

## Sensori capacitivi

Sensori capacitivi possono essere impiegati per rilevare spostamenti lineari o angolari. La relazione (1) tra capacita' di un condensatore costituito da due elettrodi piani e paralleli e la sua geometria (oltre che la costante dielettrica del materiale isolante interposto tra le armature) evidenzia il fatto che facendo variare la porzione di armature contrapposte (teoricamente dallo 0 al 100%) e/o la loro distanza e/o la natura del dielettrico interposto e' possibile far variare il valore della corrispondente capacita'. Se pertanto il movimento (traslazionale o rotazionale) tra due parti determina la variazione in uno qualsiasi dei parametri citati, allora il condensatore puo' essere utilizzato come sensore di spostamento.

In Figura 3.1 sono riportati alcuni schemi di principio di sensori capacitivi di spostamento. In uno il movimento da rilevare determina uno scorrimento delle armature del condensatore e quindi una variazione della superficie utile della struttura. Nell'altra, il movimento produce una variazione della distanza tra le armature. Entrambi si prestano ad essere utilizzati come sensori di movimento rotatorio o traslatorio.

La scelta dell'una o dell'altra configurazione e' di solito determinata da considerazioni relative alla sensibilita' e al campo di misura (range).

Infatti, nel caso in cui il movimento da rilevare abbia effetti sulla distanza tra le armature, la dipendenza della capacita' dallo spostamento e' di tipo iperbolico, quindi non lineare e pertanto caratterizzato da sensibilita' non costante sull'intero campo di valori. Nel caso in cui invece e' l'area (utile) delle armature del condensatore a dipendere dallo spostamento da rilevare, la relazione capacita'-spostamento e' lineare, con una sensibilita' indipendente dal valore dello spostamento stesso. Di conseguenza, a parita' di altri fattori, la prima configurazione permette, almeno per piccoli spostamenti, sensibilita' maggiori. Per contro questa configurazione presenta l'inconveniente di un campo di misura ben piu' stretto di quello consentito dal sistema in cui le armature scorrono l'una rispetto all'altra; la corsa e' infatti limitata, quantomeno inferiormente, dal fatto che le armature non possono essere portate a contatto l'una dell'altra.

E' evidente che il campo di misura e' all'incirca nel primo caso dell'ordine di grandezza della distanza e nel secondo dell'ordine della sovrapposizione delle armature.

Per rilevare la variazione di capacita', si utilizzano generalmente circuiti che la trasformano in un opportuno segnale elettrico (tensione o corrente), le cui caratteristiche (p. es. l'ampiezza) sono legate alla capacita' oggetto della misura.

Un metodo molto semplice per convertire la capacita' in un segnale elettrico consiste nel sottoporla a tensione sinusoidale di ampiezza e frequenza note. La corrente che vi scorre e' di ampiezza proporzionale alla capacita' (e in quadratura rispetto alla tensione). Dalla misura dell'ampiezza della corrente (o del suo valore efficace) sara' pertanto possibile risalire alla capacita' e quindi allo spostamento da rilevare.

Come conseguenza, se il funzionamento del sensore si basa sulla variazione dell'area delle armature, essendo il valore della capacita' proporzionale allo spostamento, risultera' proporzionale a questo anche l'ampiezza della corrente misurata. Viceversa, se il principio utilizzato e' quello della variazione della distanza, la corrente rilevata risultera' di ampiezza inversamente proporzionale allo spostamento.

Il problema della non linearita' nella relazione spostamento - corrente in quest'ultimo caso potra' essere risolto pilotando la capacita' con una corrente sinusoidale (invece che con una tensione) e rilevando la risposta come tensione ai capi del dispositivo. Essa risultera' inversamente proporzionale al valore della capacita' e quindi direttamente proporzionale

allo spostamento (nel caso di variazione della distanza).

Se lo spostamento da rilevare e' costante, la forma d'onda in uscita - indipendentemente dalla sua natura di tensione o di corrente - risultera' sinusoidale di ampiezza costante. Se invece lo spostamento non e' costante (come avviene per esempio nel caso in cui si debbano rilevare le vibrazioni di un organo meccanico), la forma d'onda risultera' modulata in ampiezza da una segnale proporzionale (direttamente o inversamente) allo spostamento stesso.

Queste considerazioni suggeriscono il fatto che il segnale rilevato deve generalmente essere demodulato per estrarne l'informazione che interessa.

Detta operazione richiede inevitabilmente l'impiego di un filtro passa-basso, la cui presenza determina necessariamente una limitazione alla banda del sistema e quindi alla massiva velocita' di variazione della grandezza di interesse (lo spostamento, in questo caso) che e' correttamente rilevabile.

Per contro, ridurre la banda dello strumento consente di ridurre il livello rumore che caratterizzera' la misura e quindi migliorare la sensibilita' dello strumento stesso. Come in altri casi, pertanto, banda dello strumento e sensibilita' sono due caratteristiche generalmente in contrapposizione.

Un modo piuttosto semplice di rilevare la (variazione della) capacita' del sensore si basa sull'impiego di un amplificatore operazionale. In questo caso il condensatore impiegato come sensore e' disposto sul ramo di reazione di un amplificatore invertente, in cui l'altra impedenza e' ancora una capacita'  $C_1$ , di valore noto (Figura 3.2).

Pilotando l'amplificatore con un segnale sinusoidale, si ottiene un'uscita di ampiezza proporzionale al rapporto tra le impedenze associate alle due capacita'. Se la capacita'  $C_x$  varia in maniera inversamente proporzionale allo spostamento da rilevare, allora l'ampiezza della tensione d'uscita risulta direttamente proporzionale allo spostamento stesso.

Un altro metodo per l'estrazione dell'informazione che interessa (cioe' lo spostamento) e' basato sul seguente principio.

La capacita' variabile e' inserita in un circuito in serie con una resistenza e un generatore di tensione continua  $E$  (Figura 3.3). A regime la corrente nel circuito e' ovviamente nulla e la capacita' e' carica alla tensione  $E$ .

Lo spostamento da rilevare determina una variazione della capacita'  $C$ , il che produce un transitorio nel circuito, alla fine del quale la capacita' (di valore diverso rispetto a quello iniziale) si trovera' nuovamente carica alla tensione  $E$ ; per la nota relazione tra capacita', carica e tensione in un condensatore ( $Q=CV$ ), essendo cambiato il valore di  $C$ , ma non quello di  $V$  (a regime), sara' diverso il valore della carica sulle armature del condensatore alla fine del transitorio, il che implica che durante il transitorio si e' avuta una certa corrente attraverso il circuito. Vedremo che, sotto opportune ipotesi, la misura di questa corrente (ovvero la misura della tensione prodotta da questa corrente sulla resistenza  $R$ ) permette di valutare lo spostamento che interessa.

Assumiamo che il sensore funzioni sul principio della variazione della distanza tra le armature.

La carica sulle armature e' data da

(3)

Questa e' una relazione non lineare tra la carica  $q$  e la distanza  $x$ . Nell'ipotesi che questa subisca variazioni molto contenute intorno al valore a riposo  $x_0$ , utilizziamo uno sviluppo in serie di Taylor in piu' variabili per tentare una linearizzazione del problema. Ovviamente detta linearizzazione risultera' tanto piu' efficace quanto piu' piccoli saranno gli spostamenti in

questione.

(4)

... e osservando che la tensione (a riposo) sul condensatore e' proprio E e quindi la carica a riposo e' data dal primo termine indicato.

Così`

(5)

La corrente nella maglia e' data dalla derivata della carica sulle armature del condensatore; infatti la variazione di detta carica puo' solo essere prodotta da una corrente nella maglia:

(6)

Essendo, per la variazioni,  $R_i = -v_C$ , segue anche

(6')

e, passando nel dominio di Laplace,

(7)

ovvero, per la funzione di trasferimento

(8).

Questa funzione di trasferimento e' caratterizzata da uno zero nell'origine e un polo. Cio' significa che se lo spostamento e' sufficientemente veloce (caratterizzato cioe' da un contenuto spettrale ad "alte" frequenze), la (variazione della) corrente - e quindi anche della tensione ai capi della resistenza - e' proporzionale allo spostamento stesso.

Il fatto che lo spostamento possa essere definito "veloce" richiede che le sue frequenze caratteristiche siano opportunamente maggiori della frequenza di polo. Viceversa, per spostamenti "lenti" (ossia per frequenze opportunamente minori della frequenza di polo), la (8) diventa

(8')

e il sistema, comportandosi da derivatore nei confronti dello spostamento x, produce in definitiva un segnale proporzionale alla velocita'.

Un altro metodo per la misura della capacita', basato su un circuito a ponte, trova utile impiego nel caso in cui il sensore sia costituito da due capacita', in configurazione differenziale, come nel caso del trasduttore differenziale di pressione schematizzato in Figura 3.4.a.

Lo strumento e' utilizzato per misurare la differenza di pressione esistente tra due ambienti.

Il funzionamento di questo trasduttore si basa sull'impiego di una sottile membrana m (flessibile) di acciaio inox che separa due cavita' in vetro, la cui superficie e' internamente metallizzata.

La membrana costituisce l'elettrodo comune alle due capacita' formate (dalla membrana stessa) con le superfici metallizzate delle cavita' (e schematizzate in figura). Ciascuna delle parti in vetro comunica con uno degli ambienti tra i quali si vuole misurare il salto di pressione.

Una differenza di pressione produce una deformazione della membrana (rispetto alla posizione piana di equilibrio) e quindi l'aumento della distanza tra questa e una delle superfici metallizzate e la diminuzione dell'altra distanza. Le due capacita', uguali per costruzione con la membrana non deformata, assumono pertanto valori tanto piu' diversi fra loro quanto maggiore e' la differenza di pressione tra le due cavita'.

Inserendo le due capacita' in un ponte di misura, completato con due resistenze, e pilotato ovviamente in corrente alternata (Figura 3.4.b), la tensione di sbilanciamento misura la differenza di pressione richiesta. Questo costituisce un esempio di trasduttore capacitivo di pressione; la membrana elastica "converte" il salto di pressione in uno spostamento (differenziale), rendendone possibile la misura mediante quella dello sbilanciamento del ponte.

Il ponte e' generalmente alimentato con tensioni a frequenza di pochi kHz. Lo sfasamento tra tensione di sbilanciamento e tensione di pilotaggio rende conto anche del verso della sovrappressione. Il ponte e' ovviamente dotato di resistenze per l'azzeramento.

Altre tecniche di misura consentono di misurare la capacita' del sensore p.es. producendo un'onda quadra con duty cycle proporzionale alla differenza tra le capacita'.

I trasduttori capacitivi del tipo di quelli mostrati permettono per esempio anche la misura di vibrazioni nelle macchine utensili; in questo caso spesso uno degli elettrodi della capacita' e' costituito dal corpo della macchina, mentre l'altro si trova solidale con un oggetto fisso (come il pavimento o una parete sufficientemente rigida e ferma). Altro impiego dei sensori capacitivi e' quello per la misura dell'usura di parti meccaniche (utensili per lavorazioni meccaniche o freni): in questa applicazione uno degli elettrodi e' ancora una volta costituito proprio dal pezzo del quale e' necessario rilevare l'usura, mentre l'altro elettrodo si trova su una parte fissa del sistema. L'usura della superficie determina un allontanamento delle armature e di conseguenza una diminuzione della capacita'.

Altro esempio di impiego di un trasduttore differenziale capacitivo e' quello per la misura di accelerazioni (accelerometro) [Figura 3.5].

Trasduttori induttivi.

Il meccanismo di trasduzione e' la variazione del coefficiente di autoinduzione di una bobina o del coefficiente di mutua induzione di una coppia di bobine, prodotta da una variazione del misurando. Quest'ultimo puo' essere, in linea di principio, lo spostamento di un elemento rotante, un oggetto in moto traslatorio, un'accelerazione, una forza, una coppia, ecc.

Sonde a variazione di induttanza.

L'induttanza di una bobina, all'interno della quale si trovi un nucleo magnetico dipende dalla posizione di quest'ultimo, ed e' massima quando il nucleo e' centrato all'interno della bobina.

Il funzionamento delle sonde a variazione di riluttanza si basa proprio sulla variazione del coefficiente di autoinduttanza (e quindi dell'induttanza L) di un avvolgimento.

In modo analogo, se sul nucleo sono avvolte due bobine, una accanto all'altra, lo spostamento del nucleo fa aumentare il valore di una delle due induttanze e diminuire l'altro. Così se le due bobine sono disposte su un ponte, l'effetto dello spostamento del nucleo, misurato mediante il ponte, e' doppio.

I trasduttori a induttanza variabile consentono misure nel range da qualche millimetro a qualche metro, con risoluzione teoricamente infinitesima e sensibilita' dell'ordine del centinaio di V/m.

Trasformatore lineare differenziale variabile.

Con due (o piu') bobine opportunamente avvolte sullo stesso nucleo magnetico, il movimento di questo modifica il valore del (o dei) coefficiente (coefficienti) di mutua induzione tra le coppie di bobine.

Se una di queste e' alimentata (in C.A.), l'altra o le altre sono sede di una f.e.m. indotta, dalla cui misura e' possibile risalire a informazioni sul movimento del nucleo e quindi di una parte in movimento solidale con questo.

Un'interessante applicazione di questo principio si trova nel trasformatore variabile lineare differenziale (LVDT) (Figura 3.6).

Esso consiste in una bobina primaria L1, due bobine secondarie L2 ed L3, collegate in serie (e in opposizione) fra di loro, e un nucleo magnetico, comune alle tre. Se la bobina L1 e' eccitata (a frequenze tipicamente dell'ordine del kHz), per la simmetria del sistema, con il nucleo in

posizione centrale, le tensioni sui due avvolgimenti secondari sono uguali fra loro (e isofrequenziali con l'eccitazione); la tensione VCD e' pertanto nulla, per il collegamento in opposizione.

Con lo spostamento del nucleo dalla posizione centrale, le due tensioni indotte non sono piu' di pari ampiezza e, mantenendosi in opposizione di fase tra loro, danno luogo a una tensione risultante ancora isofrequenziale con l'eccitazione, ma di valore di picco tanto maggiore quanto piu' il nucleo si allontana dalla posizione centrale. Per posizioni di questo simmetriche rispetto a quella di zero, le tensioni indotte sulla serie dei due secondari (vCD), sono in opposizione di fase. Pertanto l'ampiezza di vCD fornisce informazioni sulla distanza del nucleo dalla posizione di zero, mentre la sua fase (o meglio, il suo sfasamento rispetto alla tensione primaria) fornisce informazioni sul verso dello spostamento.

Anche in questo caso, per spostamenti alternativi (p. es. vibrazioni) l'informazione che interessa e' nell'involuppo della tensione secondaria, la quale va pertanto demodulata per misurare lo spostamento.

La risposta del sistema (ampiezza del segnale d'uscita in funzione dello spostamento  $x$ ) e' adeguatamente lineare su un buon intervallo di valori di  $x$  intorno allo zero.

La sensibilita' e' dell'ordine di qualche millivolt/mm per Volt di tensione di alimentazione. I range vanno dalle frazioni di millimetro a quelle del metro, con non linearita' contenuta sotto l'1% a fondo scala (anche inferiore di un ordine di grandezza negli strumenti di qualita' migliore). La risoluzione e' (solo teoricamente) infinitesima, dal momento che il movimento del nucleo e' continuo.

[Rifasamento delle tensioni sui due secondari.]

Esiste una versione in grado di rilevare spostamenti angolari e quindi anche coppie (di forze).

La tensione d'uscita del trasformatore differenziale e' una tensione sinusoidale di ampiezza proporzionale all'entita' dello spostamento da rilevare. Collegando questa tensione a un voltmetro in C.A. (che fornisce un'indicazione proporzionale p.es. al valore efficace) e' possibile ricavare l'informazione che interessa. Il voltmetro puo' inoltre essere parte dell'intero sistema di misura e quindi essere direttamente tarato in unita' di spostamento. La cosa funziona se gli spostamenti da rilevare sono statici o, al piu', lentamente variabili nel tempo; inoltre uno voltmetro in C.A. non e' sensibile alla fase, per cui non e' possibile ricavare informazioni sul verso dello spostamento (se non ricavandole in modo indipendente).

Per spostamenti veloci questa tecnica non funziona. Il problema e' allora ancora una volta demodulare il segnale ottenuto, possibilmente utilizzando una tecnica che permetta di ricavare informazioni anche sulla fase, cioe' sul verso dello spostamento. In questo modo si ottiene un segnale il cui andamento e' proporzionale a quello del movimento.

Un possibile metodo per ottenere questo risultato si basa sul circuito in Figura 3.7.

I circuiti a diodi collegati ai secondari del trasformatore sono dei raddrizzatori a doppia semionda. Con il nucleo magnetico in posizione centrale, le tensioni raddrizzate sono uguali; il collegamento "in serie" (e in opposizione) delle due resistenze fa si' che la tensione ai terminali d'uscita sia nulla. Con il nucleo in posizione dissimmetrica, le due tensioni raddrizzate non sono piu' uguali: sommandosi - in opposizione - danno luogo a una tensione risultante (sinusoidale raddrizzata) il cui segno rende conto del verso dello spostamento dell'organo mobile [Figura 3.8].

Poiche' l'informazione che interessa e' contenuta (anche) nel valor medio della tensione raddrizzata, misurando la tensione d'uscita con un voltmetro in C.C. bidirezionale, l'entita' e il segno della tensione misurata forniscono

entita' e verso dello spostamento. Ancora una volta per spostamenti non opportunamente lenti lo strumento puo' rivelarsi inadeguato a fornire l'indicazione richiesta.

In questo caso, se le frequenze in gioco sono opportune, e' possibile collegare l'uscita del sistema a un filtro passa basso (si ricordi che l'informazione che interessa e' associata al valor medio della tensione d'uscita). Con una frequenza di taglio scelta in modo che risulti opportunamente maggiore delle frequenze che caratterizzano lo spettro del movimento, ma anche adeguatamente minore della frequenza del segnale di pilotaggio del trasformatore, si ottiene il risultato desiderato. La banda del sistema e' pertanto limitata proprio a causa della necessita' di mantenere frequenza del movimento e frequenza di eccitazione adeguatamente separate (all'incirca nel rapporto 1:10).

Esistono trasformatori detti DC-LVDT (Figura 3.9); essi vengono alimentati in corrente continua e forniscono una tensione continua proporzionale allo spostamento. La tensione sinusoidale di eccitazione viene generata internamente e il sistema e' dotato di tutta la circuiteria necessaria per la demodulazione del segnale prodotto dal sensore.

Possibili applicazioni sono:

- la misura della rugosita' di una superficie (lavorazioni meccaniche);
- controllo del movimento di organi meccanici (moto lineare e rotatorio, vibrazioni);
- misura di spessori (industria farmaceutica, dimensioni delle compresse);
- misura della durezza di materiali (il materiale viene sottoposto a compressione con forza nota e mediante un LVDT viene misurata la deformazione prodotta);
- controllo di produzione (altezza di oggetti);
- controllo dello spessore (es. banconote in distributori Bancomat);
- bilance.

La possibilita' di convertire una forza in uno spostamento, per esempio mediante una molla consente di utilizzare gli LVDT anche per misurare forze. L'organo elastico impiegato (molla) ha qui funzione di convertitore forza-spostamento.

Trasduttori resistivi.

applicazioni: spostamenti, (sforzi meccanici), pressione, forza, carico, temperatura, velocita' di fluidi ...

Trasduttori potenziometrici

Data una resistenza  $R$  con possibilita' di contatto scorrevole, tra questo e ciascuna delle estremita' si misurano resistenze  $kR$  ed  $(1-k)R$  (Figura 3.20.a). Se la resistenza e' sottoposta a d.d.p.  $E$ , allora tra il contatto scorrevole e il riferimento si misura una tensione  $kE$  (Figura 3.20.b). Se in configurazione simmetrica, e' possibile rivelare verso ed entita' dello spostamento, mediante segno e valore assoluto della tensione (Figura 3.20.c).

Il filo che costituisce il resistore puo' essere avvolto su supporto lineare (e allora si rilevano spostamenti lineari) o su supporto toroidale (e allora si rivelano spostamenti angolari). La risoluzione dipende dalle dimensioni con cui si riesce a realizzare il contatto e il filo. Con avvolgimenti costituiti da spire di dimensioni contenute la variazione della resistenza e' pressoché continua. Se, nell'intento di ridurre la lunghezza del dispositivo si aumentassero le dimensioni delle spire, si otterrebbe l'effetto di una risoluzione peggiore. La discontinuita' della caratteristica puo' essere quantificata mediante il rapporto tra il salto massimo registrabile sull'intera corsa del dispositivo e la tensione di fondo scala (cioe' di alimentazione); essa e' generalmente contenuta al di sotto dell'1 per mille.

Se la distribuzione della resistenza e' lineare rispetto allo sviluppo geometrico della struttura (lunghezza o angolo) allora la relazione tra

tensione d'uscita e tensione d'ingresso e' lineare, ma solo nel caso in cui la tensione d'uscita sia prelevata con uno strumento con assorbimento nullo (voltmetro ideale). Diversamente, l'effetto caricante dello strumento introdurrà un errore nella misura, errore che sarà nullo per i valori estremi (0 e  $X_{max}$ ) dello spostamento e negativo all'interno di questo intervallo (massimo, in valore assoluto a circa 2/3 della scala) [Figura 3.21)].

Da queste considerazioni segue che le migliori condizioni di misura si hanno (ovviamente) quando la resistenza dello strumento e' molto maggiore di quella del potenziometro, il che porta alla conclusione che sia preferibile (almeno da questo punto di vista) un potenziometro di piccolo valore. La riduzione della resistenza del potenziometro porta però a una riduzione della sensibilità, che può essere solo in parte recuperata aumentando il valore della tensione di alimentazione, ma solo fino a un certo punto, per evidenti ragioni di dissipazione di potenza: il riscaldamento del filo di cui il resistore e' costituito determina infatti una variazione della resistività e quindi anche della resistenza.

La sensibilità dipende anche dalla tensione impiegata, che può essere scelta opportunamente grande. [(v. mta.pdf)].

Sensori potenziometrici posso essere realizzati, oltre che a filo avvolto, anche con plastiche conduttive o con rivestimenti metallici di una opportuna superficie. In questi ultimi casi si ottiene generalmente una risoluzione migliore. Esistono anche sensori ibridi, realizzati con filo avvolto rivestito da un sottile strato di plastica conduttiva: ciò serve a ridurre la discontinuità nella variazione di resistenza con lo spostamento.

Una realizzazione simmetrica del sensore permette la misura dell'entità e del verso dello spostamento.

Problemi tipici di questi dispositivi sono dati dall'usura cui il filo e' sottoposto, usura inevitabile dal momento che il contatto non può non essere strisciante. Altro problema può essere quello del funzionamento in ambiente con forti sollecitazioni meccaniche (vibrazioni) che possono dar luogo a errore nella misura.

I sensori potenziometrici vengono caratterizzati anche in termini di rumore. In questo caso si intende per rumore le fluttuazioni spurie della tensione d'uscita durante uno spostamento del cursore con velocità nota da un estremo all'altro. Il rumore così definito e' prodotto dalla discontinuità nella struttura del sensore, da vero e proprio rumore elettrico (termico). Entrano in gioco anche effetti di risonanza del sistema meccanico costituito dal cursore (elasticità con smorzamento).

Trasduttori elettromagnetici.

Il principio fisico sul quale si basa il funzionamento dei t.e. e' quello per il quale un conduttore di lunghezza  $l$  che si muove con velocità  $v=ds/dt$  perpendicolarmente alle linee di forza di un campo di induzione magnetica  $B$  e' sede di una differenza di potenziale indotta  $E=Bl ds/dt$ . Il fenomeno, come e' noto, deriva dalla variazione del flusso, per cui la tensione indotta risulta proporzionale alla derivata nel tempo del flusso concatenato (o "tagliato") dal conduttore. L'entità del fenomeno può essere aumentata utilizzando un filo (conduttore) avvolto in  $N$  spire. Come mostra la relazione citata, la tensione risulta proporzionale alla derivata dello spostamento e quindi alla velocità con cui il conduttore si muove attraverso il campo magnetico.

Collegando il conduttore a un circuito esterno, la tensione indotta produrrà su questo una corrente, dalla cui misura e' possibile risalire all'informazione che interessa.

Un primo esempio di applicazione si ha nel sensore lineare di velocità (LVT). In questo sistema due bobine  $B_1$  e  $B_2$  collegate in serie e in opposizione, sono avvolte su un magnete permanente  $m$ , solidale con la parte mobile

(Figura 3.21). Quando questa si muove, si ha una variazione del flusso concatenato, che produce una tensione proporzionale alla velocità di spostamento.

Per la presenza di due avvolgimenti, il sistema si presta a un impiego con misuratori a ponte. Poiché le variazioni di induttanza per le due bobine sono uguali e opposte, questo tipo di misuratore consente di ottenere un aumento della sensibilità, oltre a comportare il vantaggio di misurare entità e verso (segno) della velocità.

Misuratori di portata elettromagnetici.

Il principio sopra esposto può essere utilizzato per la misura della velocità di scorrimento (flusso) di un fluido conduttore in un tubo.

In questo sistema una porzione del condotto, realizzata in materiale non conduttore, è interessata da un campo di induzione magnetica; il fluido agisce come il filo conduttore ed è quindi sede, al momento del passaggio nella zona di campo, della f.e.m. indotta; questa può essere prelevata mediante due elettrodi E1 ed E2 realizzati sulle pareti del tubo (Figura 3.22).

Le resistenze R in figura schematizzano la caduta di tensione che si ha lungo il fluido (conduttore), quando vi scorre la corrente, che interessa il circuito di misura. Detta resistenza non è in generale facile da determinare, potendo variare con la natura del fluido, ma anche con le condizioni del moto nel condotto e viene pertanto generalmente ricavata mediante opportune operazioni di taratura del dispositivo.

Il campo magnetico può essere costante, o anche alternativo e da luogo, di conseguenza, a una tensione indotta continua o alternativa. Il sensore funziona fino a conducibilità dell'ordine delle frazioni di  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (acqua di rubinetto, alcool, mercurio ...). Altro campo di impiego è quello della misura del flusso sanguigno nei capillari.

Il grosso vantaggio di questo tipo di flussimetro consiste nel fatto che l'impiego dello strumento non richiede di inserire alcunche' nel condotto e quindi non comporta il rischio di ostruirlo o gli svantaggi che deriverebbero dalla riduzione della sua sezione. Altro vantaggio deriva dal fatto che la tensione continua misurata ha la polarità dipendente dal verso del moto e fornisce pertanto informazioni anche sul verso di scorrimento del fluido.

Il flussimetro è generalmente realizzato come una porzione di condotto che è possibile inserire nel condotto principale (interrompendo questo) mediante delle flange di sezione opportuna.

Estensimetri (strain gauge) resistivi.

Costituiscono una classe molto ampia e diffusa di sensori utilizzati per la misura di spostamenti, tensioni meccaniche, forze, ecc.

Il principio di funzionamento è ancora quello di modificare il valore della resistenza di un corpo, modificandone la geometria. Se infatti si tiene presente che per un conduttore p. es. cilindrico vale la relazione

(9)

facendo variare o  $l$  o  $S$  o entrambe, si ottiene una variazione della resistenza del conduttore. In particolare, per un conduttore cilindrico, la compressione o l'allungamento in direzione assiale produrranno rispettivamente una diminuzione o un aumento della lunghezza. Nell'ipotesi di variazione a volume costante, a un allungamento corrisponde inoltre una riduzione della sezione e di conseguenza la resistenza del conduttore varia sia per l'aumento della sua lunghezza, sia per la conseguente riduzione della sezione.

Proviamo a ottenere delle relazioni analitiche, trascurando le variazioni della resistività (piezoeresistività), per un cilindro di materiale opportuno di lunghezza  $l$  e sezione  $S$  (il simbolo  $\Delta$  indica "piccole")



variazioni).

Detto  $d$  il diametro di base del cilindro, il volume del cilindro e'

(10)

Imponendo che la deformazione avvenga con variazione nulla del volume, si ha

(11)

da cui segue (12).

Essendo (13)

Segue (14) e quindi, tenendo conto della (12),

(15)

In definitiva, la variazione relativa di resistenza della struttura e' proporzionale alla variazione relativa di lunghezza (o deformazione ( $\epsilon$ )). Per quanto finora visto la prima e' doppia della seconda.

Piu' in generale si ha

(16)

Il coefficiente di proporzionalita'  $F$  e' detto "costante dell'estensimetro" (gauge factor) e vale, per quanto detto, 2. Questo modello e' ragionevolmente corretto per estensimetri metallici.

Nelle considerazioni fin qui fatte e' stata trascurata la dipendenza della resistivita' dalla deformazione. Nei materiali (generalmente semiconduttori) nei quali questa si manifesta, la costante dell'estensimetro ha valore superiore (fino a due ordini di grandezza) e dunque l'estensimetro ha una maggiore sensibilita'. Tuttavia si manifesta anche - come e' noto - la dipendenza della resistivita' dalla temperatura, cosa che complica la misura della resistenza (o delle sue variazioni), come vedremo.

Il sensore e' dunque (Figura 3.32.a), in linea di principio, un filo, ancorato alle sue estremita', che viene allungato (o accorciato) per effetto dell'azione meccanica che si vuole misurare. Questa puo' essere una forza, una coppia, una pressione, un'accelerazione ...

Nella realta' l'estensimetro viene molto spesso realizzato con particolari accorgimenti che ne migliorano il comportamento in termini di efficienza, robustezza, sensibilita', ecc.

Per esempio, utilizzando piu' conduttori di lunghezza  $l$ , disposti parallelamente l'uno all'altro (e pertanto sottoposti alla stessa forza di trazione), ma collegati elettricamente in serie, e' possibile accrescere la sensibilita' della struttura. Oppure, sempre allo scopo di accrescere la sensibilita' della misura, e' possibile disporre piu' estensimetri in modo che le stessa deformazione della struttura provochi l'allungamento di alcuni di essi e l'accorciamento di altri (Figura 3.23.b).

Un altro accorgimento consiste nel realizzare l'estensimetro deponendo un sottile film metallico - di geometria opportuna - su una lamina di materiale plastico. Grazie alla flessibilita' di questo, la lamina puo' essere fatta aderire sulla superficie dell'oggetto del quale si vogliono rilevare le deformazioni. Il ridotto spessore della lamina rende la deformazione dell'estensimetro sostanzialmente pari a quella dell'oggetto sul quale esso e' applicato. Il materiale utilizzato per l'incollaggio e' critico per il corretto funzionamento dell'estensimetro, perche' deve assicurare la corretta trasmissione della deformazione dalla struttura in osservazione all'estensimetro.

La geometria e' studiata in modo da esaltare la sensibilita' in una direzione, riducendola nell'altra (Figura 3.23.c); grazie alla forma, l'estensimetro e' maggiormente sensibile alle deformazioni nella direzione indicata dalle frecce. Disponendo due estensimetri ortogonali l'uno all'altro, ciascuno dei due rileva le deformazioni in una direzione e le informazioni ottenute possono essere utilizzate per determinare la deformazione in

intensita' e verso. Uno sviluppo dell'estensimetro in forma di spirale permette di rilevare deformazioni derivanti da torsione.

In tutti i casi le piazzole servono al collegamento dell'estensimetro al circuito di misura.

Ridurre quanto piu' e' possibile le dimensioni degli estensimetri consente di ottenere informazioni puntuali sulla deformazione, piuttosto che informazioni "medie" sulla superficie interessata.

I materiali generalmente impiegati sono lege metalliche, come per esempio la costantana (60% Cu e 40% Ni). I valori tipici di resistenza degli estensimetri sono nell'ordine delle centinaia di ohm, fino a 1 kohm e, raramente, oltre; nell'impiego degli estensimetri e' necessario mantenere la corrente che li percorre (necessaria per la misura della resistenza) a valori opportunamente bassi, per limitare la dissipazione di potenza e quindi il riscaldamento dell'elemento sensibile.

Le dimensioni vanno generalmente dalle frazioni di millimetro a circa 10 cm.

La tecnica generalmente impiegata per le misure su estensimetri fa ricorso all'impiego del ponte di Wheatstone, grazie alla possibilita' offerta da questo strumento di effettuare misure di (variazioni di) resistenza con buona accuratezza e grande affidabilita', anche per piccoli valori della grandezza di interesse.

L'impiego di strumentazione elettronica consente di utilizzare il ponte anche fuori dall'equilibrio, permettendo la misura della tensione di sbilanciamento sostanzialmente senza assorbimento di corrente; in questo modo e' possibile ottenere da essa il valore della (variazione di) resistenza.

Nella figura 3.24 e' schematizzato il sistema di misura: le resistenze  $R_1$ ,  $R_2$  sono resistenze (fisse o variabili) il cui valore e' indipendente dalla deformazione da misurare, mentre  $R_X$  rappresenta la resistenza dell'estensimetro.

Nella pratica la misura puo' essere effettuata nel modo seguente: il ponte (Figura 3.24) viene equilibrato (rendendo nulla la tensione VAB) agendo per esempio sulla resistenza variabile  $R_1$ , in assenza di deformazione. In queste condizioni si avra' allora

(31)

e quindi, in assenza di deformazione, vale

(32)

In presenza di deformazione, la resistenza  $R_G$  passa al valore  $R_X + \Delta R_X$ ; quindi si ha

(33)

e quindi, ricordando la (32),

(34)

Se adesso e'  $R_3$  circa uguale a  $R_G$ ,

(35).

In questo modo, sotto opportune ipotesi (piccole deformazioni e quindi piccole variazioni relative di resistenza), la tensione di sbilanciamento risulta proporzionale alla deformazione, e quindi il comportamento del sistema puo' essere considerato lineare.

La tecnica descritta prende il nome di "quarter bridge" o "quarto di ponte" per il fatto che impiega solo 1/4 (cioe' una resistenza su quattro) del ponte.

La sensibilita' del sistema puo' essere accresciuta con una misura a "mezzo ponte" ("half bridge").

In questo caso si utilizzano due estensimetri, collegati alla struttura sotto esame in modo che, per la medesima deformazione, uno sia sottoposto a trazione e uno a compressione; dunque la deformazione della struttura produce nelle resistenze variazioni di segno opposto (+/-  $\Delta R_G$ ). I due estensimetri

sono collegati a due lati adiacenti del ponte (R3 ed R4).  
Sviluppando gli stessi calcoli delle (32)-(35), si ottiene in questo caso  
(36)

e cioe' una sensibilita' doppia rispetto al caso precedente; infatti a parita'  
di deformazione (e quindi di variazione relativa di resistenza) si ottiene  
una variazione doppia del rapporto VAB/E.

Se i due estensimetri sono sottoposti entrambi al medesimo tipo di  
deformazione (trazione o compressione), lo stesso effetto di aumento della  
sensibilita' puo' essere ottenuto disponendoli su due lati opposti (anziche'  
adiacenti) del ponte.

L'impiego di due celle (estensimetri) su lati adiacenti del ponte consente  
anche la compensazione degli effetti della temperatura. L'effetto si ottiene  
sottofondendo solo una delle celle alla sollecitazione meccanica, ma facendo  
si' che entrambe siano sottoposte alla medesima temperatura. In questo modo  
la variazione di temperatura agente sugli estensimetri R3 ed  
R4(=R3) produce la medesima variazione di resistenza (in assenza di  
deformazione) e quindi un effetto globalmente nullo sulla tensione di  
sbilanciamento. La deformazione agisce invece solo su una delle celle,  
e viene pertanto evidenziata dal ponte.

La tecnica piu' complessa si basa sull'impiego di quattro estensimetri, uno  
per ogni lato del ponte ("full bridge"). Le celle sono disposte in modo che,  
per la medesima sollecitazione, quelle su due lati opposti siano sottoposte a  
trazione, e le altre due siano sottoposte a compressione. La sensibilita'  
viene ulteriormente raddoppiata.

La tensione (differenziale) prodotta e' di norma di entita'  
tale da richiedere un'amplificazione, generalmente ottenuta mediante un  
amplificatore da strumentazione.

Esistono strumenti, detti "Automatic Strain Indicator" che, collegati ai  
quattro vertici del ponte, lo sollecitano (fornendo la tensione E) e misurano  
la tensione di sbilanciamento VAB, previa amplificazione. Se opportunamente  
calibrati, fornendo il  
valore della costante di cella, bilanciati per eliminare un eventuale offset,  
forniscono direttamente l'indicazione della deformazione. Lo strumento puo'  
essere configurato a quarto di ponte, a mezzo ponte o a ponte intero e a  
questo scopo e' internamente dotato delle resistenze eventualmente necessarie  
per completare il ponte.

Versioni piu' sofisticate dello strumento consentono di effettuare la misura  
su piu' canali, di filtrare la tensione misurata (per eliminare l'effetto di  
disturbi separabili in frequenza) e di memorizzare le misure.

L'accuratezza tipica dell'estensimetro - considerato come semplice trasduttore  
- non e' di norma migliore dell'1%. Tuttavia una opportuna procedura di  
calibrazione (p. es. per la misura di forze o pressioni), consente di ottenere  
un'accuratezza superiore.

Le cause di errore piu' comuni nelle misure con estensimetri sono il rumore  
elettrico, le forze elettromotrici di natura elettromagnetica,  
l'autoriscaldamento. Pertanto utilizzando gli estensimetri si dovra' valutare  
la necessita' di impiegare opportuni sistemi schermanti, oltre a scegliere il  
valore piu' opportuno per la tensione di alimentazione. Non e' infatti corretto,  
allo scopo di migliorare la sensibilita', accrescere la tensione di  
pilotaggio del ponte oltre un certo limite, per non causare un eccessivo  
riscaldamento delle resistenze del ponte. In particolari casi potra' essere  
opportuno alimentare il ponte solo durante il tempo strettamente necessario  
per effettuare la misura, invece di tenere il ponte stesso continuamente sotto  
tensione. Si dovra' inoltre eventualmente tenere conto  
degli effetti della temperatura ambiente sul comportamento dell'estensimetro.  
Tra le specifiche degli estensimetri si trova generalmente il range di  
temperature di funzionamento all'interno del quale sono garantite le

caratteristiche di linearita' e accuratezza dichiarate dal costruttore.

Un'altra possibile sorgente di errore e' il fatto che il materiale di cui e' fatto l'estensimetro (o il supporto su cui e' realizzato) e l'oggetto su cui viene effettuata la misura di deformazione abbiano eventualmente coefficienti di espansione termica differenti; in questo caso una variazione di temperatura produce una tensione meccanica anche in assenza di forza (esterna) applicata, dando luogo a un errore nella misura. Per questa ragione spesso i costruttori forniscono estensimetri specificamente realizzati in modo che abbiano proprieta' di espansione termica adatte a quelle dei piu' comuni materiali (acciaio, materie plastiche, alluminio, ecc.).

La minima deformazione misurabile e' limitata dal rumore termico prodotto nelle resistenze. Considerando anche il sistema di amplificazione, sono presenti altre sorgenti di rumore (anche non bianco), che "mascherano" livelli di segnale non opportunamente elevati.

La risposta dinamica degli estensimetri e' di norma costante in una banda fino a qualche decina di kilohertz.

Spesso il trasduttore e' localizzato a grande distanza dallo strumento di misura. E' questo il caso, per esempio, in cui da una postazione centrale devono essere tenute sotto controllo le deformazioni di piu' strutture, eventualmente in luoghi diversi. In questo caso la lunghezza dei collegamenti tra lo strumento e il trasduttore puo' costituire fonte di errore nella misura. Con riferimento alla Figura 3.25.a, in cui  $R_g$  rappresenta ancora la resistenza del trasduttore e le resistenze  $R$  rappresentano invece quella del collegamento (due fili) e' evidente il fatto che queste due resistenze si sommano a quella del trasduttore, producendo appunto un errore nella misura. L'errore puo' essere ridotto utilizzando per collegare lo strumento di misura un terzo conduttore (Figura 3.25.b); in questo caso le due resistenze  $R$  ed  $R$  si trovano su rami adiacenti del ponte e danno luogo pertanto e contributi di segno opposto sulla tensione di sbilanciamento: l'effetto complessivo e' pertanto idealmente nullo; nella pratica l'errore si riduce all'incirca di un ordine di grandezza rispetto alla configurazione base. E' da precisare che ovviamente anche il terzo conduttore utilizzato ha una propria resistenza; questa pero', non essendo praticamente percorsa da corrente per l'elevata impedenza d'ingresso dello strumento utilizzato, non influenza il risultato della misura.

Se dotati di opportuni convertitori, gli estensimetri possono essere utilizzati per la misura di forze, coppie di forze, (differenze di) pressioni [Figure] o per realizzare degli accelerometri. Trovano impiego anche nelle bilance per usi domestici o industriali.

Trasduttori resistivi di temperatura

La resistenza di un materiale e' notoriamente dipendente dalla temperatura. La resistenza di un oggetto di materiale e forma opportuna dipende dalla temperatura ed esso puo' allora essere utilizzato come trasduttore di temperatura.

Trasduttori di temperatura possono essere realizzati per esempio utilizzando resistori al Platino: la relazione tra resistenza e temperatura e' lineare con buona approssimazione e su un intervallo di temperature piuttosto ampio. Una relazione semiempirica, che tiene conto anche della non linearita' nel comportamento del dispositivo puo' essere espressa nella forma:

$$(41)$$

ed esprimendo la temperatura  $T$  in gradi centigradi.

La relazione indicata prende il nome di relazione di Callender e Van Dusen. Essa richiede 4 misure (in corrispondenza di quelli che sono detti "punti di calibrazione") per la determinazione del valore dei quattro coefficienti. Tra questi,  $R_0$  rappresenta la resistenza alla temperatura di 0 gradi centigradi. Nei resistori detti PT100, si ha  $R_0=100$  ohm.

L'andamento della relazione espressa dalla (41) coincide sostanzialmente con

la relazione

(42)

per temperature al di sotto di 500 gradi centigradi; alla temperatura di 800 gradi centigradi lo scarto tra le due relazioni e' del 10% circa. Si osservi che temperature al di sopra di qualche centinaio di gradi sono incompatibili con l'impiego di molti dei materiali normalmente utilizzati per realizzare fili, componenti elettrici e, a maggior ragione, componenti elettronici!

I resistori di questo tipo appartengono alla categoria dei cosiddetti P.T.C. (positive temperature coefficient) ovvero dei (dispositivi con) coefficiente termico positivo ( $\alpha > 0$ ).

Un'altra classe di dispositivi utilizzabili come trasduttori resisitivi di temperatura e' quella degli N.T.C. (negative temperature coefficient), detti anche termistori NTC. Essi sono generalmente realizzati con ossidi di Manganese, Nichel, Cobalto, Rame, Ferro, titanio, o con materiali semiconduttori.

Gli NTC sono generalmente caratterizzati da una risposta molto rapida ed elevatissima sensibilita', con variazioni del 10 o 20 % per grado centigrado di variazione della temperatura.

La relazione tra resistenza e temperatura e' del tipo

(43)

e' puo' essere semplificata (approssimandola) in

(44)

Generalmente viene impiegata la forma

(45)

in cui  $R_0$  e' la resistenza alla temperatura (di riferimento)  $T_0$ , espressa in Kelvin

In quest'ultima forma e' piu' evidente il fatto come essa derivi da una relazione di tipo esponenziale tra temperatura e resistivita', tipica dei semiconduttori. Il termine Beta varia evidentemente con la natura del materiale. Per i vari materiali generalmente utilizzati per realizzare termistori NTC, Beta ha valori compresi tra 1500 K e 6000 K.

Un grosso inconveniente derivante dall'impiego dei termistori NTC e' quello della non linearita' della relazione  $R(T)$ . Per ovviare a questo inconveniente e' possibile impiegare delle semplici tecniche di linearizzazione. Una di queste consiste nell'aggiungere una resistenza convenzionale (cioe' di valore noto e non dipendente dalla temperatura) in serie o in parallelo al termistore.

Un esempio di linearizzazione conseguito con un collegamento in parallelo e' riassunto in Figura 3.26, in cui la curva superiore rappresenta l'andamento della resistenza in funzione della temperatura per un N.T.C. con i parametri (Beta,  $T_0$ ) indicati nella figura stessa, la curva inferiore mostra l'andamento della resistenza ottenuta mettendo in parallelo all'N.T.C. una resistenza  $R_P$  da 500 ohm, la linea indica l'approssimazione lineare.

La linearizzazione interessa evidentemente un ben determinato intervallo di valori di temperatura, dipendentemente dal valore scelto per la resistenza collegata in parallelo al termistore. In questo modo si ottiene una variazione della resistenza (approssimativamente) proporzionale alla variazione di temperatura.

Risultati analoghi possono essere ottenuti con un collegamento in serie; in questo sara' la variazione di conduttanza della struttura a risultare proporzionale alla variazione di temperatura. La scelta dell'una o dell'altra soluzione puo' essere determinata dalla eventuale necessita' di misurare la resistenza misurando la tensione ai suoi capi (e in questo caso sara' utilizzato il collegamento in parallelo) oppure la corrente che vi scorre (e in questo caso sara' utilizzato quello in serie).

La riduzione della non linearita' del trasduttore viene pagata con una

riduzione del coefficiente termico dell'insieme, cioè della sensibilità.

Per la misura della resistenza è ancora utilizzabile uno strumento a ponte.

In ambito biologico/biomedico i termistori vengono utilizzati per la misura del flusso respiratorio (anemometro), per la misura di differenze di temperatura tra le diverse regioni di un organo, per la misura, con metodo calorimetrico, delle quantità di valore prodotte in reazioni biochimiche, per la misura della temperatura corporea. I termistori possono essere miniaturizzati al punto da ottenerne alcuni che possono essere alloggiati in un ago da siringa o all'interno di un catetere. Le dimensioni dei modelli di impiego più comune sono tuttavia dell'ordine del millimetro.

Anemometri a filo caldo (cenni).

Si tratta di sensori resistivi generalmente impiegati per la misura della velocità di un fluido in un condotto. Sono costituiti da un filo, generalmente di Platino, riscaldato per effetto Joule e collocato all'interno del condotto in questione. Il gas che vi scorre raffredda il filamento, determinando una variazione della resistenza. Se il sensore è disposto in un ponte, il raffreddamento produce una tensione di sbilanciamento  $E$  esprimibile empiricamente, in funzione della velocità  $v$ , come (legge di King)

$$(46)$$

I valori tipici di resistenza sono dell'ordine dell'ohm e le misure vengono effettuate nel range da 0.2 a 500 m/s.

Il trasduttore può essere reso sensibile anche al verso del flusso, disponendo due anemometri a opportuna distanza all'interno del condotto, e valutando su quale la variazione di temperatura si manifesta prima.

Un'altra tecnica di misura si basa sull'utilizzo di un circuito in reazione per mantenere costante la temperatura del filamento: la potenza necessaria per ottenere questo risultato misura la velocità del fluido.

Un difetto tipico di questi strumenti è la forte dipendenza del comportamento dal tipo di gas utilizzato (calore specifico) e dalla sua temperatura: per queste ragioni è richiesta un'accurata calibrazione, teoricamente per ogni tipo di gas. Sono inoltre oggetti molto fragili, che richiedono particolare cura nella manipolazione.

Esistono versioni corredate dalla circuiteria necessaria per il pilotaggio, la misura e la visualizzazione del risultato.

Sono utilizzati in ambito di ricerca p. es. per lo studio delle correnti vorticosi.

Trasduttori termoelettrici - Sensori a termocoppia

Sono basati sul principio fisico per cui in una struttura costituita da due metalli diversi, collegati alle due estremità realizzando delle giunzioni, se queste vengono mantenute a temperature differenti, si ha un flusso di cariche. Il fenomeno prende il nome di effetto Seebeck, dal nome dello studioso che per primo lo osservò intorno al 1820. Se uno dei due conduttori è interrotto (o una delle giunzioni viene aperta), tra i due terminali si misura una differenza di potenziale. Questa dipende dai particolari materiali utilizzati e aumenta all'aumentare della differenza di temperatura tra le giunzioni.

Nota: per effetto Peltier si ha il fenomeno inverso: facendo circolare corrente si produce un salto termico tra le giunzioni.

Le termocoppie disponibili commercialmente vengono realizzate con diverse coppie di materiali, a cui corrispondono sensibilità diverse e diversi range di temperatura utilizzabili. Sono classificate in tipi, dipendentemente dalla coppia di materiali. A titolo di esempio:

B Pt/Rh 30% - Pt/Rh 6%

0-1700 gradi C

1.24 mV a 500 gradi C

R	Pt/Rh 13% - Pt	0-1450 gradi C	4.47 mV a 500 gradi C
K	NiCr - NiAl (Cromel - Alumel)	-200-1250 gradi C	20.64 mV a 500 gradi C
T	Cu - CuNi (Rame - Costantina)	-200- 350 gradi C	20.9 mV a 400 gradi C

Come si vede, le tensioni sviluppate sono generalmente molto esigue, tipicamente dell'ordine dei millivolt; le sensibilita' sono dell'ordine della decina di microvolt per grado centigrado. Pertanto e' di norma necessaria un'adeguata amplificazione della tensione prodotta, che puo' essere ottenuta anche con amplificatore dotati di impedenza d'ingresso non elevatissima, dato il valore generalmente basso della resistenza d'uscita delle termocoppie. Per accrescere la tensione prodotta e' anche possibile mettere in serie piu' termocoppie, ottenendo le cosiddette Termopile.

Le termocoppie vengono realizzate generalmente saldando le estremita' di due fili e utilizzando eventualmente un processo di saldatura mediante raggio LASER se la sezione dei fili e' molto contenuta. Altra possibilita' e' quella di deporre su un substrato opportuno i metalli di cui e' costituita la termocoppia.

La relazione tra tensione prodotta e (differenza di) temperatura e' a rigori non lineare, ma su intervalli di temperatura molto ristretti puo' essere considerata sostanzialmente lineare. Essa puo' essere convenientemente espressa nella forma:

$$(47)$$

con  $C_1$  e  $C_2$  costanti tipiche della termocoppia. La (47) mostra anche che la tensione prodotta non e' solo funzione del salto termico ( $T_1 - T_2$ ), ma anche dei valori di  $T_1$  e  $T_2$ . L'opportunita' di linearizzare la relazione (47) e' basata ovviamente sulla possibilita' di trascurare il secondo termine.

Derivando la (47) rispetto a  $T_1$  ( $T_2$  viene considerata temperatura di riferimento) si ottiene quella che viene definita la sensibilita' della termocoppia, che a rigori dipende dalla temperatura misurata  $T_1$ .

$$(48)$$

Per misure su intervalli di temperatura piuttosto ampi, su cui cioe' non vale l'approssimazione lineare, viene di norma utilizzata una curva di calibrazione, fornita per punti e associata a una temperatura di riferimento facilmente riproducibile, come per esempio la temperatura del ghiaccio fondente.

Impurezze (localizzate o distribuite) nei materiali impiegati per realizzare la termocoppia possono determinare deviazioni del comportamento dal caso ideale. Cio' significa che per misure nelle quali e' richiesta una elevata accuratezza puo' essere necessaria una calibrazione specifica per ogni singola termocoppia.

Dalla (47) segue anche che la temperatura incognita  $T_1$  puo' essere accuratamente conosciuta solo se lo e' anche la temperatura di riferimento. Questo significa che anche nelle condizioni operative (oltre che in fase di calibrazione) una buona accuratezza e' subordinata alla possibilita' di conoscere accuratamente la temperatura alla quale si trova la giunzione di riferimento.

Un impiego tipico delle termocoppie e' quello della realizzazione di rivelatori a vero valore efficace, basati sulla definizione "energetica" del valore efficace di una tensione (o corrente).

Altra applicazione e' appunto quella della realizzazione di trasduttori di temperatura: la differenza tra la temperatura da misurare e una temperatura di riferimento produce una tensione, dalla cui misura e' possibile risalire alla temperatura incognita.

In questo caso il voltmetro impiegato per la misura della tensione puo' essere calibrato in gradi Centigradi e fornisce quindi direttamente il valore della temperatura; la calibrazione ovviamente e' specifica per il tipo di termocoppia impiegato. Se la temperatura da misurare e' molto elevata, la

termocoppia puo' essere impiegata per misure "senza contatto" (contactless).

Altra applicazione dei trasduttori a termocoppia e' quella come sensori di vuoto. La giunzione calda, che si trova nella camera in cui e' fatto il vuoto, e' scaldata mediante un filamento. Al diminuire della pressione nella camera diminuisce la dissipazione termica e quindi la temperatura (della giunzione) tende ad aumentare. Con questa tecnica si misurano pressioni nel range da 2 a  $10^{-3}$  torr.

Per le loro ridotte dimensioni (sono costituite essenzialmente da due fili) le termocoppie si prestano anche a misure in ambito biomedico, effettuate per esempio mediante l'utilizzo di cateteri o aghi: come gia' detto soffrono dell'inconveniente del valore molto esiguo della tensione prodotta (in particolare per differenze di temperatura contenute) oltre che della necessita' di utilizzare un riferimento di temperatura.

Sensori di temperatura a semiconduttori.

Il piu' semplice un sensore di temperatura a semiconduttori e' costituito da una giunzione p-n. E' noto infatti che la tensione ai capi di una giunzione polarizzata a corrente costante diminuisce all'aumentare della temperatura in modo pressoché lineare con derivata che, per il Silicio, vale qualche mV/grado centigrado (ed e' per quanto detto negativa).

La linearita' del comportamento si estende, in basso, fino a poche decine di Kelvin; la pendenza, cioe' la sensibilita' del sensore, dipende dal materiale con cui la giunzione e' realizzata, ma e' sempre dell'ordine di grandezza detto.

Il sensore viene impiegato facendolo funzionare a corrente impressa, del valore indicato dal costruttore, e misurando la tensione ai suoi capi; da questa, mediante una relazione analitica, o confrontando il valore di tensione con quelli riportati su una carta di calibrazione, e' possibile risalire alla temperatura da misurare.

In Figura 3.27 e' riportato l'andamento della tensione con la temperatura per una giunzione in GaAs appositamente realizzata per essere impiegata come sensore di temperatura. I valori indicati sono quelli forniti dal costruttore e riferiti alla corrente di polarizzazione di 10 microampere. E' possibile osservare che per temperature al di sotto di circa 30 Kelvin si ha un evidente scostamento del comportamento del sensore dal funzionamento lineare. La pendenza nella zona lineare e' di circa -2 mV/K.

Dispositivi di questo genere, dunque specificamente realizzati e calibrati per essere impiegati come sensori di temperatura hanno un costo che va da alcune centinaia al migliaio di Euro.

Un altro tipo di sensore puo' essere realizzato in forma di circuito integrato costituito da diversi transistor e alcuni componenti passivi (resistenze e capacita'). Il suo principio di funzionamento si basa su una coppia di transistori, termicamente accoppiati ma non uguali e fatti funzionare con la stessa corrente di collettore. La configurazione e' rappresentata schematicamente in Figura 3.28.a, nella quale il blocco indicato con CONTR provvede a mantenere uguali le correnti di collettore.

Se i transistor lavorano in zona attiva diretta, e' possibile scrivere per ciascuno l'espressione della corrente di collettore in funzione della tensione base-emettitore e della temperatura (tramite VT) come

(51)

Se le correnti di collettore sono uguali, si ha

(52)

Dunque

(53)

e infine

(54)



La (54) mostra che la differenza tra le tensioni base-emettitore risulta proporzionale alla temperatura assoluta di funzionamento. Si osservi che tale differenza corrisponde alla tensione sulla resistenza  $R_0$  in Figura 3.28.a, a sua volta proporzionale alla corrente di collettore di ciascuno dei due transistor

(55)

Se l'intero circuito, alimentato mediante le tensioni  $V_+$  e  $V_-$  indicate, viene collegato a una resistenza esterna  $R$ , su questa scorre una corrente data dalla somma delle correnti di collettore dei due transistori, e quindi la tensione sulla resistenza e' proporzionale alla temperatura assoluta  $T$ .

Nella pratica il trasduttore viene proprio impiegato come generatore di corrente (dipendente linearmente da  $T$ ), dalla cui misura si risale alla temperatura da misurare. La misura puo' essere effettuata misurando la tensione prodotta dalla corrente su una resistenza nota, oppure rilevando la corrente mediante p.es. un amplificatore transresistivo.

Uno schema SEMPLIFICATO del circuito, comprensivo della rete per l'imposizione delle correnti di collettore e' riportato in Figura 3.28.b. I transistori 3 e 4 costituiscono uno specchio di corrente e impongono quindi ai transistori 1 e 2 la stessa corrente di collettore. Nella realta' la struttura del circuito e' molto piu' complessa, allo scopo di ottenere caratteristiche corrente-tensione quanto piu' possibile orizzontali, come quelle cioe' di un generatore di corrente ideale.

Il funzionamento del circuito integrato AD590, prodotto da Analog Devices, si basa su un principio analogo a quello esposto. Il costo del dispositivo si aggira intorno a 1.5 dollari. Lo schema circuitale e le caratteristiche corrente-tensione di questo dispositivo, forniti dal costruttore, sono riportate nelle Figure 3.29.a e 3.29.b.

Si nota subito che l'indipendenza del valore della corrente fornita dalla tensione ai capi del dispositivo e' garantita solo per tensioni superiori a circa 4 V. Al di sotto di questo valore i transistor che (nella schematizzazione) costituiscono il circuito non lavorano in zona attiva e pertanto non sono verificate le ipotesi alla base del regionamento esposto.

Le curve rappresentate si riferiscono alle temperature di -55, 25 e 150 gradi centigradi. Il coefficiente ( $\alpha$ ) del dispositivo vale 1 microampere/K.

Il circuito si presta da alcune interessanti applicazioni.

Collegando piu' dispositivi (per esempio 3, come e' rappresentato in Figura 3.30.a) in serie e mantenendoli a temperature differenti, essi lavoreranno necessariamente con lo stesso valore di corrente. Sara' pero' il dispositivo che si trova a temperatura piu' bassa (e quindi quello al quale, secondo le caratteristiche in Figura 3.29, corrisponde il minor valore di corrente) a imporre la corrente agli altri, i quali invece avranno ai capi una tensione minore di quella minima per cui si ha il corretto funzionamento del dispositivo; essi dunque lavoreranno con una corrente che non e' piu' proporzionale alla temperatura di funzionamento. La tensione  $V_T$  prodotta sulla resistenza (esterna) sara' dunque proporzionale alla minima tra le tre temperature di lavoro dei dispositivi impiegati.

In un'altra applicazione (Figura 3.30.b) si utilizzano piu' dispositivi (nell'esempio in numero di tre) in parallelo. Se ciascuno dei tre trasduttori lavora con una tensione ai capi maggiore del minimo per cui si ha il corretto funzionamento, la tensione sulla resistenza sara' proporzionale alla somma delle temperature (cioe' delle correnti) di lavoro dei dispositivi e quindi anche alla media aritmetica delle stesse temperature. La misura della tensione  $V_T$  fornisce dunque la media tra le temperature di lavoro dei trasduttori.

Un terzo esempio (Figura 3.30.c) impiega invece due trasduttori e un

amplificatore transresistivo. Nello schema semplificato (ottenibile eliminando le resistenze R1 ed R2) la tensione d'uscita e' proporzionale alla differenza tra le temperature di lavoro T1 e T2 dei due dispositivi. Infatti si ha

(56)

con alfa dipendente dalle caratteristiche del dispositivo; per il coefficiente alfa del valore di 1 microampere/K e con R3=10 kohm si ottiene una sensibilita' di 10 mV/K. Il circuito realizza pertanto un sensore differenziale di temperatura. La resistenza R4 serve a ridurre l'offset dell'amplificatore operazionale. La resistenza R1 e il trimmer R2 servono per aggiungere un ulteriore contributo (positivo o negativo) di corrente (IR) al nodo (+). In questo caso si avra'

(57)

Il valore di IR (e quindi quello di TR) dipenderanno dalla posizione del cursore del trimmer R2. Il sistema e' ancora un trasduttore differenziale di temperatura, ma adesso la tensione d'uscita e' nulla quando T1-T2=TR e non, come prima, per T1-T2=0.