



Trasduttori

1 Generalità e parametri caratteristici

I trasduttori sono dispositivi in grado di percepire grandezze fisiche e di generare segnali di natura diversa (generalmente elettrica), dipendenti dalla grandezza fisica che li ha prodotti, secondo una legge ben definita.

La loro applicazione riguarda sia la misura sia il controllo delle grandezze fisiche.

Nel controllo, il trasduttore è indispensabile per realizzare la retroazione del valore attuale della variabile controllata (fig. 1).

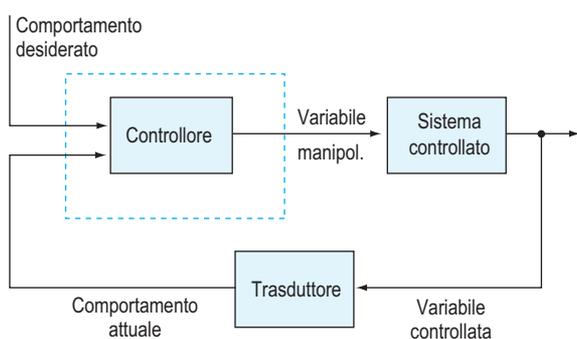


Fig. 1. Sistema di controllo retroazionato.

A tale scopo, il segnale in uscita dal trasduttore va amplificato e adattato alle caratteristiche di ingresso del sistema di controllo, così che l'informazione possa essere confrontata con il comportamento desiderato ed elaborata in modo da correggere l'azione degli attuatori presenti sul sistema controllato. I trasduttori sono classificati considerando la grandezza misurata o la grandezza da essa derivata (tab. 1.1). Si hanno così i trasduttori di posizione, di velocità, di sforzo, di temperatura, di luce e, derivati da questi, i trasduttori di accelerazione, di portata, di livello e così via.

Dal punto di vista energetico, i trasduttori possono essere divisi in attivi e passivi. Sono attivi i trasduttori auto generanti una tensione o una carica, nei quali cioè l'energia elettrica del segnale di uscita è sostenuta dalla grandezza fisica stessa. I segnali così ottenuti sono solitamente di bassa energia. Ne sono un esempio i sensori costituiti da materiali piezoelettrici o piezoresistivi, le termocoppie (effetto Seebeck), i trasduttori fotovoltaici (il selenio illuminato

fornisce una tensione), i trasduttori elettromagnetici (l'energia è ottenuta dallo spostamento reciproco tra un magnete e una bobina), ecc.

Tab. 1 - Classificazione dei sensori per tipo di grandezza rilevata

Tipo di grandezza rilevata	Grandezza misurata	Sensori
meccanica	posizione lineare	barre ottiche
	livello	sensori ad ultrasuoni
	forza e pressione	estensimetri, celle di carico
	posizione angolare	encoder digitali
	velocità	derivati da sensori di spostamento
	accelerazione	accelerometri
termica	temperatura	termocoppie, termoresistenze RTD Pt100, termometri ottici
chimica	acidità	pHmetri
elettrica	corrente	sonde di Hall
magnetica	induzione	
climatica	umidità	a variazione di capacità
acustica	suono, rumore	microfoni

I sensori passivi, i più diffusi, hanno invece tre porte energetiche: l'eccitazione elettrica (alimentazione), la grandezza fisica in ingresso, e il segnale elettrico in uscita, con quest'ultimo che risulta modulato dal segnale fisico e sostenuto dall'alimentazione.

Parametri principali

I parametri tecnici forniti dal costruttore sono: le caratteristiche statiche, le caratteristiche dinamiche e le condizioni ambientali.

Le caratteristiche statiche comprendono le informazioni sul comportamento ingresso-uscita del trasduttore quando la grandezza da misurare è stabile, oppure varia molto lentamente.

Le caratteristiche dinamiche definiscono la risposta del sensore ad un gradino nel valore della grandezza fisica rilevata.

Le condizioni ambientali rappresentano le condizioni di funzionamento (temperatura, acidità, salinità, radiazioni, ecc.) entro le quali i parametri precedenti sono garantiti.

Tra i parametri statici, i primi da valutare sono il **campo di misura**, cioè il valore minimo e il valore massimo misurabili, l'accuratezza del sensore e la funzione di trasferimento ingresso uscita.

L'**accuratezza**, o precisione, rappresenta il massimo scostamento tra la misura effettiva fornita dal sensore ed il valore vero della grandezza fisica misurata, espresso in percentuale sul fondo scala ($\pm\epsilon\%$), valida in condizioni ambientali e di rumore prestabilite, comprensiva di tutti gli errori (linearità, isteresi, ecc.).

La **risoluzione**, invece, è l'entità della variazione minima della grandezza d'ingresso apprezzabile in uscita.

In un trasduttore, la precisione ha sempre valore maggiore della risoluzione.

Oltre alla precisione, è importante la **funzione di trasferimento**, che rappresenta la relazione ideale esistente tra la grandezza fisica in ingresso e il segnale elettrico in uscita al trasduttore. Questa può essere fornita in forma grafica come in **fig. 2**, oppure come legge matematica, o ancora sotto forma di tabella di valori o come semplice costante di proporzionalità; in alcuni casi si parla semplicemente di sensibilità del trasduttore, cioè della costante di rapporto tra la variazione del segnale di uscita e la corrispondente variazione della grandezza di ingresso che l'ha provocata.

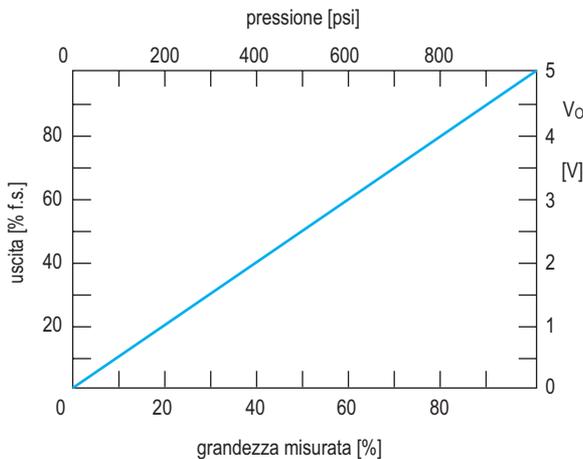


Fig. 2. Funzione di trasferimento lineare.

Tra le caratteristiche dinamiche del sensore, la più importante è la **costante di tempo**, ovvero il tempo impiegato dall'uscita a raggiungere il 63% del fondo scala in risposta ad una sollecitazione a gradino sul segnale di ingresso.

Altre volte, anziché la costante di tempo, viene fornito il tempo di risposta necessario per raggiungere il 90% o il 98% del valore di fondo scala, o anche il tempo di salita necessario per andare dal 10% al 90%, più l'eventuale overshoot, o ancora la risposta in frequenza indicante la frequenza di taglio.

Le condizioni ambientali, oltre che come valori massimi, sono fornite in termini di stabilità nelle varie condizioni di funzionamento (temperatura, acidità,

salinità, radiazioni, ecc.) oppure come coefficiente di reiezione (per esempio sui disturbi sull'alimentazione). Solo in casi particolari viene fornito il rumore massimo prodotto all'interno del trasduttore, espresso in dB.

2 Trasduttori di temperatura

La temperatura è una grandezza fisica che caratterizza un gran numero di processi fisici, chimici e biologici.

Nella tecnica attuale, il controllo della temperatura è richiesto spesso con notevole precisione.

NTC

I termistori NTC (*Negative Temperature Coefficient*) sono resistori composti da miscele di ossidi di semiconduttori che hanno la caratteristica di diminuire la loro resistenza all'aumentare della temperatura, con coefficienti molto elevati (da $-2\%/K$ a $-6\%/K$). L'andamento della resistenza con la temperatura è del tipo:

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

con B [K], detta temperatura caratteristica, una costante che può variare da 2.000 K a 5.000 K in funzione del materiale utilizzato, e R_0 la resistenza del termistore alla temperatura T_0 .

Evidenziando il coefficiente negativo di variazione relativa percentuale:

$$a = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \cdot 100 = -\frac{B}{T^2} \cdot 100$$

si ottiene la più nota:

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{a}{100} \cdot (T - T_0)}$$

L'andamento è fortemente non lineare (**fig. 3**) e anche linearizzando la risposta, la precisione ottenuta è comunque bassa.

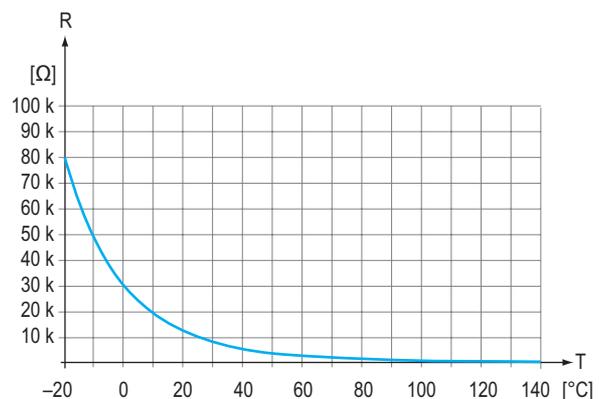


Fig. 3. Resistenza di un NTC da 10 kΩ.

Gli NTC sono disponibili in commercio nei valori ohmici standard (sempre a 25 °C) con tolleranza del 5%, per campi di temperatura di applicazione da -100 °C a +300 °C. Si tratta di scegliere il contenitore più adatto per l'applicazione cui sono destinati: in contenitore a pastiglia (fig. 4a) per misure ambientali, a bulbo esagonale con testa filettata (fig. 4b) per un ancoraggio su piastra, con rivestimento in acciaio inox (fig. 4c) per ambienti aggressivi, e a montaggio superficiale (fig. 4d).

Oltre che come sensori, gli NTC sono anche utilizzati per limitare le correnti di spunto (in-rush) in alcune applicazioni.



Fig. 4a. NTC a pastiglia.



Fig. 4b. NTC a bulbo esagonale.



Fig. 4c. NTC con rivestimento in acciaio inox.



Fig. 4d. NTC a montaggio superficiale.

Errore di autoriscaldamento

La misura di una resistenza richiede la presenza di una corrente di test, la quale però genera calore per effetto Joule, con conseguente aumento della temperatura interna; per tale motivo, la corrente di test deve essere piccola (tipicamente 1 mA).

L'errore di misura dovuto all'autoriscaldamento si calcola partendo dalla potenza dissipata internamente $P = R \cdot I^2$ [W] e calcolando il salto termico esi-

stente tra interno ed esterno, dovuto al coefficiente di dissipazione S [°C/W] caratteristico del sensore stesso e dell'ambiente di lavoro $\Delta T = P \cdot S$.

Viceversa, fissato l'errore massimo ammesso e quindi la potenza massima che il dispositivo può dissipare, è possibile tracciare l'andamento della tensione massima applicabile al dispositivo in funzione della temperatura (fig. 5).

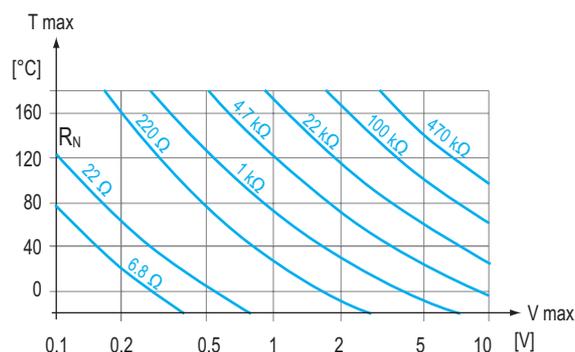


Fig. 5. Tensione ammissibile con carico costante di 5mW per termistori con resistenza nominale R_N .

Termocoppie

Due conduttori metallici di diversa elettronegatività (fig. 6), saldati fra loro ad una estremità detta **giunzione calda**, presentano all'altra estremità libera, detta **giunzione fredda**, una forza elettromotrice E proporzionale alla differenza di temperatura tra le due giunzioni:

$$E = k \cdot (T - T_0)$$

dove k rappresenta la sensibilità della termocoppia, espressa in $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, che dipende dalla natura dei due materiali utilizzati, T è la temperatura al giunto caldo e T_0 la temperatura al giunto freddo.

Il fenomeno è detto effetto Seebeck, dall'omonimo fisico estone che lo scoprì nel 1822.

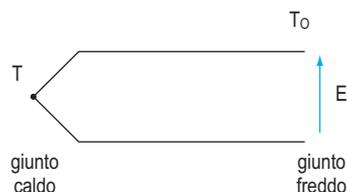


Fig. 6. Termocoppia.

La misura è relativa: per conoscere l'esatta temperatura al giunto caldo, occorre che sia nota la temperatura della giunzione di riferimento, per poi intervenire circuitalmente o mediante software alla

Temperatura °C	J		K		S		T		Temperatura °C
	Output mV	Tempco $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$							
- 200	-7,890	21,8	-5,891	15,2	-	-	-5,603	15,8	- 200
- 100	-4,632	41,1	-3,553	30,5	-	-	-3,378	28,4	- 100
0	0,000	50,4	0,000	39,5	0,000	5,4	0,000	38,8	0
+ 25	1,277	51,7	1,000	40,5	0,142	6,0	0,992	40,7	+ 25
+ 100	5,268	54,4	4,095	41,4	0,645	7,3	4,277	46,8	+ 100
+ 200	10,777	55,5	8,137	39,9	1,440	8,45	9,286	53,2	+ 200
+ 300	16,325	55,4	12,207	41,5	2,323	9,1	14,860	58,1	+ 300
+ 400	21,846	55,2	16,395	41,9	3,260	9,6	20,869	61,8	+ 400
+ 500	27,388	55,9	20,640	42,6	4,234	9,9	-	-	+ 500
+ 600	33,096	58,5	24,902	42,5	5,237	10,15	-	-	+ 600
+ 700	39,130	62,3	29,128	41,9	6,274	10,55	-	-	+ 700
+ 800	45,498	64,6	33,277	41,0	7,345	10,8	-	-	+ 800
+ 900	51,875	62,4	37,325	39,9	8,448	11,2	-	-	+ 900
+1.000	57,942	59,2	41,269	38,9	9,585	11,5	-	-	+1.000
+1.100	63,777	57,8	45,108	37,8	10,754	11,9	-	-	+1.100
+1.200	69,536	57,2	48,828	36,5	11,947	12,0	-	-	+1.200
+1.300	-	-	52,398	34,9	13,155	12,2	-	-	+1.300
+1.400	-	-	-	-	14,368	12,2	-	-	+1.400
+1.500	-	-	-	-	15,576	12,1	-	-	+1.500
+1.600	-	-	-	-	16,771	11,8	-	-	+1.600
+1.700	-	-	-	-	17,942	11,5	-	-	+1.700
+1.800	-	-	-	-	-	-	-	-	+1.800

Tab. 2. Caratteristiche tecniche di alcune termocoppie.

Legenda:

Output = tensione di uscita rispetto agli 0 °C; tutte le tensioni sono uguali a 0 in corrispondenza di 0 °C, che quindi fa da temperatura di riferimento.
Tempco = coefficiente di temperatura; il coefficiente cambia al variare della temperatura.

necessaria correzione. Questo si può realizzare in due modi:

- tenendo costante a un valore noto la temperatura al giunto freddo;
- più comodamente, misurando costantemente la temperatura della giunzione di riferimento con un secondo sensore.

La necessità della compensazione va valutata caso per caso, tenendo conto della risoluzione richiesta dal sistema.

Trattandosi di errori limitati, il giunto di riferimento è frequentemente mantenuto alla temperatura ambiente; inoltre, per termocoppie di metallo nobile, fuori dalle zone a gradiente termico elevato, sono convenientemente utilizzati appositi doppi di estensione sostitutivi, di costo minore e con risposta quasi simile alla coppia principale.

La **tab. 2** riporta le caratteristiche di alcune tra le termocoppie più utilizzate, tipo J (ferro/costantina), tipo K (nichel cromo-alumel), tipo T (rame/costantina) per le basse temperature e tipo S (Pt/Rd Pt) per le temperature sopra i 1.000 °C.

Per ciascuna termocoppia sono indicati i diversi valori della **tensione di uscita** fornita in corrispondenza di alcuni punti di temperatura al giunto cal-

do (temperature riportate nella prima e nell'ultima colonna) e con giunto freddo a 0 °C (difatti i valori risultano nulli in corrispondenza degli 0 °C). Si noti come i **coefficienti di temperatura** siano molto variabili sull'intero campo di misura, a dimostrazione della limitata linearità di questi sensori.

La termocoppia assiemata presenta una guaina di protezione, in tubo metallico e/o ceramico chiuso ad una estremità, che protegge i fili della termocoppia dagli agenti dannosi presenti nell'ambiente di misura (**fig. 7**).



Fig. 7. Termocoppia di uso generale.

Per applicazioni in ambienti pressurizzati si utilizzano termocoppie con contenitore a tenuta di pressione, detto **pozzetto termometrico** (**fig. 8**), con una testa contenente la morsettiera di connessione e provvisto di filettatura o flangia per l'attacco al dispositivo sotto pressione.

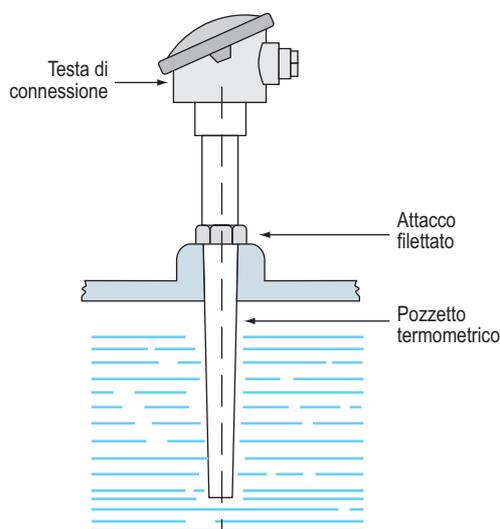


Fig. 8. Termocoppia con pozzetto termometrico.

RTD

Le RTD (*Resistance Temperature Detectors*) sono termoresistenze molto utilizzate in campo industriale, adatte per ambienti da -200 a $+850$ °C, con un'anima di filo metallico conduttivo (platino, rame, nichel) avvolta su un supporto di mica e protetto da un contenitore in acciaio (fig. 9).

Le RTD sfruttano la caratteristica che hanno i metalli di aumentare la loro resistenza all'aumentare della temperatura, secondo il modello approssimato:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]$$

dove R_0 è la resistenza dell'elemento alla temperatura T_0 e α è il suo coefficiente di temperatura:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \Delta T}$$

espresso in Ω/Ω °C.

Le RTD hanno buona stabilità, discreta sensibilità e ottima precisione; sostituiscono le termocoppie dove è richiesta estrema accuratezza nella misura (compresa tra 0,1 e 0,05%).

Sono più costose rispetto alle termocoppie perché richiedono una lavorazione particolare per poter sopportare alte temperature senza subire danni e hanno un tempo di risposta più alto. In compenso, per il collegamento con lo strumento di misura bastano normali cavi di rame.

L'RTD più usata è la Pt100, realizzata con un filo di platino, che presenta una resistenza di 100Ω a 0 °C, con tolleranza $\pm 0,2\%$ (detta anche 1 DIN) per la classe B, oppure $\pm 0,1\%$ (1/2 DIN) per la classe A,

con coefficiente di temperatura $0,00385 \Omega/\Omega$ °C. Sono disponibili anche RTD Pt1000, più sensibili, e Pt10, queste ultime costruite con filo più robusto e più affidabili oltre i 600 °C.



Fig. 9. Contenitori per RTD.

Le costanti di tempo delle termoresistenze variano da 20 s a 0,6 s a seconda delle dimensioni e dell'ambiente di misura, aria o liquido, fermo o in movimento; nel caso migliore raggiungono i 100 ms. Per misurare la temperatura, il sensore viene inserito in un ramo di un ponte, oppure viene fatto attraversare da una corrente costante per trasformare la variazione di resistenza in una variazione di tensione.

In ogni caso, la misura della temperatura può essere falsata sia dai **problemi di autoriscaldamento**, dovuti alla corrente iniettata, sia dalla variazione della resistenza dei fili di collegamento al variare della temperatura ambiente del campo.

Sensori di temperatura integrati

I sensori di temperatura integrati differiscono dagli altri sensori per due motivi fondamentali: il range di temperatura limitato ($-55 \div +150$ °C) e il fatto che la circuiteria di linearizzazione ed elaborazione assume la medesima temperatura del sensore annegato nel silicio.

Il loro funzionamento si basa sul fatto che la tensione V_{BE} della giunzione base-emettitore di un transistor polarizzata direttamente diminuisce con

l'aumentare della temperatura di circa 2,1 mV/°C, secondo la relazione:

$$V_{BE} = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{J}{J_s}$$

dove J è la densità di corrente che attraversa la giunzione e J_s è la densità di corrente inversa che varia fortemente con la temperatura.

La dipendenza dalla temperatura è quindi diretta nel termine T (temperatura assoluta) e indiretta nel termine J_s.

Utilizzando un circuito con due transistor identici accoppiati di base e con correnti di collettore in rapporto costante tra loro (circuito *band gap reference*, fig. 10), si annulla la dipendenza da J_s e la differenza tra le due V_{BE} risulta direttamente proporzionale alla temperatura assoluta:

$$V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}}$$

Questa tensione viene ulteriormente elaborata in modo da ottenere una buona accuratezza (circa 0,5 °C) su tutto il range di misura (-50 +150 °C).

Il valore della temperatura può essere fornito sotto forma di un segnale elettrico di tensione, di corrente o meglio ancora di frequenza.

Tra i sensori analogici, i più noti sono l'integrato LM35 e il sensore AD590, con sensibilità, rispettivamente, di 10 mV/°C e di 1 µA/°C. La precisione fornita è di ±1 °C su tutto il range termico.

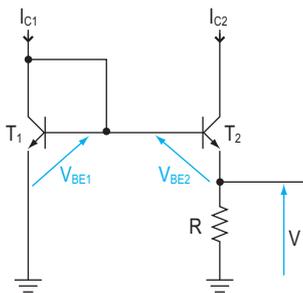


Fig. 10. Cella base per sensori integrati *band gap reference*.

3 **Trasduttori di sforzo**

I trasduttori di sforzo sono dispositivi in grado di rilevare l'entità della deformazione elastica micro-metrica cui risulta soggetto un materiale sottoposto a sforzo (*stress analysis*). Raramente si tratta di misurare effettivamente uno sforzo, quasi sempre i trasduttori sono impiegati per misurare in modo indiretto altre grandezze fisiche, quali un peso, una

forza di compressione o di trazione, o una coppia di torsione. L'elemento base di questi dispositivi è l'estensimetro.

La zona di Hooke

Il deterioramento delle proprietà funzionali di un pezzo meccanico e la sua stessa vita dipendono dall'entità e dalla combinazione dell'insieme di sforzi cui viene sottoposto il pezzo durante l'uso.

Applicando a una barretta metallica di sezione A e lunghezza L₀ una forza unidirezionale F di compressione (o di trazione) la barretta stessa si accorcia (o si allunga) di una quantità ΔL (fig. 11).

Si definisce perciò tensione meccanica σ = F/A lo sforzo per unità di superficie (stress) cui è sottoposto ciascun punto del materiale, misurato in N/m² = Pa, e deformazione (strain):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

l'allungamento relativo, adimensionale.

In un pezzo meccanico la relazione sforzo/deformazione è lineare per un primo tratto (fig. 12), e il materiale è elastico, ovvero al cessare della sollecitazione il pezzo riprende le dimensioni iniziali.

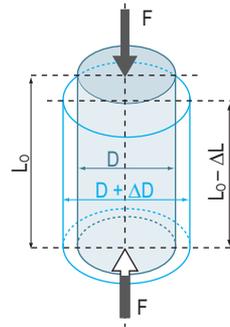


Fig. 11. Riduzione di lunghezza in una barretta metallica sottoposta a compressione.

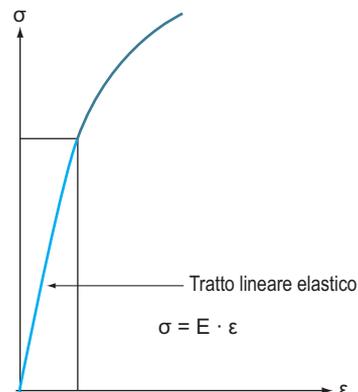


Fig. 12. Zona di Hooke.

La regione proporzionale ed elastica, detta zona di Hooke (scienziato inglese, 1635-1703) rappresenta il campo massimo di sollecitazione del materiale durante la misura. Se la deformazione supera un punto limite, non è più reversibile e il materiale rimane deformato in modo permanente (regione di deformazione plastica).

Estensimetri

Gli estensimetri, o *strain gauge* (fig. 13), sono dispositivi metallici o a semiconduttore che sfruttano il principio secondo il quale un filo modifica il valore della sua resistenza ($R = \rho \cdot \frac{l}{S}$) quando è sottoposto a una deformazione che ne alteri i parametri geometrici. Fino a quando la deformazione è reversibile, cioè nella zona micrometrica di comportamento elastico del materiale, l'allungamento relativo $\frac{\Delta L}{L}$ e la sua corrispondente variazione di resistenza $\frac{\Delta R}{R}$ sono proporzionali allo sforzo applicato.

posto a una deformazione che ne alteri i parametri geometrici. Fino a quando la deformazione è reversibile, cioè nella zona micrometrica di comportamento elastico del materiale, l'allungamento relativo $\frac{\Delta L}{L}$ e la sua corrispondente variazione di resistenza $\frac{\Delta R}{R}$ sono proporzionali allo sforzo applicato.

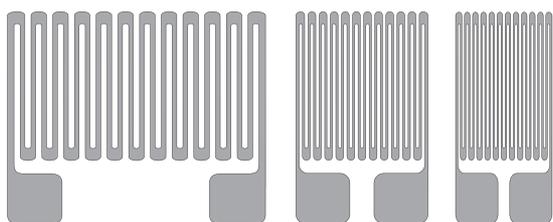


Fig. 13. Estensimetri.

La sensibilità (k) dell'estensimetro è perciò definita come variazione relativa di resistenza per un allungamento unitario del filo:

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0}$$

La sensibilità k è nota anche come *gauge factor*, caratteristico di ogni gauge.

I valori tipici variano da 2,05 per gli estensimetri a filo metallico di costantina, fino a 150 per gli estensimetri a semiconduttore (a griglia fotoincisa).

Misura di trazione

Costruita una provetta di sezione A , noto il modulo E del materiale utilizzato, è possibile determinare la forza di trazione applicata misurando semplicemente la deformazione ϵ che ne segue:

$$F = \epsilon \cdot E \cdot A = k \cdot \epsilon$$

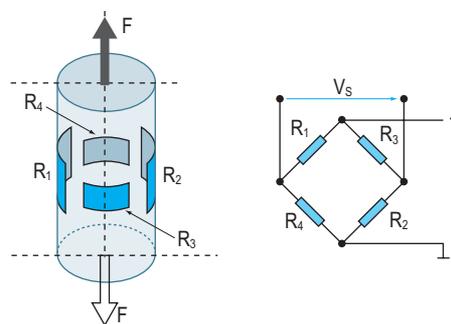


Fig. 14. Misura di trazione.

Dopo aver incollato sulla provetta a riposo uno o più estensimetri nella direzione dell'allungamento (fig. 14), ogni gauge subirà i medesimi allungamenti micrometrici della provetta, e misurando la tensione di sbilanciamento del ponte è possibile risalire all'entità del peso applicato.

Se una delle costanti non è nota, la provetta può essere preventivamente calibrata mediante l'impiego di pesi campione.

Celle di carico

Le celle di carico sono dispositivi costituiti da un supporto meccanico con quattro estensimetri già predisposti a ponte intero, progettati per un determinato range di peso e con altissime precisioni (fig. 15), da usare nelle bilance, nelle macchine confezionatrici e, in generale, nei sistemi di pesatura.

Tipo portante



Tipo a flessione, sigillato



Fig. 15. Celle di carico.

I parametri più significativi sono:

- la portata, ovvero il peso massimo applicabile;
- la sensibilità, espressa in mV/V, che rappresenta lo sbilanciamento relativo del ponte con 1 V di eccitazione e con sforzo massimo applicato;
- la stabilità, espressa in % del fondo scala.

4 Trasduttori di posizione

I trasduttori di posizione trasformano lo spostamento subito da un elemento mobile in un segnale elettrico a esso proporzionale. Se il movimento dell'elemento mobile è rettilineo, il trasduttore si dice lineare; se il movimento è rotatorio, si dice angolare.

Encoder ottici

L'encoder ottico rotativo è un dispositivo elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse in un segnale elettrico. Collegato a opportuni circuiti, permette di misurare spostamenti angolari e rettilinei, velocità di rotazione e accelerazione angolare.

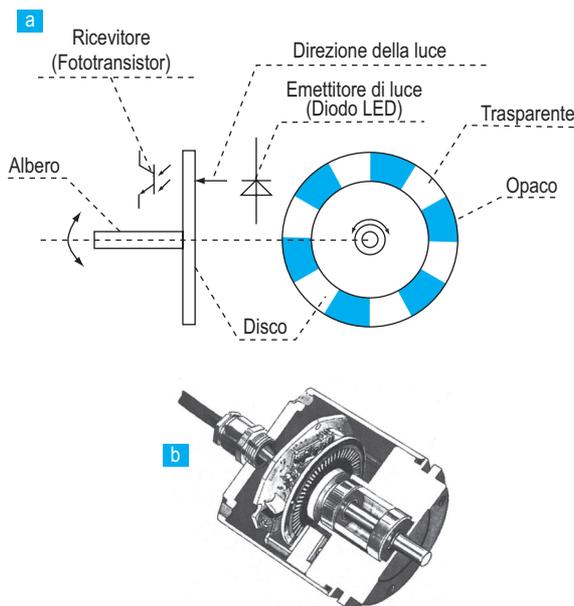


Fig. 16. Componenti di un encoder incrementale (a) e spaccato (b).

Gli encoder possono essere classificati in **assoluti**, quando forniscono un codice digitale a più bit per ciascuna posizione angolare dell'albero, e **in-**

mentali, quando forniscono un impulso per ogni incremento angolare dell'albero.

Gli encoder assoluti sono più costosi e vanno usati nei casi in cui sia necessario conoscere l'esatta posizione dell'albero anche dopo un'interruzione dell'alimentazione.

Gli incrementali sono più economici e sono i più usati nei sistemi di controllo del movimento.

Sono costituiti da tre parti fondamentali: una sorgente luminosa, un disco ottico con fenditure radiali trasparenti e alcuni fototransistor per rilevare le fenditure intercettate durante la rotazione (fig. 16).

Gli encoder incrementali forniscono in uscita tre segnali: A, B, Z (fig. 17); tuttavia, in commercio ne esistono di più economici con un solo canale. I segnali A e B permettono di individuare il senso di rotazione; sono infatti prodotti da due fotorilevatori (A) e (B) posti in modo da fornire segnali sfasati tra loro di 90°. Il segnale A risulta in anticipo rispetto al segnale B nel caso di rotazione oraria e in ritardo nel caso di rotazione antioraria.

Il segnale Z, infine, fornisce un impulso ogni giro del disco.

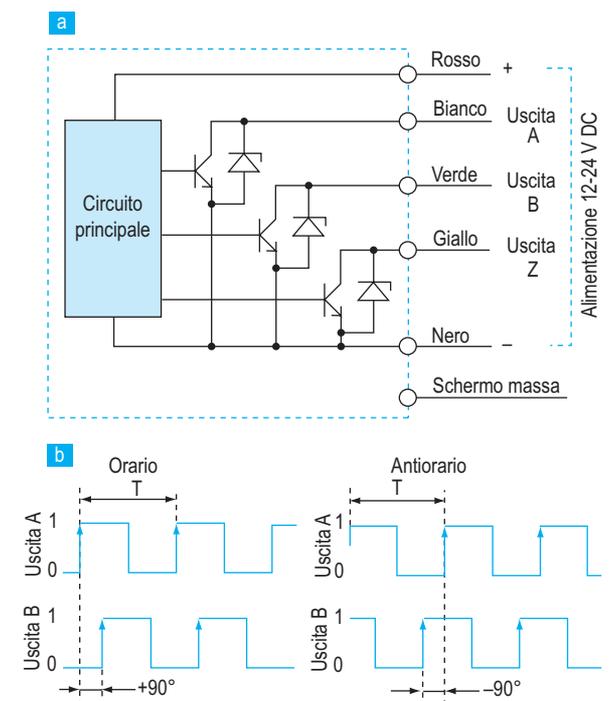


Fig. 17. Stadio di uscita (a) e diagramma dei segnali nei due sensi di rotazione (b).

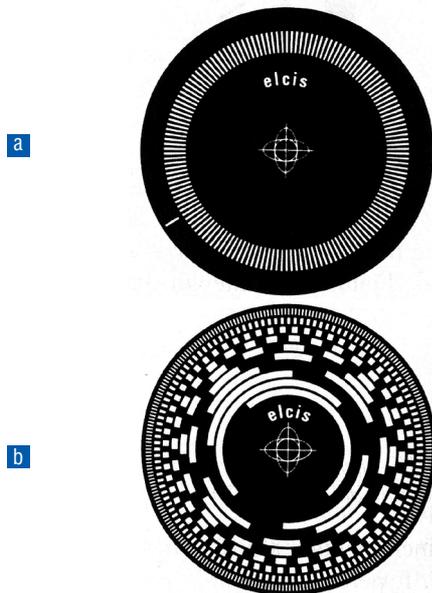
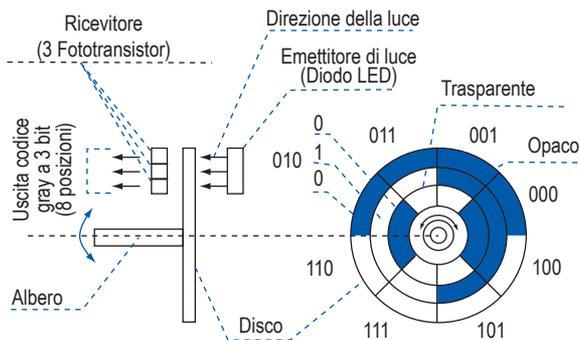


Fig. 18. Disco di un encoder incrementale (a) e di un encoder assoluto (b) con risoluzione 10 bit (1.024 posizioni per giro).

Negli encoder assoluti, il disco ottico è ben più complesso (fig. 18b) e la posizione è fornita in codice Gray (fig. 19), una particolare codifica detta a distanza unitaria perché, passando tra posizioni confinanti, cambia un solo bit.



decimale	0	1	2	3	4	5	6	7
binario	000	001	010	011	100	101	110	111
codice Gray	000	001	011	010	110	111	101	100

Fig. 19. Disco di un encoder assoluto e codice Gray a 3 bit.

I parametri principali per la scelta dell'encoder sono:

- la risoluzione, espressa in passi/giro o in ppr (*pulse per revolution*), cioè il numero di fenditure che si intercettano in un giro completo dell'albero;
- la massima velocità di rotazione dell'albero;
- la struttura del circuito elettrico di uscita dei segnali (*open drain, pushpull*).

La risoluzione richiesta deve risultare da due a quattro volte superiore alla precisione richiesta dall'applicazione, dieci volte nel caso di macchine utensili. Per non rovinare il disco ottico interno con vibrazioni o pressioni, l'accoppiamento dell'albero dell'encoder con l'albero master è realizzato mediante giunto elastico, flessibile in senso radiale e assiale, rigido in senso torsionale.

Gli encoder rotativi, accoppiati con pignone-cremagliera, possono essere impiegati per la misura di spostamenti lineari senza limitazione di lunghezza. In questo ambito si trovano anche le righe ottiche (fig. 20), costituite appunto da una riga ottica lineare graduata e da una piastrina mobile con apposito reticolo di esplorazione.

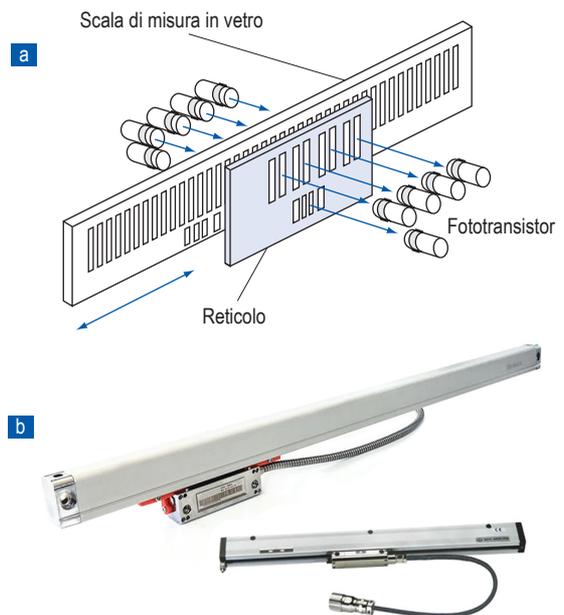


Fig. 20. Struttura interna di una riga ottica (a) ed esempio commerciale (b).

5 Trasduttori a effetto Hall

In una barretta di materiale conduttore o semiconduttore percorsa da corrente e sottoposta a un campo magnetico ortogonale al verso della corrente stessa, le cariche che la attraversano subiscono una deviazione del loro percorso per effetto della forza di Lorentz, generando una differenza di potenziale ai capi del conduttore stesso, detta tensione di Hall. Tale tensione risulta proporzionale sia alla densità B del campo applicato sia all'intensità I della corrente coinvolta.

$$V = k \cdot B \cdot I$$

Sfruttando questo fenomeno è possibile realizzare sia trasduttori per la misura diretta di correnti e di induzioni, tenendo costante ogni volta l'altra grandezza, sia trasduttori per la misura indiretta di pressione, di posizione e altro ancora. Risulta semplice, per esempio, misurare con un sensore di Hall il numero di giri dell'albero motore applicando un piccolo magnete sui denti di una ruota dentata, così come comporre una pinza amperometrica. In commercio si trovano numerosi sensori integrati specifici per determinate applicazioni, che già contengono tutta l'elettronica necessaria (joystick, sensori di corrente, di posizione, interruttori, ecc.).



ESERCIZIO A

Un trasduttore di lunghezza con escursione 1 dm, tensione di uscita 0÷5 V e precisione ±0,25 mm, ha il cursore che si sposta per incrementi costanti di 0,01 V. Determinare la sua risoluzione percentuale e la lunghezza corrispondente a una uscita di 4 V.

SOLUZIONE

La risoluzione percentuale vale:

$$\frac{0,01 \text{ V}}{5 \text{ V}} \cdot 100 = 0,2\%$$

In termini di lunghezza la risoluzione del trasduttore vale:

$$\frac{1 \text{ dm}}{5 \text{ V}} \cdot 0,01 \text{ V} = 0,2 \text{ mm}$$

In corrispondenza di una uscita da 4 V la lunghezza misurata è:

$$L = \frac{1 \text{ dm}}{5 \text{ V}} \cdot 4 \text{ V} = 8 \text{ cm} \pm 0,25 \text{ mm}$$



ESERCIZIO B

Un trasduttore di pressione da 0÷5 psi (1 pound/square inch = 0,07 kg/cm²), tensione di uscita 0÷100 mV e precisione 0,1%, presenta una uscita di 60 mV. Determinare il corrispondente valore di pressione rilevato.

SOLUZIONE

La precisione percentuale è sempre riferita al fondo scala, perciò in valore assoluto vale:

$$\frac{0,1}{100} \cdot 5 \text{ psi} = 0,005 \text{ psi}$$

In corrispondenza di una uscita da 60 mV la pressione misurata vale:

$$p = \frac{5 \text{ psi}}{100 \text{ mV}} \cdot 60 \text{ mV} = 3 \pm 0,005 \text{ psi}$$



ESERCIZIO C

Determinare il valore resistivo a 150 °C di un sensore NTC da 5 kΩ a 0 °C, con coefficiente $\alpha = -2,5\%/K$.

SOLUZIONE

$$R = R_0 \cdot e^{\frac{\alpha}{100} \cdot (T - T_0)} = 5 \text{ k}\Omega \cdot e^{-0,025 \cdot 150} = 118 \Omega$$



ESERCIZIO D

Una termocoppia di tipo S (tab. 2) viene usata per misurare la temperatura di un forno a 1.500 °C con una temperatura al giunto freddo di 25 °C ±15 °C. Determinare l'imprecisione sulla misura della temperatura del forno.

SOLUZIONE

La termocoppia S a 25 °C ha un coefficiente termico di 6 μV/°C. La variazione di ±15 °C alla giunzione fredda produce una variazione di ±90 μV nella tensione di uscita. Poiché la sensibilità della termocoppia a 1.500 °C è di 12,1 μV/°C, la variazione ±90 μV è interpretata come equivalente variazione di temperatura alla giunzione di misura:

$$\Delta T = \frac{\pm 90 \mu\text{V}}{12,1 \frac{\mu\text{V}}{^\circ\text{C}}} = \pm 7,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

con un errore:

$$\varepsilon\% = \frac{\pm 7,5 \text{ } ^\circ\text{C}}{1.500 \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 100 = \pm 0,5\%$$



ESERCIZIO E

Determinare per quale temperatura la tensione V_{AB} relativa al ponte riportato in fig. 21 risulta nulla, e quanto vale V_{AB} per una temperatura di 150 °C?

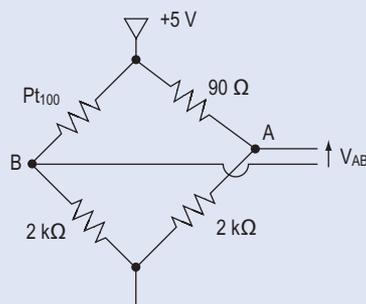


Fig. 21. Ponte per misura di temperatura da Pt100.

SOLUZIONE

Per avere $V_{AB} = 0$ il ponte deve risultare bilanciato, ovvero $Pt100 = 90 \Omega$.

Ponendo:

$$90 = 100 \cdot [1 + 0,00385 \cdot \Delta T]$$

si ricava $\Delta T = T = -26 \text{ }^\circ\text{C}$.

Alla temperatura $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$R = 100 \cdot [1 + 0,00385 \cdot (150 - 0)] = 157,75 \text{ } \Omega$$

$$V_A = \frac{5 \text{ V} \cdot 2.000 \text{ } \Omega}{2.000 \text{ } \Omega + 90 \text{ } \Omega} = 4,78 \text{ V}$$

$$V_B = \frac{5 \text{ V} \cdot 2.000 \text{ } \Omega}{2.000 \text{ } \Omega + 157,75 \text{ } \Omega} = 4,63 \text{ V}$$

$$V_{AB} = 150 \text{ mV}$$



ESERCIZIO F

Indicare sensore e strumento di misura necessari per rilevare la temperatura ambiente da $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ in alcune applicazioni delicate dove bisogna mantenere l'incertezza minore di $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ in tutto il campo di misura.

SOLUZIONE

Considerata la precisione richiesta si sceglie una RTD.

Per una Pt100 in classe A, le norme DIN garantiscono un errore massimo di intercambiabilità di $\pm 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ e minore altrove. Lo strumento di misura va scelto con almeno due cifre decimali (risoluzione $\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$) ed errore di linearità contenuto in $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ in tutto il campo di misura (almeno con lo strumento a $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Se la misura della resistenza non risente dei terminali di collegamento e avviene con una corrente di eccitazione da 1 mA , resta solo da valutare l'errore dovuto all'autoriscaldamento.

Per una RTD piccola e piatta, in aria ferma, il coefficiente di dissipazione vale circa $0,5 \text{ }^\circ\text{C/mW}$:

$$100 \text{ } \Omega \cdot (1 \text{ mA})^2 \cdot 0,5 \text{ }^\circ\text{C/mW} = 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

L'incertezza risultante dell'errore probabile è la radice quadrata della somma dei quadrati dei singoli errori massimi e non supera gli $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$:

- errore di intercambiabilità RTD $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$
- risoluzione dello strumento $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$
- non linearità dello strumento $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
- errore di autoriscaldamento RTD $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\varepsilon = \sqrt{0,25^2 + 0,01^2 + 0,1^2 + 0,05^2} = 0,275 \text{ }^\circ\text{C}$$



ESERCIZIO G

Un sensore di temperatura fornisce $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, con 0 V a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, con un errore di $\pm 10 \text{ mV}$ sul range $0 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Determinare la sua precisione percentuale e la temperatura corrispondente a una tensione di 420 mV .

SOLUZIONE

L'errore assoluto 10 mV corrisponde a $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

La precisione percentuale va riferita al fondo scala:

$$\frac{1 \text{ }^\circ\text{C}}{50 \text{ }^\circ\text{C}} \cdot 100 = 2\%$$

In corrispondenza di una uscita da 420 mV la temperatura misurata vale:

$$T = \frac{420 \text{ mV}}{10 \text{ mV}/^\circ\text{C}} = 42 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$$



ESERCIZIO H

Una coppia di rulli di diametro 6 cm trascina un nastro plastico. Un encoder con risoluzione 200 passi/giro è calettato sull'asse di uno dei rulli (fig. 22).

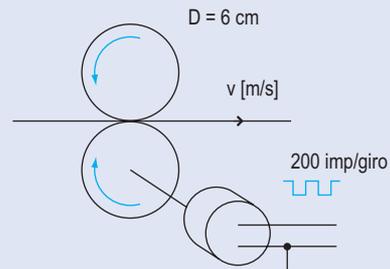


Fig. 22. Rulli di trascinamento.

Determinare ogni quanti centimetri di nastro l'encoder emette un impulso. Inoltre, se il numero di impulsi viene conteggiato nella variabile N e rilevato ogni $0,5 \text{ s}$, determinare l'equazione per il calcolo della velocità del nastro $[\text{m/s}]$ una volta noto N .

SOLUZIONE

La circonferenza del rullo vale:

$$C = 2\pi \cdot \frac{D}{2} = 2\pi \cdot \frac{6 \text{ cm}}{2} = 18,85 \text{ cm}$$

perciò, a ogni impulso dell'encoder, corrispondono:

$$\frac{18,85 \text{ cm}}{200} = 0,9425 \text{ mm}$$

Considerato che N è il numero di impulsi rilevato ogni $0,5 \text{ s}$, la velocità del nastro espressa in m/s vale:

$$v = \frac{N \cdot 0,9425 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,5 \text{ s}} = \frac{N \cdot 1,885}{1.000}$$



ESERCIZIO I

Una coppia di rulli di diametro 5 cm trascina un nastro che trasporta pacchi lunghi da 20 cm a 1 m, con velocità massima 1 m/s. Sull'asse di uno dei rulli è calettato un encoder con risoluzione 100 passi/giro (fig. 23).

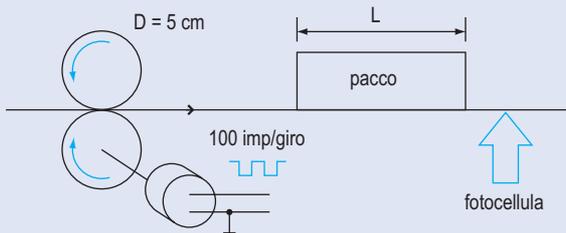


Fig. 23. Misura di lunghezza.

Durante l'intervallo di buio della fotocellula, che intercetta il passaggio del pacco, vengono misurati sia gli impulsi (N) provenienti dall'encoder, sia gli impulsi (M) di una frequenza campione da 1 kHz, così da determinare sia la lunghezza dei pacchi che transitano, espressa in cm, sia la velocità del nastro (cm/s). Indicare le precisioni sulle misure.

SOLUZIONE

La circonferenza del rullo vale:

$$C = 2\pi \cdot \frac{D}{2} = 2\pi \cdot \frac{5 \text{ cm}}{2} = 15,7 \text{ cm}$$

perciò a ogni impulso dell'encoder corrispondono:

$$\frac{15,7 \text{ cm}}{100} = 1,57 \text{ mm}$$

Noto il numero N degli impulsi conteggiati la lunghezza del pacco vale:

$$L = N \cdot 0,157 \pm 0,157 \text{ cm}$$

Per quanto riguarda la precisione, va considerato difatti che tutte le misure asincrone di impulsi presentano una precisione ± 1 .

L'errore percentuale massimo sulla misura di lunghezza si ha con i pacchi più corti, dove:

$$N_{\min} = \frac{200 \text{ mm}}{1,57 \text{ mm}} = 127 \pm 1$$

$$\epsilon_L \% = \pm \frac{1}{127} \cdot 100 = 0,79\%$$

L'intervallo di buio della fotocellula vale:

$$\Delta t = M [\text{ms}]$$

Considerato che N è il numero di impulsi rilevati nel tempo Δt , la velocità del nastro espressa in cm/s vale:

$$v = \frac{N \cdot 0,157 \text{ cm}}{M \cdot 10^{-3} \text{ s}} = 157 \cdot \frac{N}{M} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Il caso peggiore si ha quando il pacco più corto transita alla velocità massima. In tal caso l'intervallo Δt è il minore:

$$\Delta t_{\min} = \frac{L_{\min}}{v_{\max}} = \frac{20 \text{ cm}}{1 \text{ m/s}} = 0,2 \text{ s} \pm 1 \text{ ms}$$

con $M = 200 \pm 1$ ed $N = 127 \pm 1$

$$v = 157 \cdot \frac{127}{200} \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 99,7 \text{ cm/s}$$

$$v_{\min} = 157 \cdot \frac{126}{201} \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 98,4 \text{ cm/s}$$

$$v_{\max} = 157 \cdot \frac{128}{199} \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 101 \text{ cm/s}$$

L'errore assoluto sulla misura della velocità è quindi di $\pm 1,3 \text{ cm/s}$.



ESERCIZIO J

Determinare la risoluzione dell'encoder da utilizzare nell'applicazione di fig. 24, in modo da garantire una precisione sulla posizione pari a $\pm 0,1 \text{ mm}$, sapendo che $d = 30 \text{ cm}$, $s = 2 \text{ mm}$, e che il riduttore ha un rapporto $r = 10$.

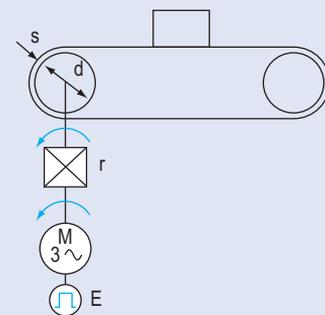


Fig. 24. Encoder incrementale impiegato in un controllo di posizione.

SOLUZIONE

Lo spazio percorso in un giro del rullo vale:

$$S = 2\pi \cdot \left(\frac{d}{2} + s\right) = 2\pi \cdot 152 \text{ mm} = 955 \text{ mm}$$

La risoluzione richiesta su un giro è pertanto:

$$\frac{955 \text{ mm}}{0,1 \text{ mm}} = 9.550$$

Considerando che per ogni giro del rullo il motore deve compiere 10 giri, con un coefficiente di miglioramento pari a quattro per la risoluzione dell'encoder e tenuto conto del fattore moltiplicativo 4 nel conteggio degli impulsi da encoder bicanale, si ha:

$$\text{ppr} > \frac{9.550 \cdot 4}{4 \cdot 10} = 955$$

Serve perciò un encoder da 1.024 ppr.

ESERCIZIO 1

Un sensore di pressione fornisce una tensione di fondo scala di 100 mV per una pressione di 100 psi, con precisione 0,25%. Determinare il valore di pressione corrispondente a 82 mV.

$$[\text{Ris.: } P = 82 \pm 0,25 \text{ psi}]$$

ESERCIZIO 2

Un sensore di pressione fornisce una tensione secondo i valori indicati nella **tab. 3**.

Tab. 3 - Risposta caratteristica del sensore di pressione	
P [psi]	V [Volt]
0	0
100	1,2
250	2,4
500	5

Determinare il valore della pressione rilevata quando la tensione fornita dal sensore vale rispettivamente 0,3 V, 2 V, 4 V.

$$[\text{Ris.: } 25 \text{ psi; } 200 \text{ psi; } 404 \text{ psi}]$$

ESERCIZIO 3

Determinare la resistenza a 150 °C di un termistore NTC da 22 kΩ a 25 °C, con coefficiente di temperatura -2,5%/K.

$$[\text{Ris.: } 966,6 \Omega]$$

ESERCIZIO 4

Un termistore NTC da 20 kΩ a 20 °C, con coefficiente di temperatura -3%/K, deve misurare temperature da 0 °C a 40 °C. Determinare il suo valore ohmico ai due estremi.

$$[\text{Ris.: } 36,4 \text{ k}\Omega; 10,97 \text{ k}\Omega]$$

Se il termistore è inserito in serie a una resistenza da 10 kΩ e il tutto è alimentato con una tensione da 12 V, determinare la caduta di tensione sulla resistenza 10 kΩ nei due casi estremi.

$$[\text{Ris.: } 2,58 \text{ V; } 5,72 \text{ V}]$$

ESERCIZIO 5

Una termocoppia di tipo S, con giunto freddo termostato a 0 °C, in corrispondenza di un campo di misura da 0 °C a 1.700 °C, fornisce una tensione da 0 mV a 17,94 mV. Considerando lineare la sua risposta, determinare la temperatura corrispondente a una tensione di 10 mV. Utilizzando i valori indicati in **tab. 2** valutare la temperatura reale e l'errore assoluto commesso.

$$[\text{Ris.: } T \text{ calcolata} = 948 \text{ }^\circ\text{C}; \\ T \text{ reale} = 1.035,5 \text{ }^\circ\text{C}; \varepsilon = -87,5 \text{ }^\circ\text{C}]$$

ESERCIZIO 6

Una termocoppia di tipo T viene usata per misurare la temperatura di una camera climatica da -100 a +100 °C con una temperatura al giunto freddo di 25 °C ± 10 °C. Determinare l'imprecisione sulla misura della temperatura del forno ai due estremi.

$$[\text{Ris.: } \varepsilon = \pm 14,3 \text{ }^\circ\text{C a } -100 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \varepsilon = \pm 8,7 \text{ }^\circ\text{C a } 100 \text{ }^\circ\text{C}]$$

ESERCIZIO 7

Una sonda termometrica al platino presenta una resistenza di 100 Ω a 0 °C. Sapendo che il suo coefficiente di temperatura è $\alpha = 0,00385 \Omega/\Omega^\circ\text{C}$, a quale temperatura vale 106 Ω?

$$[\text{Ris.: } T = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}]$$

ESERCIZIO 8

Determinare la temperatura che deve assumere una Pt100 con $\alpha = 0,00385 \Omega/\Omega^\circ\text{C}$ per raddoppiare il valore che possiede a 0 °C.

$$[\text{Ris.: } 259,7 \text{ }^\circ\text{C}]$$

ESERCIZIO 9

Una sonda termometrica presenta una resistenza di 110 Ω a 20 °C, e di 115 Ω a 30 °C. Determinare il coefficiente di temperatura del materiale a 20 °C.

$$[\text{Ris.: } 4,54 \cdot 10^{-3} \Omega/\Omega^\circ\text{C}]$$

ESERCIZIO 10

Per quale temperatura la tensione V_{AB} relativa al ponte riportato in **fig. 25** risulta nulla? Quanto vale V_{AB} per una temperatura di 250 °C?

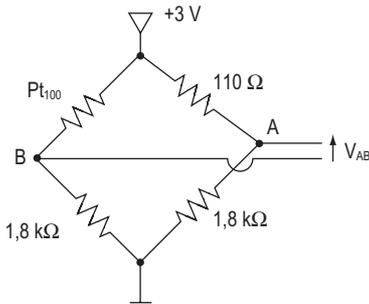


Fig. 25. Ponte per misura di temperatura da Pt100.

[Ris.: 25,97 °C; 120 mV]

ESERCIZIO 11

Un sensore di temperatura fornisce 1 μA di corrente per ogni 1 K, cioè 273,16 μA a 0 °C, con un errore di ±0,3 °C sul range 0÷100 °C. Determinare la sua precisione percentuale e la temperatura corrispondente a una corrente di 321 μA.

[Ris.: ε% = 0,3%; T = 48 ± 0,3 °C]

ESERCIZIO 12

Il sensore di temperatura ambiente MAX6577 fornisce il valore della temperatura assoluta sotto forma di frequenza con coefficiente 4 Hz/K. Determinare il valore della frequenza emessa dal sensore in corrispondenza di 25 °C e la formula di calcolo necessaria per risalire alla temperatura espressa in °C supponendo di conteggiare gli impulsi (N) in un secondo.

[Ris.: $f_{25\text{ °C}} = 1.193 \text{ Hz}; T = \frac{N}{4} - 273,2$]

ESERCIZIO 13

Analizzare il funzionamento dell’analog temperature switch di **fig. 26** e determinare i partitori resistivi necessari a polarizzare il dispositivo per i livelli di scatto indicati, supponendo $R_2 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$.

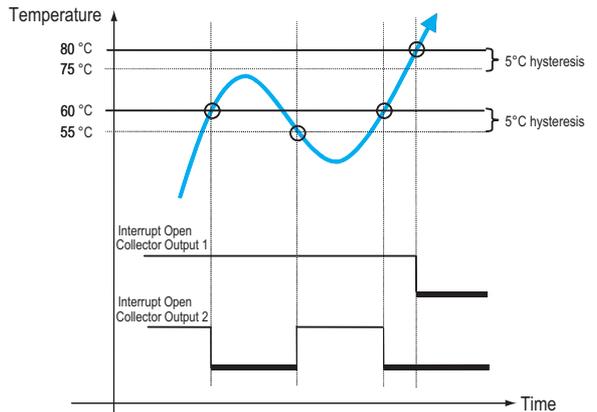
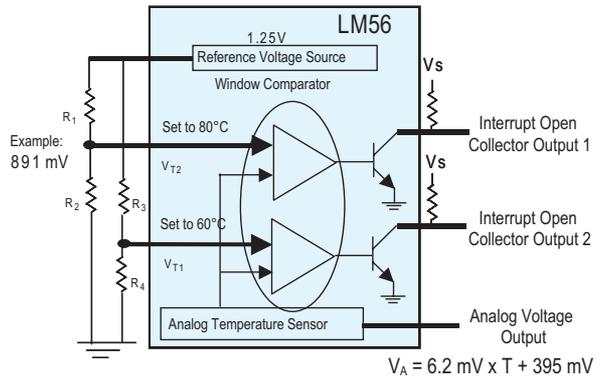


Fig. 26. Analog temperature switch LM56.

[Ris.: $R_1 = 4.029 \Omega; R_3 = 6.297 \Omega$]

ESERCIZIO 14

Analizzare il funzionamento dell’analog temperature switch di **fig. 26** e determinare il partitore resistivo necessario in **fig. 27** ad attivare il ventilatore per temperature superiori a 40 °C e l’allarme per $T > 60 \text{ °C}$ ($R_1 = 10 \text{ k}\Omega$).

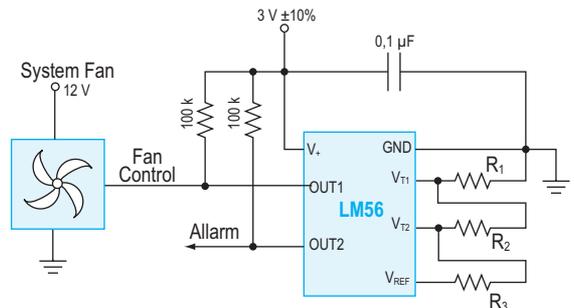


Fig. 27. Fan control.

[Ris.: $R_2 = 1.928 \Omega; R_3 = 7.512 \Omega$]

ESERCIZIO 15

Una coppia di rulli di diametro 20 cm trascina un nastro a velocità comprese tra 1 m/s e 10 m/s; calettato sull'asse di uno dei rulli è posto un encoder con risoluzione 200 passi/giro.

Determinare ogni quanti centimetri di nastro si riceve un impulso dall'encoder e quanto vale la frequenza degli impulsi alle due velocità limite?

[Ris.: 1 imp. ogni 0,314 cm;
 $f_{\min} = 318,3 \text{ Hz}$; $f_{\max} = 3.183 \text{ Hz}$]

ESERCIZIO 16

Sull'albero di una girante da 20 litri/giro è calettato un encoder da 100 passi/giro. Gli impulsi provenienti dall'encoder sono conteggiati in una variabile N

acquisita ogni 1 s. Determinare la relazione per il calcolo della portata espressa in litri/minuto.

[Ris.: $Q = N \cdot 12$]

ESERCIZIO 17

Un encoder con risoluzione 100 passi/giro è calettato sull'asse della ruota di un autobus, di diametro 1 m.

Determinare ogni quanti centimetri di strada l'encoder emette un impulso.

Inoltre, se il numero di impulsi viene conteggiato nella variabile N e rilevato ogni 0,5 s, determinare l'equazione per il calcolo della velocità dell'autobus in m/s, una volta noto N.

[Ris.: un impulso ogni 3,14 cm; $v = N \cdot 0,0628$]