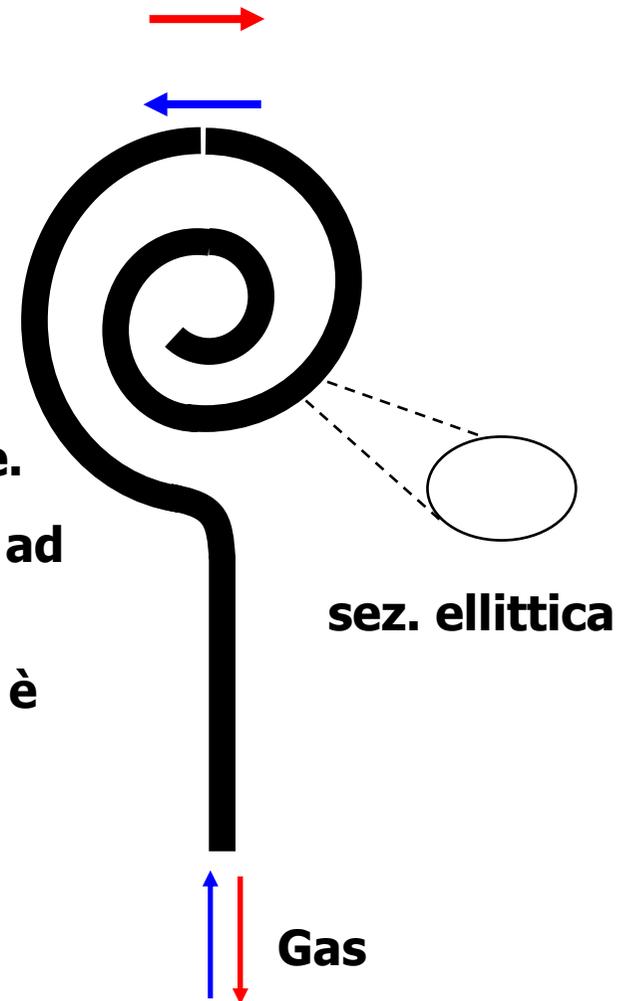
TUBO DI BOURDON

Tubo a sezione ellittica avvolto a formare una spirale.

La sez. ellittica sotto l'azione di una pressione tende ad un cerchio (srotolamento, freccia blu).

Sotto l'azione di una pressione negativa la rotazione è opposta (avvolgimento, freccia rossa).

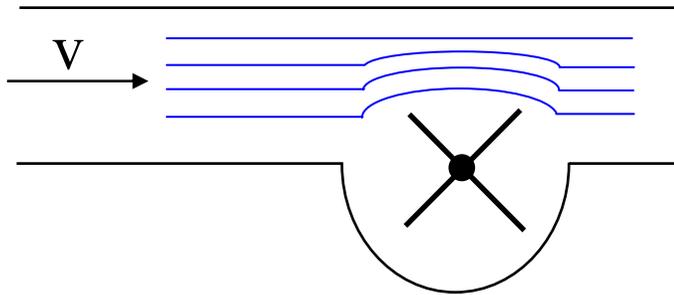
Trasduttore angolare per misurare la rotazione.



TRASDUTTORI DI PORTATA (FLUSSIMETRI)

- Entro un tubo in cui scorre un fluido possiamo definire una portata di *massa* F_m ed una di *volume* F_v (a volume costante)
- $F_m = dm/dt =$ quantità infinitesima di massa di fluido che passa in un tempo dt nella sezione del condotto.
- $F_v = dv/dt =$ quantità infinitesima di volume di fluido che passa in un tempo dt nella sezione del condotto.
- $F_m = \delta F_v \quad \delta = dm/dv$
- **N. B. Per i gas il volume varia a seconda della pressione (> comprimibilità)**
- La misura più agevole è F_v a cui si risale tramite la misura di una velocità
- $F_v = A v_m \quad v_m = \text{vel. media}$
 $A = \text{sez. efficace}$
- Se il trasduttore di portata di volume viene accoppiato ad un trasduttore di pressione (da cui si ricava la densità per la legge di Bernoulli), si ottiene un trasduttore di massa.
- **Noi vedremo solo flussimetri volumetrici (per hp. si lavora a volume costante)**

FLUSSIMETRO A TURBINA



Problemi:

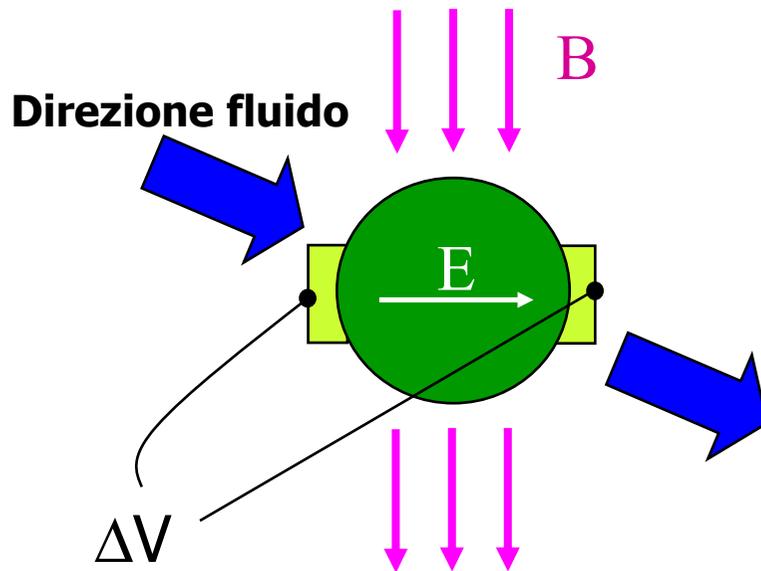
- la turbina può disturbare il flusso inficiando la misura e questo dipende dalle caratteristiche di viscosità e densità del fluido
- effetto della viscosità e densità su β

- $f = \alpha v_m$ $v_m = \text{vel. media}$
 $\alpha = \text{costante turbina}$
 $f = \text{freq. rotazione}$
- che $f = \beta F_v$ è intuibile, quindi sapendo che $F_v = A v_m$

$$\beta = \alpha/A$$

- β ha le dimensioni di 1/vol.
- Misurando la quantità di volume di fluido che si muove con la turbina si ha β ; si può ottenere f con una dinamo.

FLUSSIMETRO ELETTROMAGNETICO



- **Fluido con buona conducibilità**
- **Soluzione che non disturba il fenomeno da misurare**
- **Per effetto del campo B applicato si sviluppa un campo elettrico $E = v \times B$ (legge di Lorentz)**
- **Le placchette misurano la ΔV prodotta nel fluido (conduttore) dal campo elettrico**

Ipotesi: distribuzione velocità uniforme (anche se il moto fosse turbolento)

Campo B uniforme \Rightarrow campo E anche

La situazione è assimilabile a un condensatore

$$\Delta V = E d = B d v_m$$

d =diametro, v_m =vel. media

$$F_v = A v_m = \pi d^2 v_m / 4$$

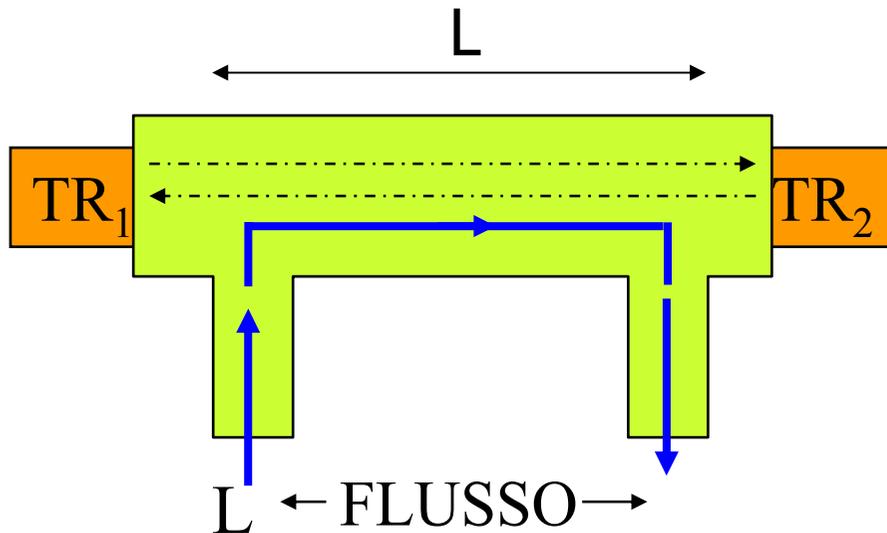
quindi

$$\Delta V = 4 B F_v / \pi d$$

TRASDUTTORE ELETTROMAGNETICO

- forte semplificazione considerando la velocità media (vero se distribuzione cilindrica della velocità).
- erogazione di corrente, sottrazione di energia al flusso, rallentamento (effetto leggero).
- elettrodi accurati per evitare tensioni “di contatto” alteranti la misura. Si può evitare questo anche modulando B tramite tensione alternata. L’eventuale tensione di contatto diventa una componente continua facilmente eliminabile.
- uscita in fase o in controfase con la tensione di alimentazione a seconda della direzione del fluido. Raddrizzatore sincrono.
- schema vantaggioso perché privo di parti meccaniche (turbinetta)

FLUSSIMETRO AD ULTRASUONI



Camera di propagazione di ultrasuoni con due generatori/ricevitori ai lati

L'emissione di un fascio da TR₁ viene recepita da TR₂ in un tempo t₁₂

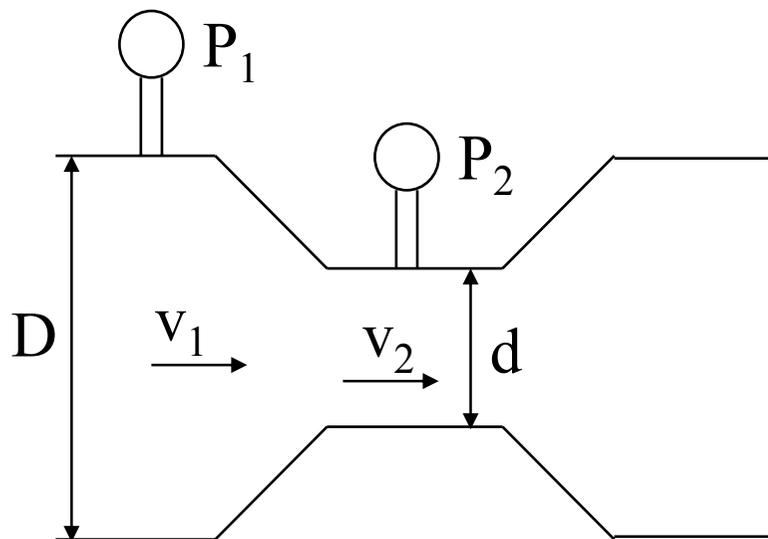
$$t_{12} = \frac{L}{c + v} \quad \text{vel. ultrasuoni + vel. liquido}$$

$$t_{21} = \frac{L}{c - v} \quad \text{L lunghezza camera}$$

$$t_{21} - t_{12} = L \left[\frac{1}{c - v} - \frac{1}{c + v} \right] = \frac{2vL}{c^2 - v^2} \cong \frac{2vL}{c^2}$$

essendo $c \gg v$

TUBO DI VENTURI (VENTURIMETRO)



La strozzatura fa aumentare la velocità del liquido (se la portata è costante).

In assenza di perdite per attriti, aumenta l'energia cinetica a scapito della energia potenziale

Legge di Bernoulli: $\rho v^2/2 + p + \rho gh = \text{cost.}$

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2$$

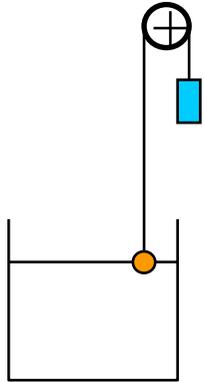
$$\text{ma } F = vA = v_1 \frac{\pi}{4} D^2 = v_2 \frac{\pi}{4} d^2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{16 \rho F^2}{2\pi^2} \left[\frac{1}{d^4} - \frac{1}{D^4} \right]$$

supponendo costante la densità

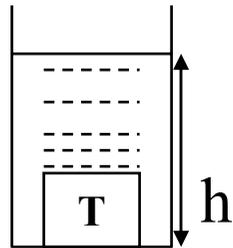
La perdita di pressione nella strozzatura è compensata, solo in parte, dall'allargamento finale. Perdite dovute a vortici e attrito. Per questo P₂ è misurata al centro della strozzatura.

LIVELLOMETRI



Galleggiante per misurare il livello + trasduttore di posizione angolare per misurare lo spostamento della puleggia.

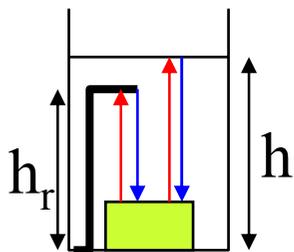
Necessità filo sempre teso e forza del peso costante.



Generatore di ultrasuoni sul fondo di una vasca: il fascio viene riflesso dal pelo libero dell'acqua e l'eco è ricevuto dopo un tempo

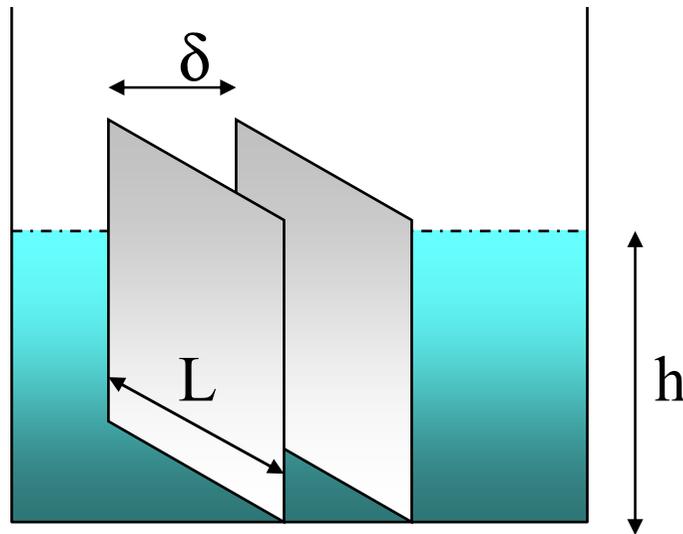
$$t=2h/c$$

c può dipendere dalla temperatura del liquido. Per svincolarsi si può introdurre un cammino intermedio con un ostacolo fisso ad altezza nota. L'ostacolo riflette parte del fascio ultrasonico



$$h=h_r t/t_r$$

LIVELLOMETRI RESISTIVI E CAPACITIVI



2 armature immerse nel recipiente e si effettuano misure di capacità o resistenza

Se il liquido è conduttore quando si misura la capacità si lavora ad alte frequenze in modo da trascurare il contributo resistivo in parallelo alla capacità.

MISURA DI RESISTENZA

$$R = \frac{\delta \rho}{A} = \frac{\delta \rho}{Lh} \quad A = Lh \text{ (superficie immersa)}$$

MISURA DI CAPACITA'

$$C = \epsilon_0 \frac{A_1}{\delta} + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{\delta} \quad A = Lh \quad A_1 = (H - h)L \quad (H \text{ altezza elettrodi})$$

$$C = \epsilon_0 \frac{LH}{\delta} + \epsilon_0 \frac{(\epsilon_r - 1)hL}{\delta}$$

MISURATORI DI ACIDITÀ (pHmetri)

Acidi e basi si dissociano in acqua in ioni positivi e negativi. Prevalentemente ioni H^+ in caso di sostanza acida, ioni OH^- altrimenti.

L'acqua stessa presenta una dissociazione tra ioni positivi e negativi ma è considerata bilanciata elettricamente con una concentrazione di ioni H^+ di 1 ogni 10 milioni di molecole (o 10^{-7}).

Introducendo un acido si arricchisce la quantità di H^+ e si impoverisce quella di OH^- , viceversa in caso di basi.

Si definisce $pH = -\log [H^+]$ l'indice di misurazione dell'acidità.

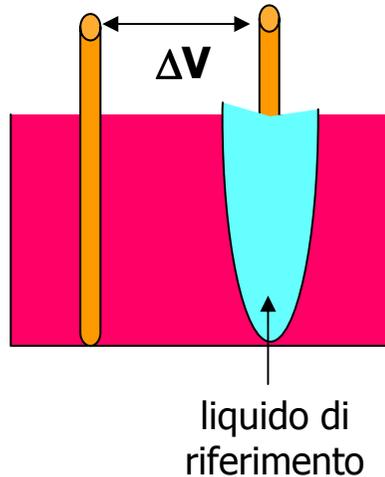
In caso di soluzione neutra $pH=7$, se basica $pH=14$, se acida $pH=0$.



Un pHmetro è uno strumento consistente in una vasca con 2 elettrodi uno dei quali immerso in una soluzione tampone usata come riferimento.

La misura si ottiene come ΔV dovuta al contatto di superficie tra i 2 elettrodi ed i liquidi (tampone + sostanza in esame). Gli elettrodi forniscono un potenziale che in caso è costante (riferimento) e nell'altro dipende dalla concentrazione degli ioni

MISURATORI DI ACIDITÀ (pHmetri)



La legge che permette di risalire alla concentrazione di ioni nel liquido in esame è:

$$\Delta V = E_0 - 0.0591 \log [H^+]$$

Si tratta di una tensione piccola, ma rilevabile (anche se da amplificare) e sufficientemente precisa.

Durante la regolazione dello strumento si può usare prima una sostanza acida e poi una basica.

Questo provoca un salto brusco di pH e quindi della misura a cavallo della condizione di equilibrio e questo può provocare problemi di stabilità (è come se avvenisse una variazione ad alta frequenza).

Se però si usano vasche di dimensioni sufficientemente grandi il tempo necessario per la variazione di pH sarà maggiore essendo legato alla diffusione degli ioni H^+ .

La reazione di equilibrio sarà dunque meno veloce comportando minori rischi di stabilità.