Corso
‘Addetto alle macchine a controllo numerico”
cod. uff. 222
MODULO DIDATTICO 9

“***Principi di funzionamento, programmazione, gestione e manutenzione delle Macchine Utensili a C.N.C***.”

Sensori e Trasduttori

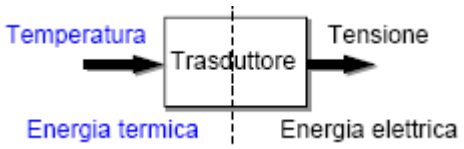
DOCENTE:
ING. ROSARIO BAMUNDO

Prima di entrare nei dettagli dei singoli sottosistemi, si ritiene opportuno esporre alcuni concetti e fornire alcune definizioni generali relative a:
• concetti di trasduttore, sensore, attuatore.
• classificazione:
• delle grandezze fisiche
• delle informazioni che da esse si possono estrarre
• caratterizzazione dei moduli funzionali presenti in un sistema di controllo
• classificazione delle tipologie dei sistemi di controllo

Concetti di trasduttore, sensore, attuatore

Definizioni

Un ***trasduttore*** (dal latino trasducere = condurre attraverso) è un dispositivo fisico che è stato progettato per trasformare grandezze appartenenti ad un sistema energetico in grandezze equivalenti (proporzionali) appartenenti ad un diverso sistema energetico (di solito più conveniente per gli usi successivi). Ovviamente un trasduttore può trasformare anche informazioni.



Un ***sensore*** è un particolare trasduttore utilizzato per *sentire* (o acquisire) le condizioni operative di una macchina o di un processo. Esso trasforma una grandezza fisica in un'altra equivalente, di solito appartenente al dominio fisico proprio dell'unità di governo (elettrico, pneumatico, idraulico) che deve poi elaborarne il contenuto informativo.
Spesso il sensore acquisisce soltanto l'informazione (tutta o in parte), nel senso che la grandezza di uscita non possiede le stesse caratteristiche energetiche possedute da quella originaria.
Consideriamo ad es. un sensore elettrico di forza. Mentre la grandezza fisica di ingresso (la forza appunto) ha associate proprietà energetiche ben precise (se applicata ad un corpo può generare una velocità e quindi si può definire una potenza associata), la grandezza fisica di uscita (una tensione ad es.) di solito non è in grado di generare nel circuito elettrico a cui è applicata una potenza elettrica significativa.
Un ***attuatore*** è un particolare trasduttore utilizzato per trasformare una informazione di comando (elaborata dall'unità di governo e quindi rappresentata nello stesso dominio fisico) in azione, fornendo alla Macchina energia nella forma più idonea.
Svolge in sostanza un ruolo simmetrico a quello del sensore, nel senso che partendo da una informazione genera energia utilizzabile nella macchina

Classificazione delle grandezze fisiche

In relazione al dominio di appartenenza dei valori ammissibili assunti le grandezze fisiche si possono suddividere in due categorie:
grandezze a valori continui (continue)
grandezze a valori discreti (discrete).
Esempi d**i grandezze continue** sono, ad es., la temperatura di una testa di termosaldatura, la

portata di una condotta, la velocità di un motore, ecc., e per esse si può dire che assumono valori in un dominio "reale" (infiniti valori).
Esempi di **grandezze discrete** sono, ad es., il verso di rotazione di un motore, il numero di pezzi prodotti da una macchina nell'unità di tempo, lo stato di apertura o di chiusura di una valvola, ecc., e per esse si può dire che assumono valori in un dominio "intero" (infinità numerabile di valori).
Classificazione delle informazioni estratte da una grandezza fisica
In relazione alla natura fisica dell'Unita' di Governo che deve elaborare le informazioni (elettrica, pneumatica, etc.) occorre rilevare informazioni di natura ad essa omogenea. Ne consegue che le informazioni che si devono estrarre dalle grandezze fisiche, al fine di realizzare il controllo della macchina, hanno in genere natura fisica diversa da queste (ad eccezione del caso di grandezze fisiche già omogenee alla natura fisica dell'Organo di Governo).

Definizione:

Le informazioni associate alle grandezze fisiche prendono il nome di segnali.
In relazione alla natura fisica dell'Unita' di Governo che deve elaborare i segnali (elettrica, pneumatica, etc.) e degli obiettivi di controllo che ci si propone, **segnali** diversi (per natura fisica e per contenuto informativo) possono essere associati alla stessa grandezza fisica.
E' bene ricordare un risultato della Teoria dell'Informazione che afferma che qualunque manipolazione effettuata sui segnali non può assolutamete portare ad un aumento del contenuto informativo proprio della grandezza fisica associata anzi, sovente ne comporta una diminuzione. Talora tale perdita di informazione è accidentale, come ne caso delle inevitabili non-idealità della catena di elaborazione che processa i segnali, talora è voluta per semplificare il costo o la complessità di tale sistema, qualora il contenuto informativo sufficiente per il controllo sia inferiore a quello originale.
Indipendentemente dalla loro natura fisica, le tipologie dei segnali tipicamente presenti in un sistema di controllo sono:

segnali analogici
segnali campionati (tipico di elaborazione elettronica)
segnali quantizzati (tipico di elaborazione elettronica digitale)
segnali digitali (tipico di elaborazione elettronica digitale)
segnali logici
segnali codificati (tipico di elaborazione elettronica digitale)

I **segnali analogici** e quelli **digitali** sono in diretta corrispondenza alle **grandezze continue** e **discrete**. Una eventuale riduzione dell'informazione contenuta è accidentale e dovuta a motivi tecnologici associati alla realizzazione fisica del sistema.
I segnali logici sono particolari **segnali digitali** che hanno la caratteristica di essere definiti in un dominio binario: essi assumono cioè due soli possibili valori. Un segnale logico può corrispondere in maniera biunivoca ad una grandezza fisica (ad es. la presenza o l'assenza di un pezzo su una piattaforma di lavorazione) o, più spesso, è ottenuto per riduzione di informazione da una grandezza continua, come ad es. per la valutazione del valore della pressione in una condotta d'aria di un circuito pneumatico. L'utilizzo di segnali logici è molto vasto per la grande semplicità di manipolazione che li caratterizza.
I **segnali campionati** sono ottenuti per campionamento temporale di segnali analogici. Si tratta quindi di particolari segnali analogici (sono definiti in un domino reale) ma caratterizzati da una

evoluzione discontinua nel tempo. Da un punto di vista pratico questi segnali non sono molto comuni per la difficoltà di manipolazione che li caratterizza. Sono invece di notevole importanza concettuale perchè ad essi fa riferimento tutta la teoria dei sistemi di controllo digitale. Nella realizzazione pratica dei sistemi di controllo digitale essi sono sostituiti dai segnali quantizzati.
I **segnali quantizzati** sono dei **segnali digitali** a tutti gli effetti ottenuti per campionamento e riduzione di informazione da segnali analogici. A differenza di un segnale campionato, il dominio di appartenenza è intero ed è ottenuto per suddivisione in intervalli (quantizzazione) del dominio reale. La riduzione dell'informazione è evidente se si pensa che a tutti i valori reali del segnale campionato appartenenti ad uno stesso intervallo di quantizzazione corrisponde lo stesso valore del segnale quantizzato. Pur essendo segnali digitali a tutti gli effetti spesso è opportuno mantenere la distinzione per ricordarne l'origine fisica continua qualora essi siano oggetto di una successiva elaborazione con tecniche diverse da quelle strettamente logiche (controllo digitale).
I segnali codificati corrispondono alla rappresentazione numerica (all'interno di un controllore digitale) dei segnali digitali. Essi sono distinti dai segnali digitali perchè ad essi è associata la particolare codifica utilizzata nel controllore.

Caratterizzazione dei moduli funzionali presenti in un sistema di controllo

Definizione

Caratteristica funzionale di un dispositivo è la relazione che lega il segnale (o la grandezza) di ingresso a quello di uscita elaborato dal dispositivo stesso.
Esempi:
a) sensore di temperatura
b) verso di rotazione di un motore
Definizione
Un dispositivo ha una caratteristica funzionale di tipo **statico** se il valore istantaneo dell'uscita dipende esclusivamente dal valore istantaneo dell'ingresso (dispositivo privo di memoria)
Definizione
Un dispositivo ha una caratteristica funzionale di tipo **dinamico** se il valore istantaneo dell'uscita dipende dal valore istantaneo dell'ingresso ed anche dai valori da esso assunti in istanti precedenti (dispositivo dotato di memoria)
Esempi:
a) amplificatore;
b) relazione forza/velocità di sistema dotato di massa
La classificazione riportata nel seguito fa riferimento esclusivamente a dispositivi statici che tipicamente costituiscono gli elementi costitutivi dei sistemi di acquisizione. Per una trattazione delle caratteristiche dei dispositivi dinamici si faccia riferimento a testi specializzati di Controllo Automatici.
La **caratteristica funzionale ideale** di un dispositivo statico è riportata in Fig. 1.

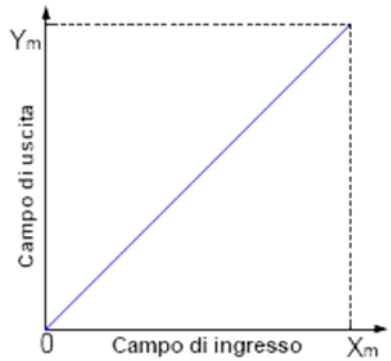
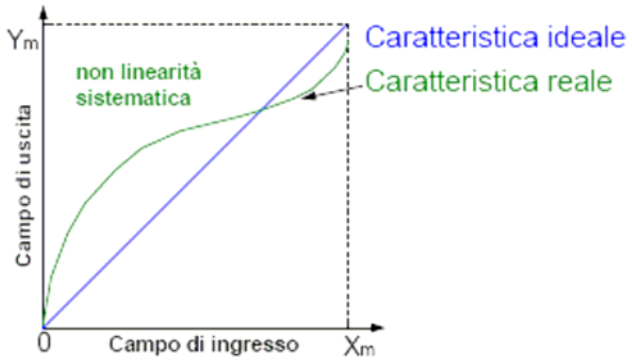
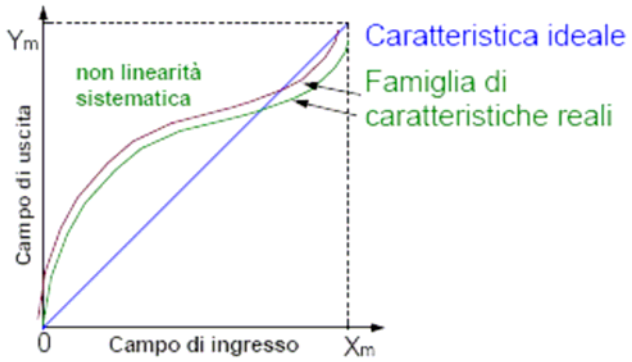
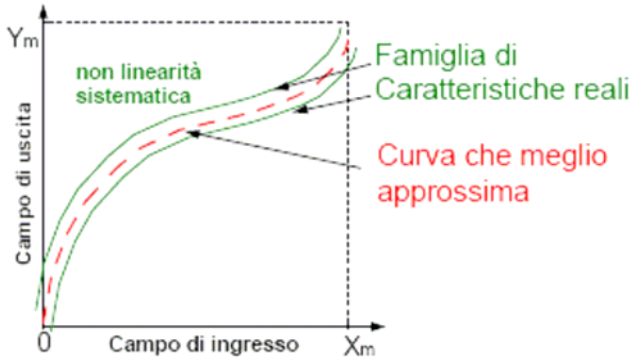


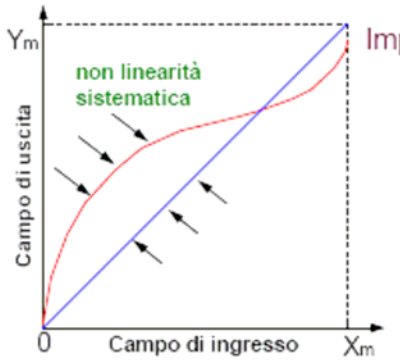
Fig. 1 Caratteristica funzionale di un dispositivo statico

Essa è definita attraverso i seguenti tre parametri:
campo di ingresso: valori estremi dell'intervallo di variazione dell'ingresso (0,XM) come nella figura o (Xm,XM) più in generale;
campo di uscita: valori estremi dell'intervallo di variazione dell'uscita (0,YM) come nella figura o (Ym,YM) più in generale;
guadagno: costante di proporzionalità (K) tra grandezza di ingresso e grandezza di uscita.
Non esistendo dispositivi perfetti, è evidente che la caratteristica reale si discosta da quella ideale. Sono possibili due tipologie di non idealità:
a) nonidealità sistematiche,
b) non idealità accidentali.
Sono *non idealità sistematiche* quelle strutturali al dispositivo, intrinseche al principio realizzativo o alla costruzione. Caratteristica essenziale di queste non idealità è la loro ripetibilità nella produzione dei componenti. Esempio tipico di questa non idealità è la non linearità strutturale delle Termocoppie.
Sono *non idealità accidentali* quelle legate alle imprecisioni di lavorazione o alle derive temporali delle caratteristiche. Tipico di queste non idealità è la variabilità nella produzione dei componenti. Tutti i dispositivi fisici sono caratterizzati in misura maggiore o minore da questa non idealità, che si può sovrapporre a quella sistematica.
Nelle figure seguenti sono riportate e confrontate le diverse non idealità


Ym
non linearità
sistematica
Caratteristica ideale
Caratteristica reale
Campo di uscita
0
Campo di ingresso
Xm

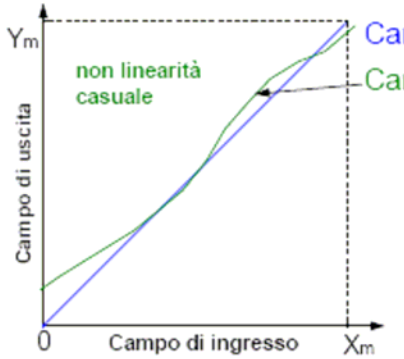

Ym
non linearità
sistematica
Caratteristica ideale
Famiglia di
caratteristiche reali
Campo di uscita
0
Campo di ingresso
Xm


Ym
non linearità
sistematica
Famiglia di
Caratteristiche reali
Curva che meglio
approssima
Campo di uscita
0
Campo di ingresso
Xm



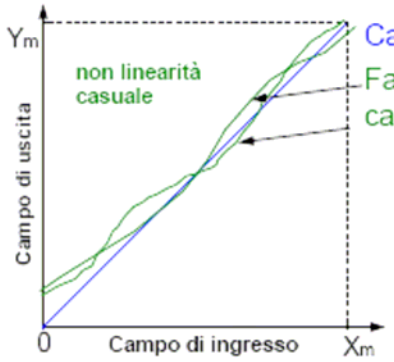
Importante

- la non linearità sistematica si può compensare con opportuni algoritmi o circuiti



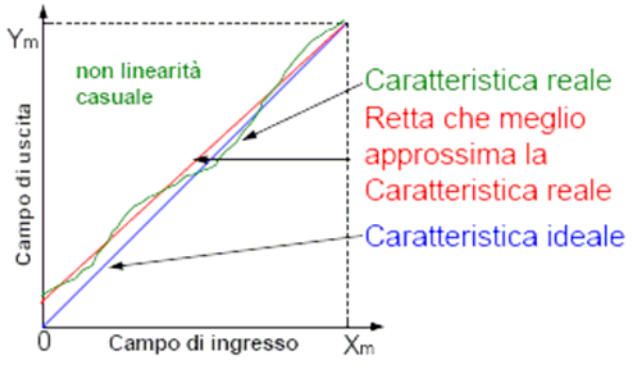
Caratteristica ideale

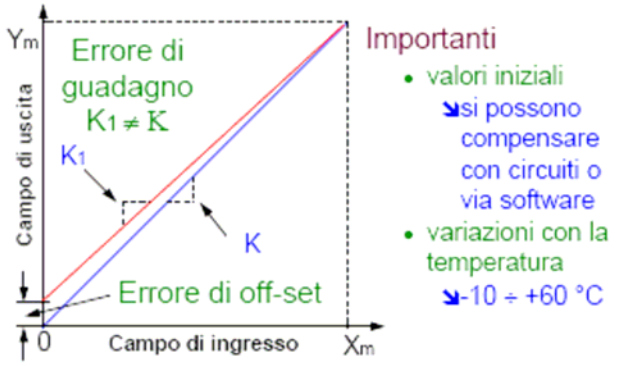
Caratteristica reale

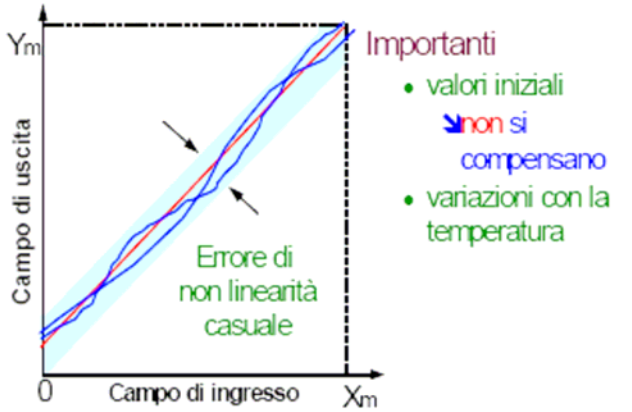


Caratteristica ideale

Famiglia di caratteristiche reali







Per caratterizzare correttamente un sensore occorrerebbe quindi definire, oltre ai parametri ideali, anche la curva caratteristica reale. In realtà i costruttori forniscono alcuni indici tipici sotto forma di errore. I più importanti tra essi sono:

Errore di linearità (linearity): massima deviazione dell'uscita dalla retta che meglio approssima la caratteristica reale (ΔY). La linearità è di solito espressa in percentuale del campo di uscita (linearità relativa), definita come ($100\ \Delta Y /(YM - Ym)$);

Errore di fuori zero (offset): valore dell'uscita con ingresso nullo (Y0);

Errore di guadagno (gain): differenza di pendenza tra la caratteristica ideale e la retta che meglio l'approssima. L'errore di guadagno è di solito espresso in percentuale e cioè ($100*(K1- K)/ K$);

Errore di quantizzazione (resolution): massima variazione dell'ingresso che non da luogo a nessuna variazione dell'uscita;

Errore di isteresi (hysteresis): massima differenza in uscita, a parità di ingresso, tra la misura ottenuta in aumento e quella ottenuta in diminuzione, durante due passate sull'intero campo di misura dell'ingresso.
E' inoltre possibile definire altre importanti caratteristiche quali:
Accuratezza (accuracy): conformità dei valori misurati ad un determinato standard di riferimento (ad. es caratteristica ideale);
Precisione (repeatability): capacità di riprodurre in uscita valori simili tra loro, ad ingresso costante, in un esperimento di molte misure consecutive;
Stabilità (stability, reproducibility): capacità di mantenere inalterate nel tempo le proprie caratteristiche.
I dati numerici che il costruttore fornisce sono:
• valore tipico, minimo e massimo, corrispondenti all'utilizzo in condizioni nominali di temperatura (ad.es 25 °C), di tensione di alimentazione, ecc. .
• coefficiente di variazione dei diversi parametri (di rado le curve di variazione), in funzione delle condizioni di uso ed in particolare della temperatura, della tensione di alimentazione (laddove occorra), del tempo.
Spesso, soprattutto per componenti di buona qualità, i valori dei parametri tipici e soprattutto delle loro variazioni con la temperatura risulterebbero troppo piccoli se espressi in % del fondo scala. Si ricorre pertanto all'altra unità di misura *ppm* (parti per milione) che corrisponde ad una moltiplicazione per un fattore 104.
Esempio:
L'errore di guadagno di un buon amplificatore è solitamente compreso tra i valori di 1% e 1‰.
La sua variazione con la temperatura è di un ordine di grandezza o due inferiore. Ne risulta che sui fogli applicativi si può trovare la seguente specifica:
gain errormax = ±0.2% oppure gain errormax = ± 2000ppm
Δgain error(T)= 0.0015%/°C oppure Δgain error(T)= 15 ppm/°C
In considerazione del fatto che l'ambiente in cui opera un sistema di controllo è solitamente abbastanza ostile, è opportuno che il progettista consideri attentamente non solo i valori tipici dei parametri, ma anche i loro coefficienti di variazione, in funzione soprattutto delle oscillazioni di temperatura e di tensione presenti nell'impianto o per esso ipotizzate. La scelta, di solito, viene fatta considerando il caso peggiore.
Esempio:
Si consideri un dispositivo che debba operare in ambiente industriale. Il range di temperature possibili per tale apparecchiatura è -25°C <T <+85°C. Si consideri ad es. l'errore di fuori-zero. Il costruttore fornisce i seguenti parametri a T= 25°C:
Offset-voltage = 250 μV Max
Offset-voltage temperature coefficient = 3μV/°C
Poichè nelle condizioni operative considerate ci si può aspettare una variazione di temperatura di ±50°C, ne consegue un valore dell'offset, nel caso peggiore, di
Voffset= (250 + 3x50) μV
Prima di concludere è bene riprendere brevemente alcuni parametri caratteristici per confrontarli tra loro, al fine di evitare possibili confusioni nella loro interpretazione.
Precisione e stabilità:
concetti simili, con la differenza che, mentre il primo si riferisce ad una successione di prove ripetute a breve distanza di tempo, il secondo si riferisce a prove ripetute nel lungo periodo;
Accuratezza e linearità:
la prima si riferisce alle caratteristiche del dispositivo confrontate con il valore di un dispositivo ideale, mentre la seconda agli scostamenti rispetto alla retta che meglio approssima la sua

caratteristica reale. Tale retta potrebbe discostarsi anche parecchio dalla caratteristica ideale;
Precisione e accuratezza:
per meglio chiarire la differenza, si ricorre alla Figura 2 che risulta più significativa di tante parole.
E' importante ricordare che il concetto di accuratezza è più forte di quello di precisione, nel senso che il primo implica il secondo, ma non viceversa.

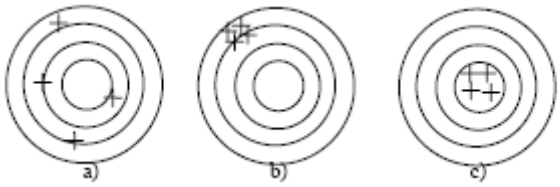


Fig.2 Accuratezza e precisione:

a) poco preciso e poco accurato
b) molto preciso e poco accurato
c) molto preciso e molto accurato
Classificazione delle modalità di controllo
In relazione alle modalità di controllo
Controllo manuale
Controllo in catena aperta (open loop)
Controllo in catena chiusa (closed loop o feedback control)
In relazione al tipo di azione di controllo
on-off
analogico (continuo)
digitale
Situazioni tipiche
C*ontrollo di tipo on-off in catena aperta:*
Il sistema di attuazione è in grado di fornire due soli livelli di energia al sistema. L'evoluzione del sistema controllato (la legge di moto per sistemi meccanici) è caratterizzata da transitori non controllati di avviamento, da funzionamento a regime e da transitori di arresto dipendenti dalle condizioni reali del sistema (carichi, disturbi etc.); non sono ottenibili andamenti del moto variabili con leggi prefissate o comunque con leggi molto accurate o ripetibili, anche se una discreta previsione delle prestazioni può essere fatta nell'ipotesi di conoscenza dei parametri di carico.
Esempi di tale tipo di controllo si hanno nei sistemi di attuazione pneumatici ed oleodinamici, nonché in molti casi di impiego di attuatori elettrici comandati semplicemente attraverso un contattore di potenza.
Un sistema di questo genere non richiede la presenza di informazioni sui parametri di funzionamento del sistema allo scopo di eseguire una regolazione di essi durante l'esecuzione del controllo previsto: come si vedrà ampiamente nel seguito, sarà comunque necessario che rilevatori con uscita di tipo logico informino l'unità di governo quando l'uscita del sistema si trova ai punti estremi del sua campo di variazione ammissibile. Queste informazioni relative alla cosiddetta *condizione di protezione o di fine corsa* sono ininfluenti sul controllo dei parametri del sistema, ma diventano essenziali per eseguire correttamente la concatenazione sequenziale di più sottosistemi all'interno del ciclo operativo della macchina.

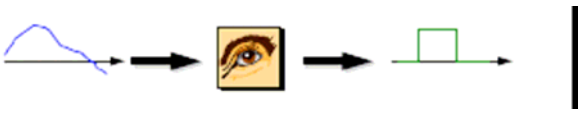
Controllo di tipo analogico in catena aperta
Il sistema di attuazione è in grado di eseguire una modulazione del flusso energetico che raggiunge il sistema in conseguenza di un segnale di comando che viene fatto variare con opportuna legge di tipo continuo. Il sistema avrà un funzionamento conseguente a questa modulazione del flusso energetico, risentendo comunque della influenza di disturbi e variazioni di carico. Non esistendo alcuna retroazione la legge di riferimento per l'elemento di controllo è costante ed indipendente dalle condizioni reali del sistema: è possibile imporre leggi di variazione comunque definite, ma non si ha alcuna garanzia sul risultato realmente ottenuto. Organi di distribuzione-regolazione di tipo continuo (i parametri che caratterizzano il flusso energetico sono proporzionali al valore istantaneo del segnale di comando) vengono utilizzati in oleodinamica (meno frequentemente in pneumatica) e sono di uso assai comune nel campo dei controlli elettronici: in quest'ultimo caso il comando in catena aperta è limitato a situazioni semplici, come l'esecuzione di transitori di avviamento o arresto secondo rampe di velocità prefissate.
Controllo di tipo analogico in catena chiusa
Per rendere l'esecuzione della legge di moto desiderata indipendente dalla influenza di disturbi esterni, il controllo continuo viene eseguito sulla base di opportune informazioni (retroazione o feedback) sul funzionamento del sistema da controllare, realizzando così un vero e proprio anello di regolazione. La maggior complessità di questa soluzione è compensata dalle migliori caratteristiche di regolazione sia durante i transitori che in presenza di carichi variabili.
Controllo di tipo digitale in catena chiusa
I moderni sistemi di controllo computerizzati in realtà non operano su segnali analogici, ma su segnali digitali. Gli stessi concetti si possono però trasferire a patto che si sostituisca all'azione di controllo continua nel tempo realizzata dai sistemi analogici una azione discontinua che varia ad intervalli regolari di tempo e viene mantenuta costante all'interno di ogni intervallo. L'ampiezza di questi intervalli è detta tempo di campionamento e deve essere trascurabile rispetto ai tempi di evoluzione del sistema.

2. IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DELLE INFORMAZIONI

SENSORI

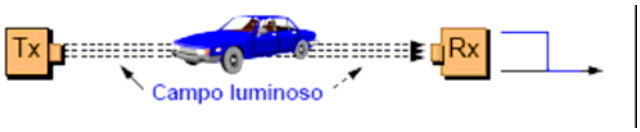
Il sensore ha il compito di trasformare una grandezza fisica di interesse in un'altra più facilmente manipolabile con la tecnologia utilizzata per la realizzazione della UG. E' importante fin d'ora sottolineare che per la stessa grandezza fisica esistono molti sensori, non solo per trasdurre nei diversi sistemi fisici propri delle diverse tecnologie utilizzate per realizzare l'UG, ma anche con uscita appartenente allo stesso sistema fisico. La scelta del sensore va dunque fatta non solo tenendo conto delle sue *caratteristiche funzionali*, come riportato dai fogli illustrativi del componente, ma anche delle sue *caratteristiche di interfacciamento* e cioè della sua maggiore o minore propensione al collegamento con l'UG prescelta. La presenza e la complessità di alcuni elementi del sistema di acquisizione dipendono fortemente dalle caratteristiche del sensore.
Due classi principali verranno considerate nel seguito:
sensori ad uscita analogica
Il segnale è caratterizzato dalla appartenenza ad un insieme continuo (limitato) di livelli (di solito di tensione se elettrico). A questa categoria verranno nel seguito acclusi anche i sensori ad uscita digitale (disponibili solo se elettrici) rappresentata, per ogni sensore, con un insieme di n segnali (corrispondenti al numero di bit utilizzati per la rappresentazione digitale) ciascuno definito su due livelli logici (segnale digitale).

sensori ad uscita logica
Sono disponibili due soli livelli (solitamente una tensione se l'uscita è elettrica).



I sensori per queste due classi di segnali, pur basandosi sostanzialmente sugli stessi principi fisici, sono solitamente realizzati in modo diverso. In particolare la realizzazione dei sensori logici e la successiva manipolazione dei loro segnali risultano di solito molto più semplici.
Prima di passare alla descrizione di alcuni sensori tipici delle macchine automatiche, si illustrano alcuni principi fisici sui quali si basano questi sensori. Considerando i diversi sensori ed i principi fisici da essi utilizzati si vedrà che taluni principi possono essere utilizzati per costruire sensori che non richiedono una sorgente ausiliaria di energia per la trasduzione ed altri che forniscono una informazione utilizzabile solo se ad essi è fornita energia in qualche forma.
I sensori del primo gruppo sono definiti "*auto-eccitanti*". Questi sensori non richiedono altra sorgente di energia se non quella fornita dalla grandezza fisica da misurare. Esempi di questo tipo di sensore sono le celle solari per misurare l'intensità luminosa e le termocoppie per misurare la temperatura. In questo tipo di sensore il livello del segnale di uscita dipende esclusivamente dall'intensità della grandezza da misurare.

I sensori del secondo gruppo sono definiti "*modulanti*". In essi il flusso di energia di una sorgente ausiliaria viene modulato dalla grandezza da misurare. Esempi di questo tipo di sensore sono gli estensimetri per misurare la deformazione e gli encoder per misurare la posizione, i sistemi ottici per rilevare l'intrusione. In questo tipo di sensore il livello del segnale di uscita dipende anche dal livello della sorgente ausiliaria.



2.1 Alcuni principi fisici utilizzati nella realizzazione dei sensori presentati

Nel seguito vengono enunciati, senza particolari dimostrazioni, alcune leggi e principi utilizzati nella realizzazione dei sensori più comuni.

Principali leggi dell'elettromagnetismo

Legge di Ohm: In un circuito elettrico in cui è presente un resistore la relazione tra le grandezze elettriche è la seguente:

V=RI

V = tensione applicata, I = corrente circolante, R = resistenza del circuito

Questa legge è spesso utilizzata per realizzare sensori "modulanti" nei quali la resistenza del circuito varia in funzione della grandezza fisica da misurare secondo qualche principo o effetto tra quelli illustrati successivamente.

Principio dell'induzione elettromagnetica: In un circuito elettrico costituito da una spira di resistenza nulla l'equazione magnetica è:

$V=d\varphi/dt = L\ di/dt$

V= tensione, φ= flusso magnetico (misura della "quantità di magnetismo" presente intorno alla spira), i = corrente circolante nella spira.

Ciò significa che:

a) se al circuito si applica una tensione mediante un generatore, esso genera un campo magnetico variabile;

b) se si immerge il circuito in un campo magnetico variabile in esso si genera una tensione.

Se il circuito è costituito da n spire l'equazione magnetica diventa:

$V = n(d\varphi/dt)$

Come si vede confrontando la legge dell'induzione con la legge di Ohm, l'applicazione di una tensione continua ad un circuito privo di resistenza provoca una corrente che cresce all'infinito.

La legge dell'induzione si applica utilmente a circuiti funzionanti in alternata con grandezze periodiche a valor medio nullo.

Il circuito tipico in cui questa legge è utilizzata è il trasformatore, che è costituito da due avvolgimenti (primario e secondario) rispettivamente con n1 e n2 spire avvolte sullo stesso nucleo. Se sul circuito primario (che per semplicità si suppone puramente induttivo) si applica

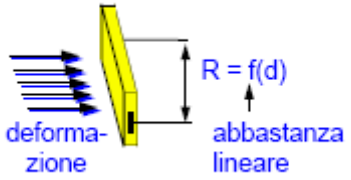
una tensione alternata $V_m \sin\omega t$, l'equazione magnetica è:

$V_1 = n_1(d\varphi_1/dt)$, da cui $\varphi_1 = -V_m(1/n_1\omega)\cos\omega t$.
Se il trasformatore è ben fatto, tutto il flusso generato dal primario si concatena con il secondario. Ne consegue che la tensione presente sul secondario è:

$V_2 = n_2(d\varphi_1/dt) = (n_2/n_1)V_m \sin\omega t$.
In molti sensori il principio del trasformatore è utilizzato in circuiti in cui il primario ed il secondario hanno lo stesso numero di spire ma nei quali volutamente l'accoppiamento magnetico tra primario e secondario non è perfetto come nei trasformatori ma varia in funzione della grandezza da misurare. Ne consegue che la tensione di uscita risulta una frazione di quella di ingresso dipendente dalla grandezza da misurare (sensori modulanti).

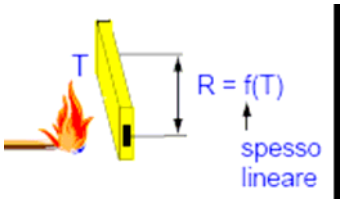
Effetto piezoresistivo

Variazione della resistenza elettrica di un materiale (metallo o semiconduttore) dovuta alla sua deformazione meccanica. La variazione di resistenza nei metalli è molto inferiore a quella nel silicio.



Effetto termoresistivo

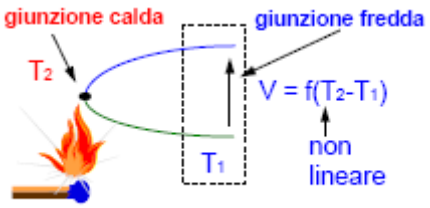
Variazione della resistenza elettrica di un materiale (metallo o semiconduttore) dovuta al riscaldamento. La variazione di resistenza nei metalli puri (soprattutto il platino) non è molto elevata ma varia molto linearmente con la temperatura. La resistenza nei semiconduttori o negli ossidi è molto elevata ma varia in modo non lineare con la temperatura.



Effetto termoelettrico

Quando una differenza di temperatura è presente tra due parti di un sistema costituito da due conduttori metallici uniti in una giunzione si verificano due effetti:
Effetto Seebeck: se la giunzione è mantenuta ad una temperatura differente da quella delle due parti metalliche libere, si genera una differenza di potenziale (tensione) tra i due estremi liberi. La tensione generata è abbastanza modesta (decine di millivolt) ma dipende quasi linearmente dalla differenza di temperatura.
Effetto Peltier: se una corrente viene fatta passare attraverso la giunzione in essa viene generato

o assorbito calore in relazione al verso della corrente circolante



Effetto fotoelettrico

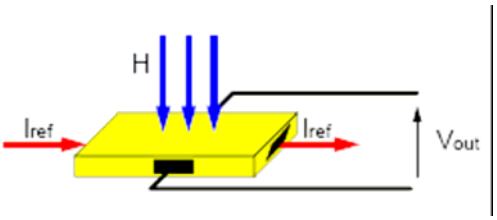
L'energia dei fotoni incidenti su una superfice metallica si può trasformare in energia cinetica degli elettroni presenti nel metallo stesso. Se l'energia cinetica è sufficiente a superare la barriera di energia potenziale localizzata sulla superfice del metallo si ha emissione di elettroni. La scoperta di questo principio valse ad Einstein il premio Nobel; esso è stato per molto tempo alla base della realizzazione dei dispositivi optoelettronici realizzati con tubi a vuoto.

Effetto fotovoltaico

I fotoni incidenti su un reticolo cristallino semiconduttore sono in grado di trasferire la loro energia agli elettroni di valenza del cristallo. In modo analogo all'effetto fotoelettrico sui metalli, se l'energia acquistata da parte degli elettroni é sufficente, questi abbandonano la banda di valenza creando coppie elettroni/lacune libere di transitare nel reticolo. Quando questo avviene in corrispondenza di una giunzione P-N, il campo elettrico creato dal potenziale di giunzione accelera le cariche dando luogo ad una corrente fotoelettrica. Il fenomeno é alla base dei sensori optoelettronici e delle celle fotovoltaiche. Nei primi esso viene sfruttato per tradurre informazioni luminose in informazioni elettriche, mentre nelle seconde si impiega per la produzione di energia elettrica.

Effetto Hall

Se un campo magnetico è applicato perpendicolarmente ad una superficie conduttrice percorsa da corrente su di essa si genera un campo elettrico perpendicolare sia alla corrente che al campo magnetico.



In termini matematici si ha

$V = KHI$
con
V = tensione di uscita del sensore
I = corrente impressa sul sensore
K = costante di Hall del dispositivo
H= campo magnetico di cui si vuole misurare l'intensità
L'effetto Hall è la base di numerosissimi sensori e dispositivi in moltissimi campi applicativi diversi.

2.2 Sensori di posizione

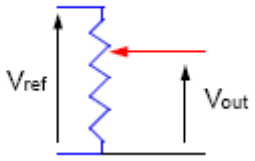
E' questa una delle grandezze più importanti per controllare il funzionamento di una macchina automatica. Essendo la posizione una grandezza che può assumere valori in un dominio (range) molto ampio, e che talora va misurata con grandissima precisione, non esiste un singolo sensore in grado di garantire elevata precisione su lunghe distanze. Esistono pertanto molti sensori diversi ogn'uno dei quali è ottimizzato per misurare posizioni in un determinato contesto.
Una prima classificazione si riferisce al tipo di spostamento da misurare: lineare o rotativo. Lo stesso sensore non può da solo rilevare entrambi i tipi di movimento, ma lo stesso principio è spesso utilizzato per realizzare sensori lineari e rotativi.
Una seconda classificazione fa riferimento alla capacità del sensore di misurare spostamenti limitati o illimitati. Anche se in generale non sembra ragionevole ipotizzare spostamenti illimitati è opportuno sottolineare che esistono numerose situazioni in cui occorre misurare la posizione all'interno di un intervallo di un oggetto in rotazione continua (ad es. la posizione del rotore rispetto allo statore in un motore Brushless) o la posizione relativa di due sistemi in rotazione continua permanente (sincronizzazione elettronica di due assi indipendenti in rotazione). Si fa pertanto riferimento a sensori di tipo assoluto, di tipo incrementale o assoluto/incrementale.
I sensori di tipo assoluto sono in grado di misurare la posizione assoluta di un oggetto ed evidentemente possono operare solo in sistemi meccanici a spostamento limitati.
I sensori di tipo incrementale sono costruiti per rilevare variazioni di posizione e possono funzionare correttamente in sistemi meccanici soggetti a spostamenti illimitati (ovviamente rotativi). Poichè la variazione della posizione corrisponde dimensionalmente ad una velocità questi sono intrinsecamente sensori di velocità che necessitano di circuiteria aggiuntiva per ricostruire la posizione.
I sensori di tipo assoluto/incrementale sono costruiti per operare sia in sistemi a moto limitato (rotativo o lineare) sia in sistemi a moto rotativo illimitato. Essi sono in grado di fornire la posizione assoluta solo all'interno di un sottointervallo dello spostamento massimo ammissibile. Per ricostruire la posizione assoluta sull'intero spostamento occorre ancora una circuiteria esterna di accumulo (integrazione).

A) Potenziometro

Principio di funzionamento
Il principio di funzionamento è basato sulla variazione di resistenza in un circuito elettrico determinata dallo spostamento dell'oggetto di cui si vuole misurare la posizione.

Descrizione

Il potenziometro è forse il più semplice sensore elettrico di posizione. E' un sensore di tipo assoluto ed è disponibile sia in versione rotativa che lineare. Si tratta di un dispositivo in cui su un resistore fisso (realizzato a filo o a film) è collocato un cursore mobile. La resistenza del circuito compreso tra uno qualsiasi dei due terminali ed il cursore dipende ovviamente dalla posizione di quest'ultimo. Risulta evidente che il potenziometro è un sensore "modulante", in quanto per ricavare una informazione elettrica utile occorre inserirlo in un circuito in cui sia presente una sorgente di alimentazione ausiliaria. Come si vede analizzando il componente mediante la legge di Ohm, la tensione di uscita è una frazione di quella di alimentazione e pertanto l'azione meccanica (la grandezza da misurare) agisce modulando in uscita la tensione di alimentazione.



Caratteristiche essenziali

• *Risoluzione*: Nei potenziometri a filo dipende dal numero e dalla spaziatura delle spire; può essere anche migliore di 0.1% e cresce al crescere della resistenza totale (numero maggiore di spire). Nei potenziometri a film la risoluzione è apparentemente infinita; in realtà è limitata dalla granularità residua del film e dalle incertezze del contatto.
• *Linearità*: > 0.1%
• *Resistenza* totale: 103 ÷ 105 a filo; 103 ÷ 106 a film.
• *Numero* di giri: 1 ÷ 10
• *Coefficiente* di variazione della resistenza con la temperatura: 10 ÷ 1000ppm/°C

Principali problemi di interfacciamento

• *Scelta della tensione di riferimento*. In funzione della resistenza totale determina la potenza dissipata nel dispositivo e quindi l'autoriscaldamento. La temperatura ambiente sommata all'autoriscaldamento rappresenta la temperatura di funzionamento del componente che determina una variazione del valore base di resistenza.
• *Impedenza di uscita non nulla e variabile con la posizione*. Questo crea sia problemi di:
a) interfacciamento col successivo dispositivo, che deve possedere una impedenza di ingresso molto maggiore per evitare effetti di carico significativi rispetto alla precisione che si vuole ottenere;
b) di sensitività ai disturbi accoppiati capacitivamente, dai quali ci si deve proteggere schermando il cavo di collegamento e riducendo l'impedenza in alta frequenze. Questo può essere fatto semplicemente inserendo un condensatore tra il cursore ed il terminale a massa.
• *Stabilità del generatore di tensione ausiliario*. Occorre alimentare il potenziometro con un generatore che garantisca una stabilità migliore della precisione che si desidera ottenere nella misura.

Considerazioni generali

E' un dispositivo economico ma poco affidabile a causa del contatto strisciante che può deteriorarsi e risentire di vibrazioni e shock meccanici. E' scarsamente utilizzato nelle macchine automatiche per misurare posizioni di parti importanti o critiche. E' spesso utilizzato come generatore di set-point negli anelli di controllo. In questo caso al cursore, che viene azionato dall'operatore di impianto, è associata una scala numerata che indica approssimativamente all'operatore il valore corrente del set-point.

B) Trasformatore differenziale

Principio di funzionamento
E' basato sul principio dell'induzione elettromagnetica. Una variazione di mutua induttanza (e quindi di flusso cancatenato) in un circuito di tipo trasformatorico è determinata dallo spostamento di un cursore collegato all'oggetto di cui si vuole misurare la posizione.

Descrizione

Il trasformatore differenziale è un sensore di tipo assoluto ed è disponibile sia in versione rotativa (chiamata **R**otary **V**ariable **D**ifferential **T**ransformer RVDT) che lineare (chiamata **L**inear **V**ariable **D**ifferential **T**ransformer LVDT).

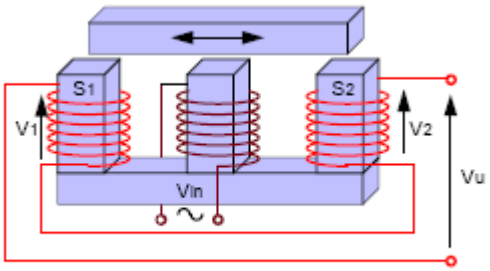


Fig. 3 - LVDT lineare

Si tratta di un sensore "modulante" in quanto richiede un generatore ausiliario per il funzionamento che risulta abbastanza semplice da descrivere. In entrambe le realizzazioni sono presenti un circuito primario e due circuiti secondari. Il primario è alimentato da un generatore sinusoidale ausiliario che imprime un flusso al traferro. L'accoppiamento magnetico tra primario e secondario avviene in parte attraverso l'aria (pessimo accoppiatore) ed in parte attraverso l'equipaggio mobile di materiale ferromagnetico (ottimo accoppiatore) collegato all'esterno. Una molla provvede a mantenere l'equipaggio mobile in posizione di riposo, corrispondente alla perfetta simmetria dei circuiti magnetici tra primario ed entrambi i secondari. Ne consegue che in condizione di riposo le tensioni indotte sui due secondari sono perfettamente identiche e la loro differenza risulta nulla. Se l'equipaggio mobile si sposta (o ruota) in una direzione (ad esempio verso S1 in Fig 3), i due circuiti magnetici diventano diversi perchè in uno (S1) è presente più ferro e nell'altro (S2) è presente più aria. Le ampiezze delle due tensioni di uscita risultano pertanto diverse e l'ampiezza della loro differenza è funzione della posizione dell'equipaggio mobile. Il segnale di uscita disponibile in questo sensore è una tensione alternata caratterizzata da:
• pulsazione pari a quella del segnale applicato al circuito primario (detto portante),

• ampiezza dipendente dalla posizione dell'equipaggio mobile,
• fase rispetto alla portante concorde o in opposizione in funzione del segno dello spostamento rispetto alla posizione di riposo.

Caratteristiche essenziali

• *Risoluzione*: 2 ÷ 20 µm (lineare); 10-5 ÷ 10-4 rad (rotativo)
• *Sensibilità*: 50÷100 mVout/(mmVvin)
• *Linearità*: 0.1÷ 0.5%
• *Ampiezza* del campo di misura: 1 ÷ 10 cm (lineare) ; ±45° (rotativo)
• *Frequenza* di eccitazione: 1 ÷ 50 Khz
I modelli a più elevata risoluzione sono realizzati per misurare spostamenti più contenuti.

Principali problemi di interfacciamento

• *Il segnale di uscita è modulato in ampiezza*. Occorre un circuito che ricavi il valore di cresta di una sinusoide e che ne rilevi la fase rispetto alla portante. Nei sistemi di controllo digitale si effettuano queste operazioni congiuntamente alla conversione analogico/digitale in uno speciale circuito (denominato Resolver to Digital Converter) utilizzato anche per altri sensori di posizione induttivi (Resolver, Inductosyn).
• *Stabilità del generatore di tensione ausiliario*. Occorre alimentare il Trasformatore Differenziale con un generatore sinusoidale che garantisca una stabilità migliore della precisione che si desidera ottenere nella misura. Come in altri sensori "modulanti", l'utilizzo della tensione del generatore ausiliario nei circuiti di demodulazione può contribuire a migliorare la qualità della misura globale.

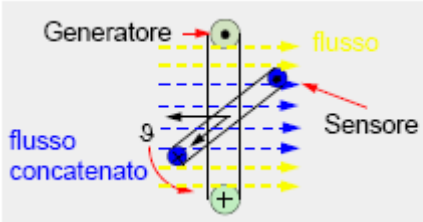
Considerazioni generali

Trova la sua massima applicazione in applicazioni dove la risoluzione e la linearità siano più importanti della escursione utile. E' un sensore robusto, affidabile e ripetibile. Il suo costo però è abbastanza elevato e richiede una circuiteria aggiuntiva di alimentazione e soprattutto di demodulazione abbastanza costosa.

C) Resolver

Principio di funzionamento

E' basato sul principio dell'induzione elettromagnetica. Una variazione di mutua induttanza (e quindi di flusso cancatenato) in un circuito di tipo trasformatorico è determinata dalla rotazione di un circuito primario collegato all'oggetto di cui si vuole misurare la posizione.



$$V = \frac{d\Phi_c}{dt}$$

$V \neq 0$ se Φ_c varia

Descrizione

E' un sensore di tipo assoluto/incrementale, è disponibile solo in versione rotativa con capacità di operare in regime di rotazione permanente.

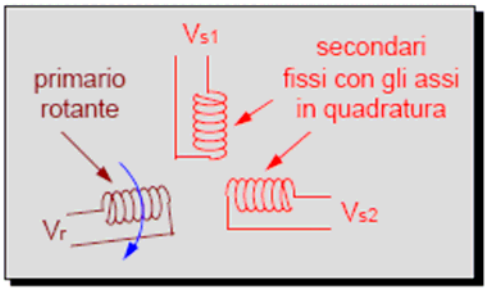


Figura 4 Schema circuitale del Resolver

In Fig. 4 è mostrato lo schema circuitale che comprende un avvolgimento di rotore (che ha la funzione di circuito primario) e due avvolgimenti di statore (che hanno la funzione di due secondari) posizionati in modo da avere i loro assi di simmetria sfasati di 90° elettrici. Si tratta di un sensore "modulante" in quanto richiede un generatore ausiliario per il funzionamento, che risulta abbastanza semplice da descrivere. Il rotore è alimentato da un generatore sinusoidale ausiliario che imprime un flusso al traferro. L'accoppiamento magnetico tra rotore e statore dipende dalla posizione relativa degli assi principali degli avvolgimenti. La collocazione a 90° elettrici degli avvolgimenti di statore assicura che quando l'accoppiamento è massimo con uno dei due avvolgimenti esso è nullo con l'altro. Chiamato θ l'angolo tra l'asse dell'avvolgimento di rotore e quello del primo avvolgimento di statore ne seguono le seguenti equazioni:
Se
$Vr = VM \sin \omega t$,
allora
$Vs1 = KVr \cos \theta$
$Vs2 = KVr \sin \theta$
Le due tensioni di uscita risultano pertanto modulate sinusoidalmente con la posizione ed in quadratura tra loro. Il segnale di uscita disponibile in questo sensore è una coppia di tensioni alternate caratterizzate da:
• pulsazione pari a quella del segnale applicato al circuito primario (detto portante),
• ampiezza dipendente dalla posizione del rotore ed in quadratura reciproca,
• fase rispetto alla portante concorde.
Il Resolver è un sensore che fornisce la posizione assoluta all'interno di un giro. Come per i motori esistono per il Resolver realizzazione caratterizzate da p coppie di espansioni polari. Questo significa che il sensore fornisce la posizione assoluta all'interno di un giro elettrico, che corrisponde a 1/p giri meccanici.

Caratteristiche essenziali

• *Linearità*: 0.1÷ 0.5%
• *Ampiezza* del campo di misura: infinita; il sensore è assoluto nel giro elettrico.
• *Frequenza* di eccitazione: 500Hz ÷ 20 Khz

Principali problemi di interfacciamento

• *Il segnale di uscita è una coppia di tensioni modulate in ampiezza*. Occorre un circuito che estragga l'inviluppo dei valori di cresta delle due sinusoidi (demodulazione) e da questo ricavi l'angolo da una sua funzione trigonometrica. Nei sistemi di controllo digitale si effettuano queste operazioni congiuntamente alla conversione analogico/digitale in uno speciale circuito (denominato Resolver to Digital Converter) utilizzabile anche per altri sensori di posizione induttivi (Trasformatore Differenziale, Inductosyn).
• *Stabilità del generatore di tensione ausiliario*. Occorre alimentare il Resolver con un generatore sinusoidale che garantisca una stabilità migliore della precisione che si desidera ottenere nella misura. Come in altri sensori "modulanti", l'utilizzo della tensione del generatore ausiliario nei circuiti di demodulazione può contribuire a migliorare la qualità della misura globale.
• *Presenza di errori dinamici*: Il Resolver è molto frequentemente utilizzato per rilevare la posizione del rotore negli azionamenti con motori Brushless. Esso deve pertanto rilevare la posizione del rotore durante il moto di quest'ultimo. La rotazione genera tensioni spurie in uscita che possono degradare la qualità della misura. Per comprendere come tali tensioni spurie si generino occorre considerare le equazioni magnetiche del circuito.
Si considera, per semplicità di trattazione,
a) che il rotore ruoti a velocità costante e quindi $\theta(t) = \theta 0 + \alpha t$.
b) che i circuiti di rotore e statore siano puramente induttivi.
c) che al rotore sia impressa la tensione $Vr = Vm \sin\omega t$
Le equazioni magnetiche risultano:
Flusso sul rotore

$\varphi r = -(K/\omega)Vm \cos\omega t$.
Flusso concatenato con il primo avvolgimento di statore

$\varphi cs1 = -(K/\omega)\ Vm \cos\omega t \cos(\theta 0 + \alpha t)$.
Flusso concatenato con il secondo avvolgimento di statore

$\varphi cs2 = -(K/\omega)\ Vm \cos\omega t \sin(\theta 0 + \alpha t)$.
Tensione indotta sul primo avvolgimento di statore

$Vs1 = d\varphi cs1/dt = K\ Vm \sin\omega t \cos(\theta 0 + \alpha t) + (\alpha/\omega)\ KVm \cos\omega t \sin(\theta 0 + \alpha t)$.
Tensione indotta sul secondo avvolgimento di statore

$Vs2 = d\varphi cs2/dt = K\ Vm \sin\omega t \sin(\theta 0 + \alpha t) - (\alpha/\omega)\ KVm \cos\omega t \cos(\theta 0 + \alpha t)$.
Come risulta evidente, le tensioni ai due avvolgimenti di statore contengono due termini. Il primo corrisponde al termine utile ed il secondo costituisce l'errore dinamico, così definito in quanto la sue ampiezza risulta direttamente proporzionale alla velocità di rotazione α.
L'ampiezza dell'errore dinamico risulta inoltre inversamente proporzionale alla pulsazione ω del generatore di riferimento. L'errore poi è ancora un segnale sinusoidale di pulsazione ω modulato sinusoidalmente in ampiezza dalla posizione, ma sfasato in quadratura con il segnale utile.
Le osservazioni appena fatte suggeriscono alcuni provvedimenti da adottare per limitare gli effetti dell'errore dinamico.
a) I Resolver operanti ad elevata velocità vanno eccitati con un segnale di riferimento a pulsazione elevata in quanto l'errore dinamico è ad esso inversamente proporzionale.
Poichè gli avvolgimenti reali di un Resolver non sono puramente induttivi, al crescere della frequenza i segnali di statore diminuiscono di ampiezza e si sfasano rispetto a quelli

di rotore. Occorre pertanto un Resolver idoneo al funzionamento ad elevata frequenza.
b) L'osservazione che l'errore dinamico è un segnale in quadratura con quello utile suggerisce una tecnica di separazione che agisce in fase di demodulazione. Se il circuito di demodulazione utilizza il segnale di riferimente applicato al rotore (portante) come sincronismo per l'estrazione: a) del valore di cresta dal segnale utile (demodulazione a valore di cresta) o
b) del valore medio nel semiperiodo della portante (demodulazione a valor medio), risulta che sul segnale demodulato gli effetti del disturbo sono assenti in quanto quest'ultimo è nullo in quell'istante (caso a) ed ha valor medio nullo nel semiperiodo (caso b).

Considerazioni generali

Il Resolver è un sensore di posizione molto affidabile, abbastanza preciso, non troppo costoso, in grado di essere applicato su sistemi in rotazione continua fornendo una informazione assoluta in un giro elettrico dell'asse di rotore (1/p giri meccanici, dove p = numero di coppie polari del Resolver). Esso trova attualmente la sua massima applicazione come sensore di posizione del rotore negli azionamenti con motore Brushless (sincrono a magneti permanenti) a campo sinusoidale. La sua robustezza, la tecnologia elettromagnetica simile a quella realizzativa di un motore e la sua relativa insensibilità agli sbalzi di temperatura lo rendono idoneo all'integrazione all'interno del motore, favorendo così la compattezza e la riduzione dei costi dell'insieme. L'inconveniente principale nelle applicazioni digitali è la necessità di un circuito di demodulazione e conversione digitale abbastanza complesso e costoso.

D) Encoder

Principio di funzionamento

Esistono realizzazioni basate su diversi principi di funzionamento. Le due tecnologie realizzative più comuni sono basate sull'effetto fotovoltaico e sull'induzione elettromagnetica per rilevare lo spostamento dell'oggetto da misurare.

Descrizione

E' disponibile sia in versione rotativa che lineare (denominato in questo caso Riga Ottica o Inductosyn in relazione al principio di funzionamento utilizzato) con funzionamento di tipo incrementale o assoluto/incrementale. Per chiarire il funzionamento del dispositivo si fa riferimento ad un dispositivo ottico. Su un disco di vetro sono depositate striscie radiali opache ottenute ad es. per evaporazione sotto vuoto di metalli su una maschera opportuna, come illustrato in Fig.5.

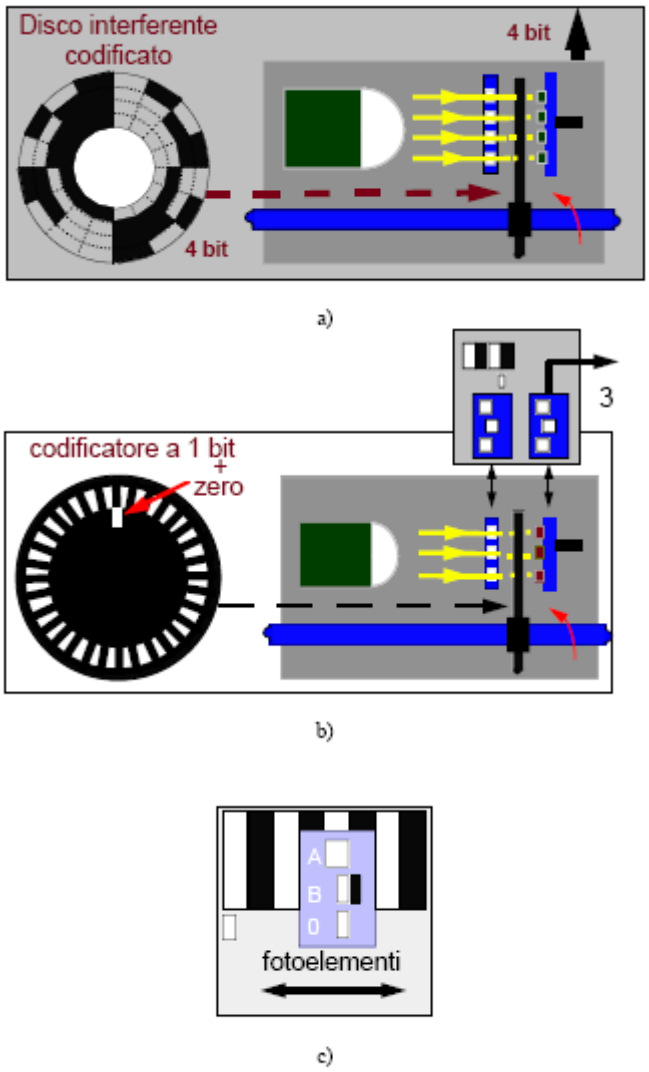


Fig. 5 a) Encoder assoluto, b) Encoder incrementale, c) Riga Ottica

Nella versione assoluta si evidenziano diverse corone circolari (il loro numero dipende dalla risoluzione desiderata per il dispositivo) su cui le zone opache e trasparenti si alternano a formare una codifica della posizione. Viene di solito utilizzato un codice Gray per garantire codici adiacenti caratterizzati dalla variazione di un solo bit. Questo consente di evitare configurazioni spurie nel passaggio da una posizione a quella successiva.
Nella versione incrementale sulla corona circolare esterna del disco si alternano zone trasparenti ed opache di eguale larghezza. Si definisce passo angolare la rotazione corrispondente alla distanza di due striscie della stessa natura (opache o trasparenti).
La caratterizzazione degli encoder è di solito riportata in passi (angolari) per giro per quelli incrementali ed in bit per quelli assoluti. Pertanto un encoder incrementale con 1024 passi per giro ha la stessa risoluzione di uno assoluto a 10 bit.
Nel seguito è descritto in qualche dettaglio l'encoder incrementale; quello assoluto è realizzato concettualmente allo stesso modo, fatto salvo il maggior numero di sensori fotovoltaici.
Il disco di vetro, calettato su un albero di trasmissione, viene posizionato in una flangia su cuscinetti a sfere facendo molta attenzione ad evitare eccentricità o disassamenti che riducono la precisione del dispositivo. Su opportuni supporti fissati alla flangia sono posizionati una

sorgente luminosa, una lente di collimazione, una piastra di scansione ed una piastra di supporto degli elementi fotosensibili, come mostrato in Fig. 5-b).
Sulla piastra di scansione sono ricavate 2 finestre trasparenti, posizionate una sotto l'altra e distanziate radialmente di un quarto di passo angolare. Vi è, inoltre, un'altra finestra di riferimento sia sul disco che sulla piastra di scansione. Dall'altra parte del disco sono posizionati, corrispondentemente alle finestre della piastra di scansione, altrettanti elementi fotosensibili.
La luce emessa dalla lampada viene collimata da una lente in raggi paralleli sulle finestre situate sulla piastra di scansione, e da questa passa sul disco, che ne modula l'intensità in funzione delle posizione. Dall'altra parte del disco gli elementi fotosensibili trasformano i fotoni in una tensione corrispondente all'intensità luminosa che li colpisce. Ne consegue che su ogni sensore si avrà una variazione (quasi sinusoidale) di tensione in funzione del movimento del disco. Il posizionamento delle finestre sulla piastra di scansione e corrispondentemente dei sensori grantisce forme d'onda sfasate di 1/4 di passo (90 gradi elettrici), come mostrato in Fig. 6. Per semplificare l'utilizzo del dispositivo solitamente il costruttore integra in esso una semplice elettronica di condizionamento basata su Schmitt-Trigger per la trasformazione dei segnali sinusoidali in treni di impulsi, includendo spesso anche i segnali negati per consentire la trasmissione differenziale.

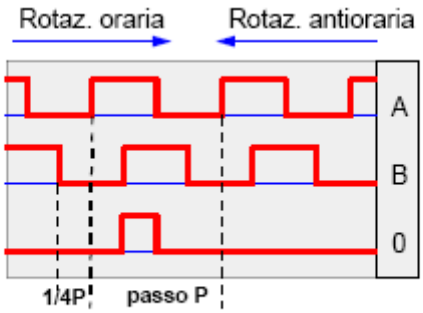


Fig. 6 - Forme d'onda di uscita di un Encoder

Così come descritto finora l'Encoder incrementale rappresenta un sensore di velocità che fornisce in uscita un segnale la cui frequenza è ad essa proporzionale. Per ottenere un sensore di posizione è necessario un circuito di conteggio che effettui l'integrazione del segnale di velocità. La doppia uscita con segnali sfasati di 1/4 di passo è indispensabile per rilevare il verso di rotazione e consentire una corretta accumulazione del conteggio dei passi. Infatti, con rotazione oraria il segnale B è in ritardo rispetto ad A, mentre con rotazione antioraria il segnale A è in ritardo rispetto a B. Può essere utile abituarsi ad osservare le forme d'onda dell'Encoder nel modo seguente. Per rotazioni orarie si considera il diagramma nel modo usuale, con l'asse dei tempi orientato da sinistra a destra. Le forme d'onda corrisponenti alla rotazione antioraria si possono ottenere, senza ridisegnare il diagramma, semplicemente considerando l'asse dei tempi orientato da destra a sinistra. La determinazione del verso di rotazione si effettua facilmente osservando il livello del segnale A in corrispondenza del fronte di salita del segnale B (o viceversa), come mostrato in Fig. 7. Si nota che con rotazione oraria il livello di A si mantiene costantemente alto, mentre per rotazione antioraria si mantiene costantemente basso.

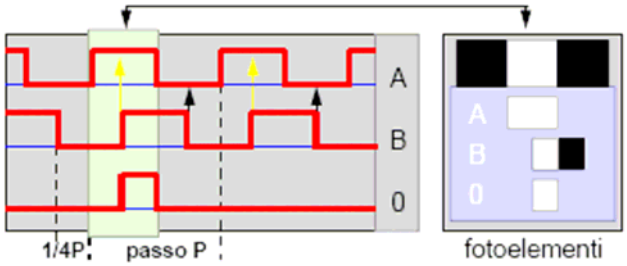


Fig. 7 - Discriminazione del verso di rotazione

Caratteristiche essenziali

• *Sensibilità*: a) uscita logica: 0-5V TTL oppure 0-15V push-pull
b) uscita analogica sinusoidale qualche decina di mVpp su carico di 1KΩ
• *Risoluzione*: anche >16bit per versione assoluta
standard fino a 5K impulsi/giro,
speciali anche >100K impulsi/giro con elettronica aggiuntiva.

Principali problemi di interfacciamento

Encoder Assoluto
La posizione è già codificata e l'interfacciamento risulta semplice. L'utilizzo di un codice di tipo Gray semplifica anche il problema delle commutazioni spurie che si potrebbero verificare nel passaggio tra due configurazioni successive dovuti agli inevitabili piccoli errori di allineamento radiale delle diverse traccie. Nel codice Gray un solo bit varia tra due configurazioni adiacenti e l'errore di allineamento della traccia che commuta rispetto al valore ideale si traduce in un cambiamento (corretto) del valore di posizione leggermente anticipato o posticipato.
Encoder Incrementale
Occorre determinare il verso di rotazione ed accumulare (integrare) il conteggio per ricostruire la posizione assoluta. Con riferimento a Fig. 7, un semplice circuito per la determinazione del verso di rotazione ed il conteggio è riportato in Fig.8. Esso tuttavia rappresenta soalmente un circuito di principio in quanto soggetto ad inevitabili errori in una applicazione pratica.

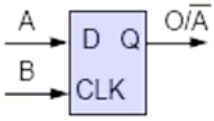


Fig. 8 - Schema di principio di rivelatore di verso di rotazione

Si pensi infatti alla situazione (assai comune nelle applicazioni meccaniche) in cui il motore di cui si vuole rilevare la posizione si arresti nell'intorno della posizione corrispondente alla commutazione della traccia A, rappresentata con a in Fig 9. La presenza di piccole vibrazioni dovute ad es. all'eccitazione di modi di risonanza durante l'accelerazione o riflesse all'asse motore dalle altre parti della macchina, potrebbero far ascillare l'asse tra le posizioni +Δa e -Δa. Dall'analisi del comportamento del circuito (si ricordi il suggerimento di percorrere il diagramma temporale invertendo l'asse dei tempi per rotazioni in senso antiorario) si riconosce facilmente che la traccia A cambia di stato due volte per ogni oscillazione completa, ma il

discriminatore del verso di rotazione rileva erroneamente sempre la stessa direzione.

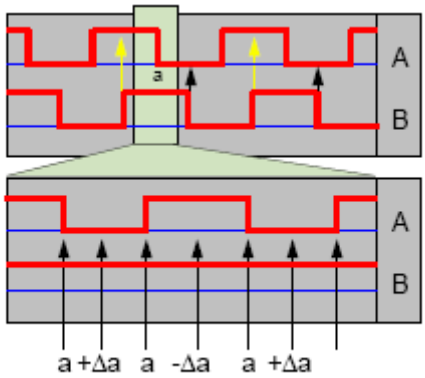


Fig. 9 - Forme d'onda di uscita in presenza di oscillazioni nell'intorno di un punto a

Occorre realizzare circuiti sequenziali sincroni più complessi, dove la discriminazione del verso sia fatta utilizzando entrambe le traccie. Esistono in commercio circuiti appositi (Encoder Interface) che realizzano, oltre alle funzioni indicate, anche il filtraggio digitale dei segnali delle tracce, per ripulirli da spikes che potrebbero indurre false commutazioni, e la moltiplicazione x2 o x4 degli impulsi. Questo significa che vengono contati i fronti di salita di entrambe le tracce (x2) e anche quelli di discesa (x4) (vedi Fig. 10).

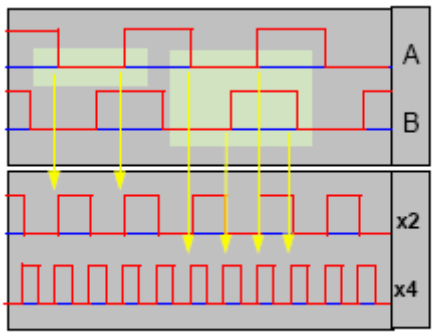


Fig. 10 - Moltiplicazione degli impulsi.

Un altro problema complica l'interfacciamento dell'Encoder (anche assoluto) al Microprocessore, più generalmente legato all'acquisizione del valore di un contatore asincrono rispetto al clock del Mp. E' noto che durante il ciclo di lettura il dato presente sul Bus del Mp deve essere stabile con un certo anticipo rispetto al termine del ciclo di lettura. E' quindi evidente che questa specifica non può assolutamente essere rispettata dall'uscita di un contatore asincrono, che può commutare indipendentemente dal ciclo di lettura del Mp. Occorre frapporre a) un circuito di campionamento (latch) che venga aggiornato in maniera sincrona con il clock del contatore, b) una rete di controllo della lettura che inibisca il campionamento durante le letture del Mp e rallenti eventualmente la lettura (Wait) nel caso in cui questa avvenga durante un campionamento precedentemente avviato. Ovviamente, anche questa circuiteria è presente in un Encoder Interface commerciale.

Considerazioni generali

Si tratta di uno dei dispositivi di misura della posizione maggiormente utilizzati nell'industria meccanica, nei robot, nei sistemi di manipolazione e di automazione. Per la sua maggiore complessità la versione assoluta trova diffusione essenzialmente nelle apparecchiature complesse dove l'inizializzazione dei contatori, indispensabile a seguito di una mancanza di alimentazione, non sia tollerabile. E' un dispositivo affidabile anche se abbastanza costoso se realizzato con elevato numero di passi/giro. Occorre prestare attenzione agli shock meccanici e termici. Una certa criticità alle sollecitazioni termiche ne preclude in genere l'uso all'interno di un motore, dove invece può essere alloggiato senza difficoltà un Resolver.
Per la relativa difficoltà di realizzazione di una rete di interfacciamento per Encoder di sicura affidabilità, ed in considerazione del basso costo e della ampia disponibilità dei componenti integrati, è consigliabile, in linea di massima, ricorrere all'uso dei dispositivi comme

2.3 Sensori di temperatura

La misura di temperatura è tra le misure più comuni nell'Automazione. Tutti i processi di generazione e trasformazione di energia producono calore e la temperatura è un elemento che spesso condiziona il funzionamento di un processo o di una apparecchiatura. Verranno presi in considerazione i tre sensori di temperatura più comuni: le Termocoppie, le Termoresistenza, ed i Termistori, le cui caratteristiche essenziali sono messe sinteticamente a confronto in Fig. 11. I principi fisici utilizzati nella realizzazione dei sensori di temperatura e l'elevato range di valori di temperatura caratteristici di molti processi rendono problematica la realizzazione di sensori con caratteristica lineare. Il circuito di interfaccia dovrà provvedere pertanto anche alla linearizzazione.

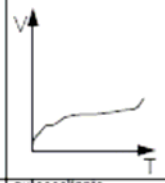
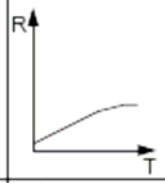
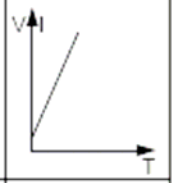
	Termocoppie	RTD	Termistori	Sensori a c.i.
				
Pro	autoeccitante semplice robusto poco costoso ampio range di Temp.	molto stabile molto accurato molto lineare	molto sensibile veloce misua due fili	massima linearità output elevato poco costoso
Contro	non lineare bassa tensione di usc. serve una temp. di rif. bassa sensitività	costoso serve rifer. di corrente bassa resistenza nom. autoriscaldamento	non lineare range limitato di T serve rifer. di corrente autoriscaldamento	T<200°C serve alimentazione lento autoriscaldamento

Fig. 11 Confronto tra le caratteristiche di diversi sensori di temperatura

A) Termocoppia

Principio di funzionamento

Si basa sull'Effetto Seebeck. Solo per piccole variazioni di temperatura la tensione di Seebeck dipende linearmente dalla temperatura. Generalmente la dipendenza è non lineare e la linearizzazione può essere effettuata mediante tabelle o polinomi interpolanti il cui ordine dipende dalla nonlinearità e quindi anche dal range di temperatura utilizzato.

Descrizione

Si tratta dell'unico sensore "auto-eccitante" presentato. Sono disponibili in commercio termocoppie realizzate con diverse coppie di metalli. Ciascuna ha caratteristiche di applicazione (range di temperatura), tensione fornita (in genere dell'ordine di poche decine di mV) e di linearità proprie. In base ai metalli utilizzati le termocoppie vengono classificate secondo lo standard ANSI con lettere maiuscole. In Tab. 1 sono riportate sinteticamente le caratteristiche delle più comuni termocoppie.

Tab. 1 - Caratteristiche generali delle più comuni termocoppie

Tipo E	Tipo J	Tipo K	Tipo R	Tipo T
NikelCromo(+) Costantana(-)	Ferro(+) Costantana(-)	NikelCromo(+) Nikel(-)	PlatinoRodio(+) Platino(-)	Rame(+) Costantana(-)
-100°C ÷ 1000°C ±0.5°C V_{max}70mV	0°C ÷ 760°C ±0.1°C V_{max}40mV	0°C ÷ 1370°C ±0.7°C V_{max}50mV	0°C ÷ 1000°C ±0.5°C V_{max}20mV	-160°C ÷ 400°C ±0.5°C V_{max}20mV
alta sensibilità bassa temperatura	uso generale basso costo	atmosfere ossidanti	grande pregio molto stabili alte temperature vanno protette	basse temperature robustezza ambienti ostili

Per garantire alla termocoppia la capacità di misurare la temperatura di liquidi e gas in qualunque condizione operativa sono disponibili diverse soluzioni realizzative come illustrato in Fig.12.

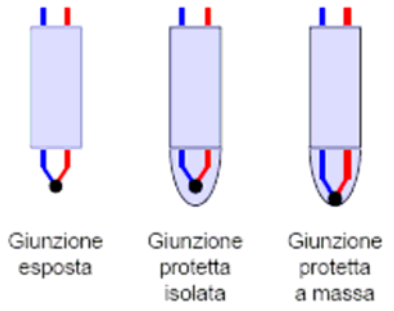


Fig. 12 - Soluzioni realizzative di una termocoppia

Le più significative sono:
La soluzione a *giunzione esposta* è consigliabile per misurare la temperatura di gas non corrosivi quando è richiesto un tempo di risposta rapido. La giunzione si estende oltre la guaina metallica protettiva per minimizzare la capacità termica del contatto. La guaina protettiva è sigillata in corrispondenza del punto di uscita della giunzione per impedire all'umidità ed al gas di penetrare all'interno.
Le soluzioni a giunzione protetta vengono utilizzate per misure in ambiente corrosivo o ad alta pressione. La *giunzione isolata* viene utilizzata quando è opportuno mantenere la termocoppia elettricamente isolata dalla guaina. In questo caso la guaina serve da schermo. La *giunzione a massa* viene utilizzata quando occorre una risposta dinamica più rapida.

Principali problemi di interfacciamento

La misura della tensione di uscita di una termocoppia richiede il collegamento ad un apposito circuito di misura. I conduttori utilizzati per questo collegamento (solitamente di rame) creano a

loro volta nuove temocoppie. Per spiegare l'effetto parassita dei collegamenti si introduce fittiziamente una ulteriore termocoppia dello stesso tipo di quella di misura, come illustrato in Fig. 13. La grandezza effettivamente disponibile per la misura è la somma (algebrica) delle quattro tensioni V1, Vref, V3, V4. Questo significa che non possiamo conoscere la temperatura T1 se non conosciamo quelle Tref, T3, T4. Se il connettore C2 è realizzato in modo da costituire un blocco isotermo, le due temperature T3 e T4 sono uguali, come pure le tensioni V3 e V4 che non contribuiscono più alla tensione Vm in quanto si cancellano a vicenda. Ne consegue che Vm = V1 - Vref = f(T1-Tref).

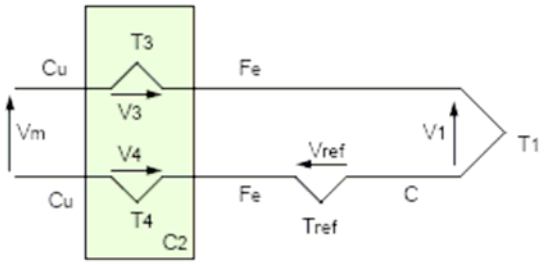


Fig. 13 - Circuito equivalente di collegamento con la termocoppia fittizia a temperatura T_{ref}.

Se riportassimo i collegamenti Tref e T4 alla stessa temperatura (Tref ad es.), potremmo avvalerci della regola empirica secondo la quale due termocoppie in serie, che condividono lo stesso materiale centrale (il ferro nell'esempio) e sono alla stessa temperatura, generano la stessa tensione che genererebbe una sola termocoppia realizzata con i due materiali esterni (Rame e Costantana nell'esempio). Ne consegue che il circuito di Fig. 14, corrispondente alla configurazione circuitale vera, è del tutto equivalente al precedente con la termocoppia fittizia.
Per questo circuito vale ancora Vm = V1 - Vref = f(T1-Tref). Si noti che Vref è la tensione generata da una termocoppia dello stesso tipo di quella di misura ma posta alla temperatura Tref. Per ottenere la temperatura T1 occorre quindi conoscere la temperatura ambiente.

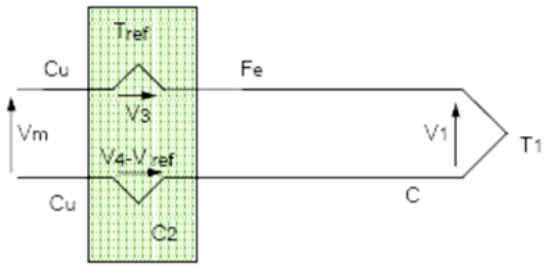


Fig 14 - Circuito effettivo di misura e tensioni nei vari punti.

La procedura di misura avviene nel modo seguente:
1. Si misura la temperatura Tref (ad es. con un sensore a semiconduttore) e si converte nella equivalente tensione di termocoppia (chiamiamola Vref) usando la stessa tabella o polinomio della termocoppia di misura.
2. Alla Vm misurata si somma Vref per trovare la tensione V1 generata dalla termocoppia di misura, che viene poi convertita nella corrispondente temperatura.
Il procedimento illustrato può apparire, a prima vista, assai strano, in quanto per misurare una temperatura (di un forno ad es.) è necessario introdurre un'altra misura di temperatura (ambiente). La giustificazione è legata al fatto che il secondo problema di misura è molto più semplice del primo e può essere risolto usando un sensore di basso costo che non sarebbe

assolutamente idoneo a misurare le temperature all'interno del forno.
Per completare il discorso sull'interfacciamento della termocoppia occorre ricordare che si tratta di un sensore "auto-eccitante" e quindi, in generale, flottante rispetto a massa. Se per l'amplificazione si usa un amplificatore di strumentazione occorre effettuare un collegamento a massa del circuito per garantire una via di scarico delle correnti di polarizzazione dell'amplificatore.

Considerazioni generali

Pregi e difetti sono riassunti in Fig. 11.

B) Termoresistenza

Principio di funzionamento

Si basa sull'effetto Termoresistivo per cui la resistenza di un metallo varia positivamente al variare della temperatura. L'uso di metalli nobili come il Platino, l'Oro ed il Nikel consente di garantire caratteristiche stabili con l'uso e nel tempo. Per migliorare la sensibilità del dispositivo è opportuno usare metalli ad alta resistività e pertanto la scelta si limita pressochè esculsivamente al Platino. Occasionalmente e per limitate escursioni di temperatura si possono utilizzare il Rame ed il Nikel.

Descrizione

Le prime termoresistenze erano realizzate avvolgendo un filo elicoidale di metallo su un supporto di mica, il tutto inserito in un tubo di vetro. Sebbene questa costruzione garantisca un sensore molto stabile, il contatto tra il metallo e l'elemento da misurare è scadente. Ne consegue una risposta abbastanza lenta ed una certa fragilità di esecuzione. Una moderna Termoresistenza, in termini tecnici RTD (Resistance Temperature Detector), è realizzate mediante il deposito di un film di metallo (Platino in generale) su un piccolo supporto piatto di ceramica. Questo garantisce una costruzione più compatta e robusta, e consente un migliore contatto con il punto di misura e di conseguenza una risposta più pronta alle variazioni di temperatura. Come risulta evidente, si tratta si un sensore *modulante* in quanto non produce direttamente nessun segnale di uscita. Poichè la resistenza elettrica non è una grandezza direttamente misurabile, normalmente si inserisce il componente in un circuito dotato di un generatore di corrente. La variazione di resistenza modula il valore di tensione ai sui capi.

Caratteristiche essenziali

L'RTD più comune è realizzato in Platino in modo tale da presentare una resistenza di 100Ω a 0° ###C. Essa viene normalmente definita come Pt100. Un elemento importante per caratterizzare un RTD è il Coefficiente di Temperatura, che per il Platino vale +0.00392 (Ω/Ω/°C). Questo significa che per un Pt100, una variazione di 1 °C comporta una variazione di 0.392 Ω. Si tratta quindi di variazioni abbastanza significative che vanno tenute in conto nella realizzazione del circuito di interfaccia. Il campo di applicazione delle RTD è abbastanza esteso (-200 ÷ +850 °C per il Pt 100) ma inferiore a quello delle Termocoppie. La linearità è molto migliore di quelle della Termocoppia anche se nel range esteso andrebbe compensata. In Tab 2 sono riportate alcune caratteristiche dei diversi tipi di termoresistenze.

Tab 2 - Caratteristiche principali dei diversi tipi di termocoppie

		filo	film spe.	film sot.
R_{nom} @ 0 °C	Ω	100 ÷ 1000	100 ÷ 300	100 ÷ 1000
Off-set	%	0.1	0.1	0.1
nonlin	%	0.6	0.6	0.6
τ (aria)	s	5 ÷ 15	10 ÷ 20	3 ÷ 10
size l x Φ	mm	25x5	25x1.5	10x1

Principali problemi di interfacciamento

Trattandosi di un sensore *modulante*, occorre connetterlo ad un opportuno generatore di riferimento. Le possibili soluzioni sono:
1. Collegamento ad un generatore di riferimento di corrente e misura della tensione ai capi del sensore.
Si tratta del ben noto metodo "Volt-ampermetrico" che, come noto, richiede una connessione a 4 fili per garantire la massima precisione. Diversamente, non potendo collocare il generatore di riferimento ed il circuito di misura all'interno del forno, le resistenze dei cavi di collegamento si verrebbero a trovare in serie a quella del sensore e ad essa si sommerebbero. Resistenze di collegamento dell'ordine di qualche Ohm sono tipiche in lunghi collegamenti e pregiudicherebbero la qualità della misura. Il circuito di misura corretto è pertanto quello riportato in Fig. 15. In questo caso le resistenze dei collegamenti in serie all'RTD rispetto al generatore di corrente non alterano il valore di corrente sull'RTD, mentre la presenza di un circuito di misura ad elevata resistenza di ingresso limita le correnti sui cavi di misura, cancellando gli effetti della loro resistenza.

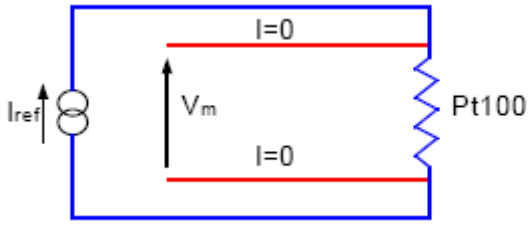


Fig 15 - Schema di alimentazione ed acquisizione per Termoresistenza con collegamento a 4 fili.

2. Inserimento del sensore in un ponte di resistenze
Questo tipo di collegamento non è particolarmente indicato per la misura di resistenza di un RTD perchè, come noto, fornisce la massima linearità in condizioni di piccolo sbilanciamento. Nel range di temperatura ammissibile la resistenza del RTD può variare da qualche Ω (-200°C) a qualche centinaio di Ω (+850°C) e pertanto un ponte, bilanciato ad es. a 100Ω, non fornirebbe una tensione linearmente dipendente dalla temperatura se non in un intervallo di qualche grado intorno allo zero. Solo nel caso in cui si dovessero misurare piccole variazioni di temperatura intorno ad un punto di lavoro si può adottare una

configurazione a ponte con l'accorgimento di utilizzare un RTD a 3 fili, come mostrato in Fig. 16. Le resistenze RL dei due cavi di collegamento risultano collocate su due rami adiacenti e, se uguali, si compensano. I problemi di non linearità dovuti allo sbilanciamento del ponte rimangono tuttavia irrisolti.

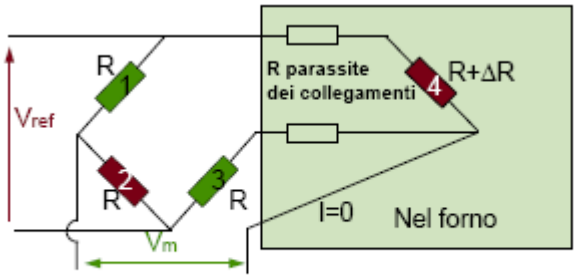


Fig 16 - Schema di alimentazione a ponte con collegamento a tre fili.

Indipendentemente dal tipo di collegamento, per trasformare la resistenza in un segnale elettrico misurabile occorre far circolare corrente nel dispositivo. Ne consegue un autoriscaldamento dello stesso per effetto Joule (I2R). Questo autoriscaldamento appare come un errore di misura. Specialmente con le RTD a film, caratterizzate da piccole dimensioni e quindi da resistenza termica elevata, occorre prestare la massima attenzione al livello di corrente iniettato nel componente per effettuare la misura. Valori tipici di resistenza termica sono nel range delle centinaia di °C/W in aria ferma e di qualche decina di °C/W se inseriti in un flusso d'aria in movimento. Si ricorda che la resistenza termica (in completa analogia con quella elettrica) indica l'incremento di temperatura per autoriscaldamento per ogni unità di potenza dissipata al suo interno. Dissipando ad es. 10mW in un Pt100 caratterizzato da una resistenza termica di 500°C/W e posto a temperatura di 0°C (corrispondente ad una corrente di 10mA sui 100Ω nominali) si ottiene un autoriscaldamento di 5°C.

Considerazioni generali

Pregi e difetti sono riassunti in Fig.11

C) Termistore

Principio di funzionamento

Si basa ancora, come l'RTD, sull'effetto Termoresistivo ma utilizzando materiale semiconduttore per cui la resistenza varia (di solito negativamente) al variare della temperatura. L'uso di semiconduttore consente di ottenere variazioni di resistenza molto significative con la temperatura.

Descrizione

Costruttivamente molto simili alle termoresistenze anche se molto più piccoli, i Termistori, grazie alla loro elevata sensibilità, sono in grado di rilevare piccole variazioni che le Termocoppie e le RTD non possono rilevare. Il prezzo da pagare per questa elevata sensibilità è

una altrettanto elevata nonlinearità.
E' in atto uno sforzo per realizzare Termistori lineari, almeno per range di temperature non amplisssimi. In virtù delle sue piccole dimensioni il Termistore possiede una elevata velocità di risposta alle variazioni di temperatura, ma soffre maggiormente di problemi di autoriscaldamento. L'elevato coefficiente di temperatura (tipicamente 4 %/°C) rende trascurabile la resistenza dei cavi di collegamento ed inutili i collegamenti a 4 fili tipici degli RTD.

Caratteristiche essenziali

• *Campo di misura*: -100 ÷+150 °C (-30 ÷+100 °C per versioni lineari)
• *Linearità*: limitata
• *Riproducibilità*: limitata
• *Sensibilità*: elevatissima
Il Termistore viene spesso utilizzato in sistemi di protezione termica nei quali l'elevato guadagno e la notevole nonlinearità sono utilizzati per realizzare un sensore ad uscita logica, in grado di rilevare il superamento di una certa soglia di temperatura.
La realizzazione a semiconduttore lo rende abbastanza delicato ed inadatto ad impieghi in condizioni di elevato stress meccanico.

Principali problemi di interfacciamento

Se usato come sensore continuo il Termistore si intefaccia come un RTD. Se usato come rivelatore di soglia termica, una volta alimentato (in tensione o in corrente) va accoppiato con un circuito comparatore opportunamente calibrato.

Considerazioni generali

Pregi e difetti sono riassunti in Fig.ST1

D) Sensori di temperatura con c.i. monolitici

Recentemente sono stati introdotti sul mercato sensori di temperatura realizzati con circuiti integrati monolitici. Sono disponibili sia in configurazione in corrente che in tensione. Caratteristiche comuni sono l'elevata linearità e l'uscita proporzionale alla temperatura assoluta. Tipiche costanti di proporzionalità sono 1μA/°K oppure 10mV/°K. A parte il pregio della linearità hanno più o meno gli stessi pregi e difetti dei termistori e quindi sono economici, ma delicati ed utilizzabili in un range limitato di temperatura. Sono spesso utilizzati nella realizzazione di termometri digitali e nella compensazione delle Termocoppie.

2.4 Sensori di deformazione, pressione e forza

Quando una forza è applicata ad un corpo esso si deforma. Più che la deformazione assoluta è di solito interessante conoscere la deformazione per unità di grandezza. Nella letteratura tecnica questa deformazione relativa è definita come *strain* ed è indicata con il simbolo ε. In definitiva $\varepsilon = \Delta L/L$ ed è quindi una grandezza adimensionale. Per mantenere un significato fisico allo *strain* spesso si associa ad esso l'unità di misura cm/cm. Nella maggior parte delle applicazioni il valore dello *strain* è piccolissimo (<0.005 cm/cm) e si preferisce esprimerlo in με che corrisponde a ε x 106. Questa rappresentazione è equivalente ad esprimere la deformazione

relativa in parti per milione o ppm.
Vi sono molti modi per rilevare lo strain in un corpo, ma il sensore più utilizzato è l'*Estensimetro* o *Strain-gage*. E' poi evidente che dalla misura della deformazione di un corpo si può facilmente risalire alla pressione o alla forza esercitate sul corpo stesso. Pertanto, la maggior parte dei sensori di Pressione e Forza è basata sull'integrazione di uno o più estensimetri in una opportuna struttura meccanica atta a trasformare la pressione o la forza su di essa esercitata in una corrispondente deformazione. Nel seguito verrà analizzato in dettaglio l'estensimetro e verranno presentati alcuni schemi per il suo utilizzo nella realizzazione di sensori di pressione e di forza.

A) Estensimetro

Principio di funzionamento

Si basa sull'effetto piezoresistivo secondo il quale la resistenza di un metallo o di un semiconduttore varia in presenza di deformazione meccanica.

Descrizione

Esistono sostanzialmente due tipi di estensimetri, quelli a semiconduttore e quelli metallici (a filo o a film).
Gli *estensimetri a semiconduttore* possono essere realizzati in dimensioni piccolissime, hanno una grande sensibilità, ma presentano una caratteristica nonlineare. Inoltre, la loro resistenza risulta molto dipendente dalla temperatura. Essi possono misurare deformazioni sia statiche che dinamiche. Per l'elevato costo e la relativa difficoltà di manipolazione essi sono solitamente utilizzati direttamente solo in applicazioni dove lo spazio a disposizione o il livello di deformazione risultino molto ridotti. Sono invece spesso usati per la realizzazione di sensori di pressione integrati ed anche di sensori di accelerazione.
Gli *estensimetri metallici* sono decisamente quelli più usati. Essi sono realizzati deponendo su un apposito supporto (carrier matrix) una griglia fine di fili, come riportato in Fig. 17. Per l'uso il supporto è incollato all'oggetto di cui misurare la deformazione con opportuni adesivi.
L'estensimetro metallico è disponibile a basso costo, in dimensioni molto contenute e risente in modo limitato della temperatura. La principale limitazione è la scarsa sensibilità.

Fig. 17 - Tipologie degli estensimetri

Caratteristiche essenziali

Gage Factor = GF = $(\Delta R/R)/(\Delta L/L) = (\Delta R/R)/\varepsilon$
Estensimetri a semiconduttore
GF. > 100

Resistenza nominale: 30 ÷ 3000 Ω.
Estensimetri metallici
GF = 2 (valore di riferimento)
Resistenza nominale: 30 ÷ 3000 Ω. Valori standard 120 e 350 Ω.

Principali problemi di interfacciamento

Come per la termoresistenza si tratta di rilevare la variazione di resistenza in funzione della deformazione. A diffrenza di quella, la variazione di resistenza dell'estensimetro è legata alla variazione di dimensione dell'oggetto su cui l'estensimetro è collegato che risulta di solito abbastanza limitata. Ne consegue che le variazioni di resistenza risultano assai limitate e la loro misura diviene un compito non facile. Nella quasi totalità dei casi sia per estensimetri metallici che a semiconduttore si utilizza una configurazione a ponte di Wheatstone per trasformare la variazione di resistenza in una corrispondente di tensione.
Il circuito base è riportato in Fig. 18. In esso sono presenti l'estensimetro, indicato con Rg, le tre resistenze di bilanciamento del ponte, un generatore di riferimento (Vref) ed un circuito di misura ad elevata resistenza di ingresso (Vout).

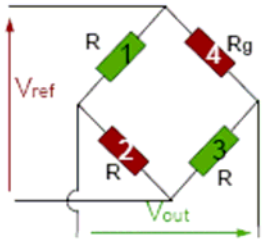


Fig 18 - Schema di collegamento dell'estensimetro

E' facile ricavare l'equazione del circuito:
Vout = Vref (R/(R+Rg) - R/(R+R)) .
Per il circuito a riposo Rg = R e pertanto
(Vout/Vref)riposo = (Rg/(Rg+Rg) - Rg/(Rg+Rg)) = 0
Si consideri ora l'applicazione della deformazione che comporta una variazione ΔRg della resistenza nominale dell'estensimetro.
In condizioni di carico meccanico l'equazione del circuito diventa
(Vout/Vref)carico = (Rg/(2Rg+ΔRg) - Rg/(2Rg)) = Vs .
Con semplici passaggi si può ricavare la seguente espressione
ΔRg/Rg = - 4 Vs /(1 + 2Vs)
che collega la variazione sotto carico della misura raziometrica della tensione di uscita (Vout) alla variazione relativa di resistenza.
Ricordando la definizione di Gage-Factor
GF = (ΔRg/Rg)/ε
e sostituendo si ottiene
ε = -4Vs/(GF(1+2Vr))
che fornisce la misura di deformazione relativa (in *strain*).
Nella realizzazione del circuito di misura occorre fare attenzione ad alcuni particolari realizzativi.
1. Le resistenze nei tre rami inattivi devono mantenere inalterato il loro valore in presenza di deformazione. Per compensare le variazioni di resistenza con la temperatura dell'estensimetro spesso si usano altri tre estensimetri in sostituzione delle tre resistenze di compensazione.

Questo garantisce una buona corrispondenza dei valori iniziali di resistenza (soprattutto se si ordinano quaterne selezionate) e delle variazioni indotte dalla temperatura se i tre estensimetri ausiliari sono incollati sullo stesso supporto di quello di misura, purchè in posizione non deformata. Ovviamente, disponendo di altri tre estensimetri, qualora lo spazio disponibile e la geometria del dispositivo meccanico lo permettano è possibile porre sotto deformazione anche due o quattro estensimetri, come mostrato in Fig. 19 ottenendo così una maggiore sensibilità di risposta dal ponte (Vs maggiore a parità di deformazione).

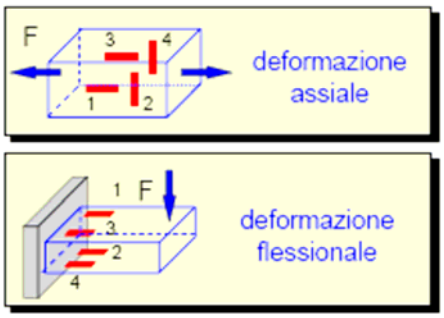


Fig. 19 - Configurazioni a più estensimetri

2. Utilizzare un generatore di riferimento ad elevata stabilità o effettuare una misura raziometrica rispetto al riferimento o misurare anche il riferimento oltre al segnale.
3. Utilizzare un circuito di amplificazione ad elevata impedenza per non caricare il ponte ed alterare così la misura.
4. Utilizzare estensimetri con un Gage-Factor costante e noto.
5. Curare molto bene i collegamenti e le schermature per evitare che disturbi elettromagnetici si accoppino sui segnali (di solito assai piccoli) deteriorando il rapporto segnale rumore prima dell'amplificazione.

Considerazioni generali

L'estensimetro è un componente di largo utilizzo in diverse applicazioni. La versione metallica trova applicazione generalizzata per il basso costo e la grande affidabilità. La versione a semiconduttore è più difficile da manipolare e viene di solito utilizzata per la realizzazione di sensori a stato solido in configurazione a ponte di quattro estensimetri, che incorporano spesso anche il generatore di riferimento ed il circuito di amplificazione e compensazione termica. Nell'utilizzo di estensimetri occorre prestare molta attenzione alla compatibilità del supporto e del materiale su cui esso viene incollato e del tipo di collante utilizzato. Esistono estensimetri appositamente realizzati per garantire buona corrispondenza con determinati materiali garantendo così che, in un limitato range di temperatura, le deformazioni indotte dalla temperatura sul materiale siano compensate dagli equivalenti effetti termici sull'estensimetro.
B) Sensore integrato di pressione
Viene di solito realizzato fissando ad una membrana flessibile due o quattro estensimetri in configurazione a ponte. Ai due lati della membrana è applicata una differenza di pressione che genera una deformazione ad essa proporzionale. Il ponte estensimetrico, opportunamente alimentato, trasforma la deformazione in una tensione elettrica. Le possibili realizzazioni si differenziano per:
• il materiale usato per la membrana ☐ metallo o silicio

• il tipo di estensimetro ☐ metallico, più spesso a semiconduttore
• il numero di estensimetri ☐ due o quattro
• la realizzazione meccanica ☐ misura di pressione differenziale o assoluta.

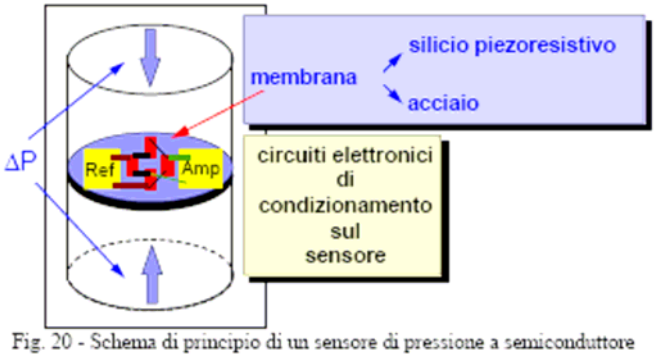


Fig. 20 - Schema di principio di un sensore di pressione a semiconduttore

C) Sensore di Forza/Peso
La realizzazione di sensori di forza richiede la definizione di un opportuno allestimento meccanico che trasformi la forza in una deformazione corrispondente in una zona del dispositivo dove allocare gli estensimetri. La misura più comune di forza è utilizzata nei sistemi di pesatura. In questo caso il dispositivo meccanico di base su cui alloggiano gli estensimetri si chiama *Cella di Carico*. Sul mercato sono disponibili numerosissimi tipi di celle di carico per le più svariate applicazioni.

2.5 Sensore universale isolato di corrente

Principio di funzionamento

Utilizzo di un sensore base ad Effetto-Hall in un circuito elettromagnetico complesso

Descrizione

Apparentemente la misura di una corrente non presenta difficoltà in un sistema elettronico trattandosi di una grandezza già ad esso omogenea. Questo è vero per la misura di piccole correnti in ambienti poco disturbati elettromagneticamente. La misura di corrente è speso utile in sistemi di attuazione di potenza (azionamenti, elettromagneti, ecc) che solitamente operano in commutazione su correnti molto elevate. A causa delle impedenze non nulle dei collegamenti, variazioni rapide di corrente generano sbalzi di potenziale che potrebbero disturbare o anche danneggiare l'Organo di Governo. Occorre pertanto isolare galvanicamente l'amplificatore di potenza dall'Organo di Governo e la semplicità della misura può essere persa se la corrente da misurare non è sinusoidale (si può usare in questo caso un semplice trasformatore di isolamento) ma è impulsiva con componenti continue non trascurabili.
Esistono due tipologie base di realizzazione di un sensore universale e isolato di corrente basate entrambe sull'utilizzo di un sensore di Hall che consente l'accoppiamento magnetico (isolato elettricamente) dell'amplificatore di potenza al circuito di misura.
Lo schema base di un *sensore a misura diretta del campo* è illustrato in Fig. 21. In essa si nota un circuito magnetico costituito da un nucleo toroidale aperto di ferrite o di altro materiale

ferromagnetico. Nella minuscola finestra è alloggiato il sensore ad effetto-Hall sul quale il nucleo concentra il campo magnetico generato dal cavo sul quale si vuole effettuare la misura della corrente che viene fatto passare all'interno. Un circuito elettronico con un amplificatore ad elevato guadagno viene utilizzato per amplificare l'uscita del sensore di Hall e per eliminare l'offset e linearizzare la caratteristica.

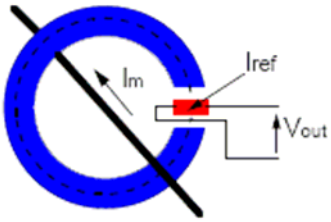


Fig. 21- Schema di sensore di corrente a misura diretta

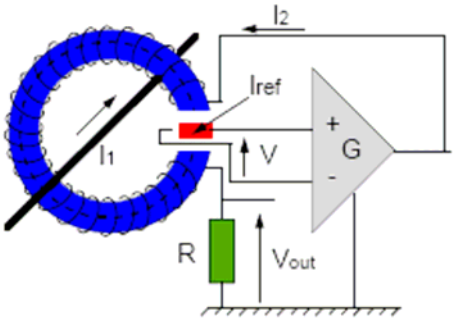


Fig. 22 - Schema di sensore di corrente a compensazione di campo

Lo schema base del *sensore a compensazione di campo* è illustrato in Fig.22. La struttura generale è simile a quella del sensore a misura diretta, con la differenza che sul nucleo toroidale trova posto un avvolgimento con numerosissime spire pilotato dall'uscita dell'amplificatore. Si realizza così un circuito in retroazione che, se stabile in presenza di un amplificatore ad elevato guadagno, si porta in condizione di segnale errore nullo. In questo schema il segnale errore è la differenza tra il campo impresso dal cavo che porta la corrente da misurare e quello generato dall'avvolgimento secondario. E' facile constatare che la corrente che circola sull'avvolgimento secondario è proporzionale a quella da misurare secondo il rapporto spire del trasformatore che ha n1 spire al primario (il cavo che porta la corrente da misurare) ed n2 spire al secondario. Si può pertanto concludere che:

$i2/i1 = n1/n2$

da cui

$i2 = K\ i1$.

Chiudendo il secondario su una resistenza verso massa si può ricavare su di essa una tensione proporzionale alla corrente da misurare.

Come si vede, il problema di misurare una corrente elevata è stato ricondotto a quello più semplice di misurare una corrente di intensità limitata, risolubile ricordando la legge di Ohm.

Caratteristiche essenziali

• *Campo di misura*: 10 ÷1000 A
• *Linearità*: migliore dell'1%

• *Isolamento*: > 1500V
• *Risposta in frequenza*: > 100kHz
• *Costo*: contenuto

Principali problemi di interfacciamento

I principali problemi di interfacciamento sono già risolti all'interno del componente che richiede esternamente un circuito di misura verso massa della corrente. Questo può essere ottenuto mediante una resistenza ed un amplificatore di tensione ad elevata impedenza di ingresso oppure con un amplificatore in corrente.

Considerazioni generali

Lo schema a compensazione risulta leggermente più complesso per la presenza dell'avvolgimento secondario. Tuttavia esso è preferibile e globalmente non risulta più costoso in quanto consente di utilizzare il sensore di Hall nell'intorno della regione di campo nullo nella quale la linearità è garantita anche con dispositivi non particolarmente selezionati.

2.6 ALTRI COMPONENTI DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE

Condizionatori di segnale

Accade sovente che i segnali di uscita dei sensori non siano omogenei per natura elettrica (corrente, tensione, resistenza, ecc.), per livello, e per tipo (tensione continua, alternata, pulsante, ecc.) nè tra loro nè rispetto all'UG. Occorre pertanto omogeneizzarli prima tra loro e poi rispetto all'UG. Le funzioni tipiche presenti a questo livello sono l'attenuazione di segnali troppo elevati, la rettificazione ed il livellamento di segnali in alternata, la trasformazione in tensione di segnali in corrente o di informazioni consistenti nella variazione di resistenza di un dispositivo.

Amplificatori

Molti sensori forniscono in uscita segnali caratterizzati da livelli inferiori a quelli standard. Un amplificatore è un dispositivo che trasforma un segnale di basso livello (di solito una tensione) in uno di livello più elevato. Si definisce guadagno dell'amplificatore il rapporto tra il segnale in uscita e quello in ingresso.

Filtri

L'ambiente industriale è caratterizzato dalla presenza di una moltitudine di segnali generati dalle diverse apparecchiature presenti o provenienti dal mondo esterno sotto forma di campi elettromagnetici. Questi segnali possono interagire accidentalmente con quelli utili contenenti le informazioni da elaborare per il controllo. In questo caso essi vengono denominati *disturbi* in quanto alterano il contenuto informativo dei segnali utili. Spesso i disturbi si presentano come segnali ad elevata frequenza. I segnali utili, le cui variazioni corrispondono a quelle di grandezze fisiche, si evolvono di solito più lentamente per la presenza di "inerzie" che limitano le escursioni dinamiche. E' quindi possibile separare i segnali utili dai disturbi per mezzo di filtri. Così come un filtro meccanico separa materiali in base alla loro dimensione, un filtro elettronico

separa i segnali in base alla loro frequenza. Infatti un filtro elettronico è uno speciale ampificatore caratterizzato da un guadagno opportunamente sagomato in funzione della frequenza del segnale che lo attraversa. I filtri più comunemente utilizzati nel sistema di acquisizione sono i cosiddetti filtri passa-basso, la cui sagomatura del guadagno lascia passare solo le frequenze inferiori ad un valore prefissato. Essi si comportano come normali amplificatori per i segnali a frequenza inferiore ad un certo valore (guadagno costante), per poi amplificare sempre meno al crescere della frequenza. E' evidente che i disturbi ad elevata frequenza vengono fortemente attenuati rispetto ai segnali utili.

Isolatori galvanici

Nella localizzazione fisica di una macchina, i sensori sono allocati a diretto contatto con le parti di cui devono rivelare lo stato, e spesso l'UG è posta in posizione remota rispetto a molti di essi. I lungi cavi di collegamento diventano delle antenne attraverso le quali i disturbi presenti nell'ambiente circostante si possono accoppiare con i segnali utili trasportati. Per spezzare questi lungi collegamenti si ricorre all'isolamento galvanico (separazione completa del sistema di masse ed alimentazioni) tra la macchina e l'UG. L'isolamento è realizzato in modo diverso per i diversi tipi di segnali. Per quelli analogici in alternata si può usare un trasformatore di isolamento, mentre per quelli analogici a bassa frequenza occorre uno speciale amplificatore detto di isolamento. Per i segnali logici si utilizzano di solito dispositivi ottici detti optoisolatori.
Amplificatori di isolamento
Un amplificatore di isolamento è un dispositivo la cui funzione primaria è quella di fornire un isolamento galvanico (interruzione della continuità ohmica dei collegamenti elettrici) tra lo stadio di ingresso e quello di uscita. Un amplificatore di isolamento è solitamente costituito da uno stadio amplificatore di ingresso (con amplificatore operazionale o di strumentazione) e da uno stadio di isolamento a guadagno unitario. In linea di principio sulla barriera di isolamento la continuità ohmica dei collegamenti è interrotta, mantenendo tuttavia la continuità di trasferimento del segnale che attraversa la barriera senza subire attenuazioni. Caratteristica importante di taluni amplificatori di isolamento è lo stadio di ingresso completamente fluttuante, che evita la necessità di collegamento del comune dello stadio di ingresso alla massa del segnale di ingresso.

Indicatori di stato

In considerazione della distanza esistente solitamente tra il sensore e l'UG, può essere molto utile in fase di installazione o di manutenzione del sistema di controllo un monitoraggio dello stato del sensore attraverso una visualizzazione del corrispondente segnale all'interno dell'UG. Per segnali logici la visualizzazione si effettua di solito con una sorgente luminosa il cui stato di acceso/spento indica lo stato del corrispondente segnale. Per le grandezze analogiche o digitali occorre un visualizzatore più sofisticato, di solito costituito da un disply analogico, numerico, o a barre.

Multiplexer

E' una funzione tipica delle unità di governo computerizzate. Mentre il numero di segnali da acquisire in una macchina automatica può essere molto elevato, la capacità di leggere contemporaneamente i segnali da parte dell'UG è di solito molto più limitata. Questa limitatezza nella capacità di lettura contemporanea è però compensata dalla elevatissima velocità di lettura.

Si ricorre pertanto all'uso di multiplexer, sia analogici che digitali, che sono dispositivi caratterizzati da molti ingressi ed una sola uscita. In funzione di opportuni segnali logici di selezione, uno ed un solo ingresso è messo in comunicazione con l'unica uscita. L'UG scandisce, uno dopo l'altro, tutti gli ingressi e li legge ad una velocità tale da garantire che il loro valore rimanga costante tra una lettura e la successiva. Ancora una volta, i dispositivi per segnali logici sono diversi da quelli per segnali analogici.

Convertitori Analogico/Digitale

Per consentire l'elaborazione di segnali analogici questi devono essere convertiti in forma digitale prima di essere letti dalla UG. Il convertitore Analogico/Digitale è un dispositivo abbastanza complesso, costoso, ma spesso assai veloce nella conversione. Si preferisce spesso anteporre ad un unico convertitore un multiplexer analogico (molto meno costoso) per ridurre il costo dell'interfacciamento.