

Seminario di TDP sui Sensori e Trasduttori

Martire Settimio V°B 99/2000

Seminario sui sensori e trasduttori

Seminario svolto nell'Anno Scolastico 99/2000 per il corso di TDP
(Tecnologie Disegno e Progettazione)

© 2000- 2005 Settimio Site Web

<http://sww.interfree.it>

sww@interfree.it

Versione 1.0

Il seguente documento potrebbe contenere errori.

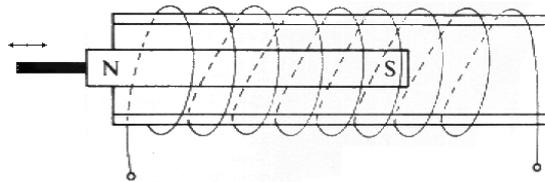
Documento scritto con OpenOffice 1.1.3 (<http://www.openoffice.org>) su Mandrake Linux 10.1
(<http://www.mandrakesoft.com>)

I Trasduttori di velocità

La velocità di un oggetto indica la rapidità con cui la sua posizione cambia nel tempo.

Esistono trasduttori di velocità lineare e angolare che basano il proprio funzionamento su fenomeni elettromagnetici o ottici.

I trasduttori di velocità lineare



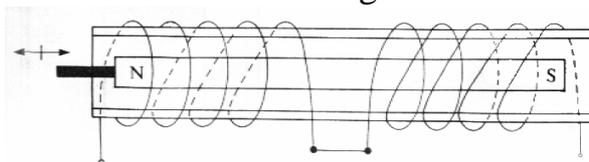
I trasduttori di velocità lineare di tipo elettromagnetico, consistono di un magnete permanente solidale con l'oggetto di cui si vuole misurare la velocità e libero di muoversi avanti e indietro all'interno di un avvolgimento. Quando il magnete si muove, viene indotta ai capi della bobina una forza elettromotrice e proporzionale alla variazione del flusso concatenato Φ secondo la legge di Lenz:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

dove N rappresenta il numero di spire dell'avvolgimento.

Più è elevata la velocità dell'oggetto solidale al magnete e tanto maggiore è la forza elettromotrice. Il principale svantaggio di questo dispositivo è che la sua sensibilità dipende dalla posizione assunta dal magnete permanente. Si può infatti osservare che quando esso si trova interamente all'interno dell'avvolgimento non essendoci in questo caso alcuna variazione di flusso magnetico, l'uscita risulta nulla.

Per ovviare a questo inconveniente si ricorre a dispositivi, indicati come LVT (linear velocity transducer), che utilizzano due avvolgimenti in controfase



Come si può notare l'LVT ha una configurazione sostanzialmente simile al trasduttore di spostamento LVDT. In effetti si può impiegare un LVDT come trasduttore di velocità alimentando principalmente il primario in corrente continua in modo da magnetizzare il nucleo e prelevando il segnale sul secondario.

I trasduttori di velocità angolare

I più diffusi trasduttori di velocità angolare sono il tachimetro in c.c. e il tachimetro in c.a.

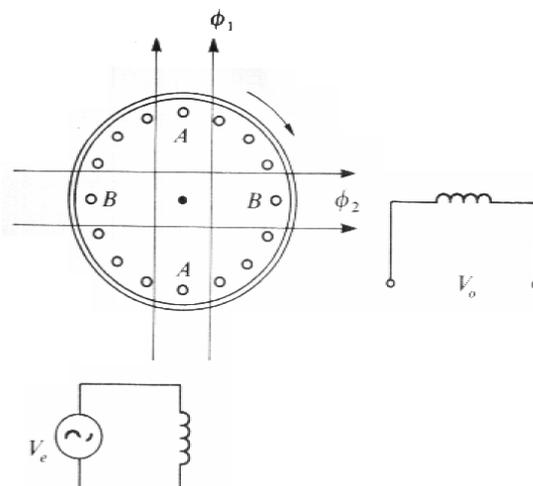
Il primo fornisce in uscita una tensione continua direttamente proporzionale alla velocità angolare, il secondo invece una tensione alternata avente ampiezza proporzionale alla velocità angolare.

Tachimetro in c.c.

Detto anche dinamo tachimetrica è in sostanza una dinamo a magnete permanente con particolari caratteristiche elettromeccaniche, ovvero con basso momento di inerzia ed elevata linearità di risposta. La tensione d'uscita è prelevata dal rotore attraverso un sistema di spazzole striscianti su un collettore ad anello. Essa non è pertanto perfettamente continua ma presenta una certa ondulazione che rende questo trasduttore adatto per misurazioni di precisione. Si osservi comunque che la dinamo tachimetrica ha il vantaggio di fornire una tensione la cui polarità è indicativa della direzione di rotazione. Le applicazioni tipiche riguardano il controllo di velocità dei motori.

Tachimetro in c.a.

Questo trasduttore, detto anche generatore a induzione, è provvisto di due avvolgimenti di statore, quello di eccitazione e quello di uscita, posti a 90° elettrici fra di loro, e da un avvolgimento in cortocircuito sul rotore



Quest'ultimo può essere del tipo a gabbia di scoiattolo oppure a forma di coppa in materiale fortemente conduttivo come rame o alluminio.

Alimentando l'avvolgimento di eccitazione con una tensione alternata V_e di ampiezza e frequenza costanti, viene generato un flusso primario Φ_1 , anche esso alternato, che induce una forza elettromotrice (f.e.m) sui conduttori del rotore. Tale fem risulta proporzionale alla velocità con cui i conduttori tagliano le linee di flusso e pertanto è massima per le spire (A) parallele a tali linee e nulla in quelle (B) ad esse ortogonali.

A sua volta la corrente generata dalle f.e.m. nel rotore produce un flusso secondario Φ_2 perpendicolare al primo e adatto pertanto ad indurre nell'avvolgimento di uscita una tensione V_o . Questa risulta così alternata con la stessa frequenza della tensione di eccitazione V_e e ampiezza direttamente proporzionale alla velocità angolare del rotore.

I tachimetri in c.a., non avendo spazzole striscianti, presentano una affidabilità elevata delle dinamo tachimetriche.

Tachimetri ottici.

Si tratta sostanzialmente di encoder incrementali che forniscono un segnale la cui frequenza è proporzionale alla velocità angolare da rilevare. Negli encoder il minimo spostamento angolare apprezzabile (risoluzione) vale $\alpha=2\pi/N$ dove N è il numero delle tacche presenti sul disco. Pertanto la velocità angolare ω , ovvero l'angolo percorso dal disco nell'unità di tempo, vale:

$$\omega = 2\pi n/N = 2\pi f/N \text{ [rad/s]}$$

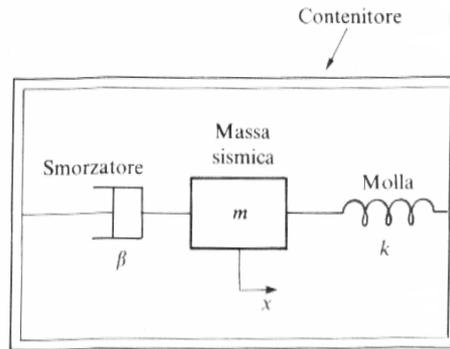
dove n indicando il numero delle tacche rilevate nell'unità di tempo, coincide con la frequenza f del segnale impulsivo generato dall'encoder. Quest'equazione rappresenta in definitiva la caratteristica di trasferimento del trasduttore.

Accelerometri

Gli accelerometri sono trasduttori impiegati per misurare accelerazioni, vibrazioni e urti meccanici, il cui funzionamento si basa sullo spostamento della cosiddetta massa sismica.

Essi sono costituiti sostanzialmente da una massa sospesa, tramite una molla ed uno smorzatore, ad un contenitore rigido. Quando quest'ultimo viene sottoposto ad una

accelerazione, la massa si sposta rispetto al contenitore, ritornando nella posizione di riposo quando l'accelerazione si annulla.



in condizioni stazionarie lo spostamento x della massa sismica è espresso dal prodotto tra l'accelerazione a e il rapporto tra la massa m e la costante elastica della molla k , ossia:

$$x = \frac{am}{k}$$

L'accelerazione come si vede, è stata trasdotta in uno spostamento che può essere rilevato facilmente con un trasduttore opportuno. In genere per le basse frequenze (< 100 Hz) si usa un LVDT, per frequenze più elevate (fino a 10 kHz) si usano gli estensimetri, mentre per frequenze ancora più elevate (fino a 100 kHz) si usano trasduttori piezoelettrici.

In condizioni dinamiche bisogna considerare anche gli effetti dell'attrito viscoso dello smorzatore, proporzionali alla velocità.

Attualmente gli accelerometri trovano larga applicazione su tutti i tipi di veicoli, dalle automobili alle navi, dagli aeroplani alle navette spaziali, per misurazioni di accelerazione, decelerazione e vibrazioni. Sulle automobili ad esempio gli accelerometri sono impiegati esclusivamente per rilevare la brusca decelerazione che prelude ad uno scontro e quindi per comandare il gonfiamento del cuscino d'aria anticollisione (air bag).

Trasduttori di forza e di pressione

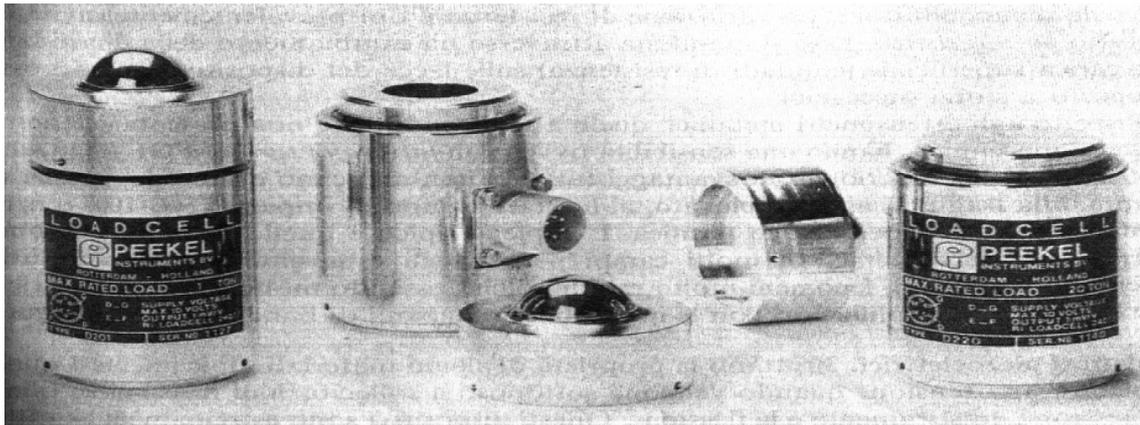
Sensori e trasduttori di forza

I trasduttori di forza, noti anche come celle di carico, sono utilizzati sia nelle misure di forza vere e proprie, sia per la determinazione della massa (pesatura).

Generalmente questi trasduttori impiegano sensori che convertono la forza applicata in una deformazione o in una deflessione di un elemento elastico.

Queste a loro volta, tramite un LVDT oppure un estensimetro o ancora un trasduttore piezoelettrico, producono un segnale elettrico di uscita. In genere per forze di piccola entità si utilizzano LVDT, per forze più grandi estensimetri e infine per forze di entità ancora maggiore trasduttori piezoelettrici.

Nella figura sottostante sono mostrate alcune celle di carico piezoelettriche commerciali.



Estensimetri.

Gli estensimetri, noti anche come strain gage sono sensori in grado di convertire una deformazione in una variazione di resistenza elettrica. Essi possono essere metallici o a semiconduttore.

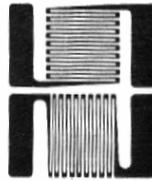
Gli *estensimetri metallici* sono costituiti da una griglia di misura incollata su un supporto di plastica sottile, alla estremità della quale vengono saldati due conduttori. L'estensimetro viene applicato mediante un collante adatto, direttamente sul corpo di cui si vuole misurare la deformazione in modo che questa venga trasmessa alla griglia che la trasforma in una variazione di resistenza elettrica.

Il montaggio dell'estensimetro deve avvenire in modo che l'asse della griglia coincida con la direzione dello sforzo che si intende misurare.

Il materiale del conduttore che costituisce la griglia può essere a sezione rettangolare per gli estensimetri a foglio o a sezione circolare per gli estensimetri a filo. Questi ultimi hanno il disegno della griglia sempre dello stesso tipo sono molto robusti ma presentano, per la loro forma, una ridotta capacità di smaltimento del calore.

Gli estensimetri a foglio che sono prodotti con la tecnica della fotoincisione, possono invece assumere dimensioni e forme diverse. Ciò consente di realizzare estensimetri in grado di misurare sollecitazioni estremamente ridotte.

Con questa tecnica è inoltre possibile realizzare i cosiddetti strain gage a rosetta costituiti da più elementi disposti in modo da rilevare sollecitazioni provenienti da diverse angolazioni



FABT-25A-12SX
2-Element Rosette
90° Planar
(foil)

Gli *estensimetri a semiconduttore* hanno come elemento sensibile una griglia di materiale semiconduttore. La variazione di resistenza è ora prevalentemente attribuibile all'effetto piezoresistivo. Esso si manifesta attraverso un cambiamento della distribuzione della carica superficiale (e quindi di resistenza) sulle facce del dispositivo quando esso è sottoposto a sforzi meccanici.

Rispetto agli estensimetri metallici, quelli a semiconduttore non presentano fenomeni di isteresi meccanica, hanno una sensibilità ovvero un fattore di taratura GF (age factor) da 50 a 100 volte superiore. Gli svantaggi. Gli svantaggi tuttavia non mancano e sono dovuti alla non linearità, alla fragilità, al costo elevato, al limitato campo di impiego (500-1000 $\mu\text{m}/\text{m}$) e alla difficoltà di compensazione termica. L'impiego tipico è quello della misurazione di deformazioni debolissime. In molti campi peraltro gli estensimetri a semiconduttore consentono l'analisi di fenomeni molto rapidi poiché, essendo molto sensibili, non richiedono l'utilizzo di amplificatori con le inevitabili limitazioni di banda che ne conseguono.

Trasduttori piezoelettrici

Sfruttano la proprietà di alcuni materiali, tipicamente al quarzo, di generare una tensione quando vengono sottoposti a sollecitazioni meccaniche quali la compressione, lo stiramento e la flessione. Questi dispositivi sono estremamente sensibili e rispondono a sollecitazioni dinamiche in un range di frequenze da 20 Hz a 20 KHz.

Sensori e trasduttori di pressione

La pressione è una grandezza scalare definita come l'intensità della forza normale per unità di superficie, L'unità di misura nel Sistema internazionale (SI) è il *pascal* ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$). In alcuni settori tuttavia si preferiscono usare altre unità di misura;

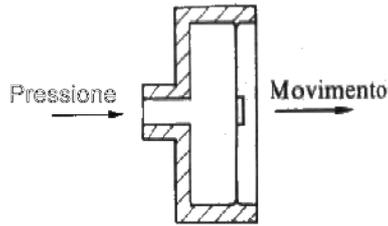
Sensori.

La misurazione della pressione viene effettuata impiegando sensori costituiti da elementi elastici come ad esempio diaframmi, tubi, capsule e soffietti, il cui spostamento è rilevato da un apposito trasduttore. Benché ognuno di questi sensori riveli una differenza di pressione, essi possono essere utilizzati per misurare la pressione differenziale, la pressione relativa o la pressione assoluta. Più precisamente per pressione differenziale si intende la differenza di pressione esistente tra due ambienti, di cui uno è scelto come riferimento. La pressione relativa a sua volta è misurata rispetto alla pressione ambiente mentre la pressione assoluta è misurata rispetto al vuoto.

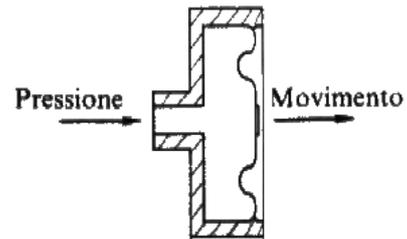
I più diffusi sensori di pressione, sono i seguenti:

- *Diaframmi.*

Un diaframma consiste in una membrana elastica circolare, in genere di acciaio inossidabile, vincolata ai bordi ed in grado di flettersi sotto l'effetto di una pressione. Può essere del tipo piatto oppure corrugato. La deflessione di un diaframma, almeno entro i limiti di impiego, è direttamente proporzionale alla pressione ad esso applicata. Questo tipo di sensore non sopporta grandi spostamenti; di conseguenza l'impiego riguarda i sistemi in cui le pressioni in gioco comportano piccole deformazioni.



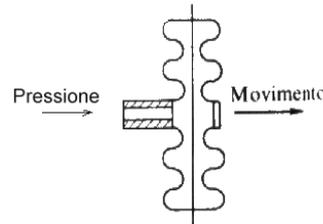
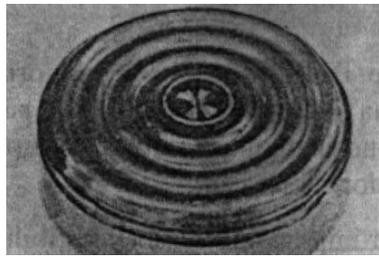
diaframma piatto



diaframma corrugato

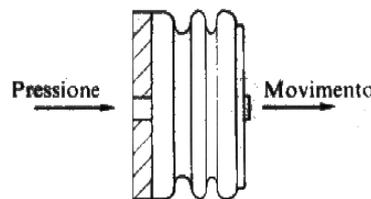
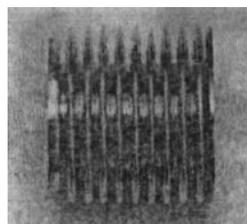
- *Capsule.*

La capsula, detta anche aneroide e costituita da due diaframmi corrugati uniti lungo la loro periferia. L'uso di due diaframmi consente quasi di raddoppiare la deflessione ottenibile con uno solo.



- *Soffietti.*

I soffiotti consistono sostanzialmente in un tubo a pareti sottili avente profonde convoluzioni e chiuso ad una delle estremità. Il numero di convoluzioni, in genere compreso tra 10 e 20, dipende dal range di pressione, dalla deformazione e dal diametro esterno. I soffiotti vengono normalmente impiegati con valori di pressione relativamente bassi e laddove non sono presenti vibrazioni significative.

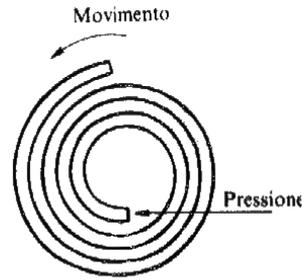


- *Tubi di Bourdon.*

Il tubo di Bourdon è costituito da un tubo flessibile appiattito di sezione ellittica o ovale piegato a << C >> o a spirale e chiuso ad un'estremità.

Quando è applicata una pressione alla sua estremità aperta il tubo tende a raddrizzarsi provocando una deflessione dell'estremità chiusa. Questi sensori

possono essere utilizzati per la misurazione di pressioni elevate, ad esempio fino a 35 Mpa.



Trasduttori di pressione capacitivi.

Si tratta di dispositivi comprendenti un diaframma mobile e un elettrodo di riferimento, che costituiscono le armature di un condensatore.

Applicando una pressione sul diaframma si determina una variazione della capacità del sistema. Di solito il condensatore è parte integrante di un oscillatore, per cui le variazioni di pressione sono convertite in variazioni di frequenza. Questo tipo di trasduttore, essendo dotato di una cavità nella quale viene fatto il vuoto, è utilizzato per misure di pressione assoluta.

Un impiego tipico è quello dalla misurazione della pressione generata da onde acustiche. La precisione è elevata, buona la stabilità, contenute le dimensioni. Questi dispositivi sono inoltre facilmente interfacciabili praticamente con tutti gli strumenti di misura elettrici ed elettronici.

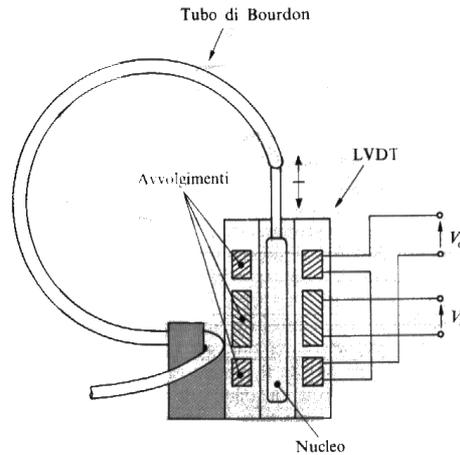
Trasduttori di pressione induttivi.

I trasduttori di pressione induttivi basano il loro funzionamento su variazioni di induttanza o di riluttanza.

Nel primo caso l'impedenza di una bobina alimentata con corrente alternata varia per effetto dello spostamento di un diaframma metallico posto nelle sue vicinanze e soggetto alle variazioni di pressione. Nel diaframma vengono infatti indotte delle correnti che generano un campo magnetico opposto a quello della bobina stessa. La variazione di induttanza che ne consegue è funzione della distanza tra il diaframma e la bobina.

I trasduttori di pressione a riluttanza variabile sono essenzialmente costituiti da un trasformatore differenziale LVDT avente come elemento sensibile un tubo di Bourdon.

La flessione del tubo dovuta alla pressione provoca lo spostamento del nucleo del trasformatore e genera di conseguenza un segnale elettrico in uscita.

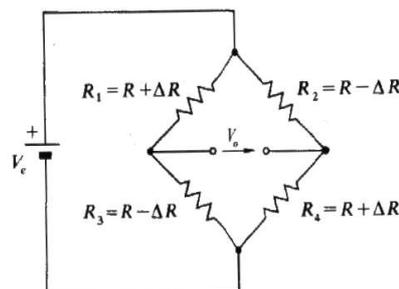


Trasduttori di pressione ad estensimetri.

Sono dispositivi costituiti da un diaframma sul quale viene incollato un ponte estensimetrico che consente di convertire la pressione in un segnale elettrico.

Il *ponte estensimetrico* è un normale ponte di Wheatstone in cui uno o più rami sono costituiti da estensimetri. Il tipo più comune prevede quattro estensimetri, uno per ciascun ramo, fisicamente disposti in modo che estensimetri di rami adiacenti siano sottoposti a deformazioni di segno contrario.

La deformazione prodotta dalla pressione sul diaframma del trasduttore provocherà allora, come è indicato in figura



un aumento ΔR delle resistenze degli estensimetri R1 e R4 e contemporaneamente una diminuzione della stessa entità delle resistenze degli estensimetri R2 e R3. La tensione V_o di uscita è pertanto espressa dalla relazione:

$$V_o = V_e \frac{R}{R}$$

dove V_o è la tensione di eccitazione del ponte e R la resistenza degli estensimetri a riposo.

Dalla quest'equazione si vede allora che il ponte estensimetrico fornisce un segnale proporzionale alla variazione ΔR della resistenza degli estensimetri e perciò indicativo della deformazione subita dal diaframma e in definitiva del valore della pressione che l'ha provocata.

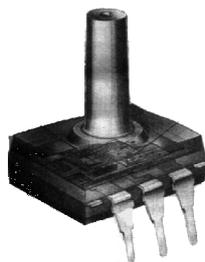
I ponti estensimetrici dei trasduttori di pressione possono essere realizzati a film sottile o a film spesso. I primi, costruiti secondo la stessa tecnologia dei circuiti ibridi, presentano elevata stabilità e temperature di lavoro molto alte, ragion per cui trovano applicazione nei processi industriali che comportano temperature d'esercizio elevate.

I trasduttori a ponte estensimetrico a film spesso vengono realizzati serigrafando sul diaframma, mediante appositi inchiostri, la figura del ponte estensimetrico. Dopo un processo di essiccazione, il deposito che rimane presenta caratteristiche piezoresistive. Il vantaggio principale di questi dispositivi è il basso costo di fabbricazione.

Trasduttori di pressione monolitici al silicio.

Questi trasduttori sfruttano la piezoresistività ossia la proprietà tipica dei materiali semiconduttori di variare la resistività quando vengono assoggettati ad una deformazione meccanica.

Costruttivamente sono formati da un diaframma sottile ed elastico (membrana) di silicio sul quale vengono ricavati, mediante diffusione o impiantazione ionica, gli elementi attivi del trasduttore o piezoresistore. Generalmente in numeri di quattro, questi sono disposti a formare una struttura a ponte di Wheatstone. Quando sono sottoposti a una pressione, i quattro resistori si deformano e poiché sono disposti in modo che due risultino in tensione e due in compressione, si produce uno squilibrio del ponte e quindi la generazione di una tensione d'uscita direttamente proporzionale alla deformazione

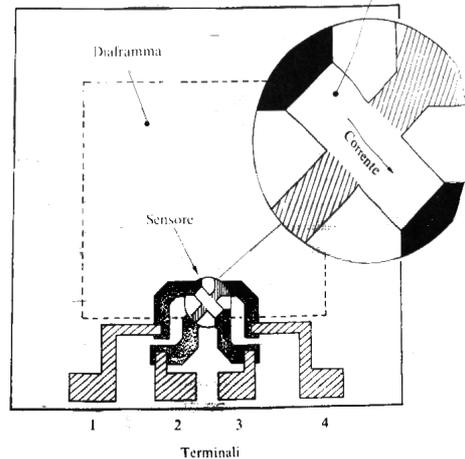


Questo dispositivo, in grado di misurare pressioni assolute, offre un range operativo da 0 fino a 200 kPa con un sensibilità massima di 1,21 mV/kPa. Sulla piastrina di

silicio sono realizzati sia i resistori estensimetrici sia il circuito di compensazione termica.

Esistono anche trasduttori con un solo piezoresistore; sono costruiti esclusivamente dalla Motorola e commercializzati con la sigla MPX.

Il piezoresistore, come si può osservare dalla figura:



è posto diagonalmente con un angolo di 45° sul bordo del diaframma. Quando è applicata una pressione e contemporaneamente fra i terminali 1 e 3 viene fatta passare una corrente, fra i lati opposti del piezoresistore si manifesta una tensione direttamente proporzionale alla pressione; questa tensione viene prelevata ai terminali 2 e 4.

Questi trasduttori sono in grado di misurare valori di pressione assoluta, differenziale e relativa tipicamente compresa tra i 10 e 200 kPa. La loro linearità è elevata, l'offset e gli errori di misura dovuti alle variazioni termiche sono ridotti. Essi sono disponibili sia nella versione con reti di compensazione termica e calibrazione sia in quelli senza compensazione.

I trasduttori di pressione piezoresistivi, siano essi con uno o quattro piezoresistori, grazie alla loro elevata linearità e sensibilità, alla bassa deriva termica e di isteresi trovano larga applicazione in moltissimi settori industriali, robotici, avionica, controllo di processo, strumentazione elettromedicale, settore automobilistico e consumer.