

## CAPITOLO 7

# Le misurazioni tramite trasduttori con uscita elettrica

(Italo Gorini)

### 7.1. Che cos'è un trasduttore

L'elaborazione di segnali di tipo elettrico<sup>1</sup> è relativamente facile, specialmente tenendo conto della vasta gamma di strumenti che il mercato offre e della versatilità che si può ottenere facendo ricorso, con costi sempre più accessibili, a tecnologie ibride di tipo analogico-numerico che si basano sull'impiego dei microprocessori.

Per esempio, un impianto di misura basato su un sistema automatico di acquisizione dati e un microprocessore consente di effettuare in modo molto più compatto ed economico le stesse elaborazioni di segnali che non molto tempo fa richiedevano complessi apparati strumentali di tipo analogico e numerosi operatori.

Viene dunque spontaneo cercare di impiegare queste tecniche anche quando il misurando, cioè l'informazione che interessa, non è associato a un segnale di tipo elettrico, trasformando opportunamente la natura del segnale che convoglia l'informazione.

Come esempio si può considerare un estensimetro a resistenza a filo (spesso chiamato «strain gauge»), mediante il quale una variazione di lunghezza è trasformata in una variazione di resistenza elettrica. Un tipo semplice di estensimetro è riportato nella fig. 7-1. Esso è costituito da un tratto di filo conduttore, ripiegato più volte su se stesso e incollato

Fig. 7-1. Rappresentazione schematica di un estensimetro elettrico a resistenza.

$L_0$  = lunghezza base ( $\delta L$  è una variazione).  
 $R_{AB}$  = resistenza della griglia ( $\delta R_{AB}$  è una variazione).  
 $S$  = fattore di taratura (gauge factor).  
Deformazioni del supporto provocano deformazioni della griglia, che a loro volta sono causa di variazioni della resistenza presentata dalla griglia stessa, sia per l'effetto puramente geometrico delle variazioni dimensionali, sia per effetto piezoresistivo.



$$\frac{\delta L}{L_0} = \frac{1}{S} \frac{\delta R_{AB}}{R_{AB}}$$

1. Sono tali, per esempio, il valore di tensione, o l'intensità di corrente, o il valore della resistenza, relativi a un bipolo; la frequenza di un'onda sinusoidale, ecc.

a una piastrina flessibile molto sottile di materiale isolante; del filo sono accessibili esternamente i due terminali. Nell'uso normale la piastrina viene fissata con speciali collanti all'oggetto di cui si vuole rilevare la deformazione; in prima approssimazione, le variazioni relative di resistenza del filo sono proporzionali alle variazioni relative della dimensione lungo la quale è stato disposto l'estensimetro. Di solito, per mettere in evidenza tali variazioni, il filo viene inserito come lato in un ponte di Wheatstone (si veda a pag. 338); se il ponte è in condizioni di equilibrio quando non si hanno deformazioni, la tensione che si ha sulla diagonale di rivelazione risulta essere, con buona approssimazione, proporzionale alle variazioni di resistenza del filo e dunque alle variazioni della lunghezza oggetto della misurazione.

I dispositivi che effettuano queste trasformazioni vengono chiamati comunemente trasduttori, o convertitori (a volte convertitori di segnale), o sensori, o rivelatori, o con altri nomi derivati più o meno direttamente dalle loro caratteristiche costruttive o funzionali (ad es. flussometri, tachimetri, accelerometri, estensimetri, ecc.). In questo contesto, seguendo una tendenza che sembra prevalere negli ambienti normativi, verrà usato il termine *trasduttore*, al quale si può dunque associare la seguente definizione:<sup>2</sup>

- *trasduttore* è un dispositivo che riceve un'informazione mediante un segnale d'ingresso costituito da una determinata grandezza fisica e la restituisce mediante un segnale d'uscita costituito da una grandezza fisica diversa, più adatta alle elaborazioni successive.

Avendo dunque convenuto con quale significato useremo il termine *trasduttore*, facendo seguito a quanto detto all'inizio, ci occuperemo in particolare dei trasduttori con uscita elettrica analogica.<sup>3</sup> Pur tuttavia, come risulterà evidente, la maggioranza dei concetti che verranno introdotti presenta una validità più generale ed è applicabile a categorie ben più vaste di trasduttori.

## 7.2. Con quali sistemi è in relazione un trasduttore

Come si è schematizzato nella fig. 7-2, per la sua stessa natura un trasduttore risulta associato ad altri sistemi fisici.

- Il trasduttore è collegato a monte con il *sistema misurato*, cioè con il sistema fisico dal quale gli proviene l'informazione, convogliata dal segnale d'ingresso.

L'attributo *misurato* sottolinea che l'informazione elaborata ha proprio lo scopo di contribuire a definire lo stato di questo sistema.

- A valle il trasduttore è collegato con il *sistema utilizzatore*, cioè con il sistema fisico al quale trasmette l'informazione e che provvede a ulteriori elaborazioni o a interventi in qualche modo correlati all'informazione ricevuta.

2. Nell'uso corrente il termine ha spesso un significato più ampio, stando ad indicare in modo generale un qualunque dispositivo che compie una certa elaborazione sul segnale che convoglia l'informazione. A volte ancora si mette in evidenza l'aspetto energetico del segnale, definendo come trasduttore qualunque dispositivo nel quale si opera una trasformazione di energia da una forma a un'altra.

3. *Analogico* è un segnale che si evolve in modo continuo, nel quale l'informazione è legata direttamente al suo andamento nel tempo.

*Numerale* (o digitale) è un segnale discontinuo nel tempo e nelle ampiezze (di solito è discretizzato su due livelli), nel quale l'informazione risulta legata biunivocamente al segnale stesso attraverso un'opportuna codificazione.

In questo caso si noti come il termine *utilizzatore* sia molto generico e metta in evidenza solamente la relazione funzionale con il trasduttore. Di fatto questo sistema può essere molto diverso di caso in caso, andando dai casi più semplici, come il dispositivo per visualizzare il valore del parametro misurato, ai casi più complessi, come il primo elemento di una catena di dispositivi atti a realizzare una regolazione o un controllo.

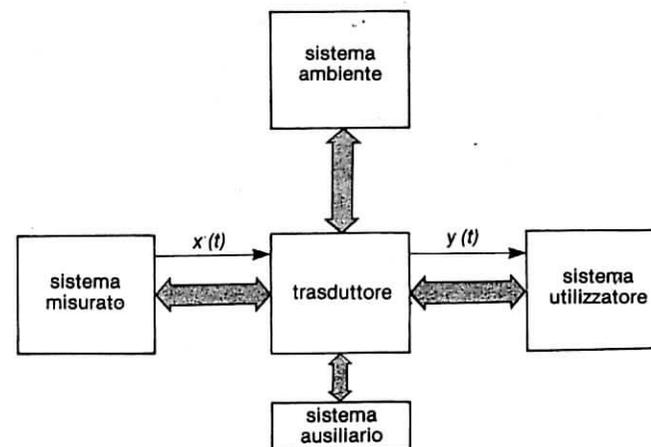


Fig. 7-2. Rappresentazione schematica a blocchi dei collegamenti fra un trasduttore e gli altri sistemi fisici con i quali risulta interconnesso. Le funzioni del tempo  $x(t)$  e  $y(t)$  sono rispettivamente il segnale d'ingresso e quello di uscita del trasduttore. Le frecce grandi a due versi rappresentano la influenza reciproca esercitata dai vari sistemi interconnessi.

È anche opportuno sottolineare come a volte l'utilizzatore sia costituito da un altro trasduttore, che ha lo scopo di modificare ulteriormente il segnale, per renderne più comoda l'elaborazione successiva.

L'interconnessione fra questi due dispositivi può risultare così intima che l'insieme viene considerato come un unico trasduttore. Questo avviene, in particolare, quando il primo dispositivo trasforma il misurando in una grandezza non ancora elettrica, come in alcuni tipi di trasduttori di forza, dove la forza viene applicata a un elemento elastico di caratteristiche note, la cui deformazione viene a sua volta trasformata in grandezza elettrica, ad esempio, per mezzo di un estensimetro.

- Il trasduttore può anche risultare collegato a un dispositivo autonomo, necessario al suo funzionamento, che può essere conveniente mettere in evidenza introducendo il *sistema ausiliario*.

Come esempio, si pensi a una sorgente ausiliaria di potenza (si veda il § 7.3.6 a pag. 555) o a un campione di riferimento.

Si noti che il *sistema ausiliario* potrebbe essere conglobato nel *sistema ambientale* (definito nel capoverso successivo), o nel trasduttore stesso. In realtà, quasi sempre è conveniente metterlo in evidenza autonomamente, non solo perché risulta fisicamente distinto, ma anche perché di regola viene caratterizzato in modo indipendente dal trasduttore, e perché può essere intercambiato con altri dispositivi dello stesso tipo.

- Infine si è introdotto il *sistema ambiente*, con il quale si è voluto rappresentare in modo sintetico l'insieme di tutte le sorgenti di interferenza con il funzionamento del trasduttore che non sono riferibili al sistema misurato e al sistema utilizzatore.

La necessità di prendere in considerazione tale sistema è intuitivamente evidente, ma apparirà più chiara nel seguito, quando si tratterà delle grandezze d'influenza (§ 7.3.2 a pag. 553).

### 7.3. Il modello di un trasduttore

Le caratteristiche funzionali di un trasduttore sono in genere fornite mediante una serie di informazioni, sotto forma sia qualitativa sia quantitativa, che dovrebbero consentire di impiegare correttamente il dispositivo.

Nonostante esista una ricca bibliografia, anche di carattere normativo, tendente ad unificare la materia, queste informazioni fanno di regola stretto riferimento al tipo di trasduttore in questione e le diverse case costruttrici impiegano nomenclature e simbolismi diversi, spesso anche basandosi su presupposti teorici diversi. In altre parole, non è facile orientarsi e interpretare correttamente i dati forniti, specialmente se non si ha familiarità col settore.

In questo paragrafo si cercherà di dare qualche cenno sulle basi teoriche necessarie per un'analisi non troppo superficiale del funzionamento di un trasduttore. Si cercherà cioè di fornire un modello interpretativo del funzionamento di un trasduttore, sufficientemente ricco da consentire di comprendere le informazioni che sono date usualmente.

Solo successivamente, nel § 7.4, si entrerà nel campo dei tipi di informazione che di solito vengono forniti per documentare in modo quantitativo le prestazioni di un trasduttore.

#### 7.3.1. La funzione di conversione

- L'impiego di un trasduttore richiede ovviamente che se ne conosca la *funzione di conversione*, cioè la relazione che lega il segnale d'ingresso  $x(t)$  al segnale d'uscita  $y(t)$ .<sup>4</sup>

Come si vedrà fra poco, l'impostazione corretta di tale problema è di una certa complessità; se lo si semplifica drasticamente, trascurando, fra l'altro, le interconnessioni del trasduttore con gli altri sistemi, come appaiono nella fig. 7-2, si può formalizzare l'introduzione della funzione di conversione con la formula:<sup>5</sup>

$$x(t) = f[y(t)]. \quad (7.1)$$

Si noti che, secondo le applicazioni, può essere più comodo considerare la relazione inversa

$$y(t) = g[x(t)] \quad (7.2)$$

e introdurre  $g$  come funzione di conversione (a causa di eventuali non biunivocità,  $g$  potrebbe anche non essere la funzione inversa  $f^{-1}$  di  $f$ ).

Come esempio si può considerare l'estensimetro a cui si è accennato nel § 7.1, fig. 7-1, a pag. 549.

In questo caso il segnale d'ingresso è costituito dalle variazioni relative di lunghezza  $\frac{\delta L(t)}{L_0}$ , mentre il segnale d'uscita è costituito dalle variazioni relative della resistenza del filo  $\frac{\delta R(t)}{R_0}$ ; cioè si ha:

4. Con  $x(t)$  e  $y(t)$  sono indicate due generiche funzioni del tempo (nel presente capitolo, tranne quando precisato diversamente,  $t$  rappresenta il tempo).

5. La funzione  $f$  va intesa in senso molto lato, nell'accezione dell'analisi funzionale, come la generica regola di corrispondenza che lega ciascuna delle possibili funzioni del tempo  $x(t)$  con la conseguente  $y(t)$ .

$$x(t) = \frac{\delta L(t)}{L_0};$$
$$y(t) = \frac{\delta R(t)}{R_0}$$

Il modello che si assume generalmente per rappresentare il legame fra i due segnali ipotizza una diretta proporzionalità:

$$\delta R/R_0 = S(\delta L/L_0). \quad (7.3)$$

Nel caso di questo trasduttore la funzione di conversione si riduce dunque a una costante,  $S$ , chiamata di solito fattore di taratura (gauge factor).

#### 7.3.2. Le grandezze d'influenza

Nell'analisi del funzionamento di un trasduttore, volendo andare oltre la grossolana approssimazione rappresentata dalla funzione di conversione come definita con la formula (7.1), occorre orientarsi verso la definizione di un modello matematico più complesso, che tenga conto delle interconnessioni di cui si è parlato nel § 7.2.

Il segnale d'uscita  $y(t)$ , oltre che da  $x(t)$ , dipende anche dalle azioni che sul trasduttore esercitano, in vario modo e con diverso peso, i tre sistemi che con esso interagiscono (si veda la fig. 7-2). Un primo passo verso una definizione più rigorosa della funzione di conversione consiste nel considerare una funzione a più variabili come legame fra l'uscita  $y(t)$  e tutti gli effettivi ingressi del trasduttore.

- Si introducono così le *grandezze di influenza*, cioè tutte le grandezze fisiche attinenti al sistema misurato (con l'eccezione del misurando), all'utilizzatore e all'ambiente, che influenzano il comportamento del trasduttore.

È importante precisare che qui si fa riferimento a grandezze che esercitano la loro influenza sul comportamento del trasduttore, mentre non interessa la loro eventuale azione sul misurando, di cui si è parlato nel § 2.8.2 a pag. 70 del vol. 1 TSP.

Come esempi di grandezze d'influenza si possono considerare i tre seguenti, ciascuno dei quali fa riferimento a uno dei tre sistemi esterni al trasduttore messi in evidenza nella fig. 7-2.

— *Dal sistema misurato*: un esempio di grandezza d'influenza relativa al sistema misurato è costituito dalla temperatura di un flusso di cui si rileva la portata in un condotto mediante un flussometro.

— *Dal sistema utilizzatore*: nel caso di un trasduttore di spostamento di tipo potenziometrico, una grandezza d'influenza è costituita dalla resistenza d'ingresso del dispositivo utilizzatore (ad esempio un amplificatore) che riceve il segnale d'uscita (una tensione).

— *Dall'eventuale sistema ausiliario*: nel caso in cui è presente una sorgente ausiliaria di potenza (§ 7.3.6), un'importante grandezza d'influenza è costituita dalla tensione fornita da tale generatore.

— *Dall'ambiente*: una tipica grandezza d'influenza attinente all'ambiente, con la quale bisogna quasi sempre fare i conti, è la temperatura, che tende a modificare la temperatura dei componenti del trasduttore e quindi a modificarne le prestazioni. Come esempio si pensi all'estensimetro elettrico, nel quale una variazione della temperatura del filo ne provoca una variazione di resistenza che può essere erroneamente interpretata come una variazione del segnale d'ingresso.

### 7.3.3. La dipendenza dal tempo

I singoli componenti di un trasduttore sono inevitabilmente soggetti a un processo di invecchiamento che si presenta con modalità diverse di caso in caso, secondo la loro natura e secondo le vicende attraverso le quali sono passati (sovraccarichi, urti, inquinamenti, ecc.).

- Tutto ciò di regola influisce sul trasduttore nel suo complesso e richiede dunque che fra le sue caratteristiche fondamentali si consideri la *dipendenza dal tempo* del suo funzionamento.

Si noti che, sotto un certo angolo di visuale, questa dipendenza dal tempo potrebbe essere ricondotta alla categoria di fenomeni a cui si è accennato nel punto precedente, introducendo fra le diverse grandezze d'influenza anche la variabile tempo. Tuttavia di solito si preferisce considerare separatamente i due tipi di fenomeni, per numerose ragioni, che vanno dalla peculiarità della variabile tempo (non assoggettabile a controllo, come invece sono, almeno in teoria, le altre grandezze d'influenza), alla inopportunità di attribuire tale grandezza come attinente a un determinato sistema fisico (verrebbe quindi meno il modello illustrato nella fig. 7-2).

### 7.3.4. Il campo di misura e il campo di sicurezza del misurando

Il funzionamento di un trasduttore dipende anche dai valori assunti dal segnale d'ingresso (e quindi anche dal segnale d'uscita).

- In altre parole, il modello scelto per rappresentare il comportamento del trasduttore, cioè la sua funzione di conversione, a parità di approssimazione,<sup>6</sup> è diverso secondo l'ampiezza del *campo di variabilità del segnale d'ingresso*.

Come esempio si consideri un trasduttore di temperatura a resistenza, cioè un dispositivo, costituito sostanzialmente da un resistore, che consente di rilevare le variazioni della temperatura a cui esso si trova, tramite il rilievo delle corrispondenti variazioni del valore di resistenza (si veda anche il § 4.1.1 a pag. 185). Il modello matematico di questo trasduttore, cioè la relazione fra le due variazioni relative, può essere espresso, in generale, come segue (in questo caso il simbolo  $T$  indica la temperatura):<sup>7</sup>

$$\delta R/R_0 = \alpha_0(\delta T/T_0) + \beta_0(\delta T/T_0)^2 + \gamma_0(\delta T/T_0)^3 \dots \quad (7.4)$$

È evidente che, a parità di approssimazione accettata nella formulazione del modello matematico del trasduttore, il secondo membro della (7.4) può essere fermato al primo termine (modello lineare), se i valori massimi delle variazioni di temperatura  $\delta T/T_0$  sono sufficientemente piccole; dev'essere invece esteso al termine quadratico (modello parabolico), se le variazioni sono di maggiore entità.

- Si definisce dunque il *campo di misura*, che precisa i limiti entro i quali deve variare la grandezza d'ingresso affinché il trasduttore funzioni secondo le specifiche fornite per caratterizzarlo.

È infine opportuno sottolineare che per il segnale d'ingresso esistono di regola altri

6. Quest'espressione, per ora comprensibile a livello intuitivo, verrà meglio precisata in seguito, quando si tratterà dell'incertezza con cui sono note le caratteristiche di un trasduttore.

7. Il valore  $T_0$  rappresenta una determinata temperatura, presa come riferimento, ed  $R_0$  è il corrispondente valore della resistenza  $R$  del resistore che costituisce il trasduttore.

limiti, che fanno riferimento all'*integrità del trasduttore*. È infatti intuitivo che, poiché il segnale è sempre associato a una certa energia, segnali associati a un'energia troppo elevata possono danneggiare il trasduttore.

- Viene così definito il cosiddetto *campo di sicurezza*, di solito più ampio, comunque mai inferiore, al campo di misura, che specifica i limiti che la grandezza d'ingresso non deve superare per non danneggiare il trasduttore.

### 7.3.5. Il campo di variabilità dell'uscita

L'uscita di un trasduttore costituisce il segnale di ingresso per il dispositivo utilizzatore che viene collegato a valle del trasduttore stesso (si veda la fig. 7-2): è dunque di importanza fondamentale conoscerne la natura e il campo di variabilità. In particolare, interessano i due tipi di informazione seguenti.

- a) Il *campo di normale funzionamento dell'uscita*, cioè il campo di valori assunti dall'uscita corrispondentemente al *campo di misura* definito nel paragrafo precedente.  
b) I *valori estremi dell'uscita*, cioè i valori più elevati assunti dal segnale di uscita quando il misurando varia entro il *campo di sicurezza*, definito nel paragrafo precedente.

È il caso di sottolineare che al di fuori del campo di misura la funzione di conversione può risultare molto alterata. Secondo i casi, si possono avere fenomeni di saturazione o, al contrario, di esaltazione dell'uscita, al crescere del misurando. Come esempio di facile comprensione, si pensi al trasduttore forza/spostamento illustrato con la fig. 7-12 nel § 7.3.8.6. Se la forza applicata è positiva, cioè di trazione, e supera i limiti della legge di Hook (i limiti di elasticità), l'allungamento si esalta al di là della legge di proporzionalità. Se la forza è negativa, cioè di compressione, la molla tende ad accorciarsi, ma, una volta chiuse le spire, la sua lunghezza non scende al di sotto di un certo valore.

### 7.3.6. Il comportamento energetico

Riguardo agli scambi energetici con il sistema misurato, è opportuno mettere l'accento sui due seguenti ordini di problemi.

a) Com'è già stato accennato più volte, ad esempio alla fine del § 7.3.4, a pag. 554, trasduttore e sistema misurato interagiscono energeticamente.

- Al segnale d'ingresso risulta sempre associata una certa energia che viene scambiata fra trasduttore e sistema misurato, provocando per conseguenza una perturbazione su entrambi i sistemi, in particolare sul sistema misurato.

Nell'uso di un trasduttore occorre dunque tener presente questa caratteristica, per evitare di alterare in modo inaccettabile lo stato del sistema misurato.

Come esempio si pensi ancora al trasduttore termoelettrico a cui si è fatto riferimento alla fine del § 7.3.4.

Tale trasduttore viene impiegato per rilevare la temperatura di un determinato sistema fisico e a tale scopo esso viene messo in contatto con quest'ultimo in modo da favorire

lo scambio di calore che porta i due sistemi, il trasduttore e il sistema misurato, ad assumere la stessa temperatura (entro una certa approssimazione).

È evidente che questo trasferimento di calore ha come conseguenza, fra l'altro, che la temperatura del sistema misurato sarà in generale diversa, in misura più o meno sensibile, da quella che si sarebbe avuta in assenza del trasduttore. La possibilità di trascurare o meno tale influenza dipende, ovviamente, oltre che dall'approssimazione accettata, dal rapporto fra la capacità termica della sonda e quella del sistema misurato.<sup>8</sup>

b) Un altro aspetto del funzionamento di un trasduttore riguarda le modalità energetiche con cui avviene la conversione fra i due segnali d'ingresso e d'uscita, o, più precisamente, la relazione fra l'energia associata al segnale d'ingresso e quella associata al segnale d'uscita.

- Sono chiamati di solito<sup>9</sup> *attivi* quei trasduttori nei quali l'energia entrante con il segnale d'ingresso ricompare direttamente, anche se in forma diversa e a meno delle perdite, associata al segnale d'uscita. Sono invece chiamati *passivi* quei trasduttori nei quali l'energia associata al segnale d'uscita proviene in prevalenza da una sorgente ausiliaria.

Un trasduttore attivo si comporta cioè come un *trasformatore* di energia, con un rendimento più o meno alto; un trasduttore passivo, invece, richiede un dispositivo ausiliario che effettua di solito anche un'*amplificazione*, provvedendo ad associare all'informazione un'energia a un livello decisamente maggiore di quella associata direttamente al segnale d'ingresso.

Con riferimento alle perturbazioni sul sistema misurato a cui si è accennato al punto a), è evidente che generalmente un trasduttore attivo tende a prelevare energia dal sistema misurato, mentre un trasduttore passivo tende a cederne.

Come esempi di trasduttori attivi si possono ricordare le termocoppie, di cui si è riferito diffusamente nel § 4.5 a pag. 194. La f.e.m. che si ha in uscita proviene direttamente, attraverso l'effetto Seebeck, senza sussidi energetici esterni al trasduttore, dalla differenza di temperatura che costituisce il segnale d'ingresso.

L'energia elettrica associata alla f.e.m. in uscita proviene dalla trasformazione di un ammontare equivalente di energia fornita dal sistema misurato sotto forma di calore.

Gli estensimetri elettrici a resistenza, il cui principio di funzionamento è descritto sommariamente nel § 7.1 a pag. 549, costituiscono invece un significativo esempio di trasduttori passivi. Le variazioni di resistenza, provocate dalle deformazioni meccaniche, vengono infatti messe in evidenza facendo percorrere il resistore da una corrente elettrica fornita da apposito generatore e trasformando quindi le variazioni di resistenza in variazioni di tensione. Il segnale di uscita, consistente in queste variazioni di tensione, ha dunque un contenuto energetico che proviene essenzialmente dal generatore ausiliario e non dal sistema misurato. In questo caso è il trasduttore che cede al sistema misurato l'energia termica che produce come effetto Joule.

In modo perfettamente analogo si comporta anche il trasduttore termoelettrico a resistenza più volte citato, per il quale si rimanda al § 4.5 a pag. 194.

8. La capacità termica della sonda costituisce una grandezza d'influenza nei confronti del sistema misurato nel senso che è stato definito nel § 2.8.2 a pag. 70 del vol. I TSP.

9. Questa definizione non è accettata da tutti. Ci sono autori che scambiano il significato dei termini.

- Da quanto visto appare dunque evidente che, nel caso di un trasduttore passivo, un elemento importante relativo al suo funzionamento è costituito dalla sorgente di *alimentazione ausiliaria*, cioè dal dispositivo, di solito esterno, ma che potrebbe anche essere situato all'interno del trasduttore, che consente al trasduttore stesso di avere un'uscita utilizzabile, secondo quanto precisato dalle sue specifiche di funzionamento.

### 7.3.7. Funzionamento in regime stazionario o dinamico

- Un trasduttore opera in regime *stazionario* quando le variazioni nel tempo del misurando sono tali che la funzione di conversione del trasduttore non risulta alterata in modo significativo rispetto a quella che si ha con misurando costante nel tempo. In caso contrario si dice che funziona in regime *dinamico*.

È importante sottolineare come lo stesso trasduttore, nelle stesse condizioni di funzionamento, con lo stesso tipo di ingresso, possa essere definito in regime stazionario o in regime dinamico secondo il grado di approssimazione con cui si considerano le grandezze in gioco; cioè secondo che si ritenga o no trascurabile un certo scostamento del segnale d'uscita rispetto a quello che si avrebbe con ingresso costante.

Si noti che spesso si preferisce parlare di sistema, anziché di regime, dinamico, mettendo in evidenza le caratteristiche intrinseche del sistema, anziché le sue condizioni di funzionamento.

Le cause a cui si possono addebitare queste differenze di comportamento risiedono nella natura stessa del trasduttore; si può dire, in modo molto succinto, che un trasduttore diventa sensibile al modo in cui varia il segnale d'ingresso quando diventano significativi i fenomeni di immagazzinamento di energia al suo interno, sotto qualsiasi forma si presentino (elastica, elettrostatica, magnetica, ecc.), e i conseguenti scambi energetici con l'esterno.

È a questi fenomeni energetici che si fa riferimento quando lo studio di un sistema viene svolto introducendo le *variabili di stato*, con le quali appunto si rappresentano, in modo più o meno diretto, le grandezze fisiche a cui si possono ricondurre gli scambi energetici (ad es. l'intensità di corrente in un induttore, la tensione in un condensatore, ecc.).

Come conseguenza di questa duplicità di funzionamento, se si prevede che un determinato trasduttore potrà anche funzionare in regime dinamico, esso dev'essere caratterizzato anche per questa condizione di funzionamento, fornendo un insieme di informazioni supplementari, oltre a quelle relative al funzionamento in regime stazionario.

Come esempio di condizione di funzionamento in cui non si possono trascurare le caratteristiche dinamiche, si pensi al trasduttore termoelettrico a termocoppia di cui si parla nel § 4.5, impiegato per rilevare le variazioni di temperatura di un transistor soggetto a variazioni molto rapide della potenza dissipata (ad esempio il transistor di potenza dello stadio finale di un amplificatore in banda acustica).

In una situazione di questo tipo può non risultare più trascurabile la capacità termica del trasduttore che, attraverso una determinata resistenza termica, assorbe o cede una certa quantità di calore a ogni apprezzabile variazione di temperatura, per portarsi alla stessa temperatura del sistema misurato. In modo qualitativo, si può dire che questo trasferimento di calore avviene in un intervallo di tempo non più trascurabile e produce un ritardo significativo fra le variazioni del misurando e le corrispondenti variazioni del segnale d'uscita del trasduttore.

### 7.3.8. Lo studio del comportamento dinamico

Senza assolutamente avere la pretesa di presentare, neanche in modo sintetico, una delle possibili trattazioni, cercheremo di introdurre il lettore nella problematica, allo scopo di facilitarli la comprensione dei principali termini con i quali si suole rappresentare il comportamento dinamico di un trasduttore.

7.3.8.1. *Ipotesi di linearità e sovrapposizione degli effetti.* - Innanzi tutto occorre precisare che, almeno in prima approssimazione, per semplificare lo studio si utilizza, per rappresentare il trasduttore, un *modello di tipo lineare*. Sulla definizione di linearità di un sistema si può disquisire a lungo, ma qui ci limiteremo a ricorrere, facendo riferimento alla formula 7.2, al concetto, abbastanza intuitivo, della sovrapposizione degli effetti, riguardo alla trasformazione fra l'ingresso  $x(t)$  e l'uscita  $y(t)$ .

- Diremo che un sistema è lineare quando, avendo scomposto il segnale d'ingresso  $x(t)$  nella somma di due segnali  $x_1(t)$  e  $x_2(t)$ , l'uscita  $y(t)$  corrispondente a  $x(t)$  è ottenibile come somma delle due uscite  $y_1(t)$  e  $y_2(t)$  corrispondenti rispettivamente a  $x_1(t)$  e  $x_2(t)$ .  
In formula, con riferimento alla (7.2):

$$g[x_1(t) + x_2(t)] = g[x_1(t)] + g[x_2(t)]. \quad (7.5)$$

L'ipotesi di linearità non è soltanto una semplificazione per la trattazione teorica, ma consente di impiegare una metodologia di analisi, basata appunto sulla sovrapposizione degli effetti, che si rivela preziosa anche sotto l'aspetto sperimentale.

- In sintesi, precisato il campo di variabilità di tutti i possibili segnali di ingresso, la funzione del tempo che costituisce un qualsiasi segnale d'ingresso può essere scomposta in una somma di funzioni appartenenti a un'unica famiglia: il comportamento del trasduttore è dunque studiato con riferimento a questa famiglia di funzioni.

Questa scomposizione si può fare teoricamente in infiniti modi diversi. Con la terminologia dell'analisi funzionale, si tratta di trovare una *base* nello spazio degli ingressi, cioè di trovare una famiglia di funzioni tali che una qualunque funzione possa essere ottenuta combinando linearmente le funzioni che costituiscono la base.

I tipi di funzione più comunemente usati per effettuare la decomposizione sono quelle sinusoidali (la ben nota decomposizione di Fourier) e quelle a gradino. Corrispondentemente, si analizza la risposta del trasduttore a segnali sinusoidali di varia frequenza, oppure la risposta al gradino.

Avendo assunto un determinato modello matematico a rappresentare il trasduttore, lo studio può essere sviluppato sia per via teorica, sia per via sperimentale. In ogni caso resta la necessità di saper interpretare i risultati, per adattarli al caso in cui l'ingresso è di tipo qualunque, entro il campo di variabilità previsto.

7.3.8.2. *Un modello matematico semplificato.* - Daremo ora qualche cenno al modo in cui di solito si imposta il modello matematico che rappresenta il trasduttore; con esso si può sviluppare uno studio teorico di prima approssimazione e ad esso si può comunque appoggiare l'interpretazione di eventuali risultati sperimentali. Un sistema lineare interessato da grandezze variabili in modo continuo (come si ha nella quasi totalità dei tipi di trasduttori considerati) viene di regola analizzato con gli strumenti dell'analisi differenziale.

Non tenendo conto delle grandezze d'influenza e supponendo adeguato un modello

a *parametri concentrati*,<sup>10</sup> la relazione fra l'ingresso  $x(t)$  e l'uscita  $y(t)$  può essere scritta in generale nella forma

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t), \end{aligned} \quad (7.6)$$

dove di solito si ipotizza che il sistema sia *invariante* nel tempo e quindi che i coefficienti  $a_i$  e  $b_i$  siano costanti.

La relazione (7.6) è un'equazione differenziale in  $y(t)$  di ordine  $n$  e mette in evidenza che in un certo istante  $t$  l'uscita  $y(t)$  non dipende soltanto dal valore  $x(t)$  dell'ingresso nello stesso istante, ma anche dalle sue prime  $m$  derivate (si noti che, poiché si ha  $a$  che fare con un trasduttore reale, risulta sempre essere  $n > m$ , cioè il sistema è sempre *strettamente proprio*).

Per ritornare sull'interpretazione di tipo energetico a cui si è accennato nel § 7.3.6, si può dire che l'equazione differenziale di ordine  $n$  tiene conto di  $n$  elementi interni al trasduttore, distinguibili fra loro mediante rilievi esterni, capaci di scambiare energia con l'esterno. In termini diversi, con riferimento alle variabili di stato di cui si è accennato nel paragrafo citato, la relazione (7.6) corrisponde a postulare l'individuazione di  $n$  variabili di stato.

7.3.8.3. *La risposta a un determinato ingresso.* - Il calcolo della risposta  $y(t)$  a un determinato ingresso  $x(t)$ , basandosi sull'equazione (7.6), può essere effettuato se sono noti:

- l'ingresso  $x(t)$  con le sue  $m$  prime derivate;
- il sistema, cioè gli  $n$  coefficienti  $a_i$  (degli  $n + 1$  coefficienti  $a_i$  soltanto  $n$  sono indipendenti) e gli  $m + 1$  coefficienti  $b_i$ ;
- le condizioni iniziali, cioè lo stato del sistema all'istante in cui viene applicato l'ingresso, precisato fornendo il valore iniziale  $y(0)$  dell'uscita e delle sue prime  $n - 1$  derivate.

Fra i diversi metodi per risolvere la (7.6), di cui si possono avere ampie notizie in un qualunque manuale di matematica,<sup>11</sup> verrà ora fatto cenno ad alcuni fra i più noti.

a) L'equazione differenziale (7.6) può essere risolta integrandola direttamente; si perviene a un'espressione di  $y(t)$  che può essere scomposta in due parti:

$$y(t) = y_f(t) + y_i(t) \quad (7.7)$$

Il primo addendo  $y_f(t)$  viene chiamato di solito risposta in *evoluzione forzata* e corrisponde alla sola applicazione dell'ingresso  $x(t)$ , essendo tutti nulli i valori dei parametri che definiscono le condizioni iniziali; il secondo addendo viene chiamato

10. Al modello a *parametri concentrati* si contrappone il modello a *parametri distribuiti*: il primo corrisponde a descrivere il sistema mediante un numero finito di variabili di stato (equazioni differenziali a derivate ordinarie); il secondo invece ne richiede un numero infinito (equazioni differenziali a derivate parziali). In breve, si può dire che un modello a parametri concentrati è adeguato, quando le velocità di variazione dei segnali in gioco sono trascurabili rispetto alla velocità di propagazione dei segnali stessi all'interno del sistema; altrimenti bisogna ricorrere a un modello a *parametri distribuiti*.

11. Ad esempio, il «Manuale di matematica» di R. Faure, A. Kaufmann e M. Denis-Papin, edito da ISEDI (Milano) nel 1971; oppure, di V. I. Smirnov, il «Corso di matematica superiore II», Editori Riuniti (Roma), 1977.

risposta in *evoluzione libera* e coincide con l'evoluzione dell'uscita, senza alcun ingresso applicato, a partire dalle condizioni iniziali prefissate.

La risposta in evoluzione forzata, a sua volta, viene spesso scomposta in due termini, uno  $y_{fr}(t)$ , detto di *regime* (o permanente) e l'altro,  $y_{tr}(t)$  detto *transitorio*, così chiamati perché sotto certe ipotesi, soddisfatte nei trasduttori reali, il termine transitorio si esaurisce in un tempo finito e la risposta viene a coincidere con il termine di regime. La (7.7) si può cioè ancora scrivere:

$$y(t) = y_{fr}(t) + y_{tr}(t) + y_i(t). \quad (7.8)$$

Nel linguaggio dell'analisi differenziale e con riferimento alla (7.7) si può dire che la risposta in *evoluzione forzata*  $y_f(t)$  coincide con l'*integrale particolare* che soddisfa la (7.6) quando le condizioni iniziali sono tutte nulle, mentre la risposta in *evoluzione libera*  $y_l(t)$  coincide con l'*integrale generale dell'omogenea associata*, particolarizzato in modo che da solo soddisfi alle condizioni iniziali.

b) L'equazione differenziale (7.6) si può risolvere anche ricorrendo alla trasformazione di Laplace,<sup>12</sup> che presenta il notevole vantaggio di trasformare l'equazione differenziale in equazione algebrica. Come caso particolare, considerando nulli tutti i valori che definiscono le condizioni iniziali, dalla (7.6) si ottiene:

$$Y(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} X(s), \quad (7.9)$$

dove:  $s = \sigma + j\omega$  è la variabile complessa della trasformata di Laplace;  $X(s)$  e  $Y(s)$  sono le L-trasformate rispettivamente dell'ingresso  $x(t)$  e dell'uscita  $y(t)$ .<sup>13</sup>

La (7.9) fornisce la L-trasformata dell'uscita; per passare alla funzione del tempo basta effettuare la sua antitrasformazione. Si noti che, essendosi considerato il caso particolare di condizioni iniziali nulle, la antitrasformazione della (7.9) fornisce quella che è stata chiamata la risposta in evoluzione forzata  $y_f(t)$ .

c) Un altro metodo di risoluzione della (7.6), particolarmente adatto all'uso di calcolatori numerici, utilizza il concetto di variabili di stato a cui si è accennato nel § 7.3.7 e si basa sulla possibilità di ridurre un'equazione differenziale di ordine  $n$  in un sistema di  $n$  equazioni differenziali di ordine uno.<sup>14</sup>

7.3.8.4. *Lo studio generale delle caratteristiche di un trasduttore.* - Nel paragrafo precedente si è accennato ai tre metodi più usati per calcolare la risposta di un trasduttore a un particolare ingresso. In realtà, di solito, più che alla soluzione di

12. Se si vuole approfondire l'argomento si veda, ad esempio, il manuale già citato nella nota 11.

13. Si è ovviamente supposto che, come accade praticamente sempre nei casi reali, esista la L-trasformata  $X(s)$  dell'ingresso  $x(t)$ . Anzi, a questo proposito, può valer la pena sottolineare che, mentre per lo studio generale delle caratteristiche del trasduttore (di cui si darà qualche cenno nel § 7.3.7.4) si preferisce parlare di risposta in frequenza, facendo quindi concettualmente riferimento alla trasformazione di Fourier, quando si tratta di calcolare l'uscita corrispondente a un determinato ingresso, di espressione analitica nota, di regola si dà la preferenza alla trasformazione di Laplace, proprio perché la sua applicazione è possibile anche a funzioni non trasformabili secondo Fourier.

14. È opportuno sottolineare come l'impiego delle variabili di stato costituisca uno strumento di importanza fondamentale per lo studio dei sistemi dinamici, specialmente se si tratta di più sistemi interconnessi, la cui analisi richiede l'uso di un calcolatore.

Una buona trattazione dell'argomento si può trovare nel libro di D. G. Luenberger « Introduction to Dynamic Systems » Ed. J. Wiley, New York, 1979.

questo problema, si è interessati a scoprire le caratteristiche strutturali del trasduttore, espresse nel modo più generale possibile e dedotte, o direttamente dall'equazione differenziale (ad esempio considerandone i coefficienti), o da parametri legati in maniera semplice alla stessa.

Per buona parte si tratta di problemi affrontati nell'ambito della teoria dei sistemi e dei controlli automatici. È però importante osservare che nel nostro caso l'angolo di visuale è alquanto diverso, essendo rivolto essenzialmente alle caratteristiche metrologiche (di cui si parlerà nel § 7.4), anziché alle caratteristiche connesse con i problemi tipici dei controlli automatici, primi fra tutti quelli relativi alla stabilità del controllo.

#### A) L'analisi nel tempo: i modi.

Analizzando la soluzione scomposta nella forma (7.8), si può in un certo senso affermare che, mentre l'andamento nel tempo assunto dal termine di regime  $y_{fr}(t)$  della risposta in evoluzione forzata dipende sostanzialmente, come forma, dal segnale di ingresso, la risposta in evoluzione libera  $y_l(t)$  e il transitorio  $y_{tr}(t)$  della risposta in evoluzione forzata sono costituiti da funzioni del tempo dello stesso tipo, che dipendono esclusivamente dalle caratteristiche strutturali del trasduttore e quindi del sistema che lo rappresenta.

Poiché, come si è già detto, le informazioni sulla risposta in evoluzione libera provengono dalla soluzione dell'equazione omogenea associata, a questa si fa spesso riferimento per mettere in evidenza certi comportamenti tipici del sistema, parlando di *modi* della risposta, o del sistema.

Più precisamente, considerando l'equazione omogenea associata

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = 0, \quad (7.10)$$

la soluzione si determina introducendo la corrispondente equazione caratteristica

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0, \quad (7.11)$$

che è di grado  $n$  e ha  $r$  radici  $p_i$ . Queste radici sono reali o a coppie di complesse coniugate e ciascuna ha molteplicità  $\mu_i$  (la somma di tutti i  $\mu_i$  è uguale ad  $n$ ). L'integrale generale è costituito da una somma di termini che possono essere divisi in due diverse categorie:

— i termini che corrispondono a una radice reale  $p_i = -1/\tau_i$  di molteplicità  $\mu_i$ , che sono del tipo

$$(A_{\mu_i-1} t^{\mu_i-1} + \dots + A_1 t + A_0) e^{-\frac{t}{\tau_i}}; \quad (7.12)$$

— i termini che corrispondono a una coppia  $p_i$  e  $p'_i$  di radici complesse coniugate di molteplicità  $\mu_i$ , che sono del tipo

$$(M_{\mu_i-1} t^{\mu_i-1} + \dots + M_1 t + M_0) e^{-\frac{t}{\tau_i}} \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (7.13)$$

dove  $\tau_i$  e  $\omega_i$  sono legati univocamente alle due radici  $p_i$  e  $p'_i$  ( $-1/\tau_i$  è la parte reale,  $\omega_i$  è il coefficiente dell'immaginario di  $p_i$ ).

Si noti che i vari coefficiente  $A_i$  ed  $M_i$  e gli sfasamenti  $\varphi_i$  sono introdotti per ottenere che la combinazione lineare dei vari termini soddisfi alle condizioni iniziali imposte.

- Ciascuno degli addendi che costituiscono l'integrale generale dell'equazione omogenea associata viene dunque chiamato *modo* della risposta, o del sistema. Sono chiamati *modi aperiodici* quelli che corrispondono alle radici reali e sono quindi del tipo (7.12), *modi pseudoperiodici* quelli che corrispondono a coppie di radici complesse coniugate e sono quindi del tipo (7.13).

Si noti che in ciascuna delle due espressioni (7.12) e (7.13) sono riportati  $\mu_i$  modi, pari al grado di molteplicità delle radici considerate, tutti dello stesso tipo.

### B) La risposta in frequenza e la funzione di trasferimento.

Nel § 7.3.8.1 si è accennato alla possibilità di studiare le caratteristiche di un trasduttore utilizzando come segnali di ingresso funzioni del tempo appartenenti a una determinata classe che sia una base nello spazio degli ingressi. Fra queste classi di funzioni si sono citate le sinusoidali come particolarmente adatte allo scopo.<sup>15</sup> È sotto questa luce che si può guardare quel particolare modo di analizzare il comportamento di un trasduttore i cui risultati sono sintetizzati sotto il nome di *risposta in frequenza*.

Appoggiandosi sempre al modello espresso con la (7.6), si ricava che, con un ingresso sinusoidale, l'uscita può essere considerata costituita dalla somma di una funzione ancora sinusoidale, isofrequenziale con l'ingresso (la risposta a regime), e un termine che, nei trasduttori reali, tende a zero in un tempo finito. Una situazione di questo tipo è stata illustrata schematicamente nella fig. 7-3, che si riferisce a un determinato trasduttore.

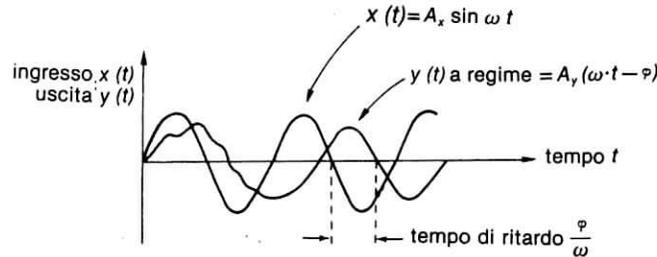


Fig. 7-3. Risposta di un trasduttore a un ingresso sinusoidale  $x(t)$ . L'uscita  $y(t)$  è costituita dalla somma di una funzione sinusoidale isofrequenziale con l'ingresso e sfasata in ritardo di un angolo  $\varphi$  (la risposta a regime) e di una funzione che tende a zero in un tempo finito (il termine transitorio).

Prendendo in esame solamente la risposta a regime, al variare della frequenza, a parità di ampiezza della sinusoidale di ingresso, la sinusoidale in uscita varia in ampiezza e fase.

- È chiamata *risposta in frequenza* del trasduttore l'insieme delle due curve che forniscono, al variare della frequenza dell'ingresso, mantenuto costante in ampiezza e di valore unitario, le variazioni dell'ampiezza e dello sfasamento dell'uscita.

15. La funzione sinusoidale costituisce un ingresso particolarmente comodo, perché le sue derivate, di qualunque ordine, sono ancora funzioni sinusoidali e la risoluzione della (7.6) diventa estremamente facile.

Su questa peculiarità degli ingressi di tipo esponenziale (le funzioni sinusoidali non sono altro che esponenziali con esponente complesso) si basa il metodo operazionale.

Le due curve che danno la risposta in frequenza non sono altro che il modulo e la fase della cosiddetta *funzione di trasferimento di Fourier*  $G(\omega)$ , cioè del rapporto fra le trasformate di Fourier<sup>16</sup> dell'uscita,  $Y(\omega)$ , e dell'ingresso,  $X(\omega)$ :

$$G(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}, \quad (7.14)$$

dove con  $\omega$  si è indicata la pulsazione<sup>17</sup> della sinusoidale.

È evidente che la funzione di trasferimento, poiché contiene tutti i coefficienti  $a_i$  e  $b_i$  che compaiono nell'equazione differenziale di partenza (7.6), racchiude in sé anche tutte le informazioni relative alla struttura del trasduttore e costituisce dunque uno strumento di studio di primaria importanza.

Senza volere assolutamente approfondire un argomento così vasto, a conclusione di questo rapido cenno, può essere interessante sottolineare come la parte più caratteristica della funzione di trasferimento sia costituita dal suo denominatore, le cui radici, che sono chiamate i *poli*<sup>18</sup> del sistema, consentono di calcolare facilmente la risposta in evoluzione libera, cioè i vari *modi* di cui si è parlato nel paragrafo precedente.

Un esempio di risposta in frequenza, ricavato sperimentalmente su un determinato trasduttore, è riportato nella fig. 7-4.

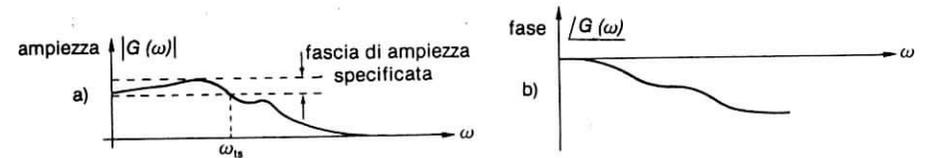


Fig. 7-4. Curve di risposta in frequenza di un trasduttore.

a) curva di ampiezza:  $|G(\omega)|$  è il modulo di  $G(\omega)$ ;

b) curva di fase:  $\arg G(\omega)$  è la fase di  $G(\omega)$ .

$G(\omega)$  la funzione di trasferimento di Fourier del trasduttore, dove con  $\omega$  si è indicata la *pulsazione*, legata alla *frequenza*  $f$  dalla relazione:  $\omega = 2\pi f$ .

Le curve riguardano un determinato trasduttore, ma si possono notare le due seguenti caratteristiche, comuni a tutti i trasduttori reali:

— da un certo valore di frequenza in poi l'ampiezza di  $G(\omega)$  è nulla, cioè l'uscita è sempre nulla qualunque sia l'ampiezza dell'ingresso;

— la fase di  $G(\omega)$  è sempre negativa, cioè l'uscita è sempre in ritardo rispetto all'ingresso.

Sulla curva di ampiezza è poi stato messo in evidenza come, avendo specificato una certa fascia di tolleranza, la curva si mantenga entro questa fascia in un certo campo di frequenza (da 0 a  $\omega_{ts}$ ); per il significato di questa precisazione si vedano il § 7.3.8.5, sulle condizioni di non distorsione, e le figure 7-6 e 7-7.

Si noti che, poiché le curve di risposta in frequenza possono anche essere ricavate sperimentalmente con opportune misure sull'ingresso e sull'uscita, esse possono essere fornite per un qualunque trasduttore. In realtà è importante osservare come il loro significato e, quindi, la loro utilizzabilità, siano legati in modo essenziale

16. La trasformazione di Fourier è definita in modo del tutto autonomo, ma può essere messa in relazione con la trasformazione di Laplace, quando si particolarizzi la variabile complessa  $s$  introdotta nella formula (7.9), ponendo  $\sigma = 0$ , e quindi  $s = j\omega$ , e tenendo in debito conto le questioni relative all'esistenza degli integrali che definiscono le trasformazioni e le antitrasformazioni.

17. La pulsazione  $\omega$  viene correntemente, anche se in modo scorretto, chiamata frequenza; in realtà la frequenza  $f$  è legata alla pulsazione  $\omega$  dalla nota relazione:

$$\omega = 2\pi f.$$

18. Le radici del numeratore della funzione di trasferimento sono chiamate *zeri* del sistema.

alla possibilità di applicare la sovrapposizione degli effetti, cioè alla validità dell'ipotesi di linearità.

### C) La risposta al gradino.

Ritornando ancora una volta a quanto affermato nel § 7.3.8.1 sulla sovrapposizione degli effetti, daremo ora qualche breve cenno allo studio del trasduttore effettuato mediante la risposta al gradino (chiamata a volte *regime indiciale*), cioè la risposta del sistema a una funzione che è nulla per  $t < 0$  e assume un valore finito e costante per  $t \geq 0$ .

- Chiamata  $w(t)$  la risposta al gradino di ampiezza unitaria, la risposta  $y(t)$  a un qualunque ingresso  $x(t)$  è data da una formula che, nel caso particolare in cui all'istante iniziale, per  $t = 0$ , sono nulle l'uscita  $y(0)$  e tutte le sue derivate, ha la seguente espressione (formula di Vaschy):

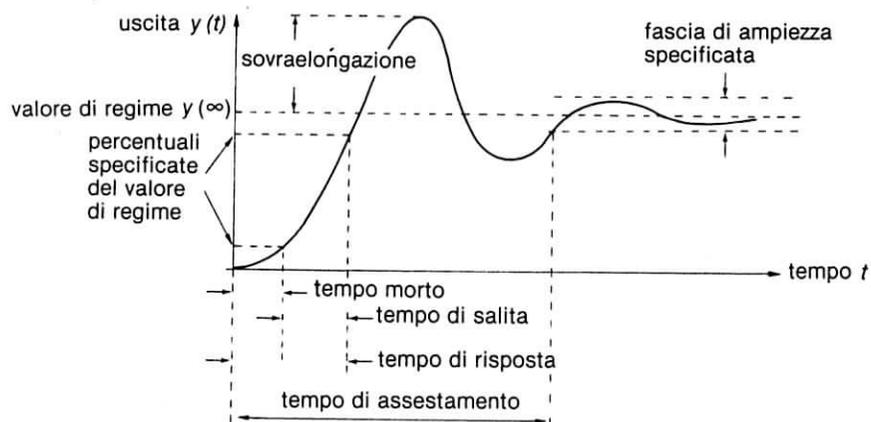
$$y(t) = x(0)w(t) + \int_0^t w(t - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau, \quad (7.15)$$

dove con  $x(0)$  si è indicato il valore di  $x(t)$  nell'istante iniziale e con  $\dot{x}(t)$  si è indicata la derivata prima di  $x(t)$ .

Come è facilmente intuibile, la stessa risposta  $w(t)$  al gradino unitario ha una sua significatività generale e può fornire interessanti indicazioni sulle caratteristiche strutturali del trasduttore.

Nel § 7.3.8.6 verranno presentate le risposte al gradino di alcuni fra i principali tipi di sistemi dinamici, mentre nella fig. 7-5 è stata schematizzata una tipica risposta, allo scopo di illustrare le definizioni di alcuni parametri interessanti. La figura è sufficientemente chiara da non richiedere spiegazioni. Le definizioni saranno comunque riprese nel § 7.4.6.2, quando si tratterà dei parametri usualmente forniti per caratterizzare il comportamento dinamico di un trasduttore.

Fig. 7-5 Risposta al gradino di un trasduttore, con la definizione di alcuni parametri. Il valore della soglia per la definizione del tempo morto è in generale specificato in valore assoluto; i valori delle varie fasce necessarie alla definizione del tempo di salita, del tempo di risposta e del tempo di assestamento sono di solito espressi come frazioni (o percentuali) del valore di regime.



### 7.3.8.5. Le condizioni di non distorsione.

- Si può dire in modo qualitativo che un trasduttore *distorce* quando la forma della funzione del tempo che costituisce l'uscita risulta alterata in modo apprezzabile rispetto a quella dell'ingresso. Si noti che viene considerata soltanto la forma delle funzioni, in quanto le scale possono essere diverse, e nel caso dei trasduttori di cui si tratta in questa sede, la stessa natura fisica delle grandezze in gioco risulta di regola mutata fra l'ingresso e l'uscita.

Una definizione quantitativa del *grado di distorsione* si può dare in modi molto diversi,<sup>19</sup> ma qui non si ritiene opportuno affrontare l'argomento, preferendo dare qualche cenno di carattere generale sul fenomeno.

Rimanendo nel campo dei sistemi lineari (quelli non lineari distorcono sempre), il modo forse più intuitivo per comprendere il fenomeno è quello di ricorrere all'analisi in frequenza. In questo modo non si potrà dar conto delle distorsioni presenti in transitorio, cioè nella risposta in evoluzione libera  $y_l(t)$  e nel transitorio della risposta in evoluzione forzata  $y_{ft}(t)$ , ma nella pratica interessano di solito le distorsioni della risposta a regime, che corrisponde appunto al termine di regime  $y_{rr}(t)$  della risposta in evoluzione forzata.

Con queste premesse, le curve della risposta in frequenza di cui si è parlato nel § 7.3.8.4 forniscono indicazioni semplici e immediate.

Infatti, si supponga di avere un ingresso  $x(t)$  scomponibile in un numero discreto di sinusoidi  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ecc. e si considerino le corrispondenti uscite  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ , ecc.

- Affinché il trasduttore non distorca devono essere verificate le due seguenti condizioni:
  - a) Le ampiezze delle varie sinusoidi d'uscita devono stare negli stessi rapporti in cui stanno le ampiezze delle sinusoidi d'entrata. Se, ad esempio,  $x_1(t)$  ha ampiezza doppia di  $x_2(t)$ , anche  $y_1(t)$  deve avere ampiezza doppia di  $y_2(t)$ .
  - b) Lo sfasamento temporale fra le varie sinusoidi d'uscita deve coincidere con quello delle corrispondenti sinusoidi d'ingresso. Se, ad esempio,  $x_2(t)$  è in ritardo di un tempo  $\tau$  rispetto a  $x_1(t)$ , anche  $y_2(t)$  dev'essere in ritardo di  $\tau$  rispetto a  $y_1(t)$ .

In formula, se si considera una generica componente

$$x(t) = x_M \sin \omega t$$

e l'uscita corrispondente

$$y(t) = y_M \sin \omega(t + \tau) = y_M \sin(\omega t + \varphi),$$

con

$$\varphi = \omega \tau,$$

le due condizioni precedenti si traducono nelle due seguenti relazioni:

19. Ad esempio, supponendo un ingresso puramente sinusoidale, si può dare il cosiddetto *contenuto di armoniche*, espresso come il rapporto fra il valore efficace dell'insieme delle armoniche presenti nell'uscita e il valore efficace della fondamentale ad esse associata.

Rapporto fra le ampiezze delle componenti isofrequenziali di uscita e di ingresso, al variare di  $\omega$ ,

$$y_M(\omega)/x_M(\omega) = \text{costante} = G_0.$$

Ritardo fra le componenti isofrequenziali di uscita e di ingresso, al variare di  $\omega$ ,

$$\tau(\omega) = \text{costante} = \tau_0.$$

Relazioni che, con riferimento alla funzione di trasferimento di Fourier  $G(\omega)$ , si possono esprimere nella forma:

$$\text{Modulo di } G(\omega) = |G(\omega)| = G_0. \quad (7.16)$$

$$\text{Fase di } G(\omega) = \angle G(\omega) = \tau_0 \omega. \quad (7.17)$$

Le condizioni (7.16) e (7.17) corrispondono a chiedere che i diagrammi di modulo e di fase della funzione di trasferimento abbiano l'andamento riportato nella fig. 7-6. Si noti che, come caso particolare, la condizione (7.17) è soddisfatta anche con sfasamento nullo a tutte le frequenze.

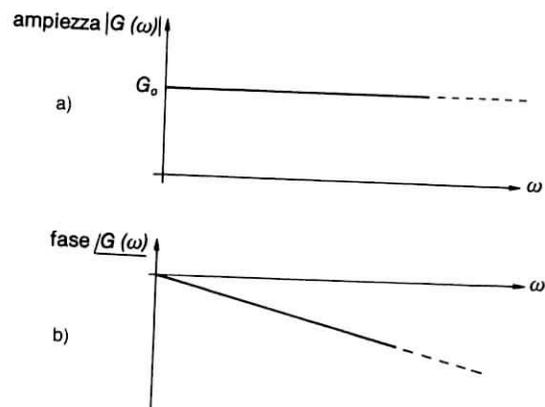


Fig. 7-6. Curve di risposta in frequenza relative a un sistema ideale non distortente. Le condizioni di non distorsione si traducono nelle due seguenti, rispettivamente sul modulo  $|G(\omega)|$  e la fase  $\angle G(\omega)$  della funzione di trasferimento di Fourier  $G(\omega)$  (si veda il § 7.3.8.5):

- a)  $|G(\omega)|$  è costante:  
 $|G(\omega)| = G_0$ ;  
 b)  $\angle G(\omega)$  è proporzionale alla pulsazione  $\omega$  attraverso il tempo di ritardo  $\tau_0$ , costante:  
 $\angle G(\omega) = \tau_0 \cdot \omega$ .

Si noti che, in un trasduttore reale (come quello di cui sono state presentate le curve di risposta nella fig. 7-4) le due curve possono essere considerate approssimate dalle curve ideali sempre soltanto in un limitato campo di frequenze.

C'è ancora da osservare che, se si volesse che il sistema non distorcesse per qualsiasi andamento di  $x(t)$ , le due curve di fig. 7-6 dovrebbero essere due semirette, cioè prolungarsi all'infinito. In realtà ogni segnale reale, scomposto secondo Fourier, esaurisce le sue componenti in un campo definito di frequenze (più rapidamente varia il segnale, più elevate sono le frequenze limite contenute); basta dunque sapere in quale campo di frequenze saranno compresi i segnali che si prevede saranno applicati all'ingresso, per avere perfettamente definito il campo nel quale devono essere soddisfatte le condizioni (7.16) e (7.17). Per definire il campo di frequenze entro il quale un determinato trasduttore non distorce in modo significativo, di solito si parla di *frequenza, o pulsazione, di taglio*, facendo riferimento al solo modulo della risposta in frequenza, salvo poi a verificare l'andamento della fase.

- Nel caso più generale, quando la curva di risposta ha l'andamento della fig. 7-7, si definiscono una *frequenza di taglio inferiore* e una *frequenza di taglio superiore* come i due valori estremi entro i quali il modulo

della risposta in frequenza non esce da una fascia prefissata, la cui larghezza dipende dall'approssimazione entro la quale si può accettare che il sistema distorca.

Quando non è specificato, il termine *frequenza di taglio* sta ad indicare la *frequenza di taglio superiore*, sottintendendo che il sistema è del tipo cosiddetto *passa-basso*, cioè tale che il campo di frequenza utile si estende fino ad  $\omega = 0$ .

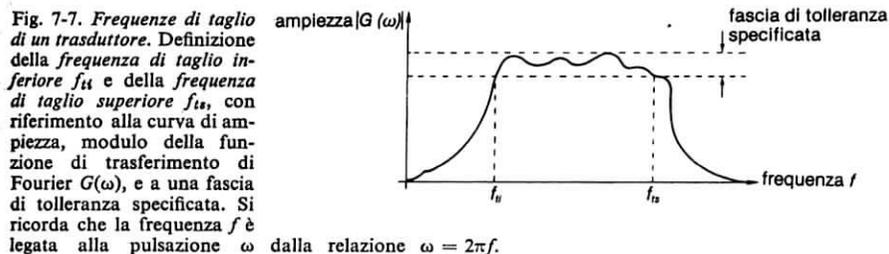


Fig. 7-7. Frequenze di taglio di un trasduttore. Definizione della frequenza di taglio inferiore  $f_L$  e della frequenza di taglio superiore  $f_H$ , con riferimento alla curva di ampiezza, modulo della funzione di trasferimento di Fourier  $G(\omega)$ , e a una fascia di tolleranza specificata. Si ricorda che la frequenza  $f$  è legata alla pulsazione  $\omega$  dalla relazione  $\omega = 2\pi f$ .

7.3.8.6. I principali tipi di sistemi dinamici. - Nel § 7.3.7 si è parlato di funzionamento in regime dinamico. Qui il termine *dinamico*, accettando la bivalenza di significato esistente nel linguaggio tecnico corrente, è riferito al trasduttore stesso, o meglio al sistema introdotto per rappresentarlo, volendo così indicare che esso, al variare del segnale d'ingresso, si comporta in modo da richiedere di essere descritto mediante un modello dinamico, cioè del tipo espresso dall'equazione (7.6). Un modo molto generale di catalogare i sistemi sotto il profilo dinamico consiste nel considerare l'ordine dell'equazione differenziale che ne costituisce il modello. Si parla così di sistemi del prim'ordine, del second'ordine, ecc., secondo che l'equazione differenziale (7.6) sia del prim'ordine, del secondo, ecc. In verità, si parla anche di sistemi di ordine zero, per i quali solo impropriamente si può dire che siano dinamici, in quanto altro non sono che sistemi nei quali l'aspetto dinamico non è significativo e la relazione fra ingresso e uscita può essere scritta nella forma (7.2), essendo la funzione  $g$  costante, comunque vari l'ingresso, ovviamente entro i limiti del normale funzionamento.

#### A) Sistemi di ordine zero.

- Si definiscono dunque di ordine zero quei sistemi che si possono sempre considerare funzionanti in regime stazionario, secondo la definizione che è stata data nel § 7.3.7.

Come esempio si può presentare un trasduttore di posizione a potenziometro (di cui si parlerà ancora a pag. 576), nel quale il campo di variazione dell'ingresso sia limitato a funzioni del tempo che non si evolvono troppo rapidamente.

Nella fig. 7-8 sono presentati schematicamente, sia il principio di funzionamento del trasduttore, sia l'andamento del segnale d'ingresso, lo spostamento  $x(t)$ , e del segnale d'uscita, la tensione  $v(t)$ .

L'esempio consente di sottolineare come la scelta del modello non sia affatto univoca, dato il trasduttore, ma dipenda sia dal tipo di segnale elaborato, sia dalla precisione con cui se ne vuole rappresentare il comportamento. Infatti si può notare che il modello scelto a rappresentare il potenziometro non tiene conto, né dell'eventuale carico applicato ai morsetti che forniscono la  $v(t)$ , né delle induttanze e capacità parassite che, al di là di una determinata approssimazione, si devono considerare associate alla resistenza. Se si devono prendere in considerazione

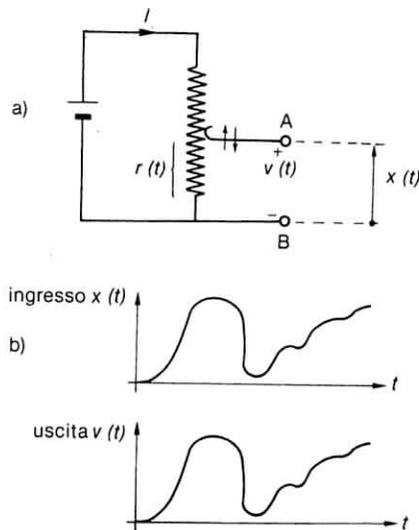


Fig. 7-8. Esempio di risposta di un trasduttore rappresentato con un sistema di ordine zero. Si è considerato un trasduttore di spostamenti lineari  $x(t)$ , basato sul principio del potenziometro a resistenza.

a) Schema di principio del trasduttore. Si suppone che ai morsetti di uscita  $A$  e  $B$  non sia collegato alcun carico, cioè che non si eroghi corrente.

b) Andamento dell'ingresso  $x(t)$  (la posizione del cursore) e della corrispondente uscita  $v(t)$  (la tensione ai morsetti  $A$  e  $B$ ).

Come è precisato nel § 7.3.8.6, si è supposta sufficientemente bassa la velocità di spostamento del cursore in modo da poter rappresentare il trasduttore con un sistema di ordine zero.

$$\left. \begin{aligned} v(t) &= I \cdot r(t) \\ r(t) &= k' \cdot x(t) \end{aligned} \right\} v(t) = I \cdot k' \cdot x(t) = k \cdot x(t)$$

questi elementi, perché troppo rilevanti rispetto alla precisione richiesta e alla velocità di variazione del segnale di ingresso, si è obbligati a costruire un modello di ordine certamente diverso da zero, cioè il sistema si rivela dinamico in senso proprio.

### B) Sistemi del primo ordine.

La funzione di trasferimento di un sistema del primo ordine, espressa in funzione della variabile  $\omega$ , è del tipo

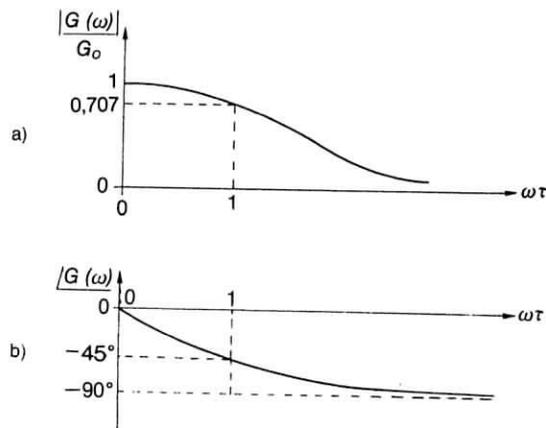
$$G(\omega) = \frac{G_0}{1 + j\omega\tau}, \quad (7.18)$$

dove  $G_0$  è la risposta a un ingresso costante di ampiezza unitaria e  $\tau$  è la costante di tempo del sistema.

Fig. 7-9. Curve di risposta in frequenza di un sistema del prim'ordine, con riferimento alla funzione di trasferimento di Fourier  $G(\omega)$ .

a) Curva di ampiezza (modulo della funzione di trasferimento).

b) Curva di fase (fase della funzione di trasferimento).  
Le grandezze coordinate sono state rese adimensionali normalizzando le pulsazioni  $\omega$  mediante la costante di tempo  $\tau$  (si veda il § 7.3.8.6) e le ampiezze  $|G(\omega)|$  mediante il valore  $G_0$  dell'ampiezza per pulsazione nulla.



L'andamento del modulo e della fase di  $G(\omega)$ , cioè della risposta in frequenza, è stato riportato nella fig. 7-9, dove, per maggior generalità, le ascisse sono state normalizzate riportando la grandezza  $\omega\tau$  e le ordinate della curva di modulo sono state normalizzate riportando il rapporto  $|G(\omega)/G_0|$ .

Dalla formula (7.18) e dalla fig. 7-9, secondo quanto si è visto nel § 7.3.8.5, si deduce che il sistema inevitabilmente *distorce*. Questa distorsione può però in pratica essere accettabile, o addirittura, in presenza di altri disturbi o di inesattezze nel modello utilizzato, non essere avvertibile, se non supera certi limiti che dipendono dallo specifico caso in oggetto.

È interessante notare che la pulsazione di taglio  $\omega_t$ , come definita nel § 7.3.8.5, fissata con riferimento a una fascia di 3 dB,<sup>20</sup> ha il valore

$$\omega_t = \frac{1}{\tau},$$

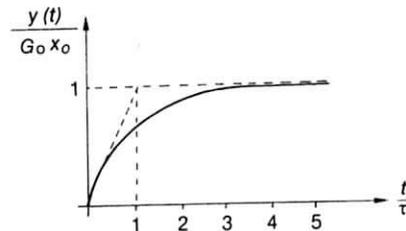
cioè, nel diagramma di fig. 7-9, corrisponde all'ascissa  $\omega\tau = 1$ . La risposta a un gradino di ampiezza  $x_0$  ha l'espressione

$$y(t) = G_0 x_0 (1 - e^{-t/\tau}) \quad (7.19)$$

e il suo andamento è riportato nella fig. 7-10, dove si è effettuata la normalizzazione delle ascisse, riportando  $\frac{t}{\tau}$ , e delle ordinate, riportando  $\frac{y(t)}{G_0 x_0}$ .

Fig. 7-10. Risposta al gradino di un sistema del prim'ordine. Il gradino di ampiezza  $x_0$ , si suppone applicato all'istante  $t = 0$ .

Le grandezze coordinate sono state rese adimensionali normalizzando il tempo  $t$  mediante la costante di tempo  $\tau$  del sistema (si veda il § 7.3.8.6) e le ampiezze  $y(t)$  mediante il valore di regime  $G_0 x_0$ . Si noti come l'intersezione fra la tangente alla curva nell'origine e l'asintoto a cui tende la curva stessa corrisponda al valore  $\frac{t}{\tau} = 1$ .



Con riferimento alle definizioni date nel § 7.3.8.4 si nota come la risposta al gradino metta in evidenza le caratteristiche dell'unico modo del sistema (si tratta di un sistema del prim'ordine), che risulta essere del tipo *aperiodico*. Il valore  $\tau$  è chiamato costante di tempo del sistema.

Quanto ai diversi parametri definiti nel § 7.3.8.4 con riferimento alla fig. 7-5, la sovralongazione è nulla, mentre il tempo di risposta e il tempo di assestamento possono essere portati a coincidere con la costante di tempo specificando in modo opportuno le varie fasce.

Sia dalla risposta in frequenza sia da quella al gradino appare come l'uscita tenda a seguire l'andamento dell'ingresso con un ritardo che è sostanzialmente legato alla costante di tempo  $\tau$ . Questo comportamento, e il legame con  $\tau$ , è messo bene in evidenza se si considera la risposta a una rampa, illustrata nella fig. 7-11. Come si vede, dopo un transitorio, l'uscita assume lo stesso andamento dell'ingresso, ma con un ritardo costante che ha proprio il valore  $\tau$ .

20. La definizione del dB come unità di misura dei rapporti è data al punto 119.D.A della tabella B, a pag. 238 del Vol. 1 TSP. 3 dB corrispondono a circa il 30%. Per la definizione e l'uso di unità logaritmiche si veda anche il § 6.2, a pag. 507.

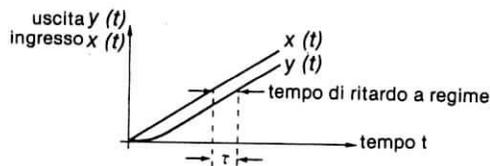
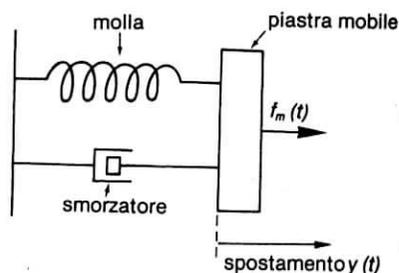


Fig. 7-11. Risposta alla rampa di un sistema del prim'ordine. A regime l'uscita  $y(t)$  assume lo stesso andamento nel tempo dell'ingresso  $x(t)$ , salvo un ritardo pari alla costante di tempo  $\tau$  del sistema (si veda il § 7.3.8.6.).

Come esempio di un semplice sistema del primo ordine, nella fig. 7-12 è stato abbozzato lo schema di principio di un trasduttore forza/spostamento.

Fig. 7-12. Esempio di trasduttore rappresentabile con un sistema del prim'ordine, se si trascura la massa della piastra mobile, oppure del second'ordine, se non la si trascura. Per semplicità si è presentato un trasduttore con uscita non elettrica: si tratta di un trasduttore avente come ingresso la forza  $f_m(t)$  e come uscita lo spostamento  $y(t)$ . La possibilità di rappresentare il trasduttore con un sistema del primo o del second'ordine dipende, come è detto nel § 7.3.8.6, dalla velocità di variazione dell'ingresso.



Questi trasduttori sono molto diffusi (le bilance a molla non sono altro che trasduttori di questo tipo) e non sempre le forze o pressioni<sup>21</sup> in gioco variano così lentamente che il trasduttore possa considerarsi funzionante in regime stazionario.

Si pensi ad esempio allo studio dell'andamento nel tempo delle pressioni che si producono all'interno di un cilindro di un motore a combustione interna; oppure alle pressioni che si esercitano sulle pareti di una condotta al variare delle condizioni di moto del fluido al suo interno; oppure ancora agli studi di fluido-dinamica relativi all'attrito del mezzo su veicoli di vario genere (in aria o in acqua). In queste applicazioni i trasduttori sono soggetti a ingressi variabili così rapidamente che non se ne può più trascurare le caratteristiche dinamiche; secondo le esigenze, vengono dunque rappresentati da sistemi del prim'ordine, come si sta esemplificando in questo punto, o del second'ordine, come verrà presentato nel punto seguente, utilizzando ancora, come esempio, lo stesso tipo di trasduttore.

Prima di passare alla sua descrizione, osserviamo ancora che il trasduttore presentato nella fig. 7-12 ha l'ingresso e l'uscita entrambi meccanici. In realtà, per le ragioni di cui si è parlato nel § 7.1, trasduttori siffatti costituiscono di solito il primo elemento (che a volte viene appunto detto *ensore primo*) di una catena di trasduttori che producono, come ultima uscita, una grandezza elettrica. L'esempio è stato scelto perché si presenta di facile analisi; altri tipi di trasduttori di forza saranno presentati nel § 7.5.

Il trasduttore schematizzato in fig. 7-12 consiste principalmente in una piastra mobile, di massa  $M$  trascurabile, a cui è applicata la forza esterna  $f_m(t)$ , che ne costituisce l'ingresso. La piastra è collegata a un supporto mediante una molla, anch'essa di massa trascurabile, il cui allungamento  $y(t)$  rispetto alle condizioni di riposo<sup>22</sup> costituisce l'uscita del sistema. L'allungamento  $y(t)$  è legato alla forza  $f_m(t)$  applicata alla molla stessa dalla formula

$$f_m(t) = k y(t),$$

21. Di solito i trasduttori di forza possono essere facilmente trasformati in trasduttori di pressione facendo in modo che la pressione da rilevare si eserciti su una superficie di area nota.

dove  $k$  è la costante elastica della molla, supposta invariante nel campo di funzionamento del trasduttore.

La parte mobile del sistema presenta anche uno smorzamento non trascurabile (in certe applicazioni accentuato artificialmente), rappresentato in figura da uno smorzatore a fluido, che produce una forza  $f_s(t)$  che si può assumere proporzionale alla velocità della piastra secondo l'espressione

$$f_s(t) = k_s \frac{dy(t)}{dt},$$

dove  $k_s$  è il coefficiente di smorzamento del sistema.

L'equilibrio dinamico del sistema così descritto è espresso dall'equazione

$$k_s \frac{dy(t)}{dt} + k y(t) = f_m(t)$$

che, come si vede, rappresenta un sistema del prim'ordine la cui funzione di trasferimento di Fourier è

$$G(\omega) = \frac{1/k}{1 + j\omega k_s/k}.$$

Il valore della funzione di trasferimento per  $\omega = 0$  è

$$G(0) = G_0 = 1/k,$$

mentre la costante di tempo  $\tau$  è

$$\tau = k_s/k.$$

### C) Sistemi del secondo ordine.

La funzione di trasferimento di Fourier di un sistema del second'ordine è del tipo

$$G(\omega) = \frac{G_0}{1 + j \frac{2z\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (7.20)$$

Si noti che nella (7.20) si è supposto che non vi siano zeri (il numeratore è una costante). Tale ipotesi semplificatrice, spesso verificata, non modifica in modo sostanziale la struttura del sistema in quanto, come si è detto nel § 7.3.8.4, al punto A, i modi del sistema dipendono soltanto dai suoi poli. In ogni caso, affinché il sistema possa essere strettamente proprio, come deve essere per rappresentare un trasduttore reale, il numero degli zeri non potrebbe essere, in questo caso, superiore a uno.

Nella (7.20) sono stati messi in evidenza i due parametri i cui valori condizionano in modo sostanziale il comportamento di un sistema del second'ordine:

- $z$ , chiamato *fattore* (o *grado*) di smorzamento;
- $\omega_0$ , chiamata *pulsazione caratteristica* del sistema (o *pulsazione propria non smorzata*).

L'andamento del modulo e della fase di  $G(\omega)$  è stato illustrato nella fig. 7-13, normalizzando, come al solito, le ascisse, riportando  $\omega/\omega_0$ , e le ordinate della curva di modulo, riportando  $|G(\omega)/G_0|$ .

22. Si può pensare a una molla capace di agire nei due sensi, in trazione e in compressione, così che la variabile  $y(t)$  può assumere valori sia positivi sia negativi, in corrispondenza a valori positivi e negativi della forza di trazione  $f_m(t)$ .

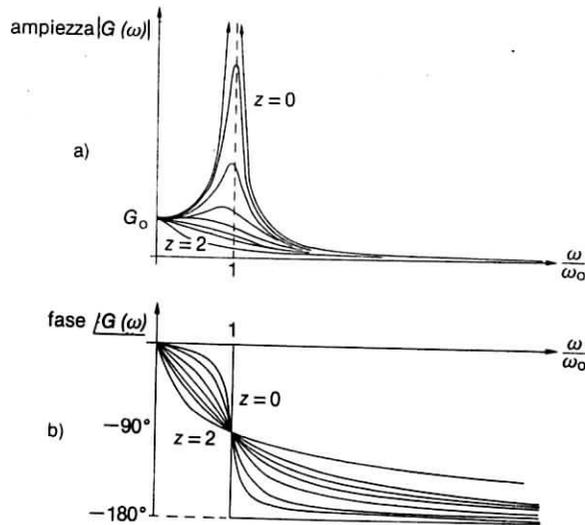


Fig. 7-13. Curve di risposta in frequenza di un sistema del second'ordine, con riferimento alla funzione di trasferimento di Fourier  $G(\omega)$ . a) Curva di ampiezza (modulo della funzione di trasferimento). b) Curva di fase (fase della funzione di trasferimento). Le ascisse sono state rese adimensionali normalizzando le pulsazioni  $\omega$  mediante la pulsazione caratteristica  $\omega_0$ . L'altro parametro che, come è detto nel § 7.3.8.6, insieme a  $\omega_0$  caratterizza completamente il sistema sotto l'aspetto dinamico, è il fattore di smorzamento  $z$ .

L'andamento di queste curve indica con evidenza alcune caratteristiche essenziali dei sistemi di questo tipo. Innanzi tutto appare chiaro il ruolo giocato dal fattore di smorzamento  $z$ .

- Per valori di  $z$  inferiori a  $1/\sqrt{2}$ , cioè a circa 0,707, la curva di modulo presenta un massimo in corrispondenza a una pulsazione  $\omega_r$ , chiamata pulsazione di risonanza, data dalla relazione

$$\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - 2z^2}. \quad (7.21)$$

Per valori di  $z$  decrescenti la risonanza si accentua sempre più (l'ampiezza tende all'infinito) e la pulsazione corrispondente tende a coincidere con la pulsazione caratteristica  $\omega_0$ .

Confrontando le curve della fig. 7-13 con quelle, ideali, di non distorsione, della fig. 7-6, si deduce che un sistema del secondo ordine distorce sempre. In realtà, poiché il concetto di distorsione, come si è accennato nel § 7.3.8.5, è sempre associato a una determinata tolleranza, il sistema può essere considerato non distorto entro un determinato campo di frequenze che parte sempre da zero ed è delimitato dalla frequenza di taglio superiore (chiamata semplicemente frequenza di taglio), che dipende, fissata la tolleranza, dal grado di smorzamento  $z$ . Nelle applicazioni usuali si impiegano valori di  $z$  che variano fra 0,6 e 0,7.

In ogni caso appare evidente che, per un dato fattore di smorzamento, fissate le esigenze di non distorsione mediante l'ampiezza della fascia, resta determinato il rapporto  $\omega_t/\omega_0$  che delimita il campo di frequenza utilizzabile; la pulsazione di taglio  $\omega_t$  (se ne veda la definizione nel § 7.3.8.5) risulta dunque tanto più elevata quanto maggiore è il valore di  $\omega_0$ .

La risposta al gradino è illustrata nella fig. 7-14.

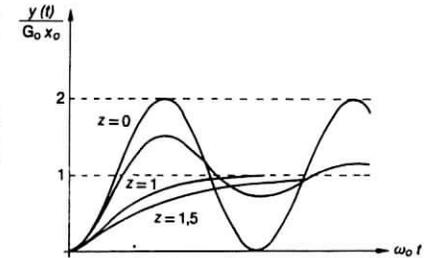
Anche in questo caso si vede come il fattore di smorzamento  $z$  influisca sostanzialmente sui modi del sistema. Più precisamente, si hanno tre diverse possibili condizioni di funzionamento:

— *Sistema sovrasmorzato.* Il fattore di smorzamento  $z$  è  $> 1$ . Non si ha sovra-

elongazione. I modi del sistema sono due, entrambi aperiodici, e l'espressione matematica dell'uscita è la somma di questi due modi, oltre alla risposta di regime:

$$y(t) = G_0 x_0 \left[ 1 - \frac{z + \sqrt{z^2 - 1}}{2\sqrt{z^2 - 1}} e^{(-z + \sqrt{z^2 - 1})\omega_0 t} + \frac{z - \sqrt{z^2 - 1}}{2\sqrt{z^2 - 1}} e^{(-z - \sqrt{z^2 - 1})\omega_0 t} \right]. \quad (7.22)$$

Fig. 7-14. Risposta al gradino di un sistema del secondo ordine. Il gradino, di ampiezza  $x_0$ , si suppone applicato all'istante  $t=0$ . Sono riportate più curve corrispondenti a diversi valori del fattore di smorzamento  $z$ . Le grandezze coordinate sono state rese adimensionali normalizzando il tempo  $t$  mediante la pulsazione caratteristica  $\omega_0$  (si veda il § 7.3.8.6) e le ampiezze  $y(t)$  mediante il valore di regime  $G_0 x_0$ .



— *Sistema sottosmorzato.* Il fattore di smorzamento  $z$  è  $< 1$ . Si ha una sovraelongazione tanto più accentuata quanto minore è lo smorzamento. Si ha un unico modo, proveniente dalle due radici complesse coniugate, e l'espressione dell'uscita è

$$y(t) = G_0 x_0 \left[ 1 - \frac{e^{-z\omega_0 t}}{\sqrt{1 - z^2}} \sin(\sqrt{1 - z^2} \omega_0 t + \varphi) \right], \quad (7.23)$$

con  $\varphi = \arcsin \sqrt{1 - z^2}$ .

— *Sistema con smorzamento critico.* Corrisponde a  $z = 1$  ed è la condizione limite di separazione fra le due condizioni di funzionamento precedenti. Presenta due modi aperiodici esprimibili con la relazione<sup>23</sup>

$$y(t) = G_0 x_0 [1 - (1 + \omega_0 t) e^{-\omega_0 t}]. \quad (7.24)$$

Come esempio, semplice da analizzare, di sistema del second'ordine, si consideri ancora il trasduttore forza/spostamento schematizzato nella fig. 7-12.

Questo trasduttore è già stato utilizzato per esemplificare un sistema del prim'ordine. Se non si fa più l'ipotesi di trascurare la massa  $M$  della piastra mobile, si deve introdurre la forza d'inerzia proporzionale all'accelerazione; il modello diventa un sistema del second'ordine corrispondente alla seguente equazione differenziale:

$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + k_s \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = f_m(t),$$

da cui deriva la funzione di trasferimento

$$G(\omega) = \frac{1/k}{1 + j\omega k_s/k - \frac{M}{k} \omega^2}.$$

Confrontando questa funzione di trasferimento con la (7.20) si ricavano le seguenti corrispondenze:

- pulsazione caratteristica  $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ ;
- fattore di smorzamento  $z = k_s/(2\sqrt{kM})$ .

23. La formula (7.24) si può ricavare, oltre che direttamente, come limite della (7.23), per  $z \rightarrow 1$ .

7.3.8.7. *I sistemi non lineari.* - Se il trasduttore non è rappresentabile con un modello lineare, il suo comportamento dinamico può essere di difficile interpretazione, specialmente se si vogliono definire parametri che ne rappresentino adeguatamente il funzionamento per un ampio campo di variabilità dell'ingresso.

Di solito ci si limita a fornire la funzione di conversione  $g$  della formula (7.2), in condizioni di funzionamento stazionarie, precisando in qualche modo il campo di variabilità dell'ingresso entro il quale si può presumere che le variazioni della  $g$  siano inapprezzabili.

Ad esempio, si indica la velocità di variazione massima raggiungibile dall'ingresso, cioè il valore massimo della derivata prima  $dx(t)/dt$ , e, a volte, quello della derivata seconda  $d^2x(t)/dt^2$ . Altre volte, ma in modo non equivalente al precedente e, in definitiva, concettualmente poco corretto, si fornisce una sorta di frequenza di taglio  $f_i$  al di là della quale il segnale di ingresso non deve avere componenti (si noti che però non è applicabile la sovrapposizione degli effetti) se si vuole che sia valida la funzione di conversione  $g$ . Spesso poi, proprio per tener conto in qualche modo delle non linearità, non si dà un unico valore di  $f_i$ , ma se ne indicano diversi, in corrispondenza ad altrettanti valori massimi raggiungibili dal segnale di ingresso. In definitiva, si può concludere che di volta in volta, secondo il tipo di non linearità presente e secondo il tipo di ingresso che si prevede verrà applicato al trasduttore, si forniscono indicazioni che consentono di sapere, in modo più o meno chiaro, entro quali limiti si può impiegare il trasduttore se si vuole che il suo comportamento coincida con quello in regime stazionario.

#### 7.4. Come si caratterizza un trasduttore

In questo paragrafo riporteremo, in forma molto schematica, l'insieme dei termini, con le rispettive definizioni, che vengono usualmente impiegati per specificare le caratteristiche di un trasduttore, visto dall'angolo di visuale dell'utente.

Le definizioni faranno riferimento al modello teorico generale presentato nel § 7.3 e, quando sarà necessario, verranno effettuati dei richiami specifici. Per comodità del lettore verranno anche ripetute alcune definizioni già date in precedenza. Si cercherà di fornire un quadro che sia il più completo possibile, ma è evidente che un determinato trasduttore avrà in generale bisogno di un numero di indicazioni notevolmente più limitato, vista la sua natura e il suo prevalente campo di applicazione. Ad esempio, le caratteristiche relative al regime dinamico sono specificate soltanto quando si prevede che il trasduttore verrà a trovarsi in tali condizioni di funzionamento.

Poiché la terminologia non è normalizzata<sup>24</sup>, né in campo italiano, né, tanto meno, in campo internazionale, nei casi in cui si è ritenuto utile sono stati riportati i termini alternativi, con eventuali precisazioni, specialmente quando esistono ambiguità di significato, come, ad esempio, nel caso del termine *sensibilità*.

Le principali informazioni che devono essere date per potere utilizzare correttamente un trasduttore sono riferibili alle seguenti voci:

- a) Principio di funzionamento. - b) Grandezza misurata. - c) Grandezza di uscita. - d) Eccitazione (eventuale). - e) Caratteristiche metrologiche (in regime stazionario e in regime dinamico). - f) Condizioni operative.

24. Sia in campo nazionale, sia in campo internazionale si sta lavorando per pervenire ad una terminologia unificata. L'Ente Italiano di Unificazione (UNI) ha costituito, in seno all'ente associato UNIPREA, una commissione incaricata esplicitamente della revisione della normativa italiana e della collaborazione con organismi internazionali che studiano la realizzazione di un vocabolario metrologico.

A volte sono fornite indicazioni sulla possibile durata della vita e sulle caratteristiche fisiche (dimensioni, peso, ecc.) del trasduttore.

Su ciascuna di queste voci si darà ora qualche rapido cenno per consentire una corretta interpretazione delle informazioni fornite.

Infine, poiché sono molto diffusi trasduttori le cui caratteristiche sono fornite in lingua inglese, per ciascuno dei termini più importanti si è cercato di riportare, in parentesi, il corrispondente termine inglese.

#### 7.4.1. Principio di funzionamento

La nomenclatura per indicare il principio fisico su cui si basa un determinato trasduttore non è affatto codificata. D'altro canto, il numero dei fenomeni a cui si fa ricorso da parte dei vari costruttori è così elevato che la loro sola elencazione completa, ovviamente alla data attuale, costituirebbe un'impresa praticamente impossibile.

Nella tab. 7/1 si è cercato di fornire un quadro che, lungi dall'essere esauriente, si propone soltanto di accennare ai principali tipi di trasduttori con uscita elettrica, catalogati secondo il loro principio di funzionamento.

Per ogni tipo si sono anche citate, nell'ultima colonna, le varie grandezze che possono essere accettate come segnale d'ingresso, comprendendo anche quelle che non sono direttamente oggetto della trasformazione, ma richiedono un intermediario molto elementare. Ad esempio, nel caso di un trasduttore di tipo estensimetrico impiegato per misurare una forza, la misura è effettuata tramite il rilevamento della deformazione di un organo elastico di caratteristiche note.

A proposito della grandezza misurata, qualche precisazione è richiesta dall'introduzione del termine *suono* che di per sé non indica una grandezza fisica definita, bensì un fenomeno complesso, caratterizzabile dai valori assunti da numerose grandezze, opportunamente definite (pressione, velocità, frequenza o spettro di frequenza, ecc.). Si è preferito conservare il termine, anche se ambiguo, in quanto estremamente diffuso nei cataloghi, precisando però, di volta in volta, la grandezza specifica oggetto della trasformazione (in genere, pressione o velocità).

Un commento richiede anche il termine *radiazione elettromagnetica* il cui significato, a rigori, si sovrappone in parte a quello del termine *flusso di calore*. Con *radiazione elettromagnetica* si è inteso, come è abitudine corrente nel settore commerciale, tutto il campo di frequenze che va al di là delle cosiddette *radio frequenze*, corrispondente cioè a lunghezze d'onda inferiori a 100  $\mu\text{m}$ . Di fatto, i trasduttori di *radiazione elettromagnetica* si possono raggruppare in due grandi famiglie: quelli che si basano sull'effetto termico della radiazione (bolometri, termopile, ecc.) e quelli che si basano su effetti di tipo *quantistico* (trasduttori fotoelettrici, fotovoltaici, fotoconduttivi, ecc.).

Si è poi ritenuto utile presentare nella tab. 7/2 un quadro sinottico complessivo che consente una più chiara visione d'insieme dei vari tipi di trasduttori, elencandoli sia con riferimento al misurando, sia secondo il principio di funzionamento.

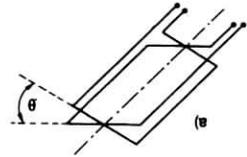
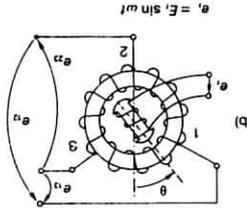
Infine è il caso di ricordare che all'elenco mancano, per scelta a cui si è accennato all'inizio del capitolo, alcune categorie di trasduttori, come quelli con uscita numerale (ad esempio quelli basati su conteggi di impulsi), oppure quelli la cui uscita non è di tipo elettrico, ma che di solito sono visti strettamente collegati con un altro trasduttore ausiliario con uscita elettrica, con il quale realizzano praticamente un unico trasduttore (si pensi, ad esempio, ai trasduttori di tipo interferometrico, o a quelli a frange di moiré, la cui uscita è di tipo ottico, ma nei quali il segnale finale è ancora di tipo elettrico).

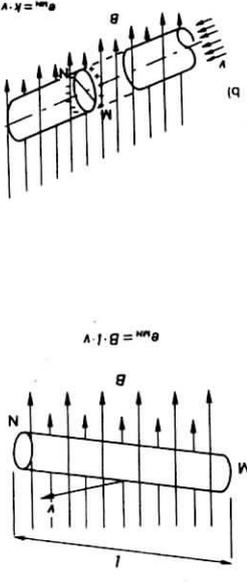
TABELLA 7/1. - Funzionamento e impiego dei principali tipi di trasduttori

N. d'ord.	Principio fisico di trasduzione	Schema di principio del trasduttore	Descrizione sommaria del funzionamento	Grandezze oggetto della trasduzione
1	Variazione di resistenza con la posizione: <i>potenzione tiro</i> . Variazione di resistenza con le dimensioni: <i>estensimetro</i> .	<p><math>V(t) = k \cdot x(t)</math></p>	<p>Il segnale di ingresso è la variabile <math>x(t)</math>, che definisce la posizione del cursore. La resistenza <math>r(t)</math> risulta direttamente proporzionale al valore di <math>x(t)</math>:  <math>r(t) = k' \cdot x(t)</math>.                  La corrente <math>I</math>, costante, provoca nella resistenza <math>r(t)</math> una caduta di potenziale <math>v(t) = I \cdot r(t)</math> che costituisce l'uscita utile del trasduttore, legata all'ingresso dalla relazione:  <math>v(t) = I \cdot k' \cdot x(t) = k \cdot x(t)</math>.                  Nota - Si possono realizzare anche potenziometri alimentati con una sorgente di tensione alternata.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensioni (*).</li> <li>- Spostamento (*).</li> <li>- Velocità (*), mediante derivazione dell'uscita.</li> <li>- Accelerazione (*), mediante spostamento di una massa.</li> <li>- Pressione, mediante trasduzione in spostamento (o deformazione) di una parete (o diaframma).</li> <li>- Temperatura, tramite deformazione del cursore.</li> </ul>
2	Variazione di resistenza con le dimensioni: <i>estensimetro</i> .	<p><math>L_0</math> = lunghezza base  <math>R_A</math> = resistenza della griglia  <math>S</math> = fattore di taratura (gauge factor)</p> <p><math>\frac{\Delta R}{R} = 1 + \frac{S}{R_A} \Delta L</math></p>	<p>Deformazioni del supporto provocano deformazioni di variazioni della resistenza presentata dalla griglia stessa, sia per l'effetto puramente geometrico delle variazioni dimensionali, sia per effetto piezoresistivo (si veda al n. 6).                  Si vedano anche i §§ 7.1 a pag. 549 e 7.3 a pag. 552 e il § 2.7 a pag. 139.                  Nota - Negli estensimetri metallici è prevalente l'effetto delle variazioni dimensionali, in quelli a semiconduttore è prevalente l'effetto piezoresistivo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensioni.</li> <li>- Spostamento.</li> <li>- Velocità, mediante derivazione del segnale d'uscita.</li> <li>- Accelerazione, mediante trasduzione in forza e della forma in deformazione di un organo elastico.</li> <li>- Forza e coppia, mediante trasduzione in variazioni di dimensioni di un organo elastico.</li> <li>- Pressione, mediante trasduzione in spostamento (o deformazione) di una parete (o diaframma).</li> </ul>
3	Variazione di resistenza con la temperatura: <i>termorepistore</i> .	<p><math>\Delta R = a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2 + \dots + a_n \Delta t^n</math></p>	<p>La grandezza d'ingresso è la temperatura. Poiché variazioni di temperatura producono sempre, in un materiale conduttore, variazioni di resistenza, dal rilievo della variazioni della resistenza di un opportuno bipolo, effettuato, ad esempio, mediante un ponte di Wheatstone, si risale alle variazioni della temperatura <math>t</math>.                  Nota - Per realizzare il resistore vengono usati sia materiali conduttori, sia materiali semiconduttori; in questo secondo caso al resistore viene dato il nome di <i>termistore</i>.                  Si veda anche Cap. 4, § 4.4.3, pag. 193.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura.</li> <li>- Flusso di calore, rilevando le conseguenti variazioni di temperatura.</li> <li>- Radiazione elettromagnetica, come per il flusso di calore.</li> <li>- Portata in massa, rilevando le variazioni di temperatura.</li> <li>- Velocità di un fluido.</li> <li>- Pressione (Bassa) di un gas, rilevando le variazioni di conduttività termica legate alle variazioni di pressione.</li> </ul>
4	Variazione di resistenza con la temperatura: <i>filo caldo</i> .	<p><math>R_{AB} = k \cdot F</math>  <math>F</math> = forza applicata</p>	<p>Un filo è riscaldato facendolo percorrere da un'opportuna intensità di corrente. La temperatura a cui si porta, e dunque il valore della sua resistenza, dipendono dal coefficiente di trasmissione del calore fra il filo stesso e il fluido in cui è immerso; questo coefficiente a sua volta dipende dalla natura del fluido, dalla sua viscosità e, se esso è in movimento, dalla sua velocità. La variazione di resistenza è misurata, ad esempio, con un ponte di Wheatstone.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Livello di un fluido.</li> <li>- Pressione di un fluido.</li> <li>- Suono (velocità) rilevando le variazioni di velocità del fluido.</li> <li>- Portata in massa.</li> </ul>
5	Variazione di resistenza con la pressione: <i>sonoresistivi</i> .	<p><math>R_{AB} = k \cdot F</math>  <math>F</math> = forza applicata</p>	<p>La resistenza di una massa di granuli di carbone compressi fra due superficie metalliche che fungono da elettrodi dipende dalla pressione esercitata sui granuli.                  La variazione di resistenza è messa in evidenza applicando una tensione costante e rilevando le variazioni di corrente (microfono a carbone).                  Si veda anche il § 6.2 a pag. 514.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suono (pressione).</li> </ul>

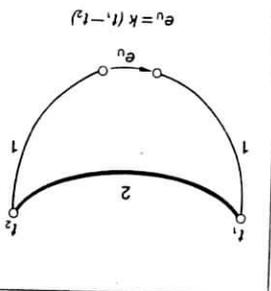
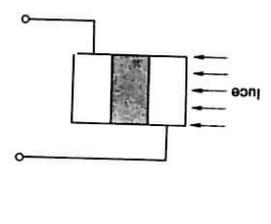
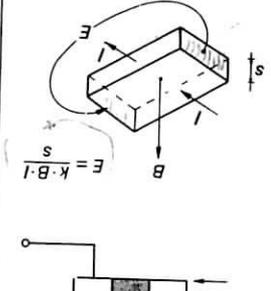
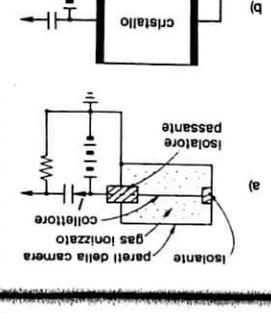
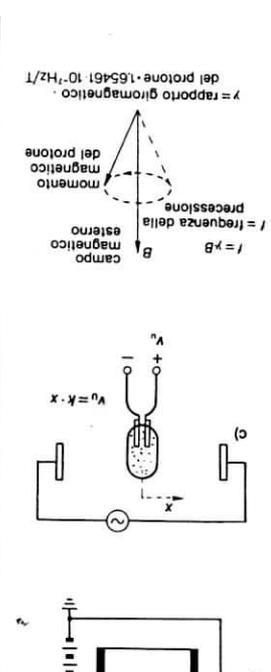
(\*) Qui e nel seguito, se non è specificato diversamente, si sottintende « linear e angolar ». Si sottintende anche di realizzare trasduttori di variazioni di dimensioni.



N. d'ord.	Principio fisico di trasduzione	Schema di principio del trasduttore	Descrizione sommaria del funzionamento	Grandezze oggetto della trasduzione
11	<p>Variatione di mutua induttanza con la posizione reciproca degli avvolgimenti.</p>		<p><b>Nota.</b> - Per semplicità si è supposto che la variazione di induttanza sia ottenuta con lo spostamento del nucleo; sono da considerare come prestri tutti i metodi che in qualche modo alterano la riluttanza del circuito magnetico.</p> <p>La variazione di posizione angolare reciproca di due bobine mutuamente accoppiate produce una variazione del coefficiente di mutua induttanza <math>M</math>. Questa variazione può essere rilevata, ad esempio, alimentando una delle due bobine con corrente alternata e misurando l'ampiezza della tensione indotta ai capi dell'altra bobina. In pratica si costruiscono due tipi di trasduttori basati su questo principio di funzionamento.</p> <p>a) Il <i>potenziometro a induzione</i>, nel quale la bobina fissa (statore) e la bobina mobile (rotore) sono costituite ciascuna da un unico avvolgimento.</p> <p>b) Il <i>synchro</i>, nel quale il rotore è costituito da un normale avvolgimento alimentato da corrente sinusoidale, mentre lo statore è costituito da tre avvolgimenti disposti a 120° fra loro. Le tre tensioni indotte su questi tre avvolgimenti hanno ampiezze tali da definire in modo univoco la posizione del rotore rispetto allo statore.</p>	<p>- <i>Livello</i> di un liquido conduttore, impiegato come nucleo di una bobina ad asse verticale.</p> <p>- <i>Temperatura</i>, mediante le variazioni della riluttanza del circuito magnetico.</p> <p>- <i>Dimensioni angolari</i>.</p> <p>- <i>Spostamento angolare</i>.</p>
12	<p>Variatione di mutua induttanza con</p>	 $e_1 = E_s \sin \omega t$ $e_2 = E_s \sin \omega t \cdot \sin \theta$ $e_3 = E_s \sin \omega t \cdot \sin (\theta + 120^\circ)$ $e_4 = E_s \sin \omega t \cdot \sin (\theta + 240^\circ)$	<p>La variazione di posizione del nucleo provoca una variazione del coefficiente di mutua induttanza.</p>	<p>- <i>Dimensioni</i>.</p> <p>- <i>Spostamento</i>.</p>

13	<p>Induzione elettromagnetica.</p> <p>la riluttanza del circuito magnetico.</p>		<p>Se un conduttore di lunghezza <math>l</math> si muove con una velocità <math>v</math> in un campo magnetico di valore <math>B</math>, tagliandone perpendicolarmente le linee di forza, sulle cariche del conduttore si esercitano forze che tendono a separare le positive dalle negative, producendo un gradiente di potenziale <math>e</math>, conseguentemente, una f.e.m. <math>e_{MN}</math> ai suoi estremi espressa dalla formula:</p> $e_{MN} = B \cdot l \cdot v$ <p>Numerosi tipi di trasduttori si basano su questo principio; fra di essi si vedano i seguenti:</p> <p>a) <i>Magnetometro a induzione</i>, per la misura del campo magnetico.</p> <p>b) <i>Flussometro elettromagnetico</i></p> <p>Il conduttore è costituito da un fluido conduttivo in un tubo di materiale isolante e non magnetico. Agli estremi del diametro <math>MN</math> (schema a fianco) si localizza una f.e.m. <math>e_{MN}</math> proporzionale alla velocità media <math>v</math> del fluido nella condotta, e quindi al suo flusso.</p> <p>Il campo magnetico può essere costante o, più spesso, variabile sinusoidalmente.</p>	<p>- <i>Forza</i>.</p> <p>- <i>Coppia</i>.</p> <p>- <i>Pressione</i>.</p> <p>zione. Questa variazione può essere rilevata come nei casi precedenti, al n. 10 e al n. 11.</p> <p><b>Nota.</b> - Questo principio di funzionamento è spesso chiamato « <i>variazione di riluttanza</i> ». Su questo principio di funzionamento sono basati i cosiddetti « <i>trasformatori differenziali</i> » (lo schema si riferisce appunto a questo tipo di trasduttori), spesso indicati con la sigla <i>LVDT</i> (<i>linear voltage differential transformer</i>).</p>
185				<p>a) <i>Campo magnetico</i>.</p> <p>b) <i>Portata in massa di un fluido conduttivo</i>.</p>

N. d'ord.	Principio fisico di trasduzione	Schema di principio del trasduttore	Descrizione sommaria del funzionamento	Grandezze oggetto della trasduzione
14	Piezoelettricità		<p>a) Alcuni materiali cristallini naturali (quarzo, sali di rochelle) o artificiali (solfato di litio) presentano una separazione di cariche elettriche se vengono sottoposti a deformazioni meccaniche. Poiché si tratta di materiali isolanti, questa separazione di cariche può essere messa in evidenza misurando la differenza di potenziale fra due elettrodi opportunamente collocati. Il fenomeno si presenta in modo diverso secondo i punti dove si rileva la tensione e le modalità della sollecitazione.</p> <p>b) Si realizzano anche trasduttori di temperatura basati sulla dipendenza dalla temperatura della frequenza di risonanza di cristalli di quarzo opportunamente lavorati, in questo caso si parla di solito di <i>piezoelettricità</i>.</p> <p>Il Pitran è un piezo-transistore, cioè un transistorore nel quale una sollecitazione meccanica opportunamente applicata produce una variazione del guadagno di corrente.</p>	<p>a) Dimensiononi. - Spostamento. - Accelerazione. - Forza e coppia - Pressione.</p> <p>b) Temperatura. - Forza. - Pressione.</p>
15	Pitran		<p>Il Pitran è un piezo-transistore, cioè un transistorore nel quale una sollecitazione meccanica opportunamente applicata produce una variazione del guadagno di corrente.</p>	<p>- Forza. - Pressione.</p>
			<p>c) <i>Pick-up elettromagnetico</i> (o <i>elettrodinamico</i>). Il moto relativo di una bobina e di un magnete permanente (o di un elettromagnete eccitato con corrente continua) produce una f.e.m. <math>e_u</math> pari alla velocità di variazione del flusso <math>\Phi</math> concatenato con la bobina:</p> $e_u = - \frac{d\Phi}{dt}$ <p>In relazione al tipo di moto relativo si può avere la soluzione del magnete fisso e bobina mobile e quella della bobina fissa e magnete mobile.</p> <p>d) <i>Dinamo tachimetrica</i>. Non si tratta altro che di un generatore in corrente continua, come indicato nello schema a fianco, nel quale la f.e.m. <math>e_{FA}</math> raccolta alle spazzole risulta proporzionale alla velocità angolare <math>\omega</math> del rotore.</p> <p>e) <i>Tachimetro in corrente alternata</i>. Il principio di funzionamento è lo stesso di un generatore in c.a. a induzione e può essere illustrato con riferimento a un motore bifase a gabbia di scoiattolo (schema di principio a fianco). Il rotore, cioè l'organo rotante, è costituito da un insieme di conduttori situati lungo altrettante generatrici di un cilindro e collegati fra loro alle due estremità (gabbia di scoiattolo). Lo statore, cioè la parte fissa, è fornito di due avvolgimenti, di cui uno è alimentato con corrente sinusoidale, disposti a <math>90^\circ</math> fra.</p>	<p>c) Velocità lineare. - Suono (pressione), trasformando la pressione nello spostamento di un diaframma.</p> <p>d) Velocità angolare. - Velocità lineare, trasformandola in velocità angolare.</p> <p>e) Velocità angolare. - Velocità lineare.</p>

N. d'ord.	Principio fisico di trasduzione	Schema di principio del trasduttore	Descrizione sommaria del funzionamento	Grandezze oggetto della trasduzione
16	Effetto Seebeck	 <p>Quando si verifica la situazione schematizzata di fianco, dove 1 e 2 stanno ad indicare materiali diversi, se le due giunzioni sono a temperature diverse, nella maglia si produce una f.e.m. <math>e_u</math> proporzionale alla differenza di temperatura <math>T_1 - T_2</math> fra le due giunzioni. Si veda anche § 4.5, pag. 194.</p>	<p>Il contatto di materiali diversi produce, alla giunzione, una differenza di potenziale che dipende dall'intensità con cui la giunzione stessa è illuminata. Si veda anche il § 6.1.5.3 a pag. 488.</p>	<p>– Temperatura.</p> <p>– Flusso di calore, trasformazione di calore in variazione di temperatura.</p> <p>– Pressione (bassa) di un gas, utilizzando la termocoppia per rilevare le variazioni di conduttività termica dovute alle variazioni di pressione.</p>
17	Effetto fotovoltaico.		<p>Se su una piastrina di materiale conduttore, o semiconduttore, percorso da corrente <math>I</math>, è applicato un campo magnetico <math>B</math> perpendicolare alle linee di flusso del vettore densità di corrente, si produce un campo elettrico perpendicolare a entrambe le direzioni, del campo magnetico e della corrente elettrica, a cui corrisponde una f.e.m. <math>E</math>, rilevabile fra due facce, proporzionale a <math>B</math> e a <math>I</math>. (Si veda anche il § 5.8.1, Esempio III, a pag. 357).</p>	<p>– Radiazione elettromagnetica.</p> <p>– Campo magnetico.</p> <p>– Spostamento lineare, dispendo la piastrina fra le espansioni polari di un magnete in cui il valore dell'induzione dipende dalla posizione.</p>
18	Effetto Hall	 <p><math>E = k \cdot B \cdot I</math></p>	<p>L'interazione di una radiazione nucleare con ioni che può essere messa in evidenza misurando la materia produce sempre una formazione di un'intensità di corrente (è il caso che qui interessa) o impulsi di tensione.</p> <p>Il tipo di sostanza su cui si fa incidere la radiazione può essere:</p> <p>a) Un gas. Tutti gli ioni sono raccolti dal collettore e producono un'intensità di corrente legata all'intensità della radiazione.</p> <p>b) Un cristallo, nel quale la conduttività, nulla in condizioni normali, diventa apprezzabile in seguito alla ionizzazione. Si usano cristalli isolanti o diodi a semiconduttori polarizzati inversamente.</p>	<p>a) Radiazione nucleare.</p> <p>– Livello, sfruttando il diverso assorbimento della radiazione da parte del liquido e dell'aria.</p> <p>– Pressione.</p>
19	Ionizzazione		<p>c) Un fenomeno particolare consiste nella dipendenza della tensione ai capi degli elettrodi di un'ampolla contenente gas a bassa pressione dalla posizione dell'ampolla stesso all'interno di un campo elettrico creato da due piastre piane parallele soggette a una tensione a frequenza elevata.</p> <p>Ogni protone è dotato di un moto di rotazione su se stesso (<math>spin</math>) che corrisponde a un momento magnetico, oltre che angolare. Quando sul protone agisce un campo magnetico esterno si ha un moto di precessione dell'asse di rotazione che è rilevabile, dall'esterno, ad esempio mediante una f.e.m. indotta su un avvolgimento, la cui frequenza è proporzionale al campo magnetico applicato. (Si veda anche il § 5.11.3 a pag. 430).</p>	<p>b) Radiazione nucleare.</p> <p>– Spostamento lineare.</p>
20	Risonanza magnetica del protone (risonanza nucleare).		<p>– Campo magnetico.</p> <p>– Portata in massa mediante l'eccitazione della risonanza magnetica in un fluido entro una condotta.</p>	<p>– Dimensioni lineari.</p>

N. d'ord.	Principio fisico di trasduzione	Schema di principio del trasduttore	Descrizione sommaria del funzionamento
21	Effetto Doppler.		<p>Un'onda sonora, o ultrasonica o elettromagnetica diffusa dalle particelle di un fluido in movimento viene modificata in frequenza. Rilievando il « battimento » fra l'onda in partenza e l'onda che ha inciso sulle varie particelle del fluido si ha una frequenza di battimento proporzionale alla velocità media del fluido stesso.</p>
22	Distors. del flusso (seconda armonica).		<p>Una sbarretta di materiale ferromagnetico è magnetizzata con un avvolgimento di eccitazione alimentato con una corrente sinusoidale, in rispetto allo zero (ad esempio, sinusoidale), in modo che il materiale sia soggetto, in assenza di campo magnetico generato da altre fonti, a un ciclo di isteresi simmetrico rispetto all'origine; corrispondentemente, nel circuito di rivelazione si induce una f.e.m. e con andamento simmetrico rispetto allo zero, nella cui forma d'onda, cioè, sono presenti solamente armoniche di ordine dispari.</p> <p>La presenza di un campo magnetico B prodotto da altra fonte genera una dissimmetria nel ciclo di isteresi e quindi la comparsa nella f.e.m. e di armoniche di ordine pari, in particolare di una seconda armonica la cui ampiezza risulta funzione crescente binivoca dell'intensità del campo magnetico B.</p>
23	Risonanza meccanica.		<p>L'oggetto di cui si vuole misurare lo spessore s è accoppiato a un trasduttore piezoelettrico</p> <p><i>Dimensioni.</i></p>
24	Variazione della velocità di propagazione di un ultrasuono in un fluido in movimento.		<p>Se in una condotta percorsa da un fluido con velocità media v è emesso un impulso ultrasonico per mezzo di un trasmettitore posto alla distanza d capterà l'impulso con un ritardo Δt pari a:</p> $\Delta t = \frac{c + v}{d}$ <p>dove c è la velocità del suono nel fluido in quiete.</p> <p>Se si immette un'onda sinusoidale di frequenza f, anziché un impulso, si ha uno sfasamento Δφ:</p> $\Delta \phi = \frac{c + v}{2\pi f \cdot d}$ <p>Certi materiali, chiamati magnetostrittivi, alterano le loro proprietà magnetiche se sono sottoposti a tensione meccanica. La magnetostrizione si può presentare, secondo i materiali, in forma positiva (fig. a) o negativa (fig. b). Si può dunque risalire dal rilievo di grandezze magnetiche, o elettriche equivalenti, al valore delle grandezze meccaniche (forze, pressioni).</p>
25	Magnetostrizione.		<p>Variazione della velocità di propagazione di un ultrasuono in un fluido in movimento.</p> <p>Se in una condotta percorsa da un fluido con velocità media v è emesso un impulso ultrasonico per mezzo di un trasmettitore posto alla distanza d capterà l'impulso con un ritardo Δt pari a:</p> $\Delta t = \frac{c + v}{d}$ <p>dove c è la velocità del suono nel fluido in quiete.</p> <p>Se si immette un'onda sinusoidale di frequenza f, anziché un impulso, si ha uno sfasamento Δφ:</p> $\Delta \phi = \frac{c + v}{2\pi f \cdot d}$ <p>Certi materiali, chiamati magnetostrittivi, alterano le loro proprietà magnetiche se sono sottoposti a tensione meccanica. La magnetostrizione si può presentare, secondo i materiali, in forma positiva (fig. a) o negativa (fig. b). Si può dunque risalire dal rilievo di grandezze magnetiche, o elettriche equivalenti, al valore delle grandezze meccaniche (forze, pressioni).</p>
Grandezze oggetto della trasduzione	<p>Portata in massa.</p> <p>Velocità.</p> <p>Spostamento, per integrazione della velocità.</p> <p>Campo magnetico.</p>		<p>Temperatura, rilevando le variazioni di dimensioni di una cavità risonante.</p> <p>Portata di massa.</p> <p>Velocità di un fluido.</p> <p>Forza.</p> <p>Coppia.</p> <p>Pressione.</p>

Tipo di trasduttore	Grandezza misurata													
	1. Dimensioni				2. Moto				3. Livello				4. Forza	
	1.1. Dimensioni angolari	1.2. Spostam. lineare	1.1. Spostam. angolare	2.1. Velocità lineare	2.2. Velocità angolare	2.3.1. Acceleraz. lineare	2.3.2. Acceleraz. angolare	3.1. Coppia	3.2. Pressione	3.3. Suono	4.1. Portata in massa	4.2. Temperatura	4.3. Fusso di calore	4.4. Radiazione nucleare
Potenzionmetro	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Estensimetro	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Termoresistore	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Filo caldo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fonoresistore	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cristallo piezoresistivo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fotoresistore	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Igroresistore	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Condensatore variabile	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Induttore variabile	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Potenzionmetro a induzione	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Synchro	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Trasformatore differenziale	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Magnetometro a induzione	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fussonmetro elettromagnetico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pick-up elettromagnetico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Dinamo tachimetrica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tachimetro in c.a.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cristallo piezoelettrico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Piran	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A effetto Seebeck	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A effetto fotovoltaico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A effetto Hall	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A ionizzazione	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A risonanza nucleare	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A effetto Doppler	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A distorsione di fusso	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A risonanza meccanica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A ultrasuoni	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A magnetostriazione	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A rumore termico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

TABELLA 7/2. - Quadro sinottico dei diversi tipi di trasduttori presentati nella tabella 7/1

N. d'ord.	Principio fisico di trasduzione	Schema di principio del trasduttore	
26	Rumore termico.		<p>Ai capi di una resistenza <math>R</math>, alla temperatura assoluta <math>T</math>, c'è una tensione variabile, con spettro molto ampio, chiamata <i>rumore termico</i>, il cui valore efficace <math>V</math> è secondo la legge di Nyquist (cfr. § 4.2.4 a pag. 174, nota 101 del § 5.11.1.2 a pag. 406 e § 5.13.2.5 a pag. 461):</p> $V = \sqrt{2k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$ <p>dove <math>\Delta f</math> è il campo di frequenza che si considera e <math>k</math> è la costante di Boltzmann.</p>
	Grandezze oggetto della trasduzione		- Temperatura.

(Segue tab. 7/1)

#### 7.4.2. Misurando (Measurand)

A) *Specie del misurando*: Natura della grandezza fisica che costituisce il misurando.

B) *Campo di misura (Input range)* (§ 7.3.4): Insieme dei valori che può assumere il misurando, entro il quale, se sono rispettate le condizioni operative (§ 7.4.8), il trasduttore funziona secondo le specifiche fornite (§§ 7.4.5 e 7.4.6). Spesso si parla di *portata (range)*, o di valore di *fondo scala (full scale)*, riferendosi al limite superiore del *campo di misura*.

C) *Campo di sicurezza del misurando* (§ 7.3.4): Insieme dei valori che può assumere il misurando senza che il funzionamento del trasduttore resti permanentemente alterato rispetto alle specifiche fornite (§§ 7.4.5 e 7.4.6). I valori estremi del *campo di sicurezza* vengono chiamati *valori di sovraccarico del misurando (measurand overload values)*.<sup>25</sup>

#### 7.4.3. Uscita (Output)

A) *Specie del segnale d'uscita*: Natura della grandezza fisica che costituisce il segnale d'uscita.<sup>26</sup>

B) *Campo di normale funzionamento dell'uscita (Output range)* (§ 7.3.5): Insieme dei valori che assume il segnale d'uscita quando il misurando varia entro il *campo di misura*.

C) *Valori di sovraccarico dell'uscita (output overload values)*<sup>27</sup> (§ 7.3.5): I valori più elevati assunti dal segnale d'uscita quando il misurando varia entro il *campo di sicurezza*.

D) *Potenza erogabile (Output power)*: Il valore limite della potenza<sup>28</sup> che il trasduttore può fornire al sistema utilizzatore (§ 7.3.6), entro il quale il trasduttore può funzionare secondo le specifiche fornite (§§ 7.4.5 e 7.4.6).

E) *Impedenza di uscita (Output impedance)*: Valore dell'impedenza<sup>29</sup> equivalente presentata, attraverso i due morsetti d'uscita, dal trasduttore al sistema utilizzatore.

F) *Incertezza dell'uscita*: Larghezza della fascia comprendente tutti i valori che potrebbero essere assunti, con la stessa validità, a rappresentare la grandezza d'uscita corrispondente a una determinata condizione di funzionamento.<sup>30</sup>

25. In alternativa, si parla anche semplicemente di *sovraccarico (overload, overrange)*, intendendo con questo termine il limite superiore del *campo di sicurezza* e sottintendendo che il limite inferiore coincida con il limite inferiore del *campo di misura*.

26. Dati i tipi di trasduttori che vengono considerati in questo capitolo (si veda il § 7.1), si tratta comunque di grandezze elettriche, del tipo di quelle citate nella nota 1 a pag. 549.

27. Non sempre vengono fornite indicazioni su questi valori. In ogni caso è importante valutarne almeno l'ordine di grandezza, per essere in grado di proteggere, se necessario, il sistema utilizzatore collegato.

28. A volte, in modo equivalente, si parla di *corrente massima erogabile* (se il segnale di uscita è una tensione), o di *tensione massima* in uscita, o di *valore massimo dell'impedenza di carico (load impedance)* (se il segnale di uscita è una corrente).

29. Quando la parte reattiva è trascurabile, si parla di *resistenza di uscita*. Si tratta comunque dell'impedenza equivalente ottenuta guardando il trasduttore, supposto lineare, dai morsetti di uscita e applicando il teorema di Thévenin.

30. Si tratta dell'incertezza intrinseca del segnale d'uscita, legata alla sua natura di grandezza fisica e alle caratteristiche dell'interfaccia di collegamento del trasduttore con il sistema utilizzatore. Per comprenderne meglio il significato, si noti che corrisponde, nel caso degli strumenti indicatori, all'*incertezza di lettura* (chiamata anche *errore di lettura*).

#### 7.4.4. Alimentazione ausiliaria (Auxiliary supply)

È il valore della tensione o dell'intensità di corrente che dev'essere fornita da una sorgente esterna per consentire il corretto funzionamento del trasduttore (§ 7.3.6.) Un termine equivalente molto usato è quello di *eccitazione (excitation)*, che però a volte viene anche impiegato per indicare il *misurando*.

#### 7.4.5. Caratteristiche metrologiche in regime stazionario (Static metrological characteristics)

Sono l'insieme delle indicazioni necessarie a legare l'*uscita* del trasduttore al *misurando*, quando il trasduttore funziona in *regime stazionario* (§ 7.3.7).

7.4.5.1. *Funzione di taratura*. — È la relazione che permette di ricavare da ogni valore della grandezza di uscita la corrispondente *fascia di valore* del misurando, cioè l'insieme di valori, tutti ugualmente validi, che possono essere forniti per precisare l'entità del misurando.<sup>31</sup>

L'informazione completa viene di solito fornita specificando separatamente (in forma grafica, tabulare, o analitica) dove si colloca la fascia di valore, mediante un punto situato in posizione intermedia nella fascia, e l'ampiezza della fascia stessa. Si distinguono dunque i due seguenti tipi di informazione:

A) *Curva di taratura (Calibration curve)*: È la relazione biunivoca (o almeno univoca) tra ogni valore della grandezza di uscita e il corrispondente valore da assegnare al punto centrale della fascia di valore relativa al misurando.

Equivale praticamente a quella che è stata chiamata, nel § 7.3.1, analizzando il modello di prima approssimazione di un trasduttore, *funzione di conversione*.<sup>32</sup>

Quando la curva di taratura è rettilinea, esiste cioè una relazione di proporzionalità fra uscita e misurando, essa viene espressa di regola con un coefficiente chiamato *costante di taratura (calibration factor)*.

B) *Incertezza di taratura (Calibration uncertainty)*: È la larghezza della fascia di valore. Può essere specificata

— in *valore assoluto*, con la stessa unità di misura del misurando;

— in *valore relativo*, rapportandola al valore del punto intermedio della fascia a cui è associata;

— in *valore ridotto*, rapportandola a un determinato valore del *campo di misura*, di solito il limite superiore.

In modo più o meno equivalente si parla molto spesso di *errore*<sup>33</sup> (*error, uncer-*

31. Nei §§ 7.3.2 e 7.3.3 è stato spiegato come la corrispondenza fra grandezza di uscita e misurando non possa essere biunivoca (e nemmeno univoca), in quanto il trasduttore è rappresentabile solo in prima approssimazione mediante un sistema con un solo ingresso e una sola uscita; da qui la *fascia di valore*, anziché un valore determinato.

32. In tutte queste definizioni si fa riferimento, come al solito, al legame espresso dalla formula (7.1), cioè alla funzione che consente di risalire dall'uscita al misurando; è evidente che si potrebbero dare le corrispondenti definizioni con riferimento alla formula (7.2), cioè al legame visto in senso inverso.

33. Di solito, quando è introdotto, l'errore è definito come differenza algebrica (quindi può essere positivo o negativo) fra il valore del misurando ottenuto mediante il diagramma di taratura e il cosiddetto *valore vero*. Per parte nostra si è preferito accantonare questo concetto, di ambiguo significato e di fatto non necessario per caratterizzare il comportamento di un trasduttore.

tainty), o di fascia (o banda) di errore (error band), sempre con riferimento a un determinato valore dell'uscita.

A volte ancora si introduce il concetto di *precisione* (accuracy), espresso quasi sempre in termini di incertezza relativa.

Dalla funzione di taratura possono essere ricavate le due seguenti grandezze, che di solito vengono fornite separatamente:

C) *Sensibilità* (Sensitivity): È una grandezza che può essere definita con riferimento a un punto qualsiasi della *curva di taratura* e coincide con l'inverso della pendenza della curva stessa. Nel caso particolare in cui la curva di taratura è rettilinea, è l'inverso della *costante di taratura*.

Essa è dunque espressa, come unità di misura, con riferimento alle unità di misura del misurando e della grandezza d'uscita; ad esempio, in un trasduttore di forza con uscita in tensione, in volt/newton.

È importante sottolineare che spesso, specialmente in campo prettamente metrologico, il termine *sensibilità* è impiegato per indicare una grandezza completamente diversa, che qui è stata chiamata *risoluzione* (§ 7.4.5.2).

D) *Linearità* (Linearity): È un'indicazione di quanto la *curva di taratura* si discosta dall'andamento rettilineo.

È specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita. Si definiscono dunque tanti tipi di linearità quanti sono i modi di scegliere la retta di riferimento. In particolare, le definizioni più interessanti, illustrate per mezzo dei diagrammi della fig. 7-15, sono le seguenti:

D.1) *Linearità riferita allo zero* (Zero based linearity): La retta di riferimento passa per l'estremo inferiore della curva di taratura, corrispondente all'estremo inferiore del campo di misura, ed è tracciata in modo da rendere minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti (fig. 7-15 a).

D.2) *Linearità riferita agli estremi* (End point linearity):<sup>34</sup> La retta di riferimento congiunge i due estremi della curva di taratura corrispondenti ai due estremi del campo di misura (fig. 7-15, b).

D.3) *Linearità indipendente* (Independent linearity): La retta di riferimento è quella che rende minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti (fig. 7-15 c).

D.4) *Linearità secondo i minimi quadrati* (Least squares linearity): La retta di riferimento è quella che corrisponde al valor minimo della somma dei quadrati degli scostamenti (fig. 7-15 d).

Quale che sia la retta a cui si fa riferimento, la linearità, cioè il massimo scostamento, viene espressa di regola o in *valore relativo* o, più spesso, in *valore ridotto*.

7.4.5.2. *Risoluzione* (Resolution). – È la variazione del valore del misurando che provoca una variazione nel valore della grandezza di uscita pari all'*incertezza dell'uscita*.<sup>35</sup>

Può essere espressa in *valore assoluto*, o in *valore relativo*, o in *valore ridotto*. Far riferimento all'*incertezza dell'uscita* corrisponde in pratica a considerare la

34. Spesso è anche usato il termine *linearità terminale* (terminal based linearity), che a rigori ha un significato alquanto diverso, ma che in quasi tutti i casi pratici può essere considerato un sinonimo di *linearità riferita agli estremi*.

35. Come è già stato detto nel § 7.4.5.1, al punto c, spesso alla grandezza che qui abbiamo chiamato *risoluzione* viene dato il nome di *sensibilità*; altre volte essa viene chiamata *banda morta* (dead band).

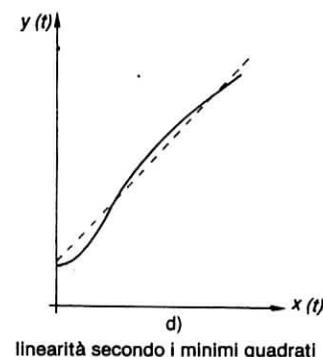
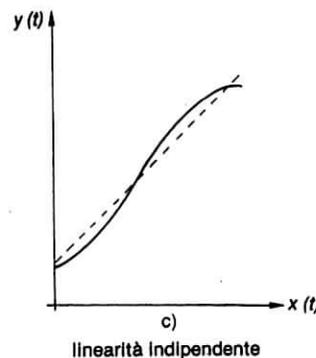
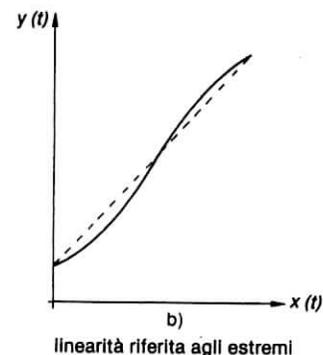
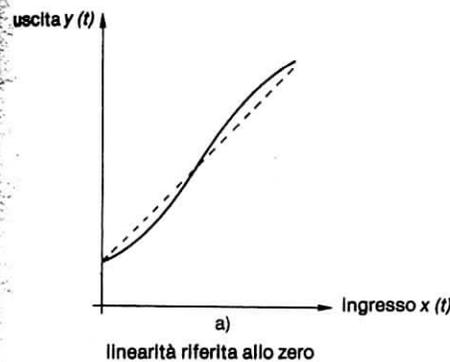


Fig. 7-15. I quattro modi principali per definire la linearità di un trasduttore. Quando la curva di taratura (a linea piena nelle quattro figure) è press'a poco rettilinea, la *linearità* indica il suo scostamento da una retta di riferimento (a tratti, nelle figure), assunta convenzionalmente. La figura mostra i quattro modi principali in cui può essere definita questa retta di riferimento.

minima variazione apprezzabile; la *risoluzione* rappresenta dunque la capacità del trasduttore a funzionare come rivelatore differenziale nell'intorno di un determinato valore del misurando.

È il caso di ricordare che quando il trasduttore funziona intorno allo zero, al termine *risoluzione* si preferisce spesso il termine *soglia* (threshold), intendendo così il valore minimo del misurando che fornisce un'uscita apprezzabilmente diversa da zero (si suppone che a misurando nullo corrisponda uscita nulla). A volte si definisce anche l'*uscita con misurando nullo* (zero-measurand output, oppure offset), termine che non ha bisogno di precisazioni.

7.4.5.3. *Ripetibilità* (Repeatability). – Specifica l'attitudine del trasduttore a fornire valori della grandezza di uscita poco differenti fra loro, quando è applicato all'ingresso lo stesso misurando più volte consecutivamente, nelle stesse condizioni operative (§ 7.4.8). La *ripetibilità* è di regola espressa con le medesime modalità dell'*incertezza di taratura*.

7.4.5.4. *Isteresi (Hysteresis)*. – È la massima differenza fra i valori della grandezza d'uscita corrispondenti al medesimo misurando, quando si considerano tutti i possibili valori entro il *campo di misura*, ed ogni valore viene raggiunto, prima partendo dall'estremo inferiore, poi partendo dall'estremo superiore.<sup>36</sup> Il valore dell'*isteresi* può essere espresso in valore assoluto, relativo, o ridotto; a volte è espresso in unità di misura del misurando, utilizzando la curva di taratura per passare dalla differenza fra i valori dell'uscita alla corrispondente differenza fra i valori del misurando.

7.4.5.5. *Stabilità (Stability)*. – È la capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo.<sup>37</sup>

Viene espressa specificando la variazione massima<sup>38</sup> che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto, relativo, o ridotto, a parità di misurando e di *condizioni operative* (§ 7.4.8), entro un determinato intervallo di tempo. Può anche essere espressa in unità di misura del misurando, considerandola legata alla stabilità riferita all'uscita tramite la curva di taratura.

A volte è usato il termine *deriva (offset o shift)*, con significato più o meno equivalente. Viene anche usato, con riferimento all'uscita con misurando nullo, il termine *deriva dello zero (zero shift, oppure offset drift)*.

#### 7.4.6. Caratteristiche metrologiche in regime dinamico (Dynamic characteristics)

Sono l'insieme di quelle indicazioni che consentono di legare l'uscita del trasduttore al misurando, quando questo varia in modo tale che non si può più assumere che il sistema funzioni in regime stazionario (§ 7.3.7).

7.4.6.1. *Risposta in frequenza (Frequency response)*. – È un tipo di informazione molto ricca che dà indicazioni sulle variazioni della sinusoide di uscita quando il misurando, sinusoidale e di ampiezza costante, varia in frequenza entro un determinato campo di frequenze (§ 7.3.8.4, punto B).

In pratica si forniscono curve del tipo schematizzato in fig. 7-4, cioè si riportano, in funzione della frequenza, il rapporto fra l'ampiezza dell'uscita e l'ampiezza del misurando (curva di modulo) e lo sfasamento fra la sinusoide di uscita e quella che costituisce il misurando (curva di fase).<sup>39</sup> Di solito, per ampliare il campo riportato in diagramma, e non perdere troppo in capacità di lettura nella zona dei bassi valori, si usano scale logaritmiche, specialmente per l'asse delle frequenze. Molto spesso ci si limita a fornire una sintesi delle informazioni contenute nelle curve della risposta in *frequenza*. In particolare si definiscono le seguenti grandezze:

36. Così definita, l'*isteresi* congloba anche l'incertezza dovuta alla risoluzione. A volte i due fenomeni vengono divisi e al termine *isteresi* si attribuisce il significato di differenza fra l'*isteresi* nel senso da noi definito e la *risoluzione*.

37. Secondo i casi, si suole parlare di mesi o di anni. In ogni modo, si intende mettere in evidenza la variabile di influenza *tempo*, a cui si è accennato nel § 7.3.3, mentre con la *ripetibilità*, definita nel § 7.4.5.3, si vuole tenere in conto gli effetti delle altre grandezze d'influenza, nella loro variabilità a breve termine.

38. A volte, invece di specificare il valore massimo, si fornisce il valore della variazione associato a una determinata probabilità che essa si verifichi.

39. Come si è detto nel § 7.3.8.4 al punto B, le due curve sono anche il modulo e la fase della *funzione di trasferimento (transfer function)* del sistema.

A) *Campo di frequenze di non distorsione (Frequency range)*: È il campo di frequenze nel quale la curva di risposta in modulo non esce da una fascia di tolleranza prefissata, la cui ampiezza dipende dal grado di distorsione ammesso (§ 7.3.8.5). Di solito, con una dizione abbreviata, si parla semplicemente di *campo di frequenze del trasduttore*.

Com'è già stato precisato nel § 7.3.8.5, con riferimento alla fig. 7-7, il *campo di frequenza* è delimitato dalla *frequenza di taglio inferiore* e dalla *frequenza di taglio superiore*.

B) *Frequenza di risonanza (Resonant frequency)*: È la frequenza alla quale la curva di risposta in modulo presenta un massimo.<sup>40</sup>

Quando il trasduttore è rappresentato da un sistema di grado superiore al terzo, potrebbe presentare più di una frequenza di risonanza; in tal caso si suole fornire l'indicazione della più bassa.

7.4.6.2. *Risposta al gradino (Step response)*. – È la risposta del trasduttore a una variazione a gradino del misurando.<sup>41</sup>

Come si è visto nel § 7.3.8.4, al punto C, costituisce un'informazione sul comportamento dinamico del trasduttore molto ricca di indicazioni. Nelle figg. 7-10 e 7-14 sono state riportate le risposte tipiche rispettivamente di un sistema del primo e di un sistema del second'ordine.

Anche in questo caso, però, come nel caso della risposta in frequenza, si è soliti fornire indicazioni più sintetiche, costituite da un numero limitato di valori numerici. Le definizioni che seguiranno fanno riferimento all'illustrazione della fig. 7-5.

A) *Sovraelongazione (Overshoot)*: È definita solamente quando l'uscita, durante il transitorio, va al di là del valore di regime. È data dalla differenza fra il valore massimo e quello di regime dell'uscita, riferita, di regola, al valore di regime.

B) *Tempo morto (Dead time)*: È l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita supera un determinato valore di soglia al di sotto del quale viene considerata trascurabile.

C) *Tempo di salita (Rise time)*: Fissate due frazioni del valore di regime dell'uscita, una relativamente piccola (ad esempio, 5%, 10%), l'altra relativamente elevata (ad esempio, 90%, 95%), è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui l'uscita supera il primo valore e l'istante in cui supera per la prima volta il secondo.

D) *Tempo di risposta (Response time)*: È l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita supera per la prima volta una determinata frazione, relativamente elevata (ad esempio, 90%, 95%), del valore di regime.<sup>42</sup>

E) *Tempo di assestamento (Settling time)*: Fissata una fascia di valore intorno al valore di regime dell'uscita (ad esempio,  $\pm 5\%$ ), è l'intervallo di tempo fra l'istante in cui ha inizio il gradino del misurando e l'istante in cui l'uscita entra, per non uscirne più, nella suddetta fascia di valore.

40. Nel caso di un sistema del second'ordine (§ 7.3.8.6, punto C), la frequenza di risonanza è data dalla formula (7.21).

41. Entro il campo di funzionamento lineare del trasduttore (§ 7.3.8.1), è indifferente che il gradino parta da zero o da un livello, costante, diverso da zero. Per semplicità, di solito si fa riferimento alla prima situazione.

42. Spesso viene chiamato *costante di tempo (time constant)* il *tempo di risposta* corrispondente a una frazione del valore di regime pari a 63%.

F) *Frequenza delle oscillazioni di assestamento (Ringing frequency)*: È la frequenza delle oscillazioni smorzate che si verificano quando il sistema è sottosmorzato.<sup>43</sup>

G) *Fattore di smorzamento (Damping factor)*: Viene definito, nel caso di sistema oscillante, cioè sottosmorzato, come il rapporto fra la minore e la maggiore di due sovraelongazioni successive, nell'ipotesi che tale rapporto sia indipendente dalla coppia di sovraelongazioni considerate.<sup>44</sup>

7.4.6.3. *Risposta libera (Natural response)*. - È il modo in cui l'uscita del trasduttore evolve nel tempo, partendo da un valore iniziale non nullo, in assenza di misurando.

Essa coincide dunque con quella che nel § 7.3.8.3, nella formula (7.7), è stata messa in evidenza come evoluzione libera  $y_1(t)$ .

Questa particolare risposta è interessante perché, come è stato detto nel § 7.3.8.4, al punto A, essa pone in luce i modi del sistema.

Di solito non si riporta la risposta libera sotto forma di diagramma in funzione del tempo, perché l'informazione sarebbe inutilmente ridondante, ma ci si limita a fornire, nel caso in cui il sistema presenti un modo pseudoperiodico, cioè delle oscillazioni smorzate, la cosiddetta *frequenza libera*, o *frequenza naturale (natural frequency)*,<sup>45</sup> che non è altro che la frequenza del termine sinusoidale che appare nella formula (7.13).<sup>46</sup>

A volte si definisce anche la *frequenza naturale a smorzamento nullo (natural undamped frequency)*, che non ha riscontro con una condizione di funzionamento reale, ma è il valore teorico che assumerebbe la *frequenza naturale*, se il sistema non fosse per nulla smorzato.<sup>47</sup>

7.4.6.4. *Limite di velocità (Velocity limit)*. - È il valore limite della velocità di variazione del misurando, al di là del quale l'uscita non è in grado di variare con la stessa velocità con cui varia il corrispondente misurando.

7.4.6.5. *Tempo di recupero (Recovery time)*. - È l'intervallo di tempo richiesto, dopo un evento specifico (per esempio, un sovraccarico, una variazione a gradino nell'alimentazione ausiliaria, un corto circuito sull'uscita), affinché il trasduttore riprenda a funzionare secondo le caratteristiche specificate.

7.4.6.6. *Rumore (Noise)*. - È una variazione del segnale non correlata ad alcuna informazione.

43. In un sistema del second'ordine corrisponde alla pulsazione che compare nella formula (7.23) e che vale:

$$\omega = \sqrt{1 - z^2} \omega_0.$$

44. L'ipotesi è tanto più verificata, quanto più è corretta la rappresentazione del trasduttore mediante un sistema del second'ordine; in tal caso questo *fattore di smorzamento* coincide con l'omonimo coefficiente definito al punto C del § 7.3.8.6.

45. Questo valore di frequenza coincide con quella che, al punto F del § 7.4.6.2, è stata chiamata *frequenza delle oscillazioni di assestamento*; la differenza sta soltanto nel tipo di misurando a cui si fa riferimento: qui si pensa a un ingresso nullo, nel § 7.4.6.2 si ipotizza un ingresso a gradino.

46. Nel § 7.3.8.4, al punto A, si è visto che il numero dei modi dipende dall'ordine del sistema. Si possono quindi avere più di una *frequenza naturale*. In pratica, però, interessa sempre la *frequenza naturale* di valore più basso; d'altronde è abbastanza raro che un trasduttore debba essere rappresentato con un sistema di ordine superiore al secondo.

47. Nel caso di un sistema del second'ordine, è quella che al punto C del § 7.3.8.6 è stata definita *frequenza caratteristica*.

A volte è anche definita, con riferimento alle curve di risposta (fig. 7-13), come la frequenza alla quale la sinusoide di uscita è in ritardo di  $\pi/2$  rispetto alla sinusoide che costituisce il misurando.

È di solito fornito in valore efficace, precisando la banda di frequenze entro la quale viene preso in considerazione (più ampia è la banda, più elevato è il valore efficace).

Si può parlare di rumore sul misurando e di rumore sull'uscita, ma, mentre il rumore sul misurando riguarda esclusivamente lo stato del misurando stesso, cioè la sua capacità di convogliare un'informazione, quando si vuole caratterizzare un trasduttore si fa l'ipotesi che il rumore sia presente solo sull'uscita; la sua entità costituisce evidentemente un'importante indicazione sulla capacità del trasduttore di non inquinare l'informazione che proviene dal misurando.

L'entità del rumore è una grandezza fornita frequentemente, soprattutto quando si prevede che il misurando possa variare velocemente nel tempo (cioè corrisponda a una banda di frequenze abbastanza ampia); in ogni caso, però, la *risoluzione* è un'informazione sintetica che dovrebbe conglobarne l'effetto.

#### 7.4.7. Taratura (Calibration)

È il procedimento mediante il quale sono determinate le caratteristiche metrologiche del trasduttore.

Si noti che tale termine è spesso usato con un significato completamente diverso, cioè per indicare l'insieme di quelle operazioni di regolazione che conducono il trasduttore a presentare il comportamento desiderato.

Il procedimento di *taratura* può essere ripetuto durante la vita del trasduttore, specialmente se esso è andato soggetto a sollecitazioni anomale che possono averne alterate le *caratteristiche metrologiche*. In tal caso si suole parlare di *verifica di taratura*.

#### 7.4.8. Condizioni operative (Operating conditions)

Con questo termine si definisce l'insieme delle condizioni a cui risulta soggetto il trasduttore.<sup>48</sup>

Le *condizioni operative* sono oggetto di particolari prescrizioni che riguardano la *taratura*, il *funzionamento normale* e in condizioni di *sovraccarico*, la *conservazione in magazzino*.

Esse comprendono innanzi tutto i *campi di valore* in cui devono essere mantenute le *grandezze d'influenza* (§ 7.4.8.1), ma si riferiscono anche ad altre condizioni, a cui si accenna nel § 7.4.8.2).

7.4.8.1. *Grandezze d'influenza (Influence quantities)*. - Come si è già detto nel § 7.3.2, con questo termine si intendono tutte quelle grandezze, diverse dal misurando, le cui variazioni alterano in modo significativo le caratteristiche metrologiche del trasduttore.

È evidente che caso per caso si possono individuare grandezze d'influenza diverse, per comodità ne riportiamo qualche esempio, con riferimento alla suddivisione che è già stata fatta nel § 7.3.2.

— *Sistema misurato*: temperatura, pressione, umidità.

— *Sistema utilizzatore*: impedenza d'ingresso.

48. In inglese spesso si usa anche il termine *environmental conditions*, con significato più o meno equivalente.

— *Sistema ausiliario* eventuale: tensione, frequenza, impedenza equivalente.

— *Ambiente*: temperatura, pressione, umidità, vibrazioni, campi elettrici o magnetici.

Vengono definiti i seguenti *campi di valore*:

A) *Campo di riferimento* di una grandezza d'influenza (*Reference operating conditions*): È il campo entro il quale deve rimanere compresa la grandezza d'influenza nel corso della *taratura* del trasduttore, o di una sua eventuale *verifica* successiva.

B) *Campo di normale funzionamento* di una grandezza d'influenza (*Normal operating conditions*): È il campo entro il quale deve rimanere compresa la grandezza d'influenza durante l'uso del trasduttore, affinché siano utilizzabili le informazioni relative alle *caratteristiche metrologiche*.

C) *Campo di sicurezza* di una grandezza d'influenza: Campo entro il quale deve rimanere compresa la grandezza di influenza durante l'uso del trasduttore, affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna delle sue *caratteristiche metrologiche*. Spesso si parla anche di *limiti di sicurezza (operative limits)* intendendo i valori estremi del *campo di sicurezza*.

D) *Campo di magazzino* di una grandezza d'influenza (*Storage conditions*): È il campo nel quale deve rimanere compresa la grandezza d'influenza quando il trasduttore è a riposo, in condizioni di immagazzinamento, affinché non risulti permanentemente alterata qualcuna della sue *caratteristiche metrologiche*.

7.4.8.2. *Funzione d'influenza (Operating influence)*. — È l'informazione su come agisce una determinata *grandezza d'influenza* su una delle *caratteristiche metrologiche*.

Può essere fornita con una curva, o con uno o più valori numerici, ciascuno dei quali, in un determinato campo di valori, esprime la *sensibilità (sensitivity)* della *caratteristica metrologica* rispetto alle variazioni della *grandezza d'influenza*. Tipica è la *sensibilità termica (thermal sensitivity)*.

Per esempio, si può esprimere l'effetto della tensione della sorgente di *alimentazione ausiliaria* sulla *costante di taratura* mediante un coefficiente del tipo  $-0,1\%/V$ , volendo significare che in tutto il campo di *normale funzionamento* (o, secondo quanto specificato, entro il *campo di sicurezza*) l'aumento di un volt nella tensione provoca una diminuzione della *costante di taratura* pari a  $0,1\%$ .

7.4.8.3. *Altre condizioni*. — Secondo il tipo di trasduttore, vengono specificate, di solito in relazione solamente alla *taratura* e al *normale funzionamento*, altre condizioni, quali, ad esempio:

— l'*orientamento nello spazio (attitude)*, con riferimento alla forza di gravità;

— l'*altezza sul livello del mare (altitude)*;

— l'*accelerazione (acceleration)* in una direzione specificata, rispetto a un determinato sistema di riferimento;

— le *modalità di applicazione del carico*.

#### 7.4.9. Vita (Life)

È la durata minima garantita di funzionamento del trasduttore in condizioni di piena validità delle sue *caratteristiche metrologiche*.

Essa può essere specificata in modi diversi, secondo il tipo di trasduttore e, per lo stesso trasduttore, secondo l'informazione che si vuol dare.

A) *Numero di cicli (Cycling life)*: È il numero di escursioni del misurando da un estremo all'altro del *campo di misura*, o fra due limiti diversamente specificati.

B) *Tempo di funzionamento (Operating life)*: È l'intervallo di tempo nel quale il trasduttore è in funzione. Di regola si specifica se si intende *funzionamento continuo (continuous rating)* oppure *intermittente (intermittent rating)*.

C) *Tempo di magazzino (Storage life)*: È l'intervallo di tempo che il trasduttore trascorre in magazzino, senza funzionare, a determinate *condizioni di magazzino (storage conditions)*.

#### 7.4.10. Caratteristiche fisiche (Physical characteristics)

Con questo termine si intende l'insieme delle seguenti caratteristiche:

A) *Dimensioni (Dimensions)*: Le dimensioni fisiche esterne del trasduttore.

B) *Peso (Weight)*: Il peso del trasduttore e dei suoi eventuali accessori.

C) *Montaggio (Mounting)*: Le modalità con cui il trasduttore viene collegato al *sistema misurato* (viti, flange, collanti, ecc.) e al *sistema utilizzatore* (spine, connettori, ecc.).

D) *Materiali di costruzione (Materials of construction)*: I materiali usati in prevalenza nella costruzione delle varie parti del trasduttore (acciaio inossidabile, plastica, ecc.).

E) *Accessori (Accessories)*: Le apparecchiature ausiliarie (§ 7.2) che sono opportune, o necessarie, per il corretto funzionamento del trasduttore.

F) *Regolazioni (Adjustments)*: le modalità con cui si effettuano, quanto è possibile, le regolazioni dello *zero (zero)*, cioè dell'*uscita con misurando nullo*, e della *sensibilità (sensitivity)*.

#### 7.5. Alcuni trasduttori disponibili in commercio

In questo paragrafo, con l'aiuto della tab. 7/3, si è voluto presentare un certo numero di trasduttori, con le loro principali caratteristiche, secondo quanto precisato nel § 7.4.

Poiché i dati sono ricavati da cataloghi commerciali correnti, spesso si è dovuto rinunciare a fornire qualche informazione, perché non riferita dal costruttore. Altre volte si è dovuto effettuare conversioni di unità di misura (in origine non coincidenti con quelle del SI), con il risultato di ottenere numeri un po' insoliti come rappresentativi di campi di lavoro, campi di sicurezza, sensibilità, ecc. Infine qualche volta le informazioni sono fornite in modo incompleto, come quando si riporta il tempo di funzionamento senza precisare il tipo di servizio.

TABELLA 7/3. - Alcuni esempi di trasduttori

1.1. DIMENSIONI LINEARI		
<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Piezoresistività (6) 0 - 5 $\mu\text{m}$ 0 - 20 $\mu\text{m}$ Tensione continua 0 - 1 V 1 200 $\Omega$ 3,5 $\mu\text{V}$ Tensione cost.: 1 - 10 V	Trasformatore differenziale (12) $\pm 0,025 \text{ cm}$ $\pm 0,050 \text{ cm}$ Tensione sinusoidale a 30 kHz 0 - 360 mV 300 $\Omega$ Tens. sinus.: 3 V, 30 kHz
<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> In regime stazionario FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ In regime dinamico RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE	retta 1,5% $\frac{\Delta R/R}{\text{misurando}} = 0,02/\mu\text{m}$ 1% 6 kHz	retta 0,1% $\frac{\Delta V/V}{\text{misurando}} = 0,32 \cdot 10^{-3}/\mu\text{m}$ 0,002 $\mu\text{m}$ 0,02% $\pm 0,01\%/ \text{anno}$ 50 Hz
	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	- 29 °C ÷ 100 °C $\pm 0,22\%/^{\circ}\text{C}$ Resistenza: $\pm 0,7\%/^{\circ}\text{C}$
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	$> 10^{10}$ 5 anni 5 anni 1 cm × 0,12 cm × 0,05 cm Saldatura o Staffa Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Nessuna	$> 10^6$ 5 anni Illimitato 5 cm × 1 cm (diam. mass.) 14 g - Avvitato in foro filettato - Uscita a connettore (7 contatti). Acciaio inossid. Dello zero

(Segue tab. 7/3)

1.2. DIMENSIONI ANGOLARI		
<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Variaz. di induttanza (10) 0° ÷ 0,1° Sovraccarico: 25% Tens. alternata a 400 Hz 0 ÷ 11,8 V 0,5 W 65 $\Omega$ zero: 0,03 V Tens. alt.: 11,8 V, 400 Hz	Potenziometro (1) 1° ÷ 10 000° 0° ÷ 11 000° Secondo l'alim. ausiliaria Dipende dal generat. ausil. 1 000 $\Omega$ Tens. cost. o alt.: 12 ÷ 15 V
<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> In regime stazionario FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ In regime dinamico RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE	Retta 30' di arco 0,206 V/grado 1' di arco 1' di arco 0,5%/8 ore	retta $\pm 1\%$ 0,1 $\Omega/1^{\circ}$ 0,05'' di arco 0,1%
	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	- 40 °C ÷ + 100 °C - 55 °C ÷ + 125 °C 0,5%/°C
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	$10^7$ 3 anni 5 anni 9,7 cm × 3,3 cm (diam.) 120 g Staffa Uscita a connettore Allum. e acciaio inossid. Nessuna	$10^6$ 8,5 cm (diam.) × 15,5 cm 1,8 kg Albero rettificato Alluminio Microinterrut. di fine corsa Dello zero

(Segue tab. 7/3)

2.1.1. Spostamento lineare				
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	Variazione di capacità (9)	Variat. di induttanza (10)		
MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza	10 <sup>-6</sup> cm	0-0,002/0-0,008/0,02 cm fino al 150% del fondo scala		
USCITA: - Specie	Tensione continua	Tensione continua		
- Campo di normale funzionamento	0 ÷ 10 V	0 - 5 V oppure ± 2,5 V		
- Potenza	100 Ω	50 mW		
- Impedenza		10 Ω		
- Incertezza				
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Tensione costante: 28 V	Tensione costante: 28 V		
CARATTERISTICHE METROLOGICHE	FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità	± 0,25% del fondo scala		
		$\frac{\Delta V}{100 \cdot \frac{\Delta C}{C}} = 0,4$ volt		
		2 $\frac{V}{cm}$ al fondo scala		
		RISOLUZIONE	10 <sup>-3</sup> pF	2 · 10 <sup>-8</sup> cm
		RIPETIBILITÀ	1% del fondo scala	± 0,05% del fondo scala
In regime stazionario	ISTERESI	± 0,05% del fondo scala/		
	STABILITÀ	10 mV/24 ore	/8 ore	
	RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza	0 o 0,1% : 0 ÷ 15 kHz	0 ÷ 10 kHz	
In regime dinamico	RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni		Cost. di tempo: 160 μs	
	FREQUENZA NATURALE			
ALTRE CARATTERISTICHE				
GRANDEZZE D'INFLUENZA	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri	Temperat. di laboratorio	- 54 °C ÷ 72 °C	
	ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		± 1% per tutto il campo di normale funzionamento	
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino	1 anno (serv. continuo) Indefinito	10 <sup>6</sup> 1 anno 5 anni		
CARATTERISTICHE FISICHE:	- Dimensioni	12 cm × 3,8 cm (diam.)	2,5 cm (diam.) × 2,5 cm	
	- Peso	360 g	0,9 kg	
- Montaggio			Staffa	
- Materiali di costruzione	Uscita a spina Acciaio inossidabile		Uscita con terminali saldati Acciaio	
- Accessori				
- Regolazioni	Dello zero		Dello zero	

(Segue tab. 7/3)

2.1.2. Spostamento angolare				
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	Potenziometro a induzione (11,a)	Potenziometro (1)		
MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza	0° ÷ 360° 0° ÷ 360°	0° ÷ 350° 0 ÷ 358°		
USCITA: - Specie	Tensione sinusoidale modulata in ampiezza	Secondo l'alimentazione ausiliaria		
- Campo di normale funzionamento	0 ÷ 10 mV	6 W		
- Potenza	10 Ω	500 Ω ÷ 500 kΩ		
- Impedenza				
- Incertezza				
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Tens. sinus.: 1 W, 10 kHz	Tensione cost. o sinusoid.		
CARATTERISTICHE METROLOGICHE	FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità	Sinusoidale	Retta	
		0,5" d'arco	0,25%	
		RISOLUZIONE	0,05" di arco	0,001% del fondo scala
		RIPETIBILITÀ	0,1" d'arco	0,001% del fondo scala
		ISTERESI		
In regime stazionario	STABILITÀ	Dipende dai cuscin. a sfere		
	RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza			
In regime dinamico	RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni		Cost. di tempo trascurabile	
	FREQUENZA NATURALE			
ALTRE CARATTERISTICHE				
GRANDEZZE D'INFLUENZA	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri		Trascurabili	
	ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		4 · 10 <sup>-4</sup> °C	
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino			10 <sup>7</sup> 3 anni	
CARATTERISTICHE FISICHE:	- Dimensioni	Diametri da 5 cm a 30 cm	} Secondo le richieste dell'acquirente	
	- Peso	Da 1 kg a 38 kg		
- Montaggio		Uscita in cavo o morsetti		
- Materiali di costruzione		Acciaio inossidabile o Al		
- Accessori				
- Regolazioni		Dello zero		

(Segue tab. 7/3)

2.2.1. Velocità lineare	
<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Pick-up elettromagnetico (13,c) 0,0002 - 1,2 m/s sovraccarico di 110% Tensione sinusoidale 1 - 20 kΩ Nessuna Tensione continua ≤ 20 V
<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ In regime stazionario	Dinamo tachimetrica (13,d) 0,2 - 10 m/s Tensione continua 0 - 80 V 50 Ω 1% $4 \div 100 \frac{mV}{m/s}$ 0,1% 0,02 ÷ 0,1 $\frac{V}{cm/s}$ 0,25% del fondo scala 0,25% del fondo scala
<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE	Cost. di tempo trascurab. 20 kHz
<b>GRANDEZZE D'INFLUENZA</b> TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	< 70 °C 1 · 10 <sup>-4</sup> /°C zero: 0,01%/°C
<b>VITA:</b> - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino <b>CARATTERISTICHE FISICHE:</b> - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	10 <sup>7</sup> 1,9 cm (diam.) × 0,6 m 0,1 kg Acciaio inossidabile Uscita a connettore Acciaio e Al Dello zero

(Segue tab. 7/3)

2.2.2. Velocità angolare	
<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Potenzimetro (1) $\pm 15 \text{ gradi/s}$ $\pm 200 \text{ gradi/s}$ Secondo l'alim. ausiliaria 0 - 50 V 0,5 W $\leq 5 \text{ k}\Omega$ Tens. continua o alternata
<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ In regime stazionario	Dinamo tachimetrica (13,d) 210 gradi/s Tensione continua 600 Ω 1% $30 \frac{mV/V}{\text{gradi/s}}$ 0,7% 0,5% 0,25%/anno
<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE	Costante di tempo: 25 ms 10 Hz
<b>GRANDEZZE D'INFLUENZA</b> TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	2 · 10 <sup>-6</sup> /°C
<b>VITA:</b> - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino <b>CARATTERISTICHE FISICHE:</b> - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	10 <sup>6</sup> 3 anni 7 cm <sup>2</sup> × 9 cm 7 kg 4 bulloni Acciaio 3 cm (diam.) × 15 cm

(Segue tab. 7/3)

2.3.1. Accelerazione lineare	
<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Piezoelettricità (14) $10^{-3} \div 10\ 000\ \text{m/s}^2$ $10^{-3} \div 10\ 000\ \text{m/s}^2$ Tensione continua Dipende dall'aliment. ausil. $0,5\ \text{W}$ $2 \div 5\ \text{k}\Omega$ Capacità: $3\ 300\ \text{pF}$ Tensione continua $\leq 28\ \text{V}$
<b>FUNZIONE DI TARATURA:</b> - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ In regime stazionario	Retta $3\%$ $0,6\ \frac{\text{mV}}{\text{m/s}^2}$ $5 \cdot 10^{-4}\ \text{m/s}^2$ Invariante in 5 anni Costante di tempo: $10^{-5}\ \text{s}$ $> 10\ \text{kHz}$ $5 \div 140\ \text{Hz}$
<b>RISPOSTA IN FREQUENZA:</b> - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE	$1\%$ del fondo scala $1\ \frac{\text{V}}{\text{fondo scala}}$ $0,5 \cdot 10^{-3}$ del fondo scala $1\%$ del fondo scala $5 \div 140\ \text{Hz}$
<b>TEMPERATURA:</b> - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	$-20 \div +71\ ^\circ\text{C}$ $2,5\%$ di variazione a $100\ ^\circ\text{C}$ $10^6$ $5$ anni $10$ anni $2\ \text{cm} \times 3,5\ \text{cm} \times 2,5\ \text{cm}$ $70\ \text{g}$ Uscita con correttore BNC Al e acciaio Nessuna
<b>VITA:</b> - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	$10^6$ $3$ anni $2,5\ \text{cm} \times 2\ \text{cm} \times 3,5\ \text{cm}$ $1\ \text{kg}$ Dello zero

606

607

(Segue tab. 7/3)

2.3.2. Acceleraz. angolare	
<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	Variazione di capacità (9) $100 \div 3\ 000\ \text{rad/s}^2$ Sovraccarico del $110\%$ Tensione continua $5\ \text{volt}$ $< 1\ \text{W}$ $1 - 5\ \text{k}\Omega$ Tensione costante: $15\ \text{V}$ Tens. alternata: $500\ \text{kHz}$
<b>FUNZIONE DI TARATURA:</b> - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ In regime stazionario	Retta $0,5\%$ $5\ \text{V}$ a fondo scala $5 \cdot 10^{-6}$ $0,05\%$ Invariante $0 \div 120\ \text{Hz}$ da $50$ a $120\ \text{Hz}$
<b>RISPOSTA IN FREQUENZA:</b> - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE	Retta $0,05 \cdot 10^{-6}\ \text{cm}$ $0,5 \cdot 10^3\ \text{V/cm}$ $1 \cdot 10^{-4}$ Invariante Cost. di tempo elettr. $5\ \mu\text{s}$ $65\ \text{Hz}$ (meccanica)
<b>TEMPERATURA:</b> - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	$0,1\%/^\circ\text{C}$ $10^7$ $5$ anni o $1\ 000$ ore $5$ anni $3\ \text{cm}$ (diam.) $\times 5\ \text{cm}$ $1,5\ \text{kg}$ Flange Terminali da saldare Lega di Al Della sensibilità
<b>VITA:</b> - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	$10^6$ $10$ anni Senza limiti $7\ \text{cm} \times 3\ \text{cm} \times 0,8\ \text{cm}$ Della sensibilità

(Segue tab. 7/3)

		4. Forza	5. Coppia
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO		Estensimetro (2) (montato su organo elastico)	Fotoresistività (7)
MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza		da 0 ÷ 2,5 a 0 ÷ 15 N Sovraccarico del 150%	da 0 ÷ 0,2 a 0 ÷ 2 N · cm Sovraccarico del 100%
USCITA: - Specie		Secondo l'alim. ausiliaria	
- Campo di normale funzionamento		0 ÷ 40 mV	0 ÷ 100 µA
- Potenza		350 Ω	< 300 Ω
- Impedenza			
- Incertezza			
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		Tens. cont. o altern.: 18 V	Tens. cost.: 12 V, 250 mA
CARATTERISTICHE METROLOGICHE	In regime stazionario	FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura	Retta
		- Incertezza	0,2% del fondo scala $\frac{40 \text{ mV}}{\text{Portata}}$
		- Sensibilità	0,25% del fondo scala $\frac{1}{100}$ del fondo scala
		- Linearità	1 · 10 <sup>-4</sup> del fondo scala
		RISOLUZIONE	Infinitesima
In regime dinamico	RIPETIBILITÀ	ISTERESI	0,5%/1000 ore
		STABILITÀ	
		RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza	Cost. di tempo: 0,5 ms
		RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni	0,6 ÷ 2,2 kHz
		FREQUENZA NATURALE	
ALTRE CARATTERISTICHE			
GRANDEZZE D'INFLUENZA	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri	- 40 °C ÷ + 90 °C	0 ÷ 180 °C
		4 · 10 <sup>-6</sup> del fondo scala/°C	
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA			
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino		Senza limiti	10 <sup>7</sup> > 3 000 ore Senza limiti
CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio		8 cm (diam.) × 6 cm 2 kg	5 cm (diam.) × 10 cm 0,5 kg Staffa
- Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni		Nessuna	Allum. e acciaio inossidabile Dello zero

(Segue tab. 7/3)

		6. Pressione	7. Suono
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO		Piezoresistività (6)	Variazione di capacità (9)
MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza		da 0 ÷ 5 a 0 ÷ 100 bar Sovraccarico del 50%	17 ÷ 140 dB < 165 dB
USCITA: - Specie		Tensione continua	Tensione
- Campo di normale funzionamento		0 ÷ 3 V	10 µV ÷ 10 V
- Potenza		30 mW	Corrente: 0,6 mA
- Impedenza		200 Ω	< 100 Ω
- Incertezza			
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		Tensione costante: 3V	Tens. cost.: 200 V; 2,5 mA
CARATTERISTICHE METROLOGICHE	In regime stazionario	FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura	
		- Incertezza	0,5%
		- Sensibilità	30 mV/bar
		- Linearità	
		RISOLUZIONE	0,0007 bar
In regime dinamico	RIPETIBILITÀ	ISTERESI	5 mV/µbar
		STABILITÀ	0,3 dB/anno
		RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza	0 ÷ 100 Hz
		RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni	20 Hz ÷ 18 kHz a ± 1,5 dB
		FREQUENZA NATURALE	100 Hz
ALTRE CARATTERISTICHE			
GRANDEZZE D'INFLUENZA	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri	< 190 °C	- 8 °C ÷ + 50 °C
			0,01 dB/°C
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA			
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino		10 <sup>6</sup> 10 anni	
CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio		0,5 mm (sp.) × 15 mm (diam.) 0,025 g	2,5 cm (diam.) × 14 cm 0,8 kg
- Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni		Rame	Usc. con cavo e spina a tubo Acciaio inossidabile

(Segue tab. 7/3)

<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	<b>8. Portata in massa</b> Filo caldo (4) $0,0001 \div 0,01 \text{ kg/s}$ $< 0,3 \text{ kg/s}$ Tensione continua $0 \div 0,5 \text{ V}$ $2 \text{ mW}$ $< 50 \Omega$ Tensione costante: 28 V	<b>9. Temperatura</b> Termoresistore (3) $0 \text{ }^\circ\text{C} \div 100 \text{ }^\circ\text{C}$ Tensione continua $2.252 \div 5.000 \Omega$ Tensione costante $< 5 \text{ V}$
	<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	Retta $1\%$ $200 \frac{\text{V}}{\text{kg/s}}$ $0,0005 \text{ kg/s}$ $1\%$ $1\%$ /anno Costante di tempo: 5 s Nessuna $- 15 \text{ }^\circ\text{C} \div + 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 50 000 ore $3 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ $0,3 \text{ kg}$ Uscita a connett. bipolare Acciaio inossidabile

610

(Segue tab. 7/3)

<b>PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO</b> MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza USCITA: - Specie - Campo di normale funzionamento - Potenza - Impedenza - Incertezza ALIMENTAZIONE AUSILIARIA	<b>10. Flusso di calore</b> Effetto Seebeck (16) $0 \div 15.000 \text{ J/m}^2/\text{s}$ Tensione continua $0 \div 80 \text{ mV}$ $1,6 \text{ mW}$ $4 \Omega$ Nessuna	<b>11. Radiazione elettrom.</b> Fotoresistività (7) $0 - 2 \text{ W}$ Tensione continua $100 \div 1.000 \mu\text{V}$ $50 \div 500 \Omega$ Tens. continua: $10 - 250 \text{ V}$
	<b>CARATTERISTICHE METROLOGICHE</b> FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura - Incertezza - Sensibilità - Linearità RISOLUZIONE RIPETIBILITÀ ISTERESI STABILITÀ RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni FREQUENZA NATURALE ALTRE CARATTERISTICHE TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri ALIMENTAZIONE AUSILIARIA VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio - Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni	Retta $3\%$ della portata $9 \text{ mV}$ $\frac{\text{kJ/m}^2/\text{s}}$ $0,09 \frac{\text{mV}}{\text{kJ/m}^2/\text{s}}$ $1\%$ della portata $2\%/2 \text{ anni}$ $1 \cdot 10^{-11} \text{ W}$ $10\%$ $10\%/3 \text{ anni}$ Costante di tempo: 15 s Cost. di tempo: $10 \div 50 \text{ ms}$ $< 190 \text{ }^\circ\text{C}$ $- 100 \text{ }^\circ\text{C} \div + 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $7\%/^\circ\text{C}$ $> 500.000$ $> 2 \text{ anni}$ $> 5 \text{ anni}$ $1 \text{ cm (diam.)} \times 0,3 \text{ cm}$ $15 \text{ g}$ $10 \text{ cm} \times 3 \text{ cm (diam.)}$ $0,2 \text{ kg}$ Flangia Vetro Nessuna

611

(Segue tab. 7/3)

		12. Radiazione nucleare	13. Campo magnetico	
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO		Ionizzazione di semiconduttore (19)	Effetto Hall (18)	
MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza		Tipo di radiazione: 7 000 Å ± 0,07 Å Tens. alternata a 20 kHz	10 <sup>-6</sup> ÷ 10 <sup>-1</sup> T	
USCITA: - Specie		0 ÷ 10 V	Tensione	
- Campo di normale funzionamento		10 Ω	60 Ω	
- Potenza				
- Impedenza				
- Incertezza				
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		Tensione continua: 1 kV	Corrente costante: 100 mA	
CARATTERISTICHE METROLOGICHE	In regime stazionario	FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura		
		- Incertezza	1,25% a 10 V	
		- Sensibilità	1% del fondo scala	
	In regime dinamico	RISOLUZIONE	175 eV a 6,4 keV	3 · 10 <sup>-8</sup> T
		RIPETIBILITÀ	0,1%	0,01% del fondo scala
		ISTERESI STABILITÀ	0,1%/anno	0,1% del fondo scala/anno
In regime dinamico	RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza	} Tempo di salita: 0,1 μs } Tempo morto: 20 μs	Cost. di tempo < 5 · 10 <sup>-8</sup> s	
	RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni			
FREQUENZA NATURALE		} Rendimento: 100% } da 0 a 22 keV		
ALTRE CARATTERISTICHE				
GRANDEZZE D'INFLUENZA	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri	5 · 10 <sup>-5</sup> /°C	- 20 ÷ 80 °C	
	ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		0,2%/°C	
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino		1 anno 2 anni	10 <sup>9</sup> > 5 anni > 5 anni	
CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio		0,3 m × 0,3 m × 0,6 m 5 kg	0,5 cm × 0,6 cm × 0,05 cm 0,15 g Per adesione Uscita con fili Ceramica	
- Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni		Della sensibilità	Nessuna	

(Segue tab. 7/3)

		14. Umidità relativa		
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO		Variazione di resistività ionica (8a)		
MISURANDO: - Campo di misura - Campo di sicurezza		0 ÷ 100%		
USCITA: - Specie		Corrente alternata		
- Campo di normale funzionamento		0 ÷ 1 mA		
- Potenza		1 kΩ ÷ 15 kΩ		
- Impedenza				
- Incertezza				
ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		Tens. alt.: 20 Hz ÷ 20 kHz		
CARATTERISTICHE METROLOGICHE	In regime stazionario	FUNZIONE DI TARATURA: - Curva di taratura	Logaritmica	
		- Incertezza	2,5%	
		- Sensibilità		
	In regime dinamico	RISOLUZIONE	0,05%	
		RIPETIBILITÀ	2,5%	
		ISTERESI STABILITÀ	2,5% 1%/anno	
In regime dinamico	RISPOSTA IN FREQUENZA: - Campo di frequenze - Frequenza di risonanza	} costante di tempo: 30 s		
	RISPOSTA AL GRADINO: - Sovraelongazione - Altre indicazioni			
FREQUENZA NATURALE				
ALTRE CARATTERISTICHE				
GRANDEZZE D'INFLUENZA	TEMPERATURA: - Campo di riferimento - Campo di normale funzionamento - Campo di sicurezza - Campo di magazzino - Funzioni d'influenza: costante di taratura incertezza altri parametri	5 · 10 <sup>-5</sup> /°C	- 70 ÷ + 90 °C	
	ALIMENTAZIONE AUSILIARIA		0,4%/°C	
VITA: - Numero di cicli - Tempo di funzionamento - Tempo di magazzino		3 ÷ 5 anni 10 anni		
CARATTERISTICHE FISICHE: - Dimensioni - Peso - Montaggio		2 cm × 3 cm × 0,15 cm 2,5 g		
- Materiali di costruzione - Accessori - Regolazioni		Plastica		
		Nessuna		

## BIBLIOGRAFIA

### Teoria dei sistemi e del controllo automatico

L'impostazione dello studio di un sistema di misura non richiede un approfondimento particolare della teoria dei sistemi; sono più che sufficienti i concetti metodologici elementari reperibili di solito nei libri di carattere generale sul controllo automatico.

Fra gli altri, ad esempio, i seguenti:

*in lingua italiana*

A. LEPSCHY e A. RUBERTI, *Lezioni di controlli automatici*, Siderea, Roma, 1967.

G. MARRO, *Controlli automatici*, Zanichelli, Bologna, 1978.

*in lingua inglese*

J. J. D'AZZO e C. H. HOUPIS, *Linear control system analysis and design*, McGraw-Hill, New York, 1975.

### Matematica

Trattazioni sulla risoluzione dei sistemi di equazioni differenziali lineari a derivate totali e sui vari tipi di trasformazioni lineari sono reperibili su manuali di matematica applicata:

*in lingua italiana*

M. R. SPIEGEL, *Manuale di matematica*, Schaum-Etas Libri, Milano, 1974.

R. FAURE, A. KAUFMANN, M. DENIS-PAPIN, *Manuale di matematica*, ISEDI, Milano, 1971.

*in lingua inglese*

S. A. SCHELKUNOFF, *Applied mathematics for engineers and scientists*, Van Nostrand, Princeton, 1965.

### Trasduttori

Lo studio dei trasduttori costituisce spesso un capitolo più o meno ampio dei libri di misure, in particolare di misure elettriche od elettroniche e di misure meccaniche.

Fra questi, *in lingua italiana*, si possono citare:

M. BERTOLACCINI, C. BUSSOLATI, P. F. MANFREDI, *Elettronica per misure industriali*, Tamburini, Milano, 1975.

A. BRAY e V. VICENTINI, *Meccanica sperimentale*, Levrotto e Bella, Torino, 1975.

G. ZINGALES, *Metodi e strumenti per le misure elettriche*, UTET, Torino, 1976.

*In lingua inglese* è particolarmente prezioso, per l'approfondimento degli argomenti e per la vastità dei temi:

E. O. DOEBELIN, *Measurement systems*, McGraw-Hill, Kogakusha, Tokyo, 1975.

J. O. HOUGEN, *Measurement and control applications*, ISA, Pittsburgh, 1979.

Un quadro abbastanza completo dei trasduttori con uscita anche non elettrica corredato da ricche tabelle sinottiche e da informazioni relative alle case costruttrici, è contenuto nell'ottimo libretto:

P. H. MANSFIELD, *Electrical Transducers for Industrial Measurement*, Butterworths, London, 1973.

*In italiano* è uscito recentemente un ottimo libro, che affronta il problema dei trasduttori nella strumentazione industriale:

M. PETTERNELLA e R. VITELLI, *Strumentazione industriale. Trasduttori e regolatori*, UTET, 1981.

Infine, chi volesse consultare un « megacatalogo », non aggiornato ma insostituibile come quadro generale, tenga presente i tre volumi che vanno sotto il nome di:

*ISA Transducer Compendium*, ISA, Pittsburgh, 1967.