

CAPITOLO 16

16.1 Sensori e Trasduttori

Il segnale elettrico è oggi diventato il "vettore" più versatile per la trasmissione, la memorizzazione e la elaborazione delle informazioni più disparate. Le comunicazioni fra le persone (telefono, radio, televisione), le informazioni meteorologiche, i comandi a distanza, i controlli automatici delle macchine e dei meccanismi, i sistemi di regolazione automatica, gli azionamenti elettrici fanno uso dei segnali elettrici per la trasmissione delle informazioni richieste per i vantaggi che il vettore elettrico permette.

Le considerazioni appena svolte permettono di comprendere agevolmente l'interesse da sempre mostrato dal mondo industriale e da quello scientifico per quegli oggetti, chiamati "trasduttori", che trasferiscono il contenuto informativo di una grandezza fisica di un tipo ad una di un altro tipo, in particolare ad una grandezza elettrica.

L'uso di un sensore permette quindi di trasformare la grandezza fisica da sottoporre alla misurazione in un segnale elettrico ad essa proporzionale e tale da essere più facilmente trasmesso a distanza e misurato.

Nella figura 1 è rappresentato schematicamente un trasduttore di posizione con uscita in tensione ed il relativo schema circuitale elettrico in cui compaiono anche un dispositivo di alimentazione (batteria) ed uno strumento di misura (voltmetro).

L'elemento mobile si sposta in base alla grandezza fisica di ingresso determinando la modifica del punto di contatto del cursore sulla resistenza del potenziometro e quindi provocando una variazione della tensione di uscita. Misurando la tensione di uscita mediante il voltmetro si può individuare così la posizione dell'elemento mobile quindi il valore della grandezza di ingresso (posizione).

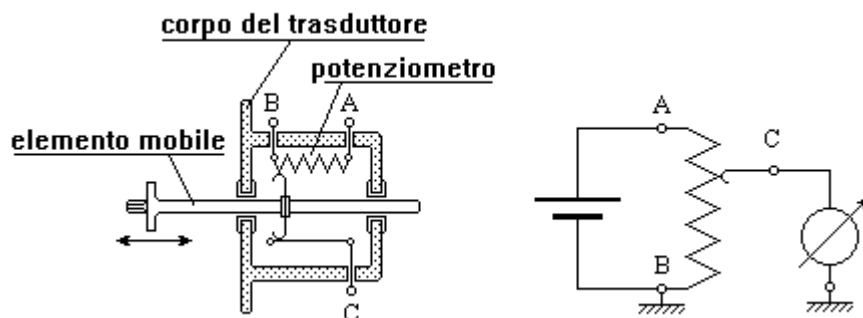


Figura 1. Funzionamento schematico di un trasduttore di posizione: l'elemento mobile, spostandosi in base alla grandezza di ingresso, determina la variazione della tensione in uscita al morsetto C.

I trasduttori, i sensori e gli attuatori hanno la stessa funzione di base: essi realizzano una trasformazione della grandezza fisica di ingresso per fornire in uscita una grandezza di tipo diverso. Ci si può chiedere perché allora sono stati utilizzati termini diversi? Le risposte che possono essere date sono diverse e non si è ancora arrivati a convergere su di una comune visione. E' opinione comune che il trasduttore sia un dispositivo che opera una trasformazione della grandezza fisica che ha in ingresso per restituire in uscita una grandezza fisica di tipo diverso. Per sensori ed attuatori vi sono invece opinioni discordi: secondo alcuni autori il sensore è un dispositivo finalizzato alla trasformazione di segnali di bassa potenza a scopo di misura mentre l'attuatore è destinato a convertire grandezze cui è associata un'energia non trascurabile. Questa opinione si basa su presupposti ingegneristici e sul significato che i termini "sensore" e "attuatore" hanno nella lingua italiana: sensore è l'elemento di percezione mentre attuatore è l'elemento che agisce per mettere in atto un comando.

La seconda opinione, sostenuta da altri ricercatori, è più sottile: il sensore è lo stadio di ingresso di un qualsiasi trasduttore mentre l'attuatore ne costituisce lo stadio di uscita. Il sensore, cioè, è quella parte di un trasduttore che si collega direttamente alla grandezza fisica che deve essere convertita in

grandezza di altro tipo; l'attuatore è invece quella parte di un trasduttore che rende disponibile in uscita la grandezza fisica convertita.

La differenza fra le due opinioni citate sembra notevole, ma se si approfondisse la discussione del problema si vedrebbe che in realtà i due concetti sono praticamente coincidenti. Personalmente però preferisco la seconda versione, anche perché essa è conforma ad una Norma tecnica, la UNI 4546 "Misure e misurazioni - Termini e definizioni fondamentali", secondo la quale il trasduttore è:

"un mezzo tecnico che compie su un segnale d'ingresso una certa elaborazione, trasformandolo in un segnale d'uscita"; il sensore è un: "particolare trasduttore che si trova in diretta interazione con il sistema misurato" e l'attuatore è un: "particolare trasduttore che si trova in diretta interazione con l'utilizzatore dell'indicazione fornita".

La Norma UNI 4546 considera quindi che un trasduttore che converte un segnale generico in un segnale elettrico può essere costituito da più trasduttori elementari, uno collegato di seguito all'altro in maniera da attuare più trasformazioni parziali. Ci possono essere infatti grandezze fisiche che non è possibile trasformare direttamente in segnali elettrici pertanto è indispensabile eseguire una trasformazione iniziale che porti ad ottenere una nuova grandezza fisica (che potremmo indicare come "di servizio") per la quale sia poi disponibile la trasformazione in grandezza elettrica. La figura 2 riporta una rappresentazione di un trasduttore, composto da due trasduttori elementari, che effettua la trasformazione di una forza in un segnale elettrico mediante una conversione intermedia in spostamento.

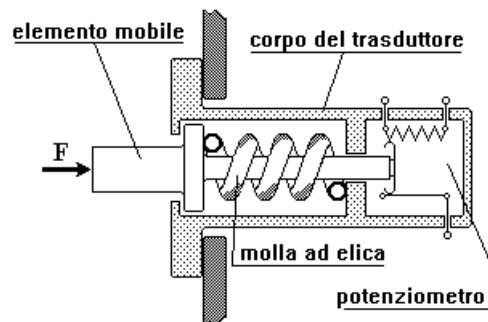


Figura 2. Trasduttore "forza-tensione elettrica": rappresentazione semplificata della catena di trasduzione con il primo trasduttore elementare (o "sensore") "forza-spostamento" ed il secondo trasduttore elementare "spostamento-tensione elettrica".

Nella figura è anche rappresentato lo schema elettrico di collegamento del trasduttore ad uno strumento di misura (voltmetro).

Il primo dei componenti elementari della catena di trasduzione è il "sensore": nell'esempio della figura 2 il sensore è quindi costituito dall'elemento elastico (molla ad elica) che trasforma la forza incognita in uno spostamento. Lo spostamento costituisce quindi la grandezza di servizio che viene a sua volta applicata in ingresso al trasduttore potenziometrico, cioè al secondo elemento della catena di trasduzione, che la converte in una tensione elettrica misurabile da un voltmetro collegato in uscita al trasduttore.

16.2 Principi fisici di funzionamento dei trasduttori

Stabilito il significato che verrà associato in questo contesto ai termini *trasduttore* e *sensore*, passiamo ad esaminare brevemente i principi fisici utilizzati più frequentemente per la realizzazione dei trasduttori. Innanzitutto, bisogna segnalare che il numero estremamente elevato di grandezze fisiche che si ha interesse a convertire in segnali elettrici ha fatto sì che venisse realizzato un numero corrispondentemente elevato di trasduttori. Il numero di principi fisici utilizzato nella realizzazione dei trasduttori è pertanto rilevante: in alcuni casi i principi utilizzati sono

relativamente semplici, in altri casi sono estremamente complessi e la loro descrizione richiede ben più delle poche pagine che possiamo qui dedicare all'argomento.

Volendo riportare in forma di tabella alcuni fra i principali principi fisici utilizzati per la costruzione di sensori e trasduttori possiamo citare i seguenti:

Grandezza di ingresso	Grandezza di uscita	Principio fisico di trasduzione
Posizione	tensione capacità induttanza	<ul style="list-style-type: none"> • variazione parametri circuitali di maglia • variazione parametri geometrici condensatore • variazione circuito magnetico induttore
deformazione	resistenza Carica elettrica	<ul style="list-style-type: none"> • variazione resistenza provocata dalla deformazione macroscopica del conduttore (effetto piezoresistivo) • polarizzazione superficiale per deformazione reticolare (effetto piezoelettrico)
Temperatura	resistenza tensione	<ul style="list-style-type: none"> • variazione resistività per agitazione termica reticolare • termoelettricità (effetto Seebeck)
Velocità	tensione frequenza	<ul style="list-style-type: none"> • induzione elettrica • "effetto Hall"
intensità della radiazione luminosa	resistenza	<ul style="list-style-type: none"> • polarizzazione di semiconduttori fotosensibili

Come è stato premesso questi sono solamente alcuni dei fenomeni fisici più frequentemente usati per la realizzazione dei sensori e dei trasduttori: per ogni grandezza fisica di ingresso vi sono normalmente più soluzioni basate su fenomeni fisici diversi. E' pertanto assai arduo il compito del progettista che deve decidere quale principio utilizzare nelle specifiche applicazioni per ottimizzare il funzionamento del sistema e per renderlo insensibile alle diverse cause di disturbo.

I sensori ed i trasduttori non sono infatti degli elementi totalmente insensibili alle cause di disturbo che possono essere presenti nell'ambiente in cui vengono installati: essi risentono del valore che le grandezze ambientali ed esterne assumono e la ampiezza del segnale di uscita ne è condizionata.

16.3 Grandezze di influenza

Le cause di disturbo vengono indicate col nome di "grandezze di influenza"; il motivo del nome è evidente: esse influenzano il comportamento del trasduttore e determinano, assieme alla grandezza di ingresso, l'andamento del segnale di uscita.



Figura 3. Sistemi con cui il trasduttore reale interagisce. gdi: grandezze di influenza.

Vi sono grandezze di influenza rappresentate dallo stato dell'ambiente in cui è inserito il trasduttore (temperatura, pressione, umidità, ecc.); vi sono poi grandezze di influenza la cui origine è da ricercare nella presenza di un sistema utilizzatore collegato all'uscita del trasduttore ed altre ancora provocate dalle caratteristiche del sistema sotto misura ed altre originate dalla circuiteria ausiliaria del sistema. Le principali grandezze di influenza sono: la temperatura dell'ambiente esterno e la variabilità della tensione di alimentazione per quei sensori che necessitano di alimentazione ausiliaria.

E' evidente che le grandezze di influenza devono condizionare il valore della grandezza di uscita estremamente meno sensibile di quanto faccia la grandezza di ingresso del trasduttore.

Si potrebbe pensare di valutare l'entità delle grandezze di influenza in modo da poter introdurre una correzione nella grandezza di uscita del trasduttore, ma questo costituirebbe un evidente complicazione del sistema: ci vorrebbero trasduttori supplementari per correggere il trasduttore principale. Normalmente non si attua questa procedura, ma si cerca di costruire trasduttori poco sensibili alle grandezze di influenza.

16.4 Modello matematico del trasduttore

Volendo ora utilizzare una rappresentazione matematica per esprimere il legame fra la grandezza fisica di ingresso (che indicheremo con il simbolo x) e di uscita del trasduttore (che indicheremo come y) si può definire quella che viene chiamata "funzione di conversione diretta":

$$y(t) = f_d(x(t)). \quad (1)$$

Nella espressione della funzione di conversione diretta compare anche la variabile "tempo" t per significare che la velocità con cui si modifica la grandezza di ingresso x condiziona la risposta del trasduttore, ma noi ora supporremo che la x si modifichi in modo tanto lento da poter trascurare tale dipendenza: questa ipotesi corrisponde di fatto al considerare il trasduttore come operante in "regime stazionario". In regime stazionario la funzione di conversione diretta assume un'espressione più semplice:

$$y = f_d(x) \quad (2)$$

da cui si può ben vedere come l'uscita y sia una funzione della grandezza fisica di ingresso x .

La grandezza di ingresso x viene chiamata "misurando".

Facendo comparire l'effetto delle grandezze di influenza g_1, g_2, \dots, g_n per rappresentare il vero comportamento del trasduttore, quando cioè esso è inserito nel mondo "reale" la funzione di conversione diretta assume la forma generale:

$$y = f_d(x, g_1, g_2, \dots, g_n). \quad (3)$$

16.5 Funzione di conversione inversa

La funzione di conversione diretta espressa dalla (2), pur esprimendo bene il legame "causa-effetto" che ha luogo nel trasduttore il quale fornisce un'uscita il cui valore è determinato dal valore del misurando, non risulta utile allo scopo di misura a cui il sensore è dedicato: è infatti attraverso la misurazione del segnale di uscita y che si vuole individuare il corrispondente valore del segnale di ingresso x . Risulta pertanto molto più utile la "funzione di conversione inversa":

$$x = f_i(y) \quad (4)$$

che, volendo tenere conto dell'effetto delle grandezze di influenza g_1, g_2, \dots, g_n , si esprime nella forma generale:

$$x = f_i(y, g_1, g_2, \dots, g_n). \quad (5)$$

La funzione di conversione inversa (5), purtroppo, ha una forma che ne rende poco pratico l'uso: meglio è quindi, da un punto di vista applicativo, fare ricorso al cosiddetto "diagramma di taratura" che esprime, in modo grafico, il legame fra uscita ed ingresso del trasduttore reale.

2.5. Diagramma di taratura

Il diagramma di taratura rappresenta il modo più semplice e più pratico per descrivere il funzionamento di un trasduttore reale in presenza delle grandezze di influenza. Si tratta di un grafico in cui vengono riportati, in funzione dei valori della grandezza di uscita i due corrispondenti valori estremi che il misurando può assumere a causa della variabilità delle grandezze di influenza. Congiungendo i punti che rappresentano i valori estremi superiori e quelli che rappresentano i valori estremi inferiori si ottengono due curve che delimitano i possibili punti di funzionamento del trasduttore; tale regione viene chiamata "fascia di valore". Congiungendo invece i punti mediani dei segmenti che collegano i diversi estremi superiori ai corrispondenti estremi inferiori si ottiene una terza curva, chiamata "curva di taratura", che rappresenta una sorta di "comportamento medio" del trasduttore.

Esaminando la figura 4 possiamo così comprendere che se il trasduttore presenta in uscita un segnale di valore y_0 , allora il misurando, cioè la grandezza d'ingresso, può assumere qualsiasi valore compreso fra $(x_0-\epsilon)$ e $(x_0+\epsilon)$. Usando una espressione matematica di scrittura compatta possiamo anche scrivere che il valore del misurando che corrisponde all'uscita y_0 è dato da $(x_0 \pm \epsilon)$. Ecco allora spiegato l'effetto delle grandezze di influenza che condizionano il comportamento del sensore: esistono diversi valori del misurando che, a causa dell'effetto delle grandezze di influenza, possono fornire lo stesso valore dell'uscita. Ovviamente non è possibile trovare quale dei possibili valori del misurando è effettivamente presente all'ingresso del sensore e ci si deve necessariamente accontentare di una informazione approssimata: "il valore del misurando è compreso nell'intervallo dato da $(x_0 \pm \epsilon)$."

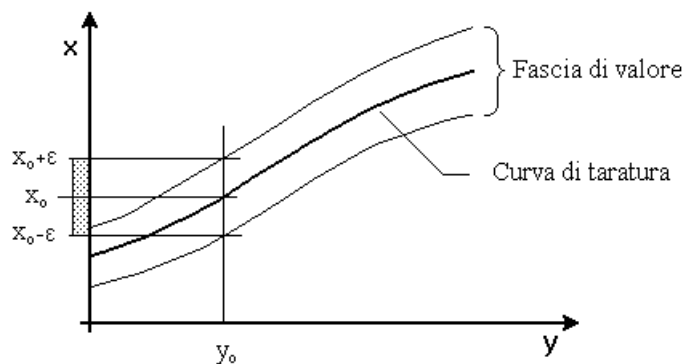


Figura 4. Diagramma di taratura di un trasduttore.

16.6 Caratterizzazione metrologica dei trasduttori

Con la espressione "caratterizzazione metrologica" si intende indicare quei valori e quelle caratteristiche che descrivono il comportamento del trasduttore, soprattutto per quanto riguarda la affidabilità della sua funzione.

Le principali caratteristiche metrologiche del sensore sono: i campi di variabilità del misurando e dell'uscita, la incertezza di misura, le caratteristiche statiche (diagramma di taratura, linearità, sensibilità, risoluzione, ripetibilità, isteresi, stabilità, condizioni di riferimento per le grandezze di influenza) e dinamiche (banda passante, costante di tempo, tempo di assestamento).

16.6.1 Campi di variabilità del misurando

La definizione del modello del trasduttore effettuata mediante la costruzione della "funzione di conversione" già descritta è legata alla escursione dei valori della grandezza di ingresso. Se questa escursione risulta estremamente ridotta la funzione di conversione può assumere una formula semplice, solitamente espressa da una legge di tipo lineare. Al contrario, se la escursione risulta

ampia sarà usualmente necessario fare uso di espressioni matematiche più elaborate. L'uso di leggi lineari permette molti vantaggi ed una semplificazione notevole dei calcoli necessari per ricavare il valore della grandezza di ingresso pertanto è consuetudine cercare di utilizzare tale tipo di leggi. Risulta così indispensabile che il costruttore del trasduttore indichi il campo di massima variabilità del segnale di ingresso affinché si possa ritenere valida una funzione di conversione espressa in forma lineare.

Come esempio consideriamo un sensore di temperatura a variazione di resistenza: in questo componente la informazione associata al misurando -cioè la temperatura- viene convertita in una informazione associata alla variazione ΔR della resistenza di un conduttore elettrico. La funzione di conversione diretta, trascurando qui per semplicità l'effetto delle grandezze di influenza, può essere espressa in questo caso come:

$$\Delta R = R_0 \cdot (a\Delta T + b\Delta T^2 + c\Delta T^3 + \dots) \quad (6)$$

dove R_0 rappresenta il valore della resistenza R del trasduttore alla temperatura T_0 , presa come riferimento, e $\Delta T = T - T_0$ è la variazione di temperatura. Le costanti numeriche a , b , c sono caratteristiche del metallo utilizzato per la costruzione del trasduttore: solitamente a è molto maggiore di b e c pertanto, fino a che l'escursione della temperatura si mantiene limitato, i termini quadratici e cubici risultano trascurabili con sufficiente accuratezza nei confronti del termine lineare:

$$a\Delta T \gg b\Delta T^2 + c\Delta T^3 + K$$

Questa condizione permette allora di "linearizzare" la (6) riscrivendola in una forma più semplice:

$$\Delta R = R_0 \cdot a \cdot \Delta T \quad (7)$$

Nel caso in cui le variazioni di temperatura siano maggiori non si potrà più trascurare il termine quadratico e, per variazioni ancora superiori si dovrà tenere conto anche del termine cubico, se si vuole ottenere una misura della grandezza di ingresso affidabile.

Per questo motivo per ciascun trasduttore viene definito il corrispondente campo di misura, che rappresenta *i limiti entro i quali deve mantenersi la grandezza di ingresso affinché il sensore funzioni secondo le specifiche fornite per caratterizzarlo.*

Risulta poi intuitivo che deve esistere un valore limite per il segnale di ingresso che, se superato, determina la rottura del trasduttore per sovraccarico. Viene a questo scopo definito il cosiddetto campo di sicurezza che specifica i limiti che la grandezza di ingresso non deve superare per non danneggiare il sensore. Il campo di sicurezza, che non è mai inferiore al campo di misura, normalmente è più ampio di quest'ultimo.

16.6.2 Campo di variabilità dell'uscita

Dato che l'uscita del trasduttore costituisce il segnale in ingresso al sistema utilizzatore, è indispensabile conoscerne la natura ed il campo di variabilità. In particolare interessano il campo di lettura utile ed i valori estremi dell'uscita.

Il campo di lettura utile è definito come *il campo di valori assunti dall'uscita corrispondentemente al campo di misura.*

I valori estremi dell'uscita sono invece definiti come: *i valori limite assunti dal segnale di uscita quando il misurando varia entro il campo di sicurezza.*

La figura 5 rappresenta graficamente i campi di misura e di lettura utile.

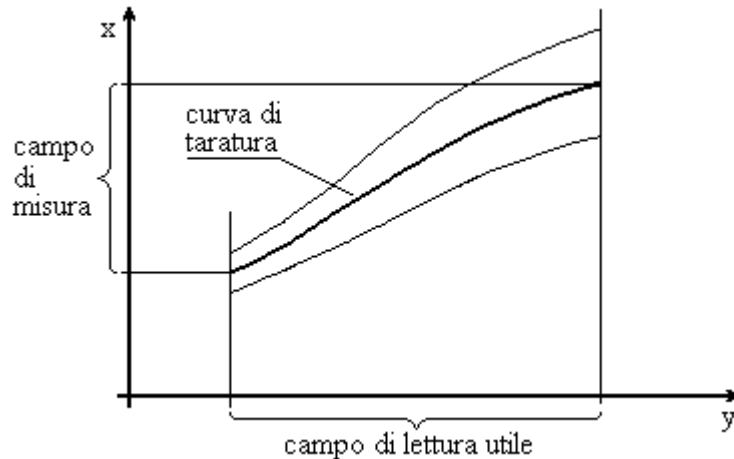


Figura 5. Campo di misura e campo di lettura utile.

16.6.3 L'incertezza della misura

L'incertezza che caratterizza l'uscita del sensore deve essere imputata a molteplici fattori concorrenti: in maniera puramente orientativa possiamo metterne in evidenza i fondamentali.

Deve innanzitutto essere considerata la incertezza intrinseca del misurando che può derivare da due principali cause:

nella definizione del misurando come parametro di un sistema fisico -il sistema misurato- resta sempre un margine di incertezza, qualunque sia la definizione adottata. Volendo fare un esempio si pensi al problema della definizione della temperatura di un "punto": comunque si operi e qualunque sia il tipo di trasduttore impiegato non sarà mai possibile misurare la temperatura di un punto che, ricordiamo, è per definizione di dimensione nulla! Verrà sempre rilevata la temperatura media di una regione spaziale, corrispondente alla dimensione del sensore impiegato.

nella definizione dello stato del sistema misurato non è sufficiente prendere in considerazione solamente la grandezza di interesse, cioè il misurando poiché lo stato dipende infatti anche da altre grandezze. Il numero di tali grandezze e la accuratezza con cui è necessario individuarne il valore aumenta man mano che diminuisce l'incertezza con cui si vuole attuare la definizione del sistema.

Si deve poi ricordare che il legame fra il misurando x ed il segnale di uscita y è condizionato dalla presenza delle grandezze di influenza. Abbiamo visto come l'effetto di queste possa essere rappresentato per mezzo delle funzioni di influenza, ma non si deve dimenticare che possono esservi delle funzioni di influenza non conosciute e che le grandezze di influenza sono a loro volta note con incertezza.

La terza causa per la incertezza è costituita dalla introduzione di semplificazioni nella definizione del modello matematico usato per descrivere il funzionamento del sensore.

Un'altra causa di incertezza è quella che viene introdotta in conseguenza di particolari operazioni eseguite sul segnale di uscita quali una quantizzazione oppure ad una amplificazione in presenza di rumore; a questo tipo di incertezza viene dato il nome di incertezza intrinseca dell'uscita.

16.6.4 Funzionamento in regime stazionario

Introducendo la funzione di conversione diretta si è ipotizzato che il misurando avesse delle variazioni così lente da poter essere considerato come costante per lunghi intervalli di tempo. La introduzione di una tale ipotesi è stata necessaria perché il comportamento del trasduttore cambia quando ad un segnale di ingresso costante viene sostituito un misurando che subisca rapide variazioni. La funzione di conversione, quindi, non è una caratteristica immutabile del trasduttore, ma modifica la sua espressione in funzione dell'andamento che il misurando applicato ha nel tempo.

Per evitare di introdurre un ulteriore causa di incertezza nella funzione del trasduttore si cerca allora, ove possibile, di sostituire al modello che descrive il reale funzionamento del trasduttore - che abbiamo detto è influenzato dall'andamento del misurando - il modello relativo al misurando costante nel tempo. Questa approssimazione è lecita tutte le volte che i risultati forniti dai due

modelli si discostano meno di una quantità prefissata, perciò è lecito tutte le volte che il misurando varia con velocità inferiore ad un valore corrispondente alla tolleranza sopra citata. Aumentando la differenza accettata fra i risultati dei due modelli aumenta di conseguenza la velocità massima concessa alla variazione del misurando.

Si dice che il trasduttore opera in "regime stazionario" tutte le volte che la velocità di variazione del misurando è inferiore al valore massimo che corrisponde alla tolleranza accettata ; si dice invece che il trasduttore opera in "regime dinamico" quando la velocità di variazione del misurando è superiore al valore massimo sopra citato.

In effetti dire che il trasduttore opera in regime stazionario equivale a dire che il misurando applicato ha variazioni così lente che la funzione di conversione è la stessa che si avrebbe con misurando costante.

E' evidente da quanto esposto che il confine fra il funzionamento in regime statico e quello in regime dinamico non è fissato dal costruttore, ma dipende dalla tolleranza con cui si studia il comportamento reale del trasduttore.

Il comportamento del trasduttore viene studiato e caratterizzato in modo diverso nei due regimi di funzionamento.

16.6.5 Le caratteristiche statiche

Le caratteristiche statiche sono quelle che descrivono il comportamento del trasduttore quando il segnale di ingresso -o misurando- si modifica lentamente nel tempo, tanto da poterlo considerare costante. Fra queste le più importanti sono il già descritto diagramma di taratura, la linearità, la sensibilità, la risoluzione, la ripetibilità, l'isteresi, la stabilità, le condizioni di riferimento per le grandezze di influenza, le funzioni di influenza e le condizioni di normale funzionamento.

Diagramma di taratura

La curva di taratura (calibration curve) è la relazione (biunivoca o almeno univoca) tra ogni valore della grandezza di uscita ed il corrispondente valore da assegnare al punto centrale della fascia di valore relativa al misurando. Quando la curva di taratura è rettilinea, cioè se la relazione è lineare, essa viene espressa con un coefficiente chiamato "costante di taratura" (calibration factor).

La "incertezza di taratura" (calibration uncertainty) è la larghezza della fascia di valore. Essa può venire espressa in tre modi diversi:

- in modo assoluto, cioè nella stessa unità di misura del misurando;
- in modo relativo, rapportandola al valore del punto intermedio della fascia cui è associata;
- in modo ridotto, rapportandola (solitamente) al limite superiore del campo di misura.

Linearità

La linearità (linearity) esprime lo scostamento della curva di taratura dall'andamento rettilineo.

Essa è specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita. Vi è pertanto un diverso valore della linearità per ogni possibile scelta della retta di riferimento. Le rette di riferimento che più frequentemente vengono adottate sono quelle che definiscono le linearità "riferita allo zero", "riferita agli estremi", "indipendente".

Linearità riferita allo zero (Zero based linearity): la retta di riferimento passa per l'estremo della curva di taratura che corrisponde all'estremo inferiore del campo di misura ed è tracciata in maniera da minimizzare il più grande (in valore assoluto) fra gli scostamenti.

Linearità riferita agli estremi (End point linearity): la retta di riferimento congiunge i due punti estremi della curva di taratura, corrispondenti agli estremi del campo di misura.

Linearità indipendente (independent linearity): in questo caso la retta di riferimento è tracciata in modo da rendere minimo il più elevato degli scostamenti. Rispetto alla definizione della linearità "riferita allo zero" viene a cadere il vincolo che vuole la retta di riferimento passante per l'estremo della curva di taratura.

I valori di tutte queste linearità vengono espressi, solitamente, in valore relativo oppure, più spesso, in valore ridotto.

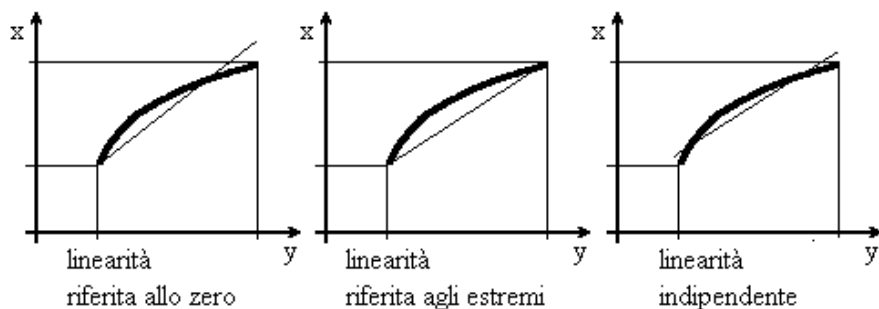


Figura 6. Le più comuni rette di riferimento per la definizione della linearità di un sensore.

Sensibilità

La sensibilità (sensitivity) rappresenta il rapporto fra la variazione dell'uscita del trasduttore e la corrispondente variazione del misurando. Il valore della sensibilità può essere ricavato, per ogni valore del misurando, dalla funzione di taratura: ne rappresenta infatti l'inverso della pendenza nel punto considerato.

Nel caso particolare di curva di taratura di tipo rettilineo la sensibilità è pari all'inverso della costante di taratura.

Le dimensioni della sensibilità sono riferite a quelle del misurando e dell'uscita; per esempio, in un sensore di pressione con uscita in tensione la sensibilità è espressa in volt/bar.

Risoluzione

La risoluzione (resolution) esprime la attitudine del sensore di rilevare piccole variazioni del misurando. Essa è definita come *la variazione del valore del misurando che provoca una variazione nel valore dell'uscita pari all'incertezza dell'uscita stessa*.

La risoluzione può venire espressa in valore assoluto, o relativo oppure ridotto.

Fare riferimento alla incertezza dell'uscita corrisponde, in pratica, a considerare la minima variazione apprezzabile senza aleatorietà a partire da un determinato punto di lavoro.

Spesso la risoluzione viene indicata con il termine di "banda morta" (dead band) e, talvolta, viene erroneamente indicata anche come sensibilità.

Un particolare caso si verifica quando il sensore opera con un misurando che si trova nell'intorno dello zero: in questo caso al termine risoluzione si preferisce quello di "soglia" (threshold) che viene così ad assumere il significato di *valore minimo del misurando che determina un'uscita apprezzabilmente diversa da zero*.

Nella precedente definizione si suppone che a misurando nullo la funzione di conversione faccia corrispondere uscita nulla.

Ripetibilità

La ripetibilità (repeatability) quantifica la attitudine del sensore a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro quando all'ingresso è applicato più volte, consecutivamente, lo stesso misurando.

La ripetibilità viene quindi determinata con una procedura in cui al sensore vengono alternativamente applicati un misurando di valore nullo ed un misurando di valore costante. L'ampiezza della fascia di valori che vengono assunti dall'uscita in corrispondenza del misurando non nullo è la misura della ripetibilità.

La ripetibilità esprime in modo globale, l'effetto a breve termine delle grandezze di influenza. Essa, che deve essere valutata per tutto il campo di funzionamento del sensore, viene espressa con le stesse convenzioni adottate per la incertezza di taratura.

Isteresi

L'isteresi (hysteresis) quantifica la presenza di un effetto di "memoria" del sensore la cui uscita, a parità di valore del misurando, potrebbe essere influenzata dalla precedente condizione operativa.

La isteresi viene valutata individuando, per ogni valore del misurando compreso nel campo di misura, la differenza fra i due valori dell'uscita che si ottengono quando il segnale di ingresso viene fatto variare in modo da raggiungere il valore desiderato partendo una volta dall'estremo inferiore

del campo di misura, ed un'altra volta dall'estremo superiore. Il valore massimo dell'insieme delle differenze così determinate costituisce l'isteresi del sensore. Le due prove devono essere effettuate entro un determinato intervallo di tempo per evitare fenomeni di rilassamento.

L'isteresi può venire espressa in valore assoluto, relativo o ridotto e deve essere indicata anche la durata dell'intervallo fra la applicazione delle sollecitazioni.

Stabilità

La stabilità (stability) è la capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo (mesi oppure anni).

La stabilità, quindi, legando le caratteristiche del sensore alla grandezza tempo, riveste un ruolo assai simile a quello della ripetibilità che, si ricorda, tiene conto degli effetti a breve termine delle grandezze di influenza.

La stabilità viene espressa specificando la variazione massima che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto, relativo o ridotto, a parità di misurando e di condizioni operative entro un determinato intervallo di tempo.

A volte è usato il termine "deriva" (offset oppure shift), con significato più o meno equivalente. Viene anche usata, solamente con riferimento alla situazione di misurando nullo, la espressione "deriva dello zero" (zero shift oppure offset drift).

Condizioni di riferimento per le grandezze di influenza

Tutte le caratteristiche metrologiche fino qui menzionate sono garantite quando ogni grandezza di influenza è contenuta entro una determinata fascia di valori. Si definiscono dunque le "condizioni di riferimento per le grandezze di influenza" (reference operating conditions) come *l'insieme delle fasce di valore delle grandezze di influenza in corrispondenza delle quali sono valide le specificazioni metrologiche riassumibili nella funzione di taratura.*

Funzioni di influenza e condizioni di normale funzionamento

Molto spesso è interessante conoscere il comportamento del sensore al di fuori delle condizioni di riferimento; si definisce allora una "funzione di influenza" per ognuna delle grandezze di influenza. Ciascuna di queste funzioni può essere espressa con uno o più valori numerici ciascuno dei quali, in un determinato campo di valori, esprime la sensibilità della grandezza metrologica considerata rispetto alla variazione della grandezza di influenza.

16.7 Funzionamento in regime dinamico

Quando la velocità con cui si modifica il misurando è talmente alta da non permettere di approssimare il comportamento del trasduttore con quello stazionario si deve utilizzare lo studio in regime dinamico. In questo caso le caratteristiche metrologiche adottate avranno lo scopo di descrivere il comportamento in frequenza del trasduttore, il valore massimo della frequenza del segnale rilevabile senza distorsione, il ritardo con cui le variazioni dell'uscita si presentano rispetto a quelle dell'ingresso.

16.7.1 Le principali caratteristiche dinamiche

Data la complessità della descrizione del comportamento dinamico del trasduttore, che esula dagli scopi di questa trattazione, si fornirà solamente un brevissimo cenno alle caratteristiche dinamiche.

Le principali caratteristiche dinamiche sono i diagrammi della "risposta in frequenza", la "banda passante", la "costante di tempo" ed il "tempo di assestamento".

Risposta in frequenza

Se supponiamo di poter applicare in ingresso al trasduttore un misurando che ha l'andamento di un segnale sinusoidale di ampiezza costante pari all'unità e di poter quindi variare la sua frequenza ci aspettiamo che l'uscita abbia lo stesso andamento, che sia cioè costituita da un segnale ancora sinusoidale, di ampiezza costante (non più unitaria a causa della trasformazione avvenuta) e di frequenza uguale a quella del corrispondente misurando. Possiamo anche ragionevolmente pensare che l'uscita sia in lieve ritardo sull'ingresso e quindi che le due onde sinusoidali che rappresentano

ingresso ed uscita siano sfasate con quest'ultima in ritardo. Lo sfasamento viene usualmente descritto mediante un "angolo di sfasamento" indicato con la lettera greca "fi" (φ)

Volendo usare una descrizione matematica introduciamo un'ulteriore grandezza, la "pulsazione" che non è altro che la frequenza moltiplicata per 6,28 (cioè 2π); la pulsazione si indica con la lettera greca "omega" (ω). Possiamo ora scrivere le due equazioni che reggono il misurando x e l'uscita y in funzione del tempo t :

$$x(t) = 1 \cdot \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$y(t) = G \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

La variabile G che compare nella (9) rappresenta l'ampiezza dell'onda sinusoidale in uscita dal trasduttore; dato che l'ingresso aveva ampiezza unitaria e costante si può anche dire che G rappresenta il rapporto fra l'ampiezza dell'uscita e l'ampiezza dell'ingresso o, in altre parole, il guadagno del trasduttore.

Si può vedere che nei trasduttori reali i valori di G e di φ variano al variare di ω . Tracciando i due grafici di G e φ in funzione di ω otteniamo i diagrammi della risposta in frequenza del trasduttore chiamati rispettivamente "risposta in ampiezza" e "risposta in fase".

Banda passante

La banda passante rappresenta il campo di frequenze del misurando per cui l'ampiezza delle oscillazioni dell'uscita viene mantenuta proporzionale alla ampiezza delle oscillazioni del misurando stesso, cioè il campo di frequenze in cui il guadagno G può essere considerato costante. L'estremo inferiore della banda corrisponde nella maggioranza dei casi allo zero, cioè il trasduttore può operare correttamente anche con misurando costante nel tempo, ma ci sono alcuni casi di trasduttori per cui la banda è limitata a frequenze superiori allo zero ed il trasduttore si dice "di tipo passa-alto".

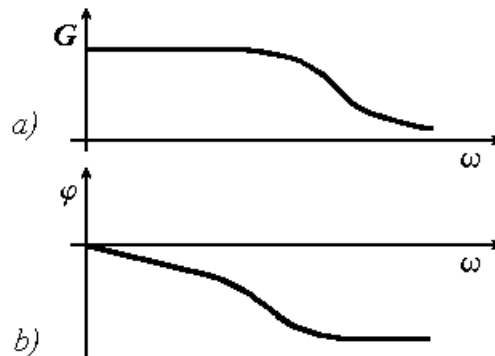


Figura 7. Diagrammi della risposta in frequenza a) Risposta in ampiezza; b) Risposta in fase.

Poiché è praticamente impossibile che la costanza sopra citata si mantenga in modo rigoroso, si accetta un lieve scostamento dalla condizione richiesta e si considera come banda passante quel campo di frequenze in cui il guadagno G del trasduttore si mantiene entro una fascia di valore prefissata. Gli estremi della banda passante si chiamano "frequenza di taglio inferiore" e "frequenza di taglio superiore".

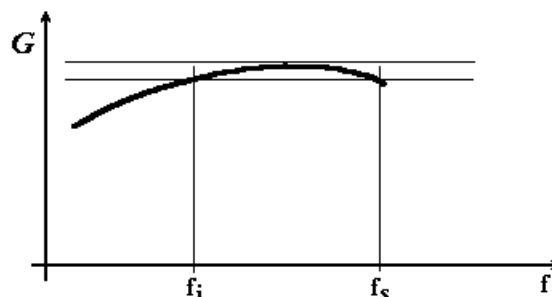


Figura 8. Risposta in frequenza (ampiezza): f_i : frequenza di taglio inferiore, f_s : frequenza di taglio superiore

Costante di tempo

Applicando in ingresso al trasduttore un misurando che istantaneamente passa dal valore zero ad un valore non nullo si può vedere che il transitorio dell'uscita è in ritardo rispetto alla sollecitazione in ingresso. Chiamiamo costante di tempo il ritardo fra la applicazione dell'ingresso e l'istante in cui il valore dell'uscita raggiunge il 63% del valore che avrà una volta terminato il transitorio (quest'ultimo valore viene chiamato "valore di regime").

Tempo di assestamento

Normalmente l'uscita non raggiunge il valore di regime con un andamento semplice: è frequente che l'uscita superi il valore di regime per poi raggiungerlo mediante delle oscillazioni smorzate. Il tempo di assestamento corrisponde al ritardo fra l'istante in cui viene applicata la sollecitazione in ingresso e l'istante in cui l'uscita entra in una fascia prestabilita attorno al valore di regime per non uscirne più. Di fatto esso corrisponde al tempo necessario perché la differenza fra il valore istantaneo presente in uscita ed il valore di regime sia inferiore ad un valore prestabilito.

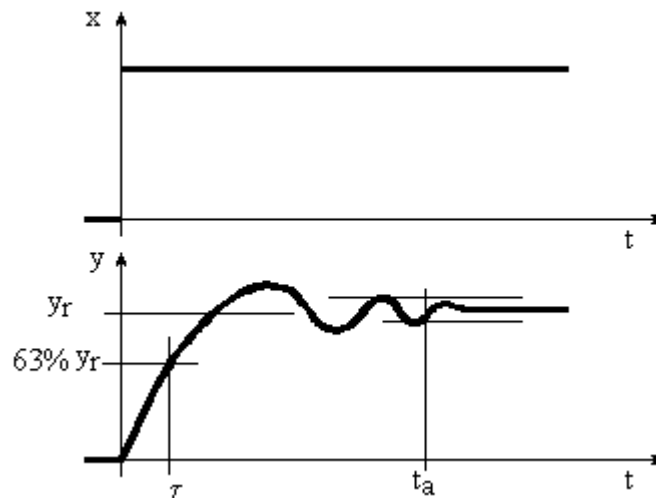


Figura 9. Risposta al gradino. t costante di tempo; t_a tempo di assestamento

16.8. Il comportamento energetico

Come tutti gli strumenti di misura, anche i trasduttori necessitano di energia per effettuare la trasformazione del misurando in una grandezza, di altra natura, da porgere al sistema utilizzatore mediante il segnale di uscita. Basandoci sulla individuazione del sistema che fornisce tale energia possiamo introdurre una prima suddivisione dei sensori in due categorie: sensori passivi e sensori attivi.

Sono chiamati passivi quei sensori in cui l'energia associata al segnale di uscita proviene da una sorgente ausiliaria.

Vengono invece chiamati attivi quei sensori in cui l'energia entrante con il segnale di ingresso ricompare direttamente, anche se in forma diversa, associata al segnale di uscita (in questo ultimo caso si è ovviamente trascurato di considerare le perdite).

Il sensore passivo, richiedendo già un sistema ausiliario di alimentazione, è frequentemente dotato anche di un dispositivo di condizionamento ed amplificazione del segnale che provvede ad associare all'informazione un'energia ad un livello decisamente superiore a quella associata al segnale di ingresso. Al contrario un sensore attivo si comporta come un trasformatore di energia restituendo all'uscita l'energia prelevata all'ingresso.

16.9 La vita

La vita dei trasduttori viene indicata in due maniere diverse: in alcuni casi essa è espressa in mesi oppure in anni -comunque in tempo- mentre in altri casi essa è espressa in "operazioni" oppure "corse". Perché questa differenza?

Nel primo caso si tratta di trasduttori che patiscono un invecchiamento legato al trascorrere del tempo: potremmo pensare a fenomeni quali l'ossidazione di particolari elementi, la scarica di pile

poste all'interno del trasduttore per alimentarne i circuiti, il consumo di elementi chimici di reazione contenuti nell'involucro del trasduttore.

Nel secondo caso, invece, abbiamo a che fare con elementi che non si consumano se non sottoposti a variazioni del misurando: pensiamo ad elementi quali dei contatti striscianti che collegano elettricamente un elemento mobile ad un altro fisso, alle bronzine di supporto dei perni del trasduttore e così via. E' evidente che in questo secondo caso il tempo ha una influenza marginale sulla usura e quindi sulla vita del trasduttore.

16.10 I criteri di scelta dei trasduttori

Possiamo infine definire alcuni criteri generali che devono essere tenuti ben presente quando si ricerca il fantomatico *trasduttore ideale*.

16.10.1 Il trasduttore ideale:

Il *trasduttore ideale*:

- è dotato di elevata sensibilità e di bassa impedenza di uscita: cioè esso fornisce un segnale di grande ampiezza e risente minimamente dell'effetto del carico costituito dal sistema utilizzatore;
- è accurato, non distorce e non presenta isteresi: in altri termini esso indica esattamente il valore della grandezza in ingresso e tale indicazione non dipende da altri fattori;
- è lineare (in maniera da facilitare l'utilizzazione del segnale) e veloce (per garantire la sua applicabilità nei sistemi di controllo);
- è robusto, affidabile e possiede un ampio campo di non danneggiamento;
- è poco ingombrante;
- costa poco!!!

E' evidente che un tale trasduttore non può essere trovato sul mercato, né può essere costruito: sarà compito del progettista dare di volta in volta il giusto valore alle caratteristiche in modo da individuare il sensore che meglio si adatta alla specifica applicazione. In questa maniera si stabilirà che per una certa applicazione è maggiormente interessante il limitato ingombro, per un'altra applicazione è principalmente importante la affidabilità oppure la linearità, per un'altra il basso costo.

16.11 Principi di trasduzione

I principi di trasduzione sono molteplici: verranno qui brevemente esposti solamente quelli più utilizzati e quelli che meglio si adattano ad una trattazione didattica rimandando, per eventuali approfondimenti, ai molti testi specialistici.

16.11.1 Principi meccanici di trasduzione

I principi meccanici vengono utilizzati nella catena di trasduzione soprattutto nello stadio sensore, cioè in quel primo trasduttore della catena che si collega al misurando.

Il motivo di questo utilizzo di principi meccanici è dovuto alla necessità di trasformare alcune grandezze fisiche di ingresso in altre per le quali si dispone di trasduttori con uscita elettrica. Un esempio può essere utile per chiarire il problema: volendo trasformare direttamente una forza in un segnale elettrico (tensione) dovremmo disporre di un trasduttore "forza-tensione". Non vi sono trasduttori di questo tipo perché non esiste un fenomeno fisico che permetta di generare una tensione mediante la applicazione di una forza ad un oggetto. Al contrario disponiamo di diversi trasduttori "spostamento-tensione" costituiti dai potenziometri, dai trasformatori differenziali, dai sensori capacitivi, ecc. Ecco allora la necessità di trasformare la forza incognita in uno spostamento per poi poter utilizzare un trasduttore "spostamento-tensione". Un semplice elemento elastico, ad esempio una molla, che subisce una deformazione proporzionale alla forza che gli è applicata permette di ottenere la trasformazione richiesta.

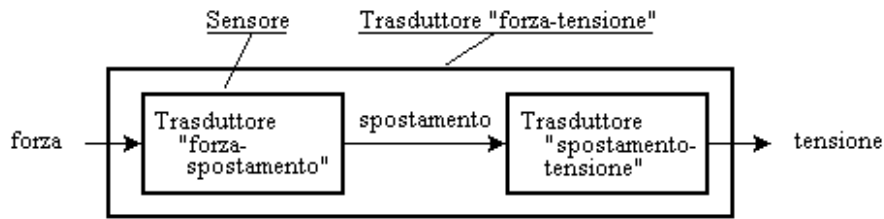
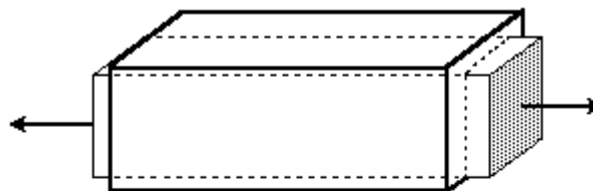


Figura 10. Schema a blocchi di un trasduttore "forza-tensione"

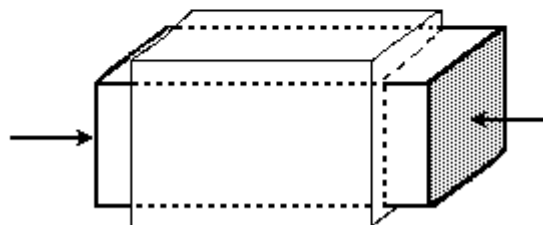
La funzione complessiva del trasduttore "forza-tensione" può quindi essere scomposta in due funzioni parziali: una prima conversione "forza-spostamento" attuata dall'elemento sensore posto a diretto contatto con il misurando ed una successiva conversione "spostamento-tensione" attuata dal secondo elemento della catena di trasduzione.

I principi meccanici utilizzati più frequentemente sono quelli basati sulla elasticità delle strutture e sulle leggi della dinamica.

Abbiamo visto che una forza applicata ad un elemento elastico ne provoca una deformazione che risulta proporzionale alla sollecitazione applicata: ad una trazione corrisponde un allungamento, ad una compressione corrisponde un accorciamento nella stessa direzione in cui agisce la forza. Pure nelle direzioni perpendicolari a quella della forza si hanno deformazioni: esse risultano però di minore ampiezza e di verso opposto a quella "principale". Tutte queste deformazioni possono essere utilizzate per effettuare una trasduzione "forza-deformazione" o "forza-spostamento".



trazione: allungamento e assottigliamento



compressione: accorciamento e ingrossamento

Figura 11. Deformazioni prodotte da una forza applicata ad un parallelepipedo.

Un altro principio fisico utilizzato nella sensoristica è rappresentato dalla flessione di una sottile lastra, chiamata "mensola incastrata", quando viene applicata una forza. Anche in questo caso la deformazione di flessione che la mensola subisce è proporzionale alla forza applicata.



Figura 12. Flessione della mensola incastrata

E' però esperienza comune il fatto che quando si supera un certo valore della forza applicata la deformazione della mensola diviene permanente: questo è il caso in cui il misurando ha superato il

valore massimo del campo di sicurezza descritto in precedenza. Si è così prodotto un danno al trasduttore il cui comportamento non risulta più descritto dalla funzione di conversione o dal diagramma di taratura.

Oltre alle già descritte trazione, compressione e flessione si può utilizzare la torsione di un elemento cilindrico per trasformare coppie meccaniche e momenti torcenti in deformazioni che possono poi essere rilevate mediante trasduttori "deformazione-tensione".

Ovviamente le deformazioni che una struttura subisce per effetto di una sollecitazione (forza o coppia) dipendono dalle dimensioni della struttura stessa ed anche dalla sua forma. A parità di sollecitazione e del tipo di materiale con cui la struttura è realizzata, uno spessore maggiore degli elementi che compongono la struttura determina una minore deformazione. Per migliorare quindi la sensibilità, cioè il rapporto fra la variazione della grandezza di uscita e la corrispondente variazione della grandezza in ingresso bisogna realizzare strutture con spessori modesti e con geometrie idonee.

La geometria della struttura deve poi essere accuratamente studiata per cercare di ridurre l'effetto delle grandezze di influenza: un problema che nasce quando si fa uso della mensola incastrata è rappresentato dal fatto che la deformazione della mensola dipende anche dal punto in cui viene applicata la forza, e non solo dalla sua intensità. Per eliminare tale negativa influenza si usano strutture composte da due mensole vincolate, nella maniera rappresentata nella figura 13: con una struttura sagomata in tale maniera si può dimostrare che la deformazione è indipendente dal punto in cui viene applicata la forza sulla superficie tratteggiata in grigio. La struttura così realizzata, infatti concentra le deformazioni solamente nelle parti in cui lo spessore è minore, cioè in corrispondenza dei quattro incavi realizzati nelle due mensole principali. Avere annullato la dipendenza della deformazione dal punto di applicazione della forza ha eliminato una delle principali grandezze di influenza permettendo il raggiungimento di precisioni maggiori di quelle consentite dalla semplice mensola incastrata. Tutto questo, però, ha un costo rappresentato dalla maggiore complessità della lavorazione necessaria per ottenere la struttura descritta.

La struttura a doppia mensola vincolata verrà ripresa quando si descriverà il funzionamento delle "celle di carico", che costituiscono i più diffusi trasduttori di forza.

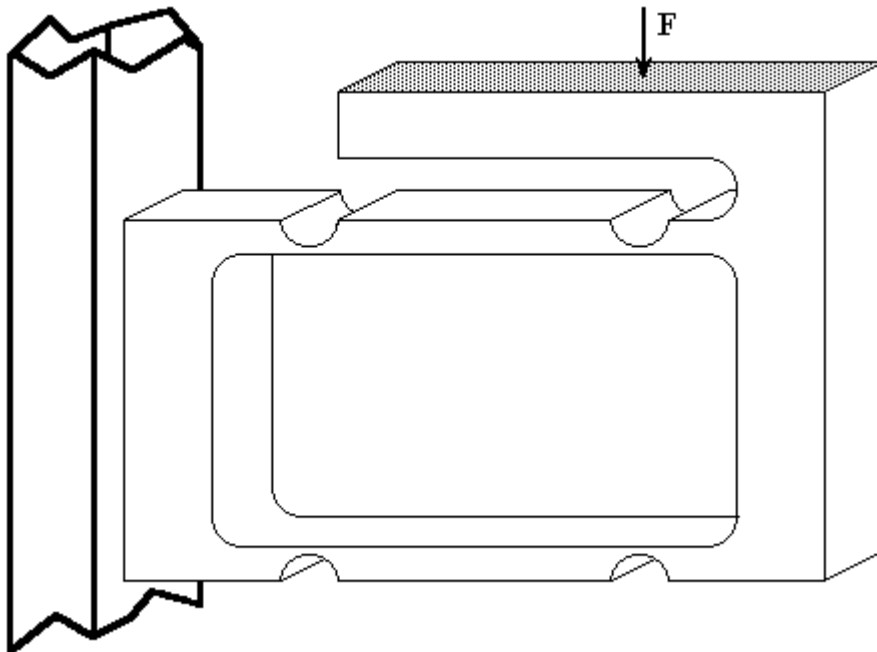


Figura 13. Struttura deformabile a doppia mensola vincolata

Un altro principio fisico che viene utilizzato frequentemente nella trasduzione è rappresentato dal legame fra accelerazione e forza inerziale descritto dal 2° principio della dinamica ed espresso dalla formula:

$$F_i = m \cdot a \quad (10)$$

in cui F_i rappresenta la forza inerziale sviluppata da una massa m che subisce un'accelerazione a .

Volendo trasformare la accelerazione di un corpo in un segnale elettrico (tensione) si potrebbe quindi fare uso di un trasduttore "accelerazione-forza" con funzione di sensore seguito da un trasduttore "forza-deformazione" e da un trasduttore "deformazione-tensione elettrica". Nella realtà il sensore è rappresentato da un trasduttore "accelerazione-deformazione" in cui la massa che viene accelerata scarica la forza inerziale F_i direttamente su di un elemento elastico che si deforma in proporzione alla forza che gli viene applicata.

Nel linguaggio tecnico l'elemento inerziale di massa m viene chiamato "massa sismica": i sensori sono anche detti "sismografi". Sono basati sull'uso di una massa sismica gli accelerometri, i vibrometri ed in generale tutti quei sensori che devono rilevare movimenti saltuari quali vibrazioni ed urti.

16.11.2 Principi fisici di trasduzione

Variatione della resistività di un metallo con la temperatura

Se consideriamo che la corrente elettrica fluisce all'interno di un conduttore grazie al movimento degli elettroni che si spostano al suo interno attraversandolo possiamo fornire una semplice descrizione della fenomeno che lega la resistività di un metallo alla sua temperatura.

Consideriamo che gli atomi che costituiscono il metallo sono disposti in modo regolare costituendo una struttura poco "densa": ciò significa che fra di essi resta un notevole spazio libero: questo spazio è in realtà condizionato dalla temperatura a cui si trova il metallo in quanto gli atomi non sono perfettamente fermi, ma subiscono impercettibili movimenti provocati da quella che è chiamata "agitazione termica". Alla temperatura "dello 0 assoluto" (0 kelvin) la agitazione termica è nulla e lo spazio fra gli atomi è massimo, all'aumentare della temperatura aumenta la agitazione termica e lo spazio libero fra gli atomi (detto anche "spazio interatomico") diminuisce sensibilmente.

Allo "zero assoluto" gli elettroni possono muoversi molto liberamente avendo a disposizione un ampio spazio interatomico. Non appena viene applicata una tensione al conduttore il campo elettrico che nasce spinge gli elettroni verso l'estremità positiva: essi allora accelerano prendendo velocità sotto l'azione del campo elettrico applicato. Maggiore è la velocità media che gli elettroni raggiungono, maggiore è la corrente prodotta e di conseguenza minore è la resistività del metallo.

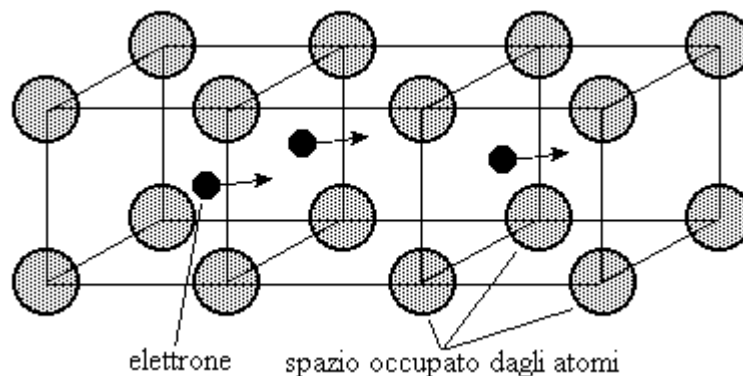


Figura 14. Migrazione elettronica all'interno del reticolo cristallino a bassa temperatura

Se aumentiamo la temperatura del metallo gli atomi iniziano ad agitarsi diminuendo lo spazio interatomico. Gli elettroni cominciano allora ad urtare gli atomi: nell'urto gli elettroni, che sono infinitamente più piccoli degli atomi si fermano; devono quindi riaccelerare, ma è evidente che la velocità media che possono raggiungere è inferiore a quella che corrisponde allo zero assoluto.

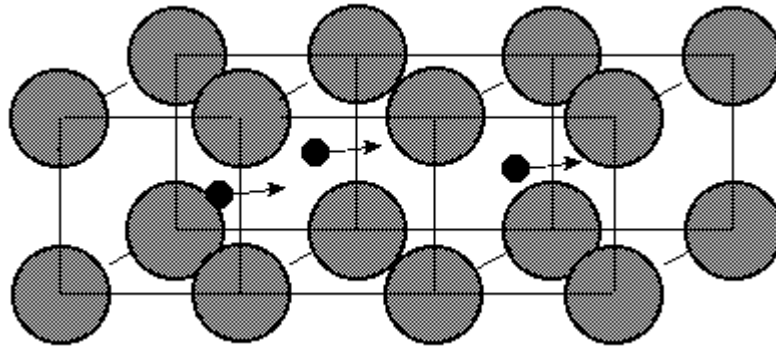


Figura 15. Migrazione elettronica all'interno del reticolo cristallino ad alta temperatura

Si comprende pertanto in modo intuitivo che tanto maggiore è la agitazione termica, tanto minore è lo spazio interatomico e quindi minore è la velocità media degli elettroni. All'aumentare della temperatura si ha quindi un aumento della resistività dei materiali conduttori metallici.

Questo fenomeno porta alla definizione di una legge matematica che lega la resistenza di un elemento conduttore alla temperatura a cui si trova il metallo:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + c(T - T_0)^3 + \dots] \quad (11)$$

in cui $R(T)$ è la resistenza dell'elemento alla temperatura generica T ed R_0 è il valore della resistenza alla temperatura di riferimento T_0 ; a , b , c sono infine delle costanti il cui valore dipende dal tipo di metallo impiegato per la costruzione dell'elemento sensibile.

Dalla espressione (11) sopra riportata si può ricavare la variazione $\Delta R = R(T) - R_0$ della resistenza in funzione della variazione di temperatura $\Delta T = T - T_0$:

$$\Delta R = R_0 \cdot (a\Delta T + b\Delta T^2 + c\Delta T^3 + \dots) \quad (12)$$

I valori delle costanti a , b e c sono molto bassi pertanto la variazione della resistenza con la temperatura è modesta o, per meglio dire, la sensibilità del principio di trasduzione è molto bassa. Una sensibilità così modesta richiede che la misurazione della variazione di resistenza sia effettuata con metodi di elevata precisione per eliminare l'effetto delle grandezze di influenza e dei disturbi: questi metodi verranno descritti in dettaglio più avanti.

Se poi si confrontano fra loro i valori delle costanti a , b e c dei materiali normalmente utilizzati per realizzare i trasduttori si nota come il primo sia estremamente maggiore degli altri: ciò permette di considerare lineare la variazione di resistenza in un intervallo di temperatura anche relativamente ampio.

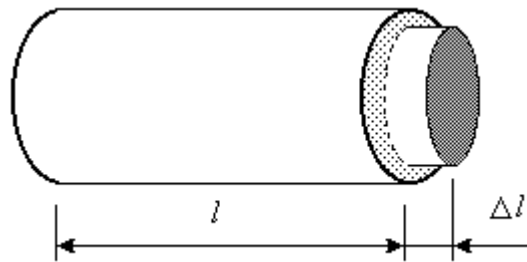
Piezoresistenza

Il fenomeno della piezoresistenza ha luogo quando le dimensioni geometriche di un conduttore subiscono una variazione, cioè quando il conduttore viene deformato da una sollecitazione esterna. Abbiamo già visto che una trazione provoca un allungamento ed un assottigliamento di un elemento metallico: la resistenza di tale elemento si modifica essendo legata alle sue dimensioni.

La resistenza R di un elemento conduttore realizzato con materiale di resistività ρ , di lunghezza l e sezione pari a S vale:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (13)$$

Applicando una trazione all'elemento nasce una deformazione che provoca un aumento di lunghezza ed una diminuzione della sezione: come conseguenza si ha allora un aumento della resistenza dell'elemento.



$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

Figura 16. Variazione della resistenza di un conduttore metallico per piezoresistenza.

L'aumento relativo della lunghezza -cioè il rapporto fra i valori dell'allungamento Δl e della lunghezza originale - è legato alla diminuzione relativa della sezione -cioè al rapporto fra i valori della variazione di sezione ΔS e della sezione originale S - da una costante numerica che dipende dal materiale utilizzato per la realizzazione dell'elemento resistivo pertanto è possibile mettere in relazione la variazione (relativa) di resistenza con la variazione relativa di lunghezza:

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \frac{\Delta l}{l}. \quad (14)$$

Nella formula sopra scritta il termine GF -chiamato "fattore di gage"- è una costante il cui valore, solitamente compreso fra 2 e 4, dipende dal materiale con cui è costruito l'elemento resistivo.

Normalmente, poi, il valore dell'allungamento relativo $\frac{\Delta l}{l}$ risulta nettamente inferiore a 0,01 per cui

la variazione relativa di resistenza $\frac{\Delta R}{R}$ risulta molto inferiore a 0,04. Se si pensa che una variazione di temperatura pari ad un grado centigrado provoca nel rame una variazione relativa della resistenza di 0,004 ben si comprende come sia necessario adottare materiali e metodi di misura che possano eliminare l'effetto della temperatura ambientale che rappresenta, anche in questo caso, una delle più importanti grandezze di influenza.

Piezoelettricità

La piezoelettricità è provocata da un fenomeno (scoperto dai fratelli Pierre e Jacques Curie nel 1880), chiamato "effetto piezoelettrico" che ha luogo in alcune materiali cristallini (quarzo, tormalina, ecc.) composti da ioni, cioè da atomi dotati di carica elettrica, ed in speciali ceramiche quando vengono deformati da una sollecitazione meccanica. La variazione dello spazio interatomico provoca un addensamento di cariche su due facce opposte del cristallo che, sotto l'aspetto elettrico, diviene simile ad un condensatore carico.

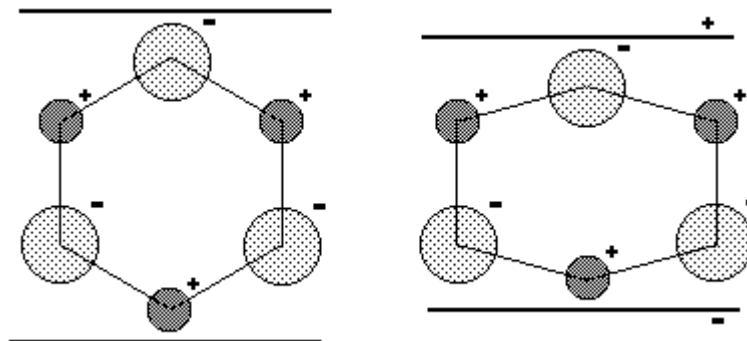


Figura 17. Effetto piezoelettrico.

La struttura della cella deformata, a destra nella figura 17, vede gli ioni positivi avvicinarsi alla faccia superiore del cristallo che si carica di uguale segno; allo stesso modo gli ioni⁻ si avvicinano alla faccia inferiore determinando la comparsa di una carica superficiale negativa.

L'effetto piezoelettrico, però, tende a svanire spontaneamente nel tempo: questo perché le cariche superficiali che compaiono attirano le cariche libere presenti nell'ambiente in cui il sensore si trova e perché lo strumento di misura che viene utilizzato per valutare il livello del segnale di uscita favorisce la ricombinazione delle cariche stesse. Non è pertanto possibile realizzare sensori in grado di rilevare sollecitazioni costanti, ma si utilizza questo fenomeno esclusivamente per il rilievo di variazioni della sollecitazione di ingresso che è costituita dalla deformazione del cristallo.

Termoelettricità

La termoelettricità è rappresentata dalla nascita di una corrente all'interno di una spira composta da due materiali conduttori diversi quando le due giunzioni sono poste a temperature diverse. Tale effetto, conosciuto come "effetto Seebeck" è costituito dalla sovrapposizione di due effetti elementari: l'effetto "Peltier" e l'effetto "Thomson".

Effetto Peltier

L'effetto Peltier, scoperto da Jean Peltier nel 1834, descrive la migrazione di cariche che ha luogo in corrispondenza della giunzione fra due materiali determinando un allineamento dei livelli di Fermi dei materiali stessi.

In termini molto semplificati si può affermare che uno dei materiali "strappa" elettroni all'altro che, venendo a mancare dell'equilibrio fra cariche atomiche positive e negative, assume un potenziale positivo. Questo potenziale, in associazione al potenziale negativo assunto dal materiale in cui si ha un eccesso di elettroni, crea un campo elettrico che vincola gli elettroni ceduti a rimanere in prossimità della regione di interfaccia. Si arriva quindi a regime in una situazione di equilibrio dinamico per cui viene a mancare l'ulteriore migrazione di cariche fra i materiali.

Il valore della differenza di potenziale -detta *fem Peltier*- che nasce alla giunzione dipende dalle caratteristiche dei materiali e dalla temperatura a cui si trova la giunzione stessa. Il legame fra *fem Peltier* e temperatura di giunzione è fortemente non lineare e viene espresso per mezzo dei valori di un coefficiente di sensibilità (alla temperatura) il cui andamento viene linearizzato localmente in corrispondenza di diverse temperature di giunzione. Questo coefficiente è chiamato *coefficiente di Peltier* (π) e vale, per esempio:

- $\pi = +8\text{mV}/^\circ\text{C}$ per la coppia "rame-platino"
 - $\pi = -30\text{mV}/^\circ\text{C}$ per la coppia "costantina-platino"
- alla temperatura di 100°C .

Effetto Thomson

L'effetto Thomson fu scoperto nel 1854 da Sir William Thomson -più conosciuto come Lord Kelvin- e consiste nella diffusione degli elettroni che avviene in un materiale sottoposto ad una temperatura non uniforme.

Per effetto della maggiore agitazione termica presente all'estremità "calda", infatti, gli elettroni tendono a migrare verso l'estremità "fredda" in modo che il materiale si trova non più equilibrato elettricamente. La migrazione ha ovviamente termine nel momento in cui il campo elettrico che nasce fra le due estremità per effetto dello squilibrio elettronico uguaglia la forza sviluppata dall'agitazione termica.

La differenza di potenziale che nasce per effetto Thomson dipende dal tipo di materiale e dalla differenza di temperatura fra le due estremità con un coefficiente di sensibilità alla temperatura, detto "*coefficiente di Thomson*" (τ) che vale:

- $\tau = 8\text{mV}/^\circ\text{C}$ per il rame
- $\tau = -23\text{mV}/^\circ\text{C}$ per la costantina.

Effetto Seebeck

Gli effetti Peltier e Thomson hanno permesso di spiegare un fenomeno che era stato scoperto alcuni anni prima da Thomas Johann Seebeck. Questi, nel 1821, notò che in una spira costituita da due materiali diversi, con le giunzioni tenute a differenti temperature, circolava una corrente elettrica.

L'effetto Seebeck è dovuto alla contemporanea presenza dei due effetti Peltier e Thomson i cui effetti si vengono a sovrapporre:

- alle due giunzioni, dette giunzione "calda" e giunzione "fredda", che hanno rispettivamente temperature T_1 e T_2 diverse, le diffusioni elettroniche provocano l'instaurarsi di diverse fem Peltier che, alla richiusura del circuito, non si compensano perfettamente e originano una fem Peltier "risultante" non nulla.
- i due rami, costituiti dai conduttori A e B, sono sottoposti entrambi ad una stessa differenza di temperatura per cui originano delle fem per effetto Thomson ma, poiché l'intensità di queste fem dipende oltre che dalla temperatura anche dalle caratteristiche del materiale, le due fem generate saranno diverse. La richiusura non ne provoca quindi una compensazione perfetta ed una fem Thomson "risultante" non nulla viene ad originarsi.

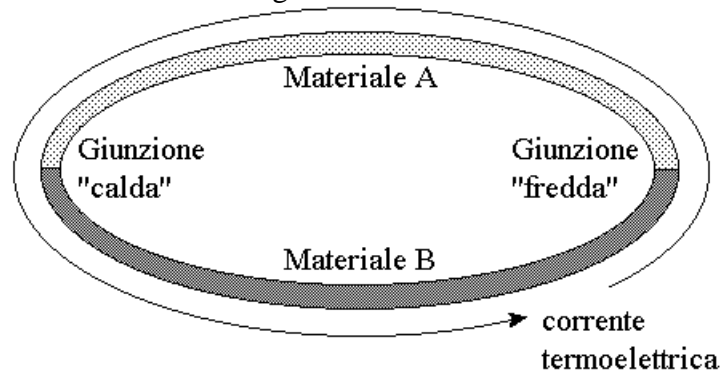


Figura 18. Spira termoelettrica di Seebeck.

Se nella spira in cui ha luogo l'effetto Seebeck viene creata una interruzione, ai capi di questa si genera una tensione che è il risultato di tutte le fem Peltier e Thomson agenti nella spira: essa quindi dipende dal tipo di materiali impiegati e dalla differenza di temperatura esistente fra le due giunzioni.

La funzione di conversione diretta che può essere utilizzata in questo caso assume l'aspetto:

$$V = a \cdot (T_1 - T_2) + b \cdot (T_1^2 - T_2^2). \quad (15)$$

I coefficienti a e b che compaiono nella espressione della tensione prodotta dall'effetto Seebeck hanno valori che dipendono dalla coppia di materiali impiegati per la realizzazione della spira.

La tensione prodotta dall'effetto Seebeck non viene modificata dall'introduzione, nella spira, di un ulteriore elemento di materiale diverso a patto che le due giunzioni in cui esso si unisce agli altri materiali si trovino alla stessa temperatura.

La dipendenza che la tensione prodotta dall'effetto Seebeck presenta nei confronti della differenza di temperatura fra i due giunti viene utilizzata per la realizzazione di semplici sensori di temperatura: le termocoppie.

16.11.3 Principi elettrici di trasduzione

I principi elettrici di trasduzione sono molteplici ed assai diversi: per citare solamente i principali si possono ricordare le variazioni della capacità e della induttanza provocate dalle modifiche dimensionali dei componenti e le variazioni del rapporto di trasformazione e di partizione conseguenti allo spostamento di un organo supplementare (nucleo ferromagnetico o pattino conduttivo).

Variazione di capacità ed induttanza

Il valore della capacità C di un "condensatore a facce piane e parallele" è dato dalla formula:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (16)$$

in cui S è la area delle armature, d è la distanza che le separa, ϵ_r è un parametro che dipende dal materiale dielettrico (isolante) posto fra le due armature ed ϵ_0 è una costante fisica detta "permettività del vuoto".

Se viene modificata la posizione di una armatura rispetto all'altra il valore di S cambia in quanto si deve considerare solamente la frazione delle armature che si fronteggiano. Si ottiene così una conversione della posizione nella capacità del condensatore.

In modo analogo si può variare la induttanza di una bobina facendo spostare il nucleo ferromagnetico rispetto ad essa oppure in modo da variare il traferro.

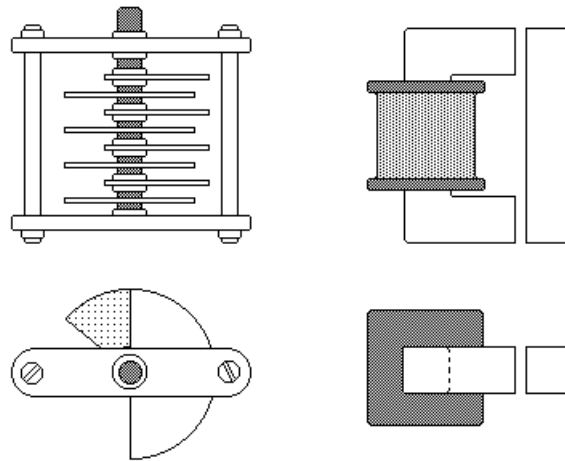


Figura 19. Esempi di condensatore variabile ed induttore variabile

Variatione del rapporto di trasformazione di un trasformatore

Il trasformatore è un componente elettrico che ha la funzione di variare il livello della tensione fra ingresso ed uscita. Normalmente i trasformatori sono costruiti mediante due avvolgimenti disposti attorno ad un nucleo di materiale ferromagnetico ed il rapporto fra le tensioni di uscita e di ingresso o "rapporto di trasformazione" è uguale al rapporto fra i numeri delle spire che costituiscono i due avvolgimenti secondario e primario.

Nel caso in cui il nucleo ferromagnetico non sia chiuso, ma possa spostarsi rispetto ai due avvolgimenti il rapporto di trasformazione dipende anche dalla posizione del nucleo.

In base a questo principio si costruiscono dei trasduttori di posizione con uscita in tensione detti "trasformatori differenziali".

Variatione del rapporto di partizione di un partitore resistivo

Applicando una tensione di valore paria ad E ad un filo di materiale resistivo di sezione uniforme si ha una ripartizione regolare della caduta di potenziale lungo il filo stesso. Potendo collegare un contatto supplementare fra i due estremi del filo resistivo si preleva una caduta di potenziale, di valore compreso fra 0 ed E , che dipende dalla distanza fra il contatto supplementare e l'estremo di riferimento.

Il dispositivo così costruito viene chiamato "partitore resistivo di tensione" o, più semplicemente, "potenziometro" e costituisce uno dei più diffusi trasduttori di posizione con uscita elettrica.

16.12 Trasduttori di posizione

I trasduttori di posizione sono quei componenti che, rilevando la posizione di un organo mobile, forniscono in uscita un segnale proporzionale a questa. I principali trasduttori di posizione con uscita elettrica sono i potenziometri, i trasformatori differenziali, gli encoder.

16.12.1 Potenziometri

In questi componenti la posizione di un cursore mobile condiziona il valore della tensione presente ai due terminali di uscita: tale tensione risulta essere una frazione della tensione di alimentazione proporzionale alla posizione dell'organo di ingresso. I potenziometri sono realizzati sia in forma rettilinea sia circolare.

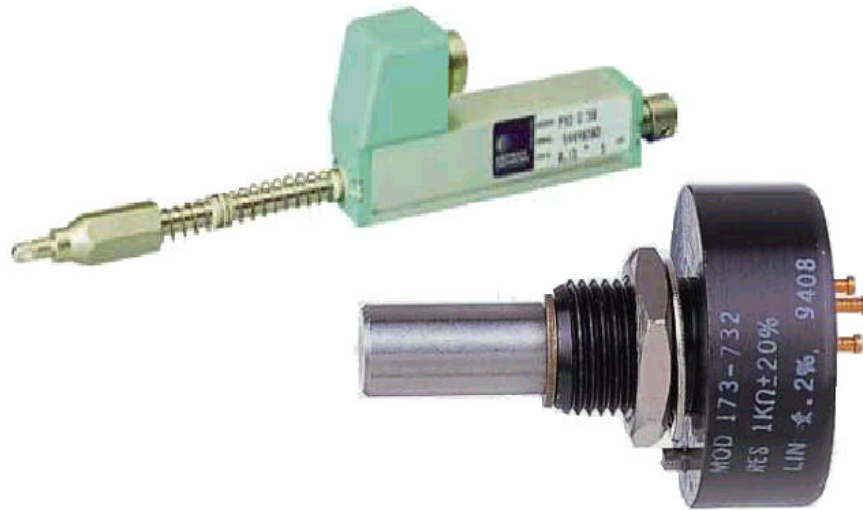


Figura 20. Potenzimetri rettilinei e circolari (*non in scala*)

Tre sono le principali tecniche costruttive dei potenziometri:

- filo metallico avvolto su supporto isolante;
- film metallico (CERMET);
- plastica conduttiva.

Si possono poi avere potenziometri "ibridi", realizzati mediante l'unione di due delle tecnologie suddette allo scopo di migliorare le caratteristiche sfruttando l'abbinamento delle qualità migliori di ognuna delle soluzioni realizzative.

Potenzimetri a filo metallico

In questo caso l'elemento resistivo è realizzato con un sottile filo di materiale metallico avvolto su di un supporto isolante e rigido. Sul filo così avvolto scorre un cursore metallico che realizza un contatto elettrico con -teoricamente- un punto dell'elemento resistivo. Il supporto può essere indifferentemente un cilindro retto oppure un toro: nel primo caso il cursore si muove in linea retta ed il sistema si presta per realizzare un sensore di spostamento rettilineo, nel secondo caso il cursore descrive una circonferenza ed il sistema può essere usato come sensore di posizione angolare.

Questo tipo di realizzazione permette di realizzare i potenziometri con le migliori caratteristiche metrologiche ma con risoluzioni e vita minore di quelle tipiche delle altre tecnologie.

Il problema della risoluzione nasce perché il cursore, nel suo movimento, realizza una variazione discreta della resistenza abbracciata: ogni incremento elementare è pari alla resistenza che corrisponde ad una spira del filo avvolto sul supporto. E' evidente che per aumentare la risoluzione si deve aumentare il rapporto fra la lunghezza totale del filo resistivo e la lunghezza della singola spira cioè, in altri termini, si deve aumentare il numero delle spire avvolte sul supporto. Poiché il numero massimo di spire è legato alla corsa del cursore ed al diametro del filo resistivo, e quest'ultima non si può ridurre al di sotto di una certa soglia, la soluzione più frequentemente adottata è allora quella di realizzare dei supporti ad elica e di utilizzare opportuni meccanismi per l'accoppiamento del pattino del cursore con l'elemento di ingresso del sensore. Si realizzano in questa maniera potenziometri con una risoluzione fino allo 0,03% del fondo scala.

La vita del potenziometro è espressa in termini di "corse" del cursore in quanto è l'usura meccanica provocata dall'attrito del cursore sull'elemento resistivo a creare l'invecchiamento del componente. Ad ogni corsa il pattino del cursore asporta una minima quantità di metallo dal filo resistivo provocando una variazione di sezione ed una conseguente variazione della resistenza globale. Se l'usura fosse ugualmente distribuita su tutto l'elemento resistivo non comporterebbe alterazioni delle caratteristiche metrologiche del sensore, ma è assai improbabile che il cursore spazzoli uniformemente l'avvolgimento resistivo. Più frequente è il caso in cui l'usura è localizzata in una regione ristretta dell'avvolgimento resistivo, con conseguente degrado della linearità del potenziometro.

Potenzimetri a film metallico

In questo tipo di potenziometri l'elemento resistivo è realizzato mediante il deposito di un sottile strato metallico su di un supporto isolante piano. La tecnologia più usata per realizzare la "pista resistiva" è quella della sinterizzazione, cioè la compressione ad alta temperatura di una finissima polvere metallica. L'effetto combinato della temperatura e della compressione permette di ottenere dei legami di tipo molecolare, e quindi resistentissimi, fra le particelle componenti.

La pista resistiva può essere sagomata a piacere per realizzare legami non lineari fra posizione del cursore e tensione di uscita oppure, al contrario, può essere rifinita con la tecnologia laser per migliorare ulteriormente la linearità. La risoluzione ottenibile è teoricamente infinita.

Potenzimetri a plastica conduttiva

Anche la plastica può essere resa conduttiva a patto di mescolare nei suoi componenti degli elementi conduttivi a base di carbonio. La plastica conduttiva permette di realizzare delle superfici estremamente lisce e resistenti alla abrasione meccanica: per questo può essere positivamente utilizzata per costruire l'elemento resistivo dei trasduttori potenziometrici. In questo caso la caratteristica metrologica più interessante è la vita che rende questo trasduttore assai adatto ad impieghi gravosi in cui si prevedano molte corse del contatto sulla pista resistiva.

16.12.2 Trasformatori differenziali rettilinei (LVDT) e rotativi (RVDT)

Questi sensori abbinano la precisione e la affidabilità della misura con la robustezza, la facilità di installazione e la durata in esercizio. Essi garantiscono un'elevata linearità, una buona sensibilità ed una risoluzione infinita. Possono essere realizzati in maniera tale da minimizzare gli attriti e le inerzie che gravano sul movimento dell'organo da sensorizzare.

D'altro canto essi richiedono un'alimentazione in alternata ed un circuito di rivelazione sensibile alla fase del segnale prelevato: in altri termini richiedono una maggiore complessità circuitale tanto al sistema ausiliario quanto al sistema utilizzatore.

I trasformatori differenziali sono dei sensori di posizione in cui l'ampiezza della tensione che costituisce il segnale di uscita dipende dalla posizione di un nucleo magnetico mobile. Come si può vedere dalla figura 21 che mostra una sezione di un trasformatore rettilineo, il sensore è costituito da un elemento cilindrico rettilineo che porta tre distinti avvolgimenti elettrici e da un nucleo in materiale ferromagnetico mobile rispetto agli avvolgimenti. L'avvolgimento centrale viene alimentato con una tensione sinusoidale e costituisce il "primario" del trasformatore, gli altri due avvolgimenti che costituiscono due "secondari" vengono collegati l'uno in serie all'altro in maniera tale da porre in controfase le tensioni che si inducono su ognuno di essi.

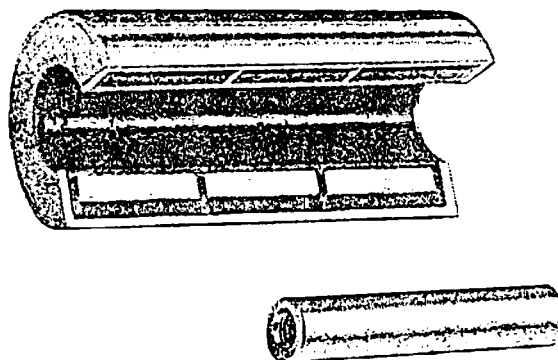


Figura 21. Spaccato di un trasformatore differenziale rettilineo: sono visibili gli avvolgimenti (un primario centrale e due secondari) ed il nucleo mobile in materiale ferromagnetico

Quando il nucleo si trova nella posizione centrale del trasformatore i due coefficienti di mutua induttanza fra il primario ed i secondari sono uguali e le due tensioni secondarie si fanno equilibrio; pertanto la tensione complessiva ai morsetti di uscita del sensore risulta nulla. Variando la posizione del nucleo rispetto agli avvolgimenti si modificano i valori dei coefficienti di mutua induzione per

cui le due tensioni non uguagliandosi più provocano l'apparire di una tensione all'uscita che risulta proporzionale allo spostamento del sensore dalla posizione centrale.

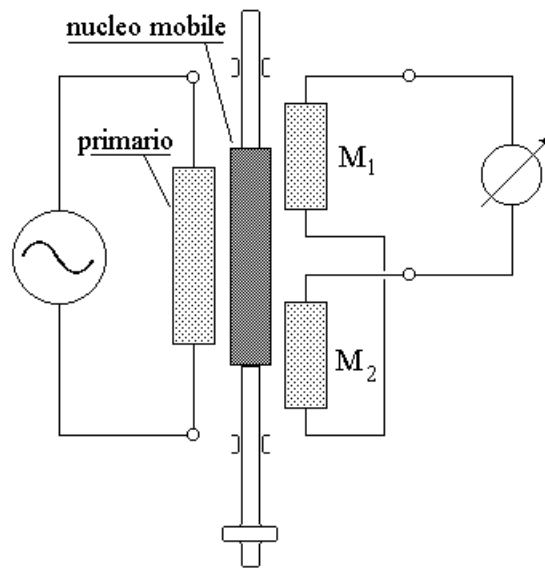


Figura 22. Schema circuitale di un trasduttore di posizione a LVDT

Questi sensori vengono caratterizzati metrologicamente in una maniera particolare che richiede un breve approfondimento.

Spostamento a fine corsa

Partendo dalla posizione centrale del nucleo si chiama spostamento a fine corsa (full-scale displacement) la ampiezza della corsa -oppure dell'angolo- in cui il comportamento del sensore è lineare entro limiti prefissati.

Normalmente, data la simmetria del sistema, lo spostamento a fine corsa in una direzione è uguale a quello nella direzione opposta.

Campo di funzionamento lineare

Il campo di funzionamento lineare (nominal linear range) è l'insieme dei punti in cui la funzione di conversione risulta lineare nell'uno e nell'altro verso di spostamento del cursore. Esso è dato dal doppio della somma dei due spostamenti a fine corsa e, nei sensori simmetrici, è pari al doppio di uno di questi.

La ampiezza del campo di funzionamento lineare è legata al valore della frequenza di alimentazione ed al valore della impedenza di ingresso del sistema utilizzatore.

Sensibilità

Essa rappresenta il valore della tensione di uscita quando il nucleo è nella posizione di fine corsa. Dipendendo direttamente dalla tensione di alimentazione del primario, viene espressa come valore della tensione di uscita V_{out} riferita alle condizioni di alimentazione V_s ed alla ampiezza dello spostamento a fine corsa l .

La sensibilità s vale dunque: $s = V_{out} / V_s \cdot l$

Anche la sensibilità viene influenzata dal valore della frequenza di alimentazione e della impedenza di ingresso del sistema utilizzatore.

Linearità

La definizione di linearità viene data coerentemente a quanto esposto nel capitolo 2. Si può qui segnalare che questi sensori presentano dei valori di sensibilità anche inferiori allo 0.25% del fondoscala.

16.13 Encoder

16.13.1. Encoder assoluti

Gli encoder assoluti forniscono in uscita un numero, spesso espresso in forma binaria, che rappresenta il valore dell'angolo esistente fra un riferimento rotorico ed un riferimento solidale con lo statore.

L'uscita è di tipo parallelo e tutti i bit che costituiscono il numero di uscita sono disponibili contemporaneamente perché ciascuno utilizza una linea dedicata.

L'organo principale degli encoder è costituito da un disco, su cui sono ricavate, in corone circolari concentriche, delle zone con caratteristiche fisiche diverse (le zone citate possono ad esempio essere opache o trasparenti, conduttrici o isolanti, magnetizzate N oppure S, ecc.).

Scorrendo il disco lungo una linea retta, a partire dal centro, si incontrano zone con caratteristiche diverse: supponendo di assegnare una corrispondenza ben definita fra le cifre logiche 0 ed 1 e le caratteristiche fisiche delle zone incontrate il percorrere il raggio indicato nella figura 23 porta ad ottenere una certa parola binaria.

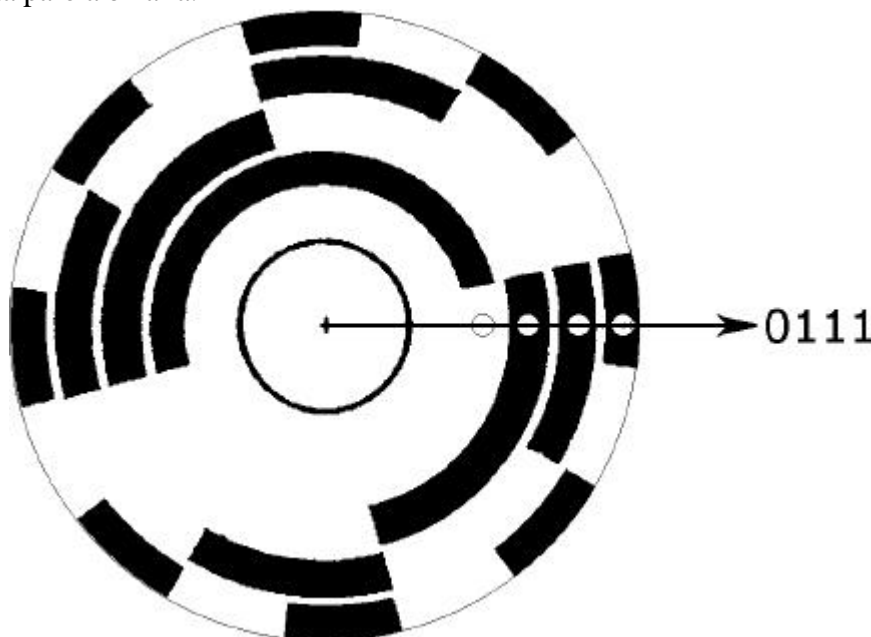


Figura 23. Esempio del funzionamento di un encoder assoluto a quattro bit.

Variando la posizione del raggio che si è immaginato di percorrere, la parola ottenuta si modifica: perché lo spostamento del raggio sia rilevabile è però necessario che esso sia maggiore di un angolo minimo che corrisponde alla ampiezza di una delle tacche della corona più esterna.

Nella trattazione svolta si è supposto di "percorrere" il raggio di lettura rilevando in maniera seriale le cifre binarie che costituiscono l'uscita del sensore: anche se questo modo di agire è in linea di principio realizzabile si preferisce installare un sensore per ogni corona circolare in modo da attuare una vera e propria lettura "in parallelo" delle cifre che costituiscono l'uscita.

Risoluzione

Nel precedente paragrafo si è fatto cenno al fatto che, affinché la uscita dell'encoder si modifichi, è necessario che il raggio di lettura -oppure il disco- ruoti di un angolo tale da provocare lo scatto di almeno un sensore: si introduce così un angolo minimo rilevabile ed una corrispondente "quantizzazione" angolare.

La principale caratteristica metrologica degli encoder assoluti è quindi la risoluzione che dipende -esponenzialmente- dal numero di bit utilizzato per la codifica dell'uscita. I 360 gradi che costituiscono la misura dell'angolo giro, infatti, vengono suddivisi in tante parti quante sono le possibili configurazioni binarie assunte dall'uscita ed è ben noto che se N sono i bit di codifica dell'uscita, le possibili configurazioni sono 2^N . Attualmente gli encoder assoluti disponibili in

commercio possono avere anche 21 bit per cui si raggiungono risoluzioni corrispondenti ad angoli minori di 1 secondo di grado.

Codifica dell'uscita

La chiave utilizzata per la codifica dell'uscita riveste una notevole importanza negli encoder assoluti: a seconda dell'uscita, infatti, le inevitabili imperfezioni costruttive degli encoder possono determinare o meno il verificarsi di errori di rilevanti misura. Per sviluppare un esempio chiarificatore di questa problematica supponiamo inizialmente di usare la sequenza binaria pura per la codifica della uscita di un encoder a quattro bit.

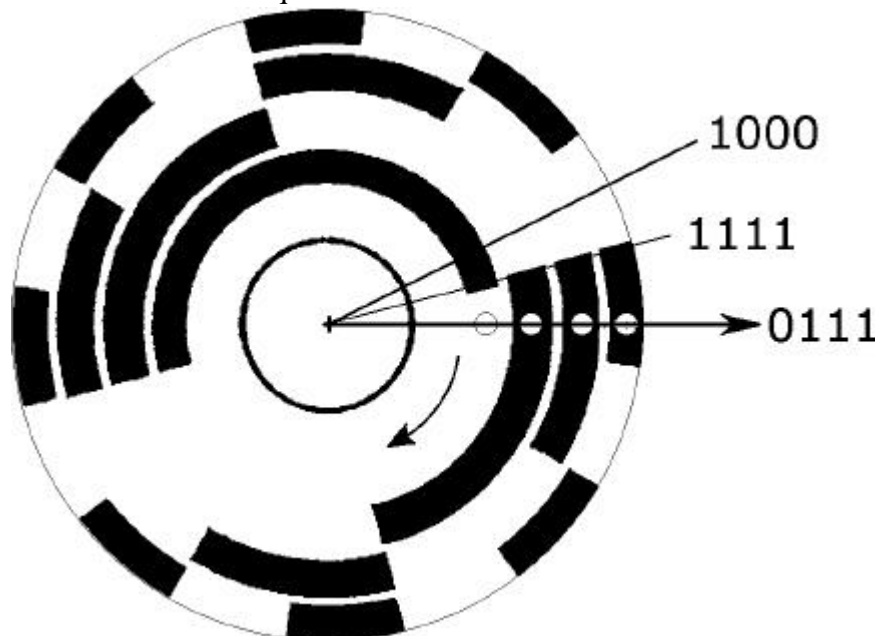


Figura 24. Incertezza dovuta al non perfetto allineamento dei sensori relativi alle diverse corone circolari dell'encoder.

Supponendo di partire dalla situazione iniziale riportata in figura 24 si può verificare facilmente che una rotazione progressiva in senso orario del disco lascia immutata la parola di uscita -uguale a 0111- fino a quando, dopo una certa rotazione, il raggio di lettura si trova ad essere sopra le frontiere delle regioni che costituiscono le corone circolari.

In via teorica a questo punto dovrebbe aver luogo la contemporanea commutazione di tutti i sensori e l'uscita dovrebbe assumere istantaneamente la configurazione 1000. In realtà, a causa delle inevitabili imperfezioni di costruzione, le commutazioni dei sensori avvengono in istanti diversi e si possono notare degli intervalli angolari in cui il numero presente all'uscita non corrisponde alla effettiva posizione del rotore. Se supponiamo che il primo sensore a cambiare stato sia quello che corrisponde al "bit più significativo" l'uscita assume la configurazione 1111 che, come si può ben vedere dalla figura 24, serve a codificare una posizione ruotata di 180 gradi rispetto a quella attuale.

Allo scopo di evitare questi notevolissimi errori di misura si adottano codifiche binarie diverse dal "binario puro": fra queste la più diffusa è la codifica "Gray".

Nel codice Gray si passa da ogni numero al successivo sempre mediante la modifica di un solo bit.

Grazie a questa caratteristica non si possono verificare gli errori di lettura evidenziati nel caso della codifica "binario puro" e la eventuale incertezza di misura si limita all'angolo corrispondente alla fascia di incertezza del solo sensore interessato alla commutazione.

Attuata la conversione della posizione in numero codificato Gray allo scopo di evitare l'errore di misura, si può quindi realizzare la traduzione della uscita nella più usuale codifica binaria mediante appositi circuiti convertitori.

Tipologie costruttive

Gli encoder possono venire costruiti in base a tipologie molto diverse: si possono infatti realizzare encoder a contatti striscianti, capacitivi, induttivi, magnetici, ottici ed altri ancora; fra tutti questi i più diffusi sono quelli ottici.

Negli encoder ottici il disco è realizzato mediante un supporto in vetro trasparente su cui vengono create, per mezzo di processi fotografici oppure a stampa, delle regioni opache. Ponendo una sorgente luminosa da una faccia del disco e tanti fotosensori quante sono le tracce dall'altra si ha che quei sensori che si trovano in corrispondenza di zone trasparenti del disco si assestano in corrispondenza di un determinato livello logico -per esempio 1- mentre i sensori che si trovano in corrispondenza delle zone opache reagiscono portando l'uscita all'altro livello logico.

I procedimenti fotografici ed a stampa permettono oggi di dividere le corone circolari del disco in vetro in un elevatissimo numero di settori: alcuni costruttori raggiungono i 5000 settori permettendo agli encoder ottici di raggiungere livelli di risoluzione notevolissimi; non si deve però dimenticare che anche la focalizzazione del fascio luminoso è altrettanto importante. Per garantire una incertezza adeguata alla risoluzione è indispensabile che i fasci luminosi che attraversano il disco siano composti da raggi il più possibile paralleli e per questo motivo si utilizzano diaframmi oppure dispositivi ottici di focalizzazione a lenti. Per rendere più agevole il montaggio di questi dispositivi di focalizzazione si impiegano delle lenti prismatiche in modo tale che una sola lente possa essere utilizzata da tutti i sensori dell'encoder che vengono montati su di un unico raggio geometrico. La lampada che viene utilizzata in questo caso è di tipo tubolare con filamento rettilineo.

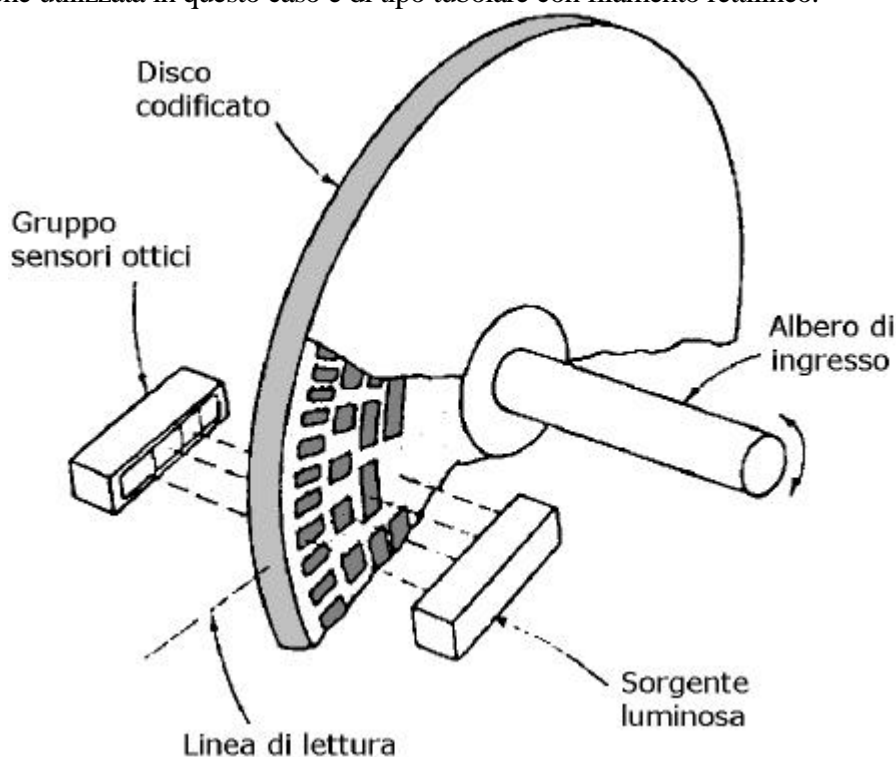


Figura 25. Encoder assoluto di tipo ottico: principio di funzionamento.

L'encoder ottico presenta molte caratteristiche positive: non subisce invecchiamenti legati all'usura, se si escludono i cuscinetti di supporto dell'alberino, non produce polveri conduttive, non provoca archi elettrici in corrispondenza delle commutazioni. D'altra parte esso risente negativamente della presenza di fumi e polvere nell'ambiente di utilizzo (questi, depositandosi sul disco lo opacizzano) e le vibrazioni più violente possono provocare la rottura del disco di vetro.

Un'altra caratteristica negativa dell'encoder ottico è costituita dall'isteresi dei fotosensori che si traduce in un'isteresi dell'encoder: ciò significa che le posizioni corrispondenti ai fronti di salita e discesa delle uscite si modificano leggermente in conseguenza del senso di rotazione del disco.

Encoder incrementali

L'encoder assoluto è un dispositivo complesso in cui devono essere realizzate più tracce sul disco, una per ogni bit che rappresenta il numero in uscita. Ovviamente ad ogni traccia deve corrispondere almeno un sensore elementare che deve fare capo ad una linea di comunicazione. Conseguenze di ciò sono una notevole complessità ed un costo non trascurabile dei questi sistemi quando si desidera raggiungere elevate risoluzioni.

Una soluzione a questi problemi è stata data dalla adozione degli encoder incrementali in cui viene utilizzata una sola corona circolare realizzata con settori rilevabili secondo le tecniche già illustrate.

Un solo sensore è sufficiente a determinare, nel caso di rotazione in un solo verso, di quale angolo è ruotato l'albero dell'encoder a partire da una posizione di riferimento. E' infatti sufficiente il conteggio del numero di tacche che sono passate in corrispondenza del sensore per ottenere il valore dell'angolo moltiplicando il numero di tacche rilevato per l'angolo elementare corrispondente ad una singola tacca.

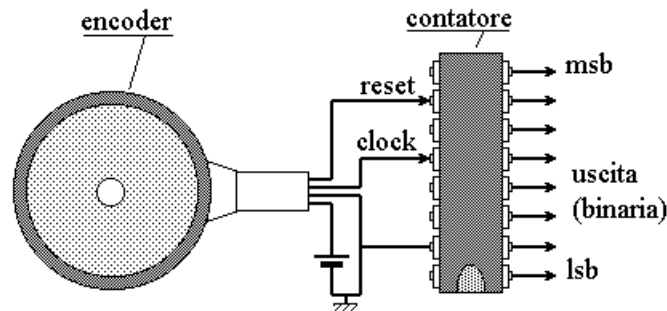


Figura 26. Schema di principio del sistema "encoder incrementale-contatore" valido per rotazioni unidirezionali.

L'operazione di conteggio può essere affidata ad un circuito logico elettronico (TTL oppure CMOS) per ottenere un sistema più compatto ed economico di un encoder assoluto di equivalente risoluzione. Rispetto a quest'ultimo, però, l'encoder incrementale presenta un non trascurabile difetto: esso necessita di una inizializzazione che gli permetta di riferire le rotazioni individuate ad una posizione certa. Per questo motivo l'encoder incrementale viene dotato di una traccia supplementare che porta una sola tacca e che viene utilizzata come riferimento assoluto agendo sull'ingresso di "reset" del contatore per azzerare il contenuto di quest'ultimo. In maniera alternativa, si agisce sull'organo a cui l'encoder è collegato per portarlo in una posizione di riferimento: in questa posizione è installato un sensore di prossimità (oppure un semplice contatto a pressione meccanica) che agisce sull'ingresso di "reset" del contatore.

La figura 26 mostra uno schema di principio del sistema encoder-contatore valido per la rotazione unidirezionale.

Si è detto che una sola pista ed un solo sensore sono sufficienti a determinare la ampiezza delle rotazioni effettuate quando queste si svolgono in un solo verso: quando invece si debbano considerare rotazioni nei due versi opposti è indispensabile usare un sensore supplementare in maniera tale da ottenere una coppia di segnali di uscita sfasati l'uno rispetto all'altro. Dall'esame delle fasi relative dei due segnali si può risalire al verso della rotazione.

Il circuito di conteggio deve disporre della possibilità di incrementare e decrementare il numero totalizzato ed in questa maniera il valore istantaneo del registro di conteggio rappresenta, nella dovuta scala, la posizione angolare istantanea riferita alla posizione iniziale in corrispondenza della quale il contatore era stato azzerato.

Il circuito di principio relativo a questa soluzione è rappresentato in figura 28.

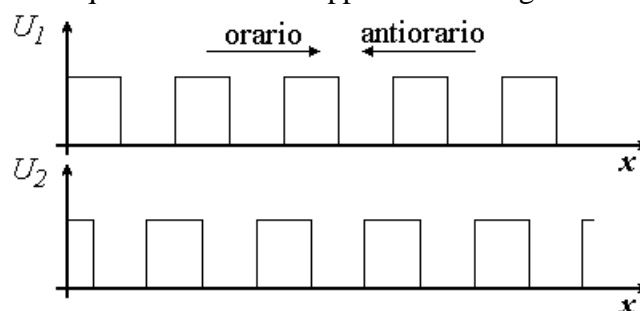


Figura 27. Utilizzo dei segnali dell'encoder incrementale per rilievo di rotazioni bidirezionali.

I due segnali in uscita dall'encoder vengono utilizzati in modo diverso: il segnale principale U_1 viene ad essere utilizzato come clock per il contatore mentre il segnale secondario U_2 è utilizzato per selezionare la funzione di incremento o decremento.

Supponendo per esempio che nel caso di rotazione in senso orario il segnale U_2 sia in anticipo rispetto ad U_1 si ha che nell'istante in cui perviene il fronte di salita del clock -cioè nell'istante in cui avviene l'aggiornamento del contatore- il segnale che seleziona il segno dell'incremento è al livello logico 1: in questo modo la rotazione oraria viene associata ad un aumento del numero memorizzato dal contatore.

Se invece la rotazione avviene in senso antiorario il clock U_1 effettua la transizione 0-1 prima che il segnale U_2 abbia assunto il livello 1 e ciò provoca un decremento del valore totalizzato dal contatore.

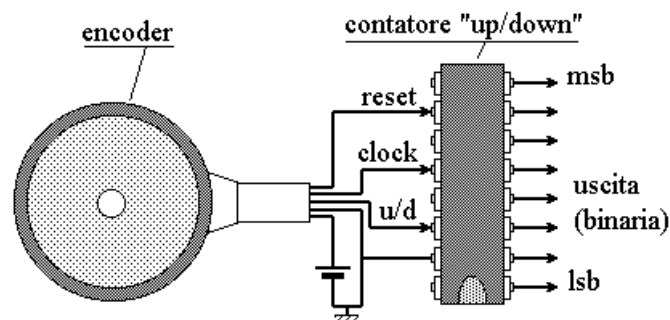


Figura 28. Schema di principio del sistema encoder incrementale-contatore "up/down" per il rilievo di rotazioni bidirezionali

Risoluzione

La risoluzione dell'encoder incrementale dipende essenzialmente dal numero di tacche presenti nella corona circolare, tuttavia è possibile aumentare tale risoluzione sfruttando una elaborazione dei segnali forniti dalle due uscite U_1 ed U_2 .

Analizzando le due forme d'onda nel caso in cui esse risultino sfasate di un quarto di periodo si può notare che vi sono quattro eventi ben individuabili che corrispondono alle commutazioni dei due segnali. Basta quindi utilizzare un semplice circuito combinatorio, per esempio un OR esclusivo (XOR) per ottenere due impulsi in corrispondenza di ogni tacca. Se invece che un XOR si utilizza una rete più complessa che generi un impulso in corrispondenza sia delle transizioni 0-1, sia di quelle 1-0 di uno qualsiasi dei segnali U_1 ed U_2 si ottiene un aumento della risoluzione di un fattore pari a 4.

16.14 Trasduttori di velocità

Fra le applicazioni di maggiore interesse nei settori dei controlli automatici vi è la misurazione delle velocità angolare. A questo scopo si possono impiegare dinamo tachimetriche, che forniscono una uscita "analogica", e tachimetri con uscita numerica basati su due diversi schemi: "a conversione in frequenza" ed "a conversione in tempo".

16.14.1 Dinamo tachimetriche

Le dinamo tachimetriche sono state i primi trasduttori di velocità: sono delle macchine elettriche che, una volta che il loro rotore è messo in movimento, generano una tensione continua la cui intensità è proporzionale alla velocità di rotazione.

La caratteristica di conversione della dinamo tachimetrica è con ottima approssimazione lineare e per questo motivo essa ha goduto di grande diffusione. Ancora oggi viene utilizzata per il rilievo della velocità di rotazione di molti assi (motori elettrici di grande potenza, turbine, ruote delle carrozze ferroviarie, ecc.).

Il difetto della dinamo tachimetrica è legato alla presenza delle spazzole e del collettore, esattamente come nelle convenzionali macchine a corrente continua: l'abrasione provocata dal

movimento del collettore a lamelle determina una rapida usura delle spazzole che si consumano rilasciando una finissima polvere conduttiva.

Per tale caratteristica le dinamo tachimetriche non possono essere utilizzate ove si debba garantire la pulizia e la assenza di materiali conduttivi e dove si voglia eliminare la manutenzione dell'impianto e delle macchine.

Altro difetto delle dinamo tachimetriche è rappresentato dalla emissione di scintille durante il funzionamento: è evidente che una tale macchina non potrà essere impiegata ove si preveda la possibilità di presenza di gas o polveri infiammabili o esplosive.

Un ultimo difetto delle dinamo tachimetriche è costituito dal loro ingombro e dal rilevante momento di inerzia.

16.4.2 Tachimetri "a ruota fonica" con uscita numerica

Questi sistemi sono dotati di uscita numerica: forniscono cioè in uscita un numero legato alla velocità di rotazione dell'organo sotto misura.

Tachimetro a conversione in frequenza

La realizzazione di un tachimetro a conversione in frequenza è assai semplice: dato che la velocità angolare è dimensionalmente omogenea alla frequenza basta sfruttare la rotazione dell'albero sotto misura per generare un segnale elettrico alla stessa frequenza -oppure a frequenza multipla- e misurare tale frequenza mediante un comune frequenzimetro digitale.

Per la generazione del segnale elettrico a partire dalla rotazione meccanica si possono usare diversi dispositivi ma, a dispetto delle notevoli differenze che ne conseguono sotto altri aspetti pratici, si può attuare una trattazione comune per quanto attiene ai problemi della risoluzione e della incertezza della misura.

Solitamente il segnale elettrico di cui verrà misurata la frequenza viene generato mediante un sensore che opera in abbinamento ad una "ruota fonica"; questa è costituita da un dispositivo che svolge funzioni analoghe a quelle del disco di un encoder incrementale.

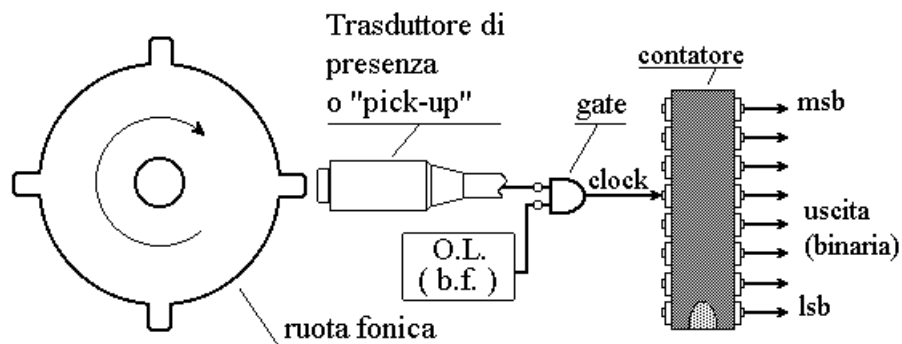


Figura 29. Tachimetro a conversione in frequenza:

Schema di principio

La ruota fonica, che presenta delle regioni rilevabili dal sensore, viene fissata all'albero di cui deve essere misurata la velocità: supponendo che essa sia dotata di n regioni rilevabili, si avrà che il sensore emette n impulsi per ogni rotazione completa dell'albero meccanico. Facendo riferimento allo schema della figura 29 in cui supponiamo che l'oscillatore locale (O.L.) determini l'apertura del gate all'istante t_1 e la sua chiusura all'istante t_2 si ottiene la espressione della velocità angolare Ω :

$$\Omega = \frac{N(t_2) - N(t_1)}{n \cdot (t_2 - t_1)} \cdot 2\pi = \frac{N(t_2) - N(t_1)}{n \cdot (t_2 - t_1)} \cdot 6,28 \quad (17)$$

in cui si è indicato con $N(t_1)$ il numero presente sul contatore all'istante di apertura del gate, con $N(t_2)$ il numero totalizzato alla chiusura del gate e con Ω la velocità meccanica dell'albero espressa in radianti al secondo.

Risoluzione

La risoluzione con cui viene realizzata la misura descritta dipende essenzialmente dal valore di $N(t_2) - N(t_1)$ dato che può essere considerata pari a:

$$risoluzione = \frac{1}{N(t_2) - N(t_1)}$$

L'esecuzione di misure con maggiore risoluzione richiede l'uso di ruote foniche con molte tacche, di intervalli di misura relativamente lunghi e diventa comunque problematica quando la velocità di rotazione meccanica è bassa.

Conversione in tempo

Per superare i limiti di velocità citati per il tachimetro a conversione in frequenza si può usare la "conversione in tempo". In questo caso il circuito di base del tachimetro si modifica come mostrato in figura 30 in cui compaiono i blocchi già introdotti connessi in maniera tale da realizzare un misuratore di intervalli di tempo.

In questa realizzazione ciò che viene misurato è la durata dell'intervallo che intercorre fra il passaggio di due successive tacche della ruota fonica davanti al sensore. Si determina cioè una frazione -nota- del periodo di rotazione della ruota fonica stessa e dell'albero a cui essa è solidale.

Indicando con T_{mecc} il periodo di rotazione dell'albero, con n il numero di tacche della ruota fonica, con t_1 l'istante di apertura del gate provocata dal passaggio di una tacca e con t_2 l'istante di chiusura del gate conseguente al passaggio della successiva tacca si ha:

$$T_{mecc} = n \cdot (t_2 - t_1)$$

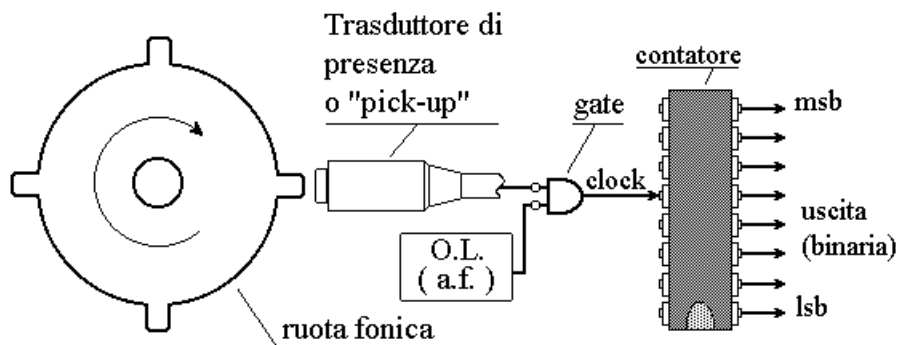


Figura 30. Tachimetro a conversione in tempo:schema di principio.

Se ora si indica con τ il periodo dell'oscillatore locale, con $N(t_1)$ il numero memorizzato nel contatore all'istante t_1 e con $N(t_2)$ il valore presente nel contatore all'istante t_2 si ottiene:

$$T_{mecc} = n \cdot \tau \cdot (N(t_2) - N(t_1))$$

Il valore della velocità di rotazione espresso in radianti/secondo si ricava quindi semplicemente moltiplicando per 2π -cioè 6,28- l'inverso del periodo T_{mecc} così individuato:

$$\Omega = \frac{1}{T_{mecc}} \cdot 2\pi = \frac{2\pi}{n \cdot \tau \cdot (N(t_2) - N(t_1))}$$

Risoluzione

Anche in questo caso la risoluzione della misura dipende dal valore dell'incremento subito dal contatore nell'intervallo $[t_1, t_2]$: esso dipende, oltre che dal valore dell'intervallo, dalla frequenza dell'oscillatore locale che deve essere tanto maggiore quanto più si desidera una risoluzione elevata. Una diminuzione della velocità di rotazione ed una riduzione del numero di tacche della ruota fonica comportano pure un aumento della risoluzione.

16.5 Trasduttori di temperatura

16.5.1. Termoresistori, Pt100

I termoresistori o RTD (Resistance temperature detectors) sono costituiti da elementi resistivi, a filo metallico, caratterizzati da un coefficiente di temperatura della resistività positivo e di modesto valore. Si è già detto che il legame fra temperatura e resistenza elettrica di un elemento metallico non è lineare, e può essere espresso mediante un modello matematico del tipo:

$$R(T) = R_0 \cdot \left[1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + c(T - T_0)^3 + \dots \right] \quad (18)$$

in cui $R(T)$ è la resistenza dell'elemento alla temperatura generica T ed R_0 è il valore della resistenza alla temperatura di riferimento T_0 ; a , b , c sono infine delle costanti il cui valore dipende dal tipo di metallo impiegato per la costruzione dell'elemento sensibile. Scegliendo opportunamente la composizione chimica del metallo usato per costruire il sensore, si possono ottenere dei valori dei coefficienti a e b tali da poter ritenere trascurabili, nei campi usuali di temperatura, gli effetti dei termini cubici e superiori: per il platino, per esempio, si hanno i seguenti valori:

$$a = 3.91 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$
$$b = -5.80 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

Indicando nella (18) con il simbolo ΔT la differenza $(T - T_0)$ si può ricavare la espressione della variazione relativa di resistenza $\frac{\Delta R}{R_0}$:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = a \cdot \Delta T + b \cdot \Delta T^2$$

per cui, ipotizzando un $\Delta T = 100^\circ\text{C}$, si ottiene che la variazione di resistenza, espressa in termini relativi, vale:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 0.391 - 0.006 = 0.385$$

Come si può notare il comportamento del sensore può ancora essere considerato lineare in quanto il rapporto fra il termine quadratico e quello lineare è assai modesto.

I sensori RTD più diffusi sono quelli a platino (Pt) e quelli a lega di nickel e rame (NiCu). I primi, in particolare, sono preferiti per la elevata stabilità del platino che reagisce modestamente con gli altri elementi chimici -il platino è un "metallo nobile"-. I sensori al platino sono spesso costruiti per presentare una resistenza di 100 ohm alla temperatura di 0°C : in questo caso vengono chiamati "Resistenze Pt100".

I principali difetti dei sensori RTD sono costituiti dalla bassa sensibilità, dall'elevato costo, dalla impossibilità di essere usati per misure di temperatura puntuale, dalla influenza delle resistenze di contatto e quindi dalla necessità di essere usati in configurazione a quattro morsetti, dalla sensibilità agli urti ed alle accelerazioni.

16.5.2 Termistori, PTC ed NTC

I termistori sono elementi ceramici caratterizzati da un elevato valore del coefficiente di temperatura della resistività. Si possono realizzare termistori con coefficiente positivo -chiamati usualmente PTC- oppure negativo -detti NTC-, ma per le migliori caratteristiche metrologiche mostrate da questi ultimi, i sensori di temperatura sono basati esclusivamente sui materiali a coefficiente negativo.

In questi elementi il legame fra la resistenza e la temperatura è difficilmente riportabile ad un modello matematico e, solamente in un campo ristretto, è possibile applicare una espressione empirica:

$$R(T_2) = R(T_1) \cdot e^{\left[b \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right]} \quad (19)$$

I valori di resistenza tipici degli NTC sono molto elevati, compresi -come mostra la figura 31- fra i 100Ω ed $1M\Omega$; valori tanto elevati permettono di trascurare le influenze delle resistenze parassite dei contatti e dei reofori. Al tempo stesso, come si può sempre notare dalla figura 31, il legame fra la resistenza e la temperatura è fortemente non lineare e può essere linearizzato localmente solamente in campi di temperature molto ristretti.

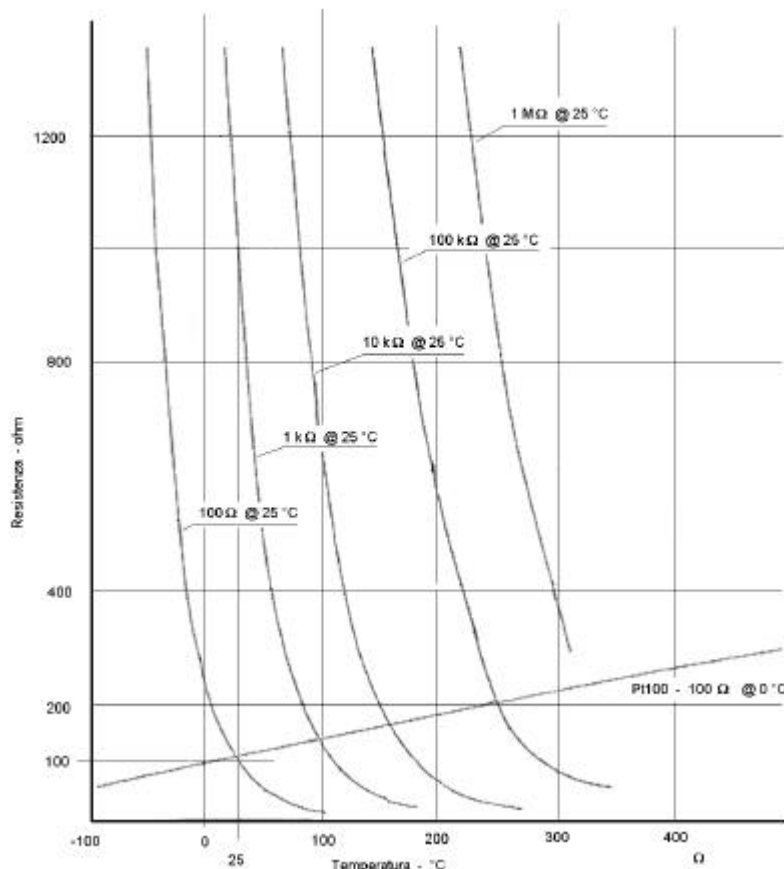


Figura 31. Andamento della resistenza di alcuni termistori NTC al variare della temperatura. E' indicato, per consentire un confronto, anche l'andamento di resistenza di un termoresistore Pt100.

Il principale requisito dei termistori è costituito dalla elevatissima sensibilità che, se confrontata con quella delle termoresistenze al platino, fa comprendere come questi sensori possano egregiamente essere utilizzati per controlli a soglia oppure per sistemi di sicurezza.

Instabilità termica

Il problema principale che deve essere tenuto presente da chi fa uso di termistori NTC è costituito dalle conseguenze termiche del coefficiente negativo di resistività: supponendo di alimentare il termistore controllando il valore della corrente, un lento e progressivo aumento di questa si riflette in un conseguente aumento della potenza dissipata per effetto Joule sul termistore ed in un aumento della temperatura. L'aumento della temperatura, d'altro canto, provoca una progressiva diminuzione della resistenza del componente che, superato un punto di massimo per la potenza dissipata, inizia a vedere calare progressivamente la caduta di tensione cui è sottoposto. Se la alimentazione fosse attuata mediante un controllo di tensione anziché di corrente, la caratteristica negativa potrebbe portare il componente ad operare in una regione in cui un aumento della temperatura del termistore, causando una diminuzione della resistenza, provocherebbe un aumento della corrente richiamata. Si avrebbe allora un conseguente aumento della potenza dissipata ed un ulteriore aumento di temperatura: il fenomeno, per la auto esaltazione conseguente, potrebbe così provocare una instabilità termica del componente che, in assenza di adeguate protezioni, porterebbe al danneggiamento del sensore.

16.5.3 Termocoppie

I sensori a termocoppia sono usati per la misura di temperatura o, meglio, di differenze di temperatura: essi necessitano di un sistema ausiliario di cui sia nota la temperatura e generano una fem il cui valore è legato alla differenza di temperatura fra il sistema in esame e quello ausiliario.

Anche se tutti i materiali metallici potrebbero essere usati per costruire delle termocoppie, solamente alcune coppie vengono praticamente sfruttate: si è visto infatti in un precedente paragrafo che il valore dei coefficienti di Peltier e di Thomson è molto basso e gli accoppiamenti fra i metalli vengono scelti principalmente per massimizzare la sensibilità della termocoppia alla temperatura. Il valore massimo del coefficiente di Seebeck viene raggiunto dalla coppia "cromo-costantana" che presenta un coefficiente di Seebeck pari a $58 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Un altro criterio per la scelta degli abbinamenti è costituito dalla possibilità della coppia di operare ad alta temperatura: la coppia W-Re/W-Re (tungsteno95%-renio5%/tungsteno74%-renio26%) può operare da 0°C fino a 2300°C .

In pratica si utilizzano 10 coppie diverse che vengono indicate con un codice alfabetico.

I principali pregi dei sensori a termocoppia sono:

- modeste dimensioni e conseguente facilità di montaggio;
- ampio campo di misura;
- facile reperibilità;
- possibilità di essere usate per misure a distanza;
- basso costo.

I principali difetti sono invece:

- modesta sensibilità;
- non linearità;
- necessità di un riferimento di temperatura.

Un ulteriore difetto è dovuto ad una caratteristica secondaria dell'effetto Peltier: se la giunzione fra due metalli è percorsa da corrente si verifica un riscaldamento della giunzione oppure un suo raffreddamento a seconda del verso della corrente. Per questo motivo, allo scopo di non alterare la temperatura dei giunti, si deve impedire la circolazione di corrente nella maglia usando rivelatori voltmetrici ad alta impedenza di ingresso.

Conduttori e giunti compensati

I conduttori della termocoppia sono caratterizzati da elevatissima purezza in modo da garantire il rispetto delle caratteristiche metrologiche della coppia. Per questo motivo essi hanno un costo relativamente elevato, soprattutto per quelle coppie in cui viene impiegato anche il platino.

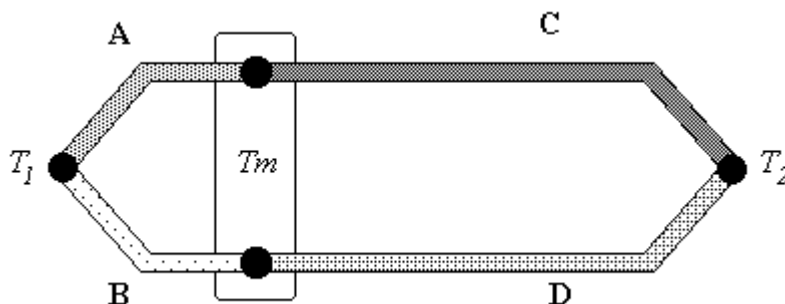


Figura 32. Conduttori compensati: i materiali A e B sono quelli che costituiscono la termocoppia, i materiali C e D sono i conduttori compensati.

Quando la termocoppia si trova in posizione remota nei confronti del sistema di misura può non essere economicamente consigliabile usare gli stessi conduttori della termocoppia per collegarla allo strumento di misura. Viene solitamente adottato uno schema di collegamento simile a quello riportato per esempio in figura 32: la termocoppia A/B ha la giunzione che è sottoposta alla temperatura T_1 mentre le altre due estremità della coppia, aperta, sono collegate ad una coppia di conduttori C e D.

Le due ulteriori giunzioni che nascono, A/C e B/D, sono alla temperatura di un giunto di riferimento T_m mentre la giunzione "fredda", che ora è costituita dai materiali C e D, è sempre alla temperatura T_2 .

La caratteristica richiesta ai materiali C e D è quella di presentare, in un campo ridotto di temperatura, un comportamento termoelettrico il più possibile uguale a quello dei materiali A e B. In questo modo, se nell'intervallo di temperatura $[T_1, T_m]$ la coppia C/D è equivalente alla A/B, è possibile utilizzare conduttori di modesta qualità -C e D- in luogo dei più pregiati A e B per realizzare i collegamenti di maggiore lunghezza.

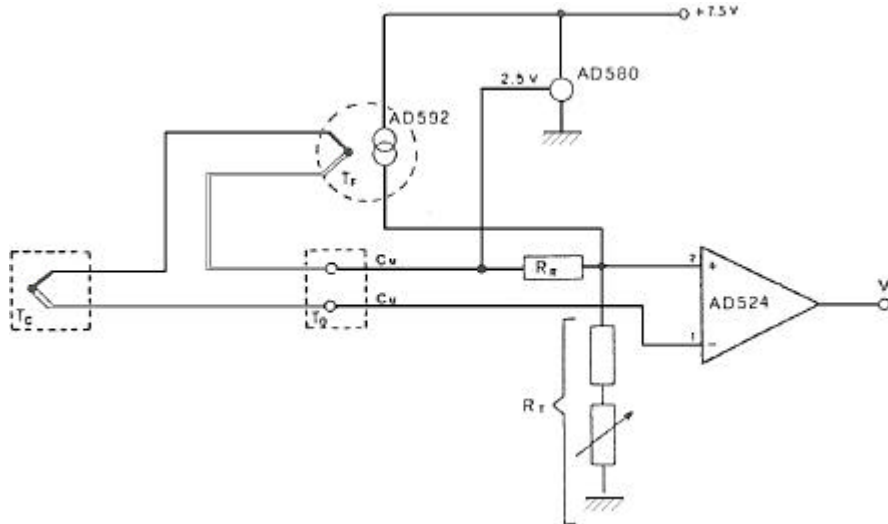


Figura 33. Esempio di circuito per la compensazione del giunto freddo.

Un altro problema pratico che si riscontra in ambito industriale riguarda la poca praticità del dover disporre di un giunto di riferimento alla temperatura T_1 di 0°C . Poiché le termocoppie vengono tarate in condizioni standard facendo riferimento a questa temperatura si dovrebbe effettivamente farle operare fra T_2 e 0°C : per praticità si preferisce invece utilizzare un giunto di riferimento a temperatura T_1 arbitraria inserendo, sul circuito di uscita della termocoppia, un generatore supplementare di fem in grado di fornire una tensione uguale alla variazione che è conseguente alla differenza fra la temperatura T_1 del giunto e la temperatura di 0°C . Diverse possono essere poi le realizzazioni circuitali con cui realizzare la descritta compensazione: la figura 33 ne riporta uno per esempio.

16.6 Trasduttori di deformazione

16.6.1 Estensimetri

L'estensimetro (*Strain gage*, raramente *Strain gauge*) è un sensore in cui la deformazione elastica patita di un elemento metallico oppure da un semiconduttore si riflette nella variazione della resistenza dell'elemento.

Tre sono le principali tipologie costruttive degli estensimetri:

- filo metallico teso,
- deposito metallico su film,
- semiconduttore.

Nel primo caso un sottile filo metallico conduttore viene vincolato, in tensione, alla struttura di cui si desidera misurare la deformazione mediante dei supporti isolanti. Questi devono essere posti lungo l'asse in cui si intende rilevare la deformazione.

La deformazione della struttura provoca una variazione della distanza fra i supporti e quindi una deformazione del filo metallico che subisce sia una variazione della lunghezza l , sia una variazione

della sezione S . Richiamando la legge che esprime la resistenza di un conduttore in funzione delle sue dimensioni:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

si nota che i due fenomeni esaltano la risposta del sensore in quanto portano contributi opposti al numeratore ed al denominatore: ad un aumento di l corrisponde infatti una diminuzione di S e viceversa.

Negli estensimetri a deposito metallico su film si usa come elemento deformabile un elemento simile ad un circuito stampato che vede una sottile pista conduttrice solidale ad un supporto isolante costituito da un film plastico di modesto spessore. La forma della pista conduttrice è tale da esaltare la dimensione totale lungo un asse e minimizzare quella lungo l'asse ortogonale. All'estremità della pista conduttrice sono poi ricavate delle piazzole per il collegamento dei reofori di alimentazione e misura. Spesso più estensimetri vengono disposti l'uno vicino all'altro, secondo assi concorrenti per ottenere una scomposizione vettoriale della deformazione. La figura 34 riporta alcuni esempi di estensimetri metallici su film.

Il supporto plastico viene incollato con appositi adesivi alla struttura di cui si deve rilevare la deformazione avendo cura di posizionare l'asse principale dell'estensimetro esattamente in corrispondenza dell'asse di deformazione. La struttura, deformandosi, induce delle corrispondenti modifiche nella geometria del supporto che si riflettono in una variazione della lunghezza e della sezione della pista conduttrice dell'estensimetro.

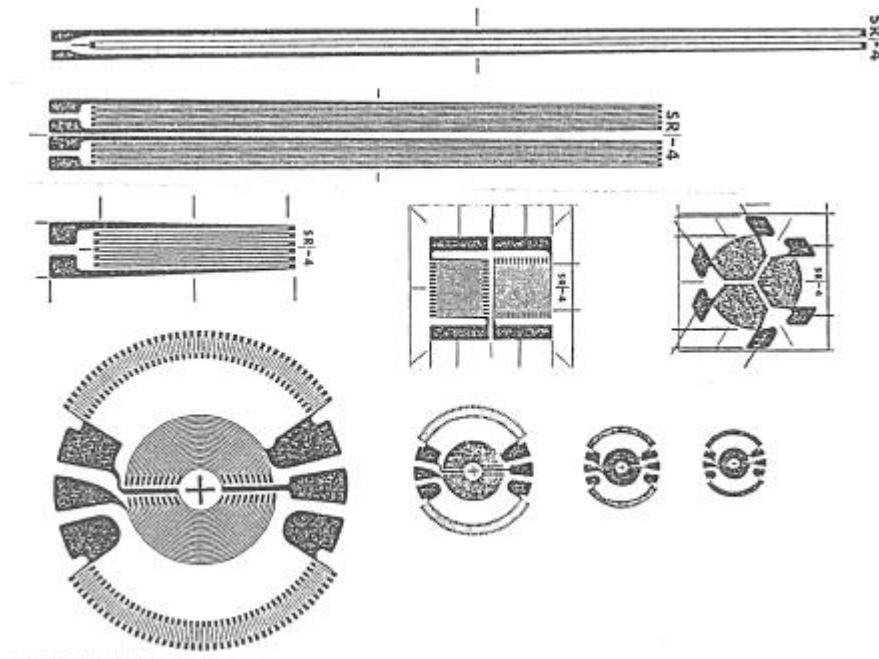


Figura 34. Estensimetri a deposito metallico su film (dimensioni reali).

Gli estensimetri a semiconduttore vengono realizzati mediante un processo di drogaggio del supporto che porta ad ottenere una pista conduttrice di forma analoga a quella dell'estensimetro a deposito metallico su film. Il supporto è frequentemente realizzato con la tecnologia del film spesso (thick film) ed in questo caso può agire direttamente come modificatore disponendo di adeguata resistenza meccanica.

I valori nominali di resistenza per gli estensimetri a deposito metallico su film sono compresi fra 100Ω e $1k\Omega$, con delle tolleranze di produzione che possono essere valutate nell' $1\div 2\%$

Gli estensimetri a semiconduttore hanno invece resistenze comprese fra 60Ω e $10k\Omega$ con delle tolleranze che vanno dall' 1% al 10%

Fattore di gage

La caratteristica di maggiore interesse nell'estensimetro è la sensibilità con cui la resistenza si modifica in conseguenza della deformazione: per giungere però un tale parametro si deve preventivamente definire come misurare la deformazione.

Facendo riferimento ad una struttura cilindrica di altezza pari ad L in condizioni di riposo si consideri di applicare una sollecitazione assiale di trazione: il cilindro subirà una deformazione -più o meno evidente a seconda dell'intensità della sollecitazione, delle caratteristiche del materiale e della geometria- e l'altezza subirà un'allungamento pari a ΔL .

Il rapporto $\Delta L/L$ costituisce l'indicazione della deformazione specifica subita dal cilindro. Il valore del rapporto, indicato col simbolo E , viene chiamato "strain".

$$E = \frac{\Delta L}{L} \quad (20)$$

Lo strain è evidentemente adimensionale essendo definito come rapporto di grandezze omogenee, tuttavia si usa esprimere l'indicazione della deformazione specifica in "microstrain" (μstrain), quasi come se lo strain così definito fosse una vera e propria unità di misura.

Definito così lo strain come indicazione della deformazione specifica è possibile ricavare l'espressione della sensibilità dell'estensimetro rapportando la variazione relativa di resistenza $\Delta R/R$ al valore dello strain. Questo fattore viene comunemente indicato con il termine di "fattore di gage" (GF).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (21)$$

Il valore del fattore di gage dipende dal materiale utilizzato per la realizzazione dell'estensimetro: per gli estensimetri metallici GF è compreso fra 2 e 4.

Il valore del fattore di gage è poi influenzato dalla temperatura e diminuisce all'aumentare di questa.

Dalla definizione di GF discende quella della sensibilità espressa facendo riferimento alla variazione relativa di resistenza dell'estensimetro provocata dalla deformazione:

$$s = \frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \frac{\Delta L}{L} = GF \cdot E$$

Dato che i valori consueti delle deformazioni specifiche che le strutture reali possono presentare sono inferiori a $10.000\mu\text{strain}$ -di solito non superano i $1.000\mu\text{strain}$ - si comprende come la variazione relativa della resistenza dell'estensimetro metallico sia molto ridotta.

Influenza della temperatura

A causa della modesta sensibilità dell'estensimetro al misurando non si deve trascurare di considerare gli effetti della grandezza di influenza "temperatura" sulla resistenza dell'estensimetro stesso. Un esempio numerico può essere molto utile per comprendere l'importanza di una tale considerazione:

Supponendo di avere applicato un estensimetro con $GF=2.0$ ad una struttura che subisce una deformazione E di $1.000\mu\text{strain}$ si ottiene una variazione relativa della resistenza espressa da:

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot E = 2,0 \cdot 1000 \cdot 10^{-6} = 0,002.$$

Supponiamo ora che il coefficiente di temperatura a della resistività del materiale che costituisce l'estensimetro sia pari a $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (che è pure un valore bassissimo, confrontabile con quello dei migliori resistori da laboratorio): basta una variazione della temperatura ΔT di soli 20°C per provocare una variazione relativa della resistenza:

$$\frac{\Delta R}{R} = a \cdot \Delta T = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 0,0002.$$

Con i valori riportati si nota come l'influenza della temperatura risulti uguale all'effetto di una deformazione pari a $100\mu\text{strain}$, cioè al 10% della sollecitazione effettivamente applicata.

L'esempio è sufficientemente significativo per convincere della necessità di utilizzare gli estensimetri in modo tale da eliminare gli effetti delle variazioni di temperatura.

La più semplice soluzione per superare i problemi legati alla variazione di temperatura è quella di utilizzare gli estensimetri non singolarmente, ma a coppie in circuiti "potenziometrici" oppure "a ponte" in modo tale che uguali variazioni di temperatura sugli estensimetri vengano ad essere ininfluenti.

Ponti di misura a squilibrio

La struttura più tipica per la misura della resistenza degli estensimetri è costituita dal Ponte di Wheatstone usato a squilibrio e le soluzioni correnti vedono l'uso di una oppure due coppie di estensimetri collegati alla struttura di cui si deve misurare la deformazione. La figura 35 mostra come utilizzare un estensimetro doppio per la misura di una trazione oppure una compressione.

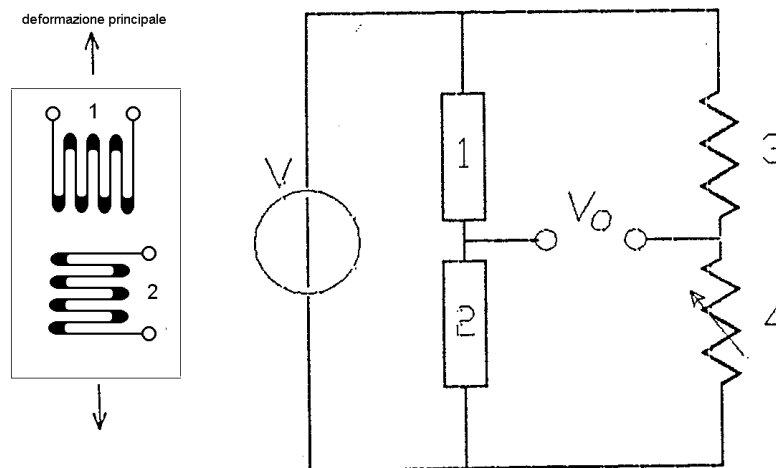


Figura 35. Coppia estensimetrica per la compensazione degli effetti di temperatura e schema del Ponte di Wheatstone.

I due elementi resistivi vengono inseriti in modo da farli insistere sullo stesso vertice della diagonale di rivelazione: questa soluzione permette di annullare gli effetti della temperatura a patto che i due estensimetri siano sottoposti alle stesse vicende termiche e, per la vicinanza dei due sensori che insistono sullo stesso supporto plastico, questa condizione è facilmente verificabile.

La tensione di squilibrio a vuoto del ponte alimentato a tensione V che nasce per effetto della deformazione degli elementi estensimetrici è facilmente calcolabile: partendo dalla condizione di equilibrio in cui

$$V_A = V \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (22)$$

ed ipotizzando che gli estensimetri 1 e 2 subiscano rispettivamente le variazioni ΔR_1 e ΔR_2 a partire dai valori R_1 ed R_2 all'equilibrio, si può sviluppare la espressione di V_A ricavando:

$$\Delta V_A = V \frac{A}{(1+A)^2} \left(-\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \quad (23)$$

in cui A rappresenta il rapporto $\frac{R_1}{R_2}$.

L'espressione precedente dimostra che gli effetti termici sugli estensimetri 1 e 2, che sono proporzionalmente uguali, non provocano l'insorgere di alcuna tensione di squilibrio confermando la validità della soluzione discussa.

Se però si considera il rapporto fra ΔR_2 e ΔR_1 si trova che esso, dipendendo dal fattore di Poisson del materiale con cui è costituita la struttura che si deforma, risulta assai inferiore all'unità. Questo fatto mostra che una disposizione degli estensimetri come quella discussa, pur molto utile in quanto

permette la compensazione degli effetti termici non consente di ottenere la massima sensibilità dal trasduttore.

La disposizione degli elementi estensimetrici che garantisce in assoluto la maggiore sensibilità del ponte è quella in cui vengono utilizzati quattro estensimetri, montati in modo tale che la deformazione della struttura provochi variazioni positive della resistenza in due di essi e negative nei rimanenti due. In questo caso la tensione di squilibrio a vuoto del ponte è espressa dalla:

$$\Delta V_A = V \frac{A}{(1+A)^2} \left(-\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (24)$$

Misuratori di pressione a ponte estensimetrico

Gli estensimetri a semiconduttore, per le ridotte dimensioni geometriche e per l'elevato GF, che può arrivare fino a 200, si prestano particolarmente per la realizzazione di sensori di pressione a membrana deformabile. In questo sensore la pressione da misurare agisce su di una membrana di materiale idoneo (silicio od altro) su cui sono stati ricavati, con le usuali tecniche di drogaggio selettivo, gli estensimetri e gli eventuali circuiti elettronici per il trattamento dell'informazione. La deformazione del substrato provoca la variazione della resistenza degli estensimetri e quindi la nascita di una tensione di squilibrio.

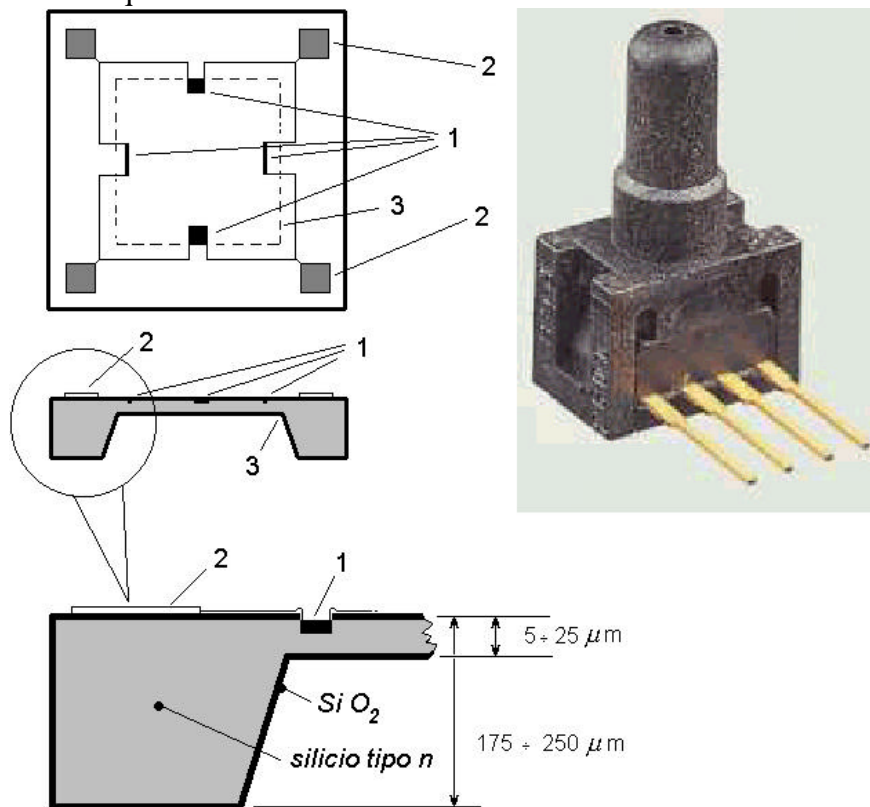


Figura 36. Sensore di pressione con estensimetri a semiconduttore diffusi (1), metallizzazione per i contatti elettrici (2); (3) indica il bordo del diaframma sensibile.

Si deve però segnalare il pericolo che il fluido sotto misura possa contenere elementi chimici in grado di reagire con il materiale che compone la membrana modificando la risposta del sensore. Per questo motivo si continuano a costruire anche sensori in cui la membrana elastica è costituita da metalli inattaccabili su cui vengono montati degli estensimetri classici a deposito metallico su film.

Il vantaggio principale degli estensimetri a semiconduttore è quello che sullo stesso chip possono essere integrati sia l'elemento sensibile, sia un circuito elettronico in grado di effettuare operazioni quali la linearizzazione o la compensazione in temperatura migliorando sensibilmente le prestazioni metrologiche del sistema.

16.7 trasduttori di forza e di coppia

16.7.1.Celle di carico

Le celle di carico sono dei sistemi in cui un ponte estensimetrico viene utilizzato per misurare la deformazione di un opportuno "modificatore" meccanico. Tramite questo modificatore una forza, oppure un momento, viene trasformato in una deformazione misurabile con i metodi già illustrati. La forma del modificatore può essere la più varia: si usano, per esempio, cilindri per le sollecitazioni di sforzo assiali oppure "doppie mensole incastrate" per sollecitazioni lungo assi paralleli, ma disassati. Sollecitazioni più complesse -ad esempio i momenti torcenti- richiedono l'uso di modificatori abbinati a particolari meccanismi.

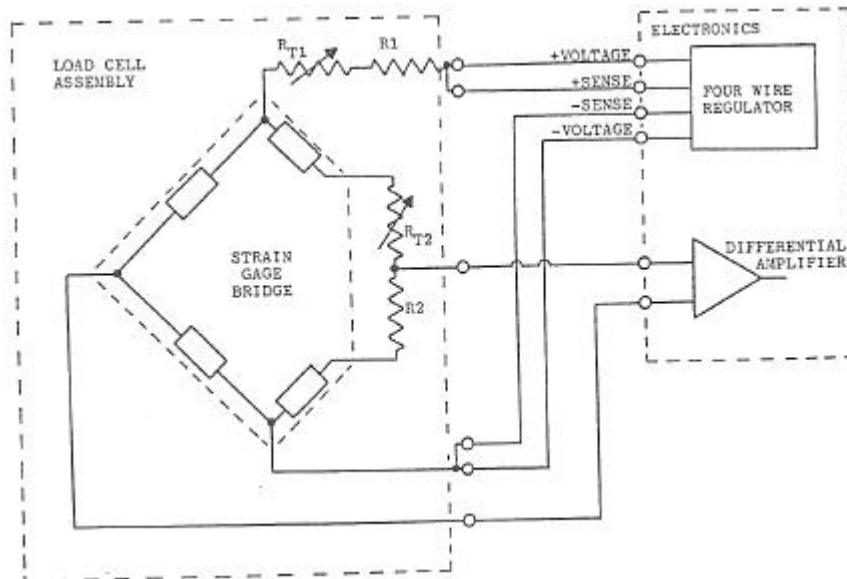


Figura 37: Schema di principio del circuito a ponte con elementi di compensazione.

In considerazione della notevole precisione che può essere ottenuta con questi apparati è opportuno approfondire lo studio della disposizione circuitale che viene impiegata nelle celle di carico.

Gli schemi fino ad ora riportati per i trasduttori estensimetrici prescindono dalle immancabili disuniformità costruttive degli estensimetri che, determinando scostamenti fra i valori di resistenza nominale e reale, non permettono l'equilibrio del ponte anche in assenza di deformazioni. Altro fattore fino ad ora trascurato è la variazione del fattore di gage con la temperatura. Per cercare di risolvere questi problemi si sono sviluppati dei ponti in cui, oltre agli elementi estensimetrici, sono presenti resistori fissi oppure regolabili o variabili con la temperatura, tali da permettere una compensazione delle caratteristiche indesiderate degli estensimetri.

La figura 37 mostra uno schema di principio di tali circuiti.

In questo circuito si possono in primo luogo notare due resistori supplementari $-R_2$ ed R_{T2} - che permettono, agendo su R_{T2} variabile, di portare esattamente all'equilibrio il ponte in condizione di riposo. Questa operazione permette cioè di annullare gli effetti delle inevitabili differenze riscontrabili fra i quattro estensimetri del ponte.

La resistenza variabile R_{T1} consente invece, agendo sul valore della tensione che alimenta il ponte a quattro lati, di regolare il valore della costante di proporzionalità che lega la variazione di resistenza degli estensimetri e la tensione di squilibrio che nasce fra i vertici della diagonale di rivelazione.

Infine la resistenza R_1 , che è realizzata con un materiale dotato di un opportuno coefficiente di temperatura della resistività, permette di compensare la diminuzione del fattore di gage con la temperatura. Come è già stato detto GF diminuisce all'aumentare della temperatura: basta allora che R_1 subisca una proporzionale diminuzione di resistenza perché la tensione applicata ai vertici di

alimentazione del ponte subisca un aumento che compensa la intrinseca diminuzione di sensibilità del ponte.

I conduttori indicati come "+sense" e "-sense" servono per ottenere una regolazione della tensione di alimentazione del ponte indipendente dalle cadute lungo i conduttori che collegano la cella di carico al sistema ausiliario di alimentazione.

16.8 Torsiometri e cuplometri

Questi trasduttori servono per il rilievo del momento torcente e della coppia meccanica applicata ad un asse in rotazione. Sono basati sull'uso del ponte estensimetrico in abbinamento a particolari elementi meccanici che agiscono come sensore per la trasformazione "coppia-deformazione".

Dal punto di vista della trasduzione sono in tutto simili alle celle di carico: se ne differenziano invece sotto l'aspetto elettrico in quanto l'elemento su cui sono fissati gli estensimetri del ponte è in movimento. Diviene così necessario provvedere ad un dispositivo che permetta il collegamento elettrico al sistema di alimentazione e misura che è invece fermo rispetto al terreno.

Vi sono due principali tecniche per superare il problema sopra citato: in un caso si fa uso di contatti striscianti su anelli conduttivi che permettono la alimentazione del ponte ed il prelievo della tensione di squilibrio. Nell'altro caso si sfrutta invece un trasformatore rotante che permette la trasmissione della tensione di alimentazione e di quella di squilibrio per accoppiamento elettromagnetico. Data la complessità di queste soluzioni, si ritiene di non approfondire ulteriormente la loro descrizione.

16.9 trasduttori di distanza e di presenza

16.9.1. Trasduttori di distanza ad ultrasuoni

In questi sistemi viene misurata la distanza fra lo strumento di misura ed un elemento riflettente sfruttando la proprietà dei suoni e degli ultrasuoni di propagarsi a velocità praticamente costante all'interno dei mezzi. Conoscendo la velocità di propagazione dell'onda acustica nel mezzo si ricava la distanza fra strumento e bersaglio a partire dalla misura del tempo intercorso fra la emissione dell'impulso sonoro e la rilevazione della eco di ritorno.

Il dispositivo che emette gli ultrasuoni è un cristallo piezoelettrico: applicando a questo un tensione oscillante ad una precisa frequenza si attiva quello che viene chiamato "effetto piezoelettrico inverso": il cristallo inizia a vibrare ed emette gli ultrasuoni desiderati. Questi, convogliati da un opportuno cono posto a contatto del cristallo, si propagano verso il bersaglio di cui si vuole determinare la distanza. Quando lo colpiscono gli ultrasuoni vengono riflessi generando un'eco e, dopo un tempo uguale a quello di andata, tornano alla sorgente da cui erano stati generati. Qui le vibrazioni provocate dagli ultrasuoni provocano la deformazione di un altro cristallo piezoelettrico che genera a sua volta un segnale elettrico.

Indicando con T il tempo di volo, cioè l'intervallo che intercorre fra l'emissione dell'impulso e la ricezione dell'eco, con v la velocità di propagazione e con L la distanza si ha:

$$L = v \cdot \frac{T}{2} \quad (25)$$

L'emissione dell'impulso da parte dell'unità trasmettitrice provoca però delle vibrazioni della struttura che si ripercuotono anche sul supporto del sensore ricevente: per evitare che queste vibrazioni possano essere erroneamente interpretate come l'eco dell'impulso, riflesso dal bersaglio, l'uscita del sensore ricevente viene "oscurata", cioè interdetta, per un tempo fisso. La durata dell'intervallo di oscuramento influenza il valore della minima distanza rilevabile dal sistema. Indicando con T_0 la durata dell'oscuramento la minima distanza rilevabile L_{min} è data da:

$$L_{min} = v \cdot \frac{T_0}{2}$$

L'elemento cui è affidato il compito di emettere l'impulso acustico è usualmente un cristallo piezoelettrico; dato che lo stesso tipo di cristallo viene usato per costruire il rilevatore dell'eco si può pensare di riunire le due funzioni in un unico dispositivo per ovvi motivi di costo ed ingombro.

Il sistema non è ancora molto diffusa, ma molti produttori stanno approntando sensori in cui le due azioni di stimolo e rilievo saranno effettuate da un unico elemento piezoelettrico.

16.9.2. Trasduttori di presenza

Alcuni trasduttori hanno la caratteristica di fornire in uscita un segnale di tipo binario (on-off): questi sistemi hanno quindi un funzionamento a soglia e vengono utilizzati principalmente per il rilievo di presenza ed il conteggio di eventi. Fra questi i più diffusi sono quelli fotoelettrici e quelli induttivi.

Trasduttori fotoelettrici

I trasduttori fotoelettrici sono basati sulla modulazione della resistenza che una giunzione silicio (di fatto un transistor) mostra quando viene colpita dalle radiazioni luminose. Sia la luce visibile, sia quella infrarossa può permettere, se opportunamente focalizzata, di portare in saturazione un foto-transistor rendendolo equivalente ad un interruttore chiuso. La corrente che attraversa il transistor può essere rilevata in diverse maniere.

Per realizzare quindi un trasduttore di presenza basta disporre un fototransistor ed una opportuna sorgente luminosa ai due lati del punto in cui si vuole indagare la presenza di un oggetto opaco: quando l'oggetto sarà presente esso interromperà il flusso luminoso impedendo al transistor di condurre; al contrario, tutte le volte che l'oggetto non si trova nel punto prestabilito la radiazione luminosa colpirà il fototransistor determinandone la saturazione.

Con questi sistemi si possono realizzare semplici dispositivi anti-intrusione e conta persone, tachimetri ottici a ruota fonica, encoder ottici, ecc.

I pregi sono il basso costo e la semplicità estrema, i difetti sono legati alla necessità di garantire la pulizia del sistema ottico (lenti, diaframmi, ecc.) e la impossibilità di lavorare in ambienti estremamente polverosi e con bersagli trasparenti.

Trasduttori induttivi

I trasduttori induttivi di presenza (chiamati spesso "proximity") sono basati sull'impiego dell'effetto trasformatore. Essi sono costituiti da un oscillatore ad alta frequenza che alimenta una bobina in aria. Questa bobina, percorsa dalla corrente fornita dall'oscillatore emette una radiazione elettromagnetica che si propaga nell'intorno. Se in vicinanza della bobina si viene a trovare un elemento di materiale ferromagnetico esso, investito dalla radiazione elettromagnetica, inizia a riscaldarsi per effetto delle cosiddette "correnti di Foucault".

L'energia necessaria per questo riscaldamento dovrebbe essere fornita dall'oscillatore il quale, non disponendo di sufficiente potenza, smette rapidamente di oscillare. Questa situazione viene rilevata da un apposito circuito che apre o chiude un interruttore elettronico.

La distanza a cui l'oggetto (detto azionatore) investito dalla radiazione elettromagnetica si deve trovare affinché l'oscillatore si arresti dipende dalle caratteristiche dell'azionatore stesso: sia le dimensioni, sia la composizione influiscono su tale distanza critica.

I proximity sono fra i trasduttori più diffusi per la realizzazione di fine-corsa in quanto non hanno elementi in movimento, possono essere sigillati, hanno una vita molto lunga.

Gli svantaggi dei trasduttori induttivi sono essenzialmente determinati dalla scarsa sensibilità (al massimo qualche centimetro) e dalla necessità che l'azionatore sia realizzato con materiale ferromagnetico.

Trasduttori capacitivi

Anche i condensatori possono essere utilizzati come rivelatori di presenza. Due sono le tecniche utilizzate: in un caso si hanno due armature e l'azionatore deve passare fra di esse, nell'altro caso si ha una singola armatura e l'azionatore costituisce la seconda armatura. In entrambi i casi il dielettrico risulta costituito dall'aria.

Il primo sistema si basa sulla variazione di capacità che ha luogo quando l'azionatore si sostituisce ad una parte del dielettrico che si trova fra le armature.

Nel secondo sistema il campo elettrico prodotto dalla singola armatura metallica si richiude su un'altra armatura fittizia costituita da un piano, a distanza infinita, connesso a terra. Quando l'azionatore si avvicina esso si sostituisce alla armatura fittizia e cambia la capacità del trasduttore.

Alimentando il trasduttore con un generatore di tensione alternata si impone la circolazione di una modesta corrente di spostamento ma, non appena un oggetto viene a trovarsi nello spazio in cui si sviluppa il campo elettrico si ha una variazione più o meno sensibile della capacità ed una conseguente variazione della corrente di spostamento. Poiché la variazione di capacità dipende da molteplici fattori tra i quali i più importanti sono le dimensioni dell'oggetto "intruso" ed il valore della costante dielettrica del materiale che lo costituisce, questi sensori mal si prestano per la misurazione della distanza fra l'intruso e la armatura metallica e vengono invece usati come semplici rivelatori di presenza senza contatto.

Le dimensioni geometriche dell'armatura influenzano la distanza di rilevamento che cresce con l'aumentare del diametro del sensore.

16.10 Considerazioni finali

IL campo della sensoristica, che si occupa di trasduttori e sensori, di rivelatori di presenza e di intrusione, di fuoco e di umidità, è uno dei più vasti e sfaccettati settori delle misure elettriche.

I motivi sono ormai chiari: i vantaggi conseguenti all'uso del vettore elettrico sono stati richiamati all'inizio di queste pagine; la complessità ed il numero delle applicazioni dei trasduttori sono invece solamente state sfiorate.

La tecnica moderna ha reso necessarie un numero sempre maggiore di misure e di controlli sulle attività naturali e dell'uomo e la industria dei trasduttori si è rapidamente adeguata ed ora funge da motrice cercando sempre tecniche di trasduzione più affidabili, più veloci, con bande sempre più ampie.

Non sarebbe stato possibile affrontare e descrivere tutte le tecniche di trasduzione oggi utilizzate pertanto si è limitato lo studio ai concetti fondamentali della caratterizzazione metrologica e si sono presi in esame, come esempi reali di trasduzione, alcuni fra i trasduttori più diffusi, soprattutto nel settore della azionamentistica.