



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica

Tesi di Laurea Triennale

Sensori di prossimità nell'automazione industriale

Relatore: Prof. Alvise Maschio

Laureando: Simone Massignan

Anno Accademico 2010-2011

Indice

Introduzione	vii
1 I sensori	1
1.1 Introduzione	1
1.2 La misurazione delle grandezze fisiche	1
1.2.1 Grandezze fisiche e segnali	3
1.2.2 La discretizzazione dell'informazione	3
1.3 Sensore o trasduttore	4
1.4 Il ruolo del sensore in un sistema di misura	6
1.5 Il modello di un sensore	9
1.5.1 Modello matematico del trasduttore	9
1.5.2 Grandezze di influenza	10
1.5.3 La dipendenza dal tempo	11
1.5.4 I campi di variabilità del misurando	11
1.5.5 Il campo di variabilità dell'uscita	12
1.5.6 Funzionamento in regime stazionario o dinamico	12
1.5.7 Funzionamento in regime dinamico	12
1.5.8 L'analisi nel tempo	13
1.5.9 L'analisi in frequenza	14
1.6 Elementi di caratterizzazione di un sensore	17
1.6.1 Premessa	17
1.6.2 Principio di funzionamento	17
1.6.3 Misurando (measurand)	18
1.6.4 Uscita (Output)	18
1.6.5 Alimentazione ausiliaria (Auxiliary supply)	19
1.6.6 Caratteristiche metrologiche in regime stazionario (Static metrological characteristics)	19
1.6.7 Caratteristiche metrologiche in regime dinamico (Dynamic characteristics)	21
1.6.8 Condizioni operative (Environmental conditions)	24
1.6.9 Vita (Life)	25
1.6.10 Caratteristiche fisiche (Physical characteristics)	25
2 Principi di funzionamento	27
2.1 Introduzione	27
2.2 I sensori di prossimità induttivi	29
2.2.1 Il sensore a riluttanza variabile lineare a singola bobina (The Single-Coil Linear Variable-Reluctance Sensor)	33
2.2.2 Il sensore a riluttanza variabile-differenziale (The Variable-Differential Reluctance Sensor)	35

2.2.3	Trasduttori ad accoppiamento variabile (Variable-Coupling Transducers)	37
2.2.4	Il trasformatore di spostamento variabile linearmente (Linear Variable-Differential Transformer)	38
2.2.5	Trasduttori induttivi a correnti di eddy	45
2.2.6	Schermatura e sensibilità dei sensori induttivi alle interferenze elettromagnetiche	47
2.3	I sensori di prossimità capacitivi	48
2.3.1	Sensori di spostamento a variazione di distanza	49
2.3.2	Sensori di spostamento a variazione di area	50
2.3.3	Sensori di spostamento a variazione di permeabilità dielettrica	51
2.3.4	Sensori capacitivi differenziali	51
2.3.5	Sensori di posizione capacitivi nei circuiti integrati	54
2.4	I sensori di prossimità magnetici	57
2.4.1	Sensori magnetostrettivi	58
2.4.2	Sensori magnetoresistivi	61
2.4.3	Sensori a effetto Hall	62
3	Sensori industriali e loro applicazioni	69
3.1	Caratteristiche principali dei sensori di prossimità	69
3.1.1	Distanza di rilevamento	69
3.1.2	Isteresi	70
3.1.3	Ripetibilità	70
3.1.4	Frequenza di commutazione	71
3.1.5	Tempo di risposta	71
3.2	Sensori di prossimità e sensori logici	71
3.2.1	Proximity induttivi attivi	72
3.2.2	Sensori induttivi passivi	85
3.2.3	Sensori industriali capacitivi	86
3.2.4	Interruttori Hall	97
3.2.5	Sensori Hall analogici	98
3.2.6	Contatti reed	99
3.2.7	Il cavo Wiegand	105
	Bibliografia	107

Introduzione

I sensori di grandezze fisiche hanno costituito da sempre un settore di importanza rilevante per lo sviluppo tecnologico delle attività produttive di tutti i comparti industriali. In questi ultimi tempi, il forte sviluppo dell'elettronica e delle tecnologie informatiche da un lato, e l'imponente spinta verso l'automazione di processi produttivi ed il controllo di processo dall'altro, ne hanno rivelato contemporaneamente la funzione primaria ed il ritardo tecnologico rispetto ad altri componenti di sistemi complessi. La naturale conseguenza è stata un massiccio investimento di risorse pubbliche e private nell'attività di ricerca e sviluppo, che è tuttora in corso, attinente sia i principi di funzionamento che le tecniche produttive per garantire nuovi sensori più precisi, economici ed affidabili.

Nel processo industriale il prodotto finale viene ottenuto mediante un insieme di azioni su entità fisiche, quali ad esempio materiali, semilavorati etc. La corretta gestione di queste azioni, e quindi di tutto il processo, richiede che i risultati di molte di tali azioni vengano verificati contemporaneamente al loro svolgersi. Questo controllo può essere effettuato da un operatore umano o da un apparato che lo effettua automaticamente. Nel caso in cui il controllo venga effettuato da un apparato lo si definisce controllo automatico. Mentre l'operatore umano può valersi dei propri sensi per osservare l'andamento del processo, il controllo automatico deve fondarsi su dispositivi, detti appunto sensori, che forniscono all'apparato di controllo informazioni relative all'andamento del processo stesso. Lo sviluppo industriale dell'ultimo secolo è stato caratterizzato da un sempre più accelerato spostamento del controllo dei processi dalla tipologia manuale a quella automatica e, quindi, ad un sempre più largo impiego di sensori, di dispositivi che forniscono un segnale di natura per lo più elettrica (tensione o corrente) che può essere misurato o elaborato da un apparato, segnale che è funzione di un'altra grandezza di ingresso che indichiamo solitamente con il termine misurando.

E' interessante osservare che i settori industriali a più elevato livello di automazione costituiscono ancor oggi le aree di maggior rilievo per il mercato dei sensori industriali, ma che nel contempo la quota di mercato di tali aree sta diminuendo a vantaggio di aree emergenti, quali l'industria manifatturiera, la cui crescita è caratterizzata da un trend fortemente positivo. Si sono ottenuti progressi in altre importanti aree di mercato di sensori come quelle riguardanti la produzione di mezzi di trasporto e di macchine elettriche. Ai fini del controllo automatico completo, ottenuto tramite una catena di reazione chiusa, operante in tempo reale, occorre che tutti i componenti della catena (sensori, interfaccia, elaboratore e attuatori) funzionino con prontezza confrontabile e con tempi propri tutti inferiori a quelli caratteristici del processo, in modo da non introdurre ritardi nel controllo e nella correzione del processo stesso. L'introduzione di elaboratori adeguatamente veloci e potenti ha consentito di rendere superflua l'azione dell'operatore umano, a patto che i sensori siano sufficientemente pronti.

I risultati conseguiti nell'automazione di processo hanno avuto un risvolto positivo anche per quanto riguarda l'aspetto economico. Due sono i fattori che hanno influenzato nell'ambito metalmeccanico la progressiva automazione di processo: l'aumento del costo della manodopera e quindi del costo dell'operatore e la comparsa sul mercato

di dispositivi di elaborazione (microprocessori) con rapporti prezzo/prestazioni sempre più vantaggiosi e tali da consentire di introdurre il controllo automatico di processo a costi decrescenti. Lo sviluppo di nuovi tipi di sensori è stato frequentemente favorito da applicazioni di risultati ottenuti nell'ambito di laboratori di ricerca, dove la necessità di estendere le nostre conoscenze della natura stimola l'invenzione di dispositivi in grado ad esempio di consentire la misura di grandezze fisiche con sempre maggior precisione e sensibilità. Inoltre la scoperta di nuovi fenomeni fisici è stata altresì utilizzata per la realizzazione di nuovi tipi di sensori. Si giustifica così la continua attenzione data dai tecnici allo sviluppo di nuovi sensori nei laboratori di ricerca, nello sforzo continuo di capire e prevedere rapidamente nuove possibilità di applicazione che possono nascere. Il trasferimento ad altri settori dei risultati raggiunti in laboratorio richiede spesso l'impiego di risorse di tipo diverso da quelle necessarie per la realizzazione di tali sensori in laboratorio; perchè un sensore sviluppato in laboratorio sia utilizzabile per applicazioni industriali è spesso necessario realizzare un dispositivo con qualità di affidabilità e riproducibilità alquanto superiori a quelle richieste da un sensore di laboratorio, senza diminuire le sue caratteristiche essenziali e per di più abbassando i costi della sua realizzazione a livelli accettabili per l'impiego industriale. Le difficoltà che si incontrano in questa attività fanno sì che il sorgere di una domanda di un nuovo tipo di sensore non provochi necessariamente una corrispondente offerta: è necessario infatti che i produttori di sensori vedano che, per prezzo e per quantitativi da produrre in prospettiva, l'inizio di una produzione industriale di quel determinato tipo di sensori offra adeguate speranze di profitto.

L'uomo ha sempre avuto la necessità di misurare per poter interagire con il mondo fisico che lo circonda, e non si accontenta certo di misurare a spanne. L'accuratezza della misura è assai importante: potrebbe forse un manipolatore spostare un uovo se non fosse in grado di dosare, misurandola e controllandola la forza di presa? Svariate sono le grandezze fisiche oggetto di misurazione: posizione, velocità, accelerazione per il controllo di movimenti, forza, pressione, per citarne solo alcune. La misura è necessaria non solo per il controllo del movimento ma anche per molteplici operazioni fra cui, per esempio, l'analisi dimensionale di oggetti per la verifica del rispetto delle specifiche del progetto, la misura dello stato di usura degli utensili di lavorazione. I sensori che verranno qui trattati saranno quelli di posizione o anche detti di prossimità (proximity).

In questi due ultimi decenni, la tecnologia della microelettronica ha consentito la diffusione commerciale di sensori MEMS realizzati su tessere di silicio a forma rettangolare o quadrata di dimensioni di qualche millimetro di lato realizzando strutture sensibili la cui precisione di lavorazione è dell'ordine del micron. Dispositivi così piccoli hanno costi contenuti purchè siano prodotti in quantità elevata. La ricerca sui sensori corre frenetica: sensori wireless stanno prepotentemente diffondendosi nei settori industriali della robotica; essi ci svincolano dall'uso del cavo tradizionale permettendo misure su organi rotanti, oggetti in movimento o in ambienti protetti suggerendo soluzioni anche per problemi di misura all'interno del corpo umano. Tali sensori utilizzano l'energia necessaria per misurare ed inviare il dato di misura all'unità di acquisizione prelevandola da una batteria montata solidale al sensore stesso. Una sfida recente è stata quella di studiare e realizzare sensori autonomi, ossia sensori sprovvisti di batteria e abili a ricavare l'energia necessaria per il loro funzionamento o dall'ambiente in cui operano, o dalle onde elettromagnetiche con cui comunicano. Evidenti sono i vantaggi derivanti dall'uso dei sensori autonomi: diminuzione dei costi di manutenzione per citare quello di maggiore impatto tecnico-commerciale ma anche maggior qualità del nostro ambiente di vita dal momento che possono contribuire alla riduzione del problema dello smaltimento delle batterie e sfruttano l'energia dell'ambiente sia

questa disponibile o come movimento o sotto altra forma, per esempio, salto termico, vibrazione o radiazione luminosa. Ciò che sembrava utopia diventa realtà grazie all'evoluzione delle tecnologie al silicio e un numero sempre crescente di applicazioni sta già beneficiando di questa nuova scoperta: dal monitoraggio ambientale alla misura della pressione degli pneumatici, dalla rilevazione dei fumi negli impianti antincendio alle soluzioni per l'identificazione automatica anche in ambito manifatturiero. Il futuro potrebbe riservarci la sorpresa di vedere robot che interrogano gli oggetti da manipolare ricevendo in risposta la loro carta d'identità con informazioni aggiuntive relative alle variazioni dimensionali o al nuovo stato tensionale conseguenza dei processi di lavorazione subiti e che spostano l'oggetto, ricaricandone il suo serbatoio di energia, verso il percorso successivo di lavorazione scelto in base alle informazioni ricevute. Tutto ciò conferma quanto sia in evoluzione la ricerca e lo sviluppo di nuovi sensori e di nuove tecnologie e quanto sia importante il loro ruolo nelle più svariate applicazioni con lo scopo di facilitare la vita dell'uomo, con un occhio di riguardo anche alla salvaguardia dell'ambiente che ci circonda.

Capitolo 1

I sensori

1.1 Introduzione

La possibilità di misurare per via elettrica grandezze non elettriche ha consentito di trasferire sui segnali che recano le informazioni relative a queste grandezze i grandi vantaggi tipici dei segnali elettrici: possibilità di amplificazione e filtraggio, possibilità di usare strumenti indicatori e registratori per estrarre le informazioni stesse a qualunque distanza, possibilità, previa conversione, analogica-numerica, di accedere all'elaborazione. I sensori sono dispositivi essenziali con i quali una grandezza fisica non elettrica viene trasformata in elettrica: costituiscono il primo anello della catena di misura come si può notare in figura 1.1.

1.2 La misurazione delle grandezze fisiche

In ogni attività di carattere sperimentale si richiede la conoscenza del valore di una o più grandezze fisiche, per poter svolgere elaborazioni di tipo quantitativo sulla base di opportuni modelli con i quali si intende interpretare la realtà. Con una prima definizione potremmo dire che misurare significa attuare un procedimento di tipo empirico ed oggettivo, mediante il quale vengono assegnati dei numeri alle proprietà di oggetti o fenomeni del mondo reale, con il fine di descriverli in modo quantitativo. E' intrinseco alla natura stessa della misurazione il carattere ibrido di essere coinvolta contemporaneamente con entità del mondo empirico (gli oggetti della misurazione) e con entità astratte (i numeri, risultati della misurazione). La scienza e la tecnica si basano su

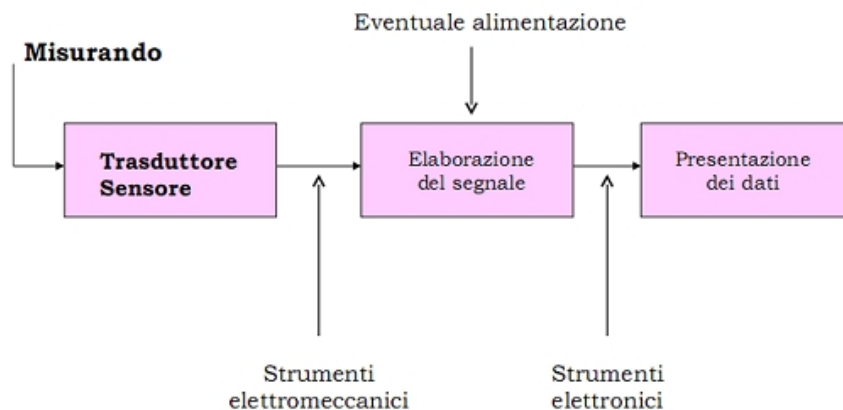


Figura 1.1: Schema di una catena di misura.

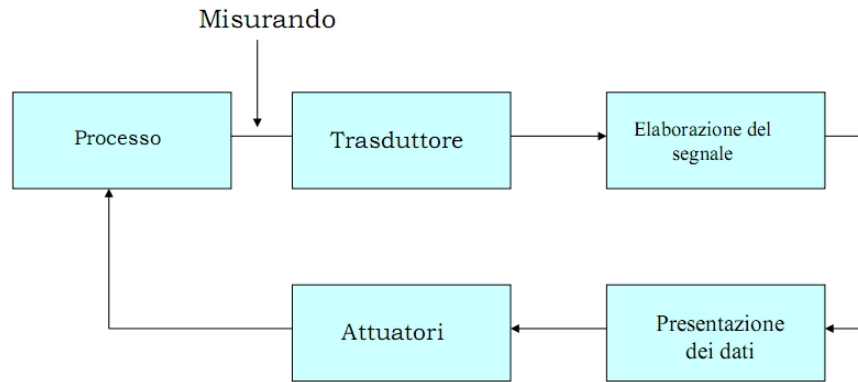


Figura 1.2: Schema di una catena di regolazione.

informazioni di tipo intersoggettivo e su modelli matematici. E' evidente come la misurazione venga incontro a tali esigenze, consentendo di trasformare le proprietà in numeri. Si dice anche che la misurazione è quel processo che porta alla quantificazione di una grandezza fisica e il risultato della misurazione viene chiamato appunto misura. Come esempio di misurazione scegliamo un controllo di processo: la sua gestione è affidata al calcolatore principale, che contiene nella sua memoria gli algoritmi di controllo e di elaborazione delle informazioni e costituisce il cuore del sistema. Da esso partono i comandi verso gli attuatori, ad esso giungono le informazioni che devono passare attraverso una serie di sottosistemi: i sensori, i condizionatori di segnale, i trasmettitori, il sistema per l'acquisizione dei dati. L'insieme delle funzioni espletate dai diversi sottosistemi si configurano come una vera e propria trasformazione, i cui risultati sono utilizzati dal calcolatore, e come ciascuno di essi sia caratterizzato rispetto alla sua funzione principale, che consiste nel manipolare e trasmettere informazioni. In figura 1.2 notiamo lo schema di una catena di regolazione.

Un sistema di misura (figura 1.3) è generalmente formato da una catena di elementi che ne caratterizzano sia la qualità sia il campo d'impiego. Individuiamo i seguenti elementi:

- il *sensore*, che provvede ad estrarre l'informazione d'interesse dalla grandezza fisica a cui è collegato ed a trasferirla, sotto forma di *segnale* al sistema successivo;
- il *sistema di condizionamento*, che provvede a modificare ed ottimizzare le caratteristiche del segnale proveniente dal sensore nei confronti del sistema successivo;
- il *sistema di conversione*, che provvede a trasformare la natura dell'informazione da analogica a numerica, in modo da essere trasferita al sistema successivo;
- il *sistema di controllo* che memorizza o elabora l'informazione numerica ottenuta dal sistema precedente secondo una prefissata sequenza di operazioni registrata in un opportuno programma; tale sistema può essere collegato con un sistema di *attuatori* per eseguire eventuali operazioni connesse con il risultato della misura.



Figura 1.3: Elementi costitutivi di un sistema di misura.

1.2.1 Grandezze fisiche e segnali

I sensori misurano le *grandezze fisiche*:

- **Grandezze continue**, che possono assumere valori continui all'interno di un certo intervallo (es. temperatura di un utensile, velocità di rotazione di un motore, etc.);
- **Grandezze discrete**, che assumono un insieme discreto di valori (es. verso di rotazione di un motore, numero di pezzi lavorati in un minuto, etc.).

Le informazioni associate alle grandezze fisiche sono dette **segnali**: in generale, il segnale d'ingresso al sensore coincide con il misurando e l'informazione d'interesse è il valore che quest'ultimo assume, in una certa unità di misura. Il segnale di uscita, invece, è generalmente di natura diversa e trasferisce l'informazione d'interesse in funzione della sua tipologia. Si parla di:

- *segnali analogici* quando l'informazione d'interesse è associata direttamente ai valori assunti dalla grandezza che costituisce il segnale; in tal caso, l'informazione può coincidere con il valore stesso della grandezza (valore istantaneo) o essere associato ad una particolare funzione definita in un certo intervallo di tempo (ad esempio, valore medio, valore efficace, frequenza, etc.);
- *segnali digitali* quando l'informazione è associata ad un insieme (**parola**) costituito da una combinazione (**codice**) di grandezze elementari (**simboli**); in tal caso, la parola digitale è di tipo parallelo se, nella trasmissione dell'informazione, ad ogni simbolo è associato un canale di trasmissione, mentre è di tipo seriale se tutti i simboli costituenti la parola sono trasmessi mediante un unico canale.

Analogamente alla classificazione dei segnali abbiamo quella dei sensori, caratterizzati in funzione del tipo di segnale fornito *in uscita*. I sensori analogici forniscono in uscita un segnale che assume con continuità tutti i valori nel campo di funzionamento, mentre quelli digitali forniscono un segnale che può assumere due soli valori, lo 0 e il fondoscala (FS).

1.2.2 La discretizzazione dell'informazione

L'informazione associata ad un segnale *non* è una funzione continua, nè rispetto ai valori assunti, nè rispetto al tempo. Riguardo alla discretizzazione rispetto ai valori si parla di *quantizzazione*, mentre la discretizzazione rispetto al tempo di solito è associata al concetto di *campionamento*. Sulla discretizzazione dei segnali digitali non vi sono certo dubbi, ma se si riflette un po' si riconosce che anche per i segnali analogici non si può fare a meno di introdurla. Infatti, l'inevitabile incertezza associata alla misura di qualunque grandezza introduce la quantizzazione; il tempo richiesto per leggere, ma anche per trasmettere un'informazione in un segnale rende illusoria la sua apparente continuità.

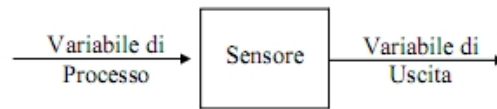


Figura 1.4: Sensore e relative variabili coinvolte.

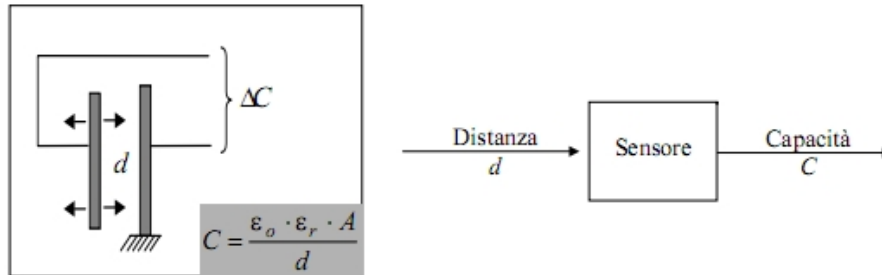


Figura 1.5: Sensore elettrico di spostamento.

1.3 Sensore o trasduttore

Il modo più semplice per valutare una grandezza fisica consiste nell'effettuare un confronto tramite campioni definiti e concordemente accettati per valore ed esattezza. Il campione è la realizzazione fisica dell'unità di misura e la sua caratteristica fondamentale è la *permanenza*: ossia deve rimanere immutato nell'intero corso della sua vita utile. La scelta del campione che più si avvicina al valore della grandezza fisica avviene attraverso uno strumento e con una procedura che esegue un confronto fra due grandezze e che genera il risultato che abbiamo chiamato precedentemente con il nome di *misura*. Tale metodo di misurazione, detto *diretto*, non è industrialmente molto comodo e, per questo motivo, non viene praticato. Al suo posto si impiega il metodo *indiretto* in cui la grandezza fisica da misurare è trasdotta per opera di un *trasduttore*, elemento che modifica la natura fisica delle grandezze da osservare producendo un segnale, funzionalmente legato all'ingresso, su cui effettuare le opportune operazioni di confronto, elaborazione e scelta, allo scopo di generare la misura della grandezza fisica prescelta.

Considerando uno strumento, o più in generale una catena di misura, è sempre possibile individuare l'elemento che interagisce e si interfaccia con la grandezza in osservazione: esso è la parte sensibile, il captatore o meglio il *sensore* che esegue propriamente l'operazione di captazione della grandezza oggetto di misurazione. L'IEC (International Electrotechnical Commission) definisce come sensore l'elemento primario di una catena di misura, che converte la variabile di ingresso in un segnale adatto per la misura (figura 1.4). La relazione tra variabile di ingresso e il segnale di uscita è fondamentale e non può essere alterata da mezzi esterni altro che modificando fisicamente e funzionalmente il dispositivo. Come esempio si osservi un sensore elettrico di spostamento in figura 1.5.

Il trasduttore, invece, viene definito come quel dispositivo che accetta un'informazione nella forma di una variabile fisica (sua variabile di ingresso) e la converte in una variabile di uscita della stessa o di diversa natura, in accordo a una legge definita. Il trasduttore è, quindi, un oggetto che modifica il segnale di ingresso in un segnale di uscita con caratteristiche fisiche uguali o diverse, comunque appropriate agli scopi della trasmissione, dell'elaborazione e dell'impiego delle informazioni correlate al segnale. In molti testi si riscontra inoltre che il trasduttore è un sistema che converte un tipo

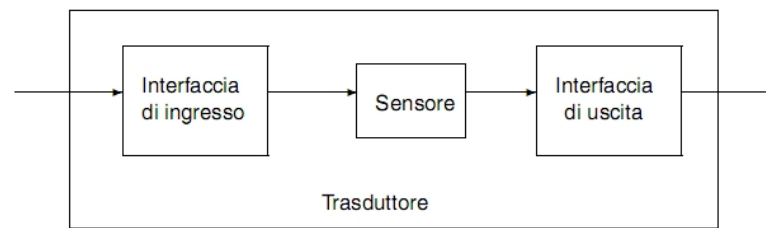


Figura 1.6: Componenti di un trasduttore.

di energia in ingresso in un tipo di energia differente in uscita. Ecco che esiste una netta differenza fra sensore e trasduttore nel senso che il sensore è l'elemento primario della catena di misura, mentre il trasduttore comprende l'insieme di tutte le funzioni fondamentali della stessa. Può essere formato (figura 1.6) dall'insieme di:

- elemento captatore (sensore vero e proprio);
- elemento di condizionamento (es. alimentazione, amplificazione, compensazione, linearizzazione, autotaratura, etc.);
- elemento di elaborazione.

Tuttavia, dopo questo tentativo di definizione, si deve affermare che, nell'ambiente industriale, il termine sensore ha acquisito il più generale significato di dispositivo la cui uscita contiene tutta l'informazione relativa alla misura della grandezza. Accettiamo il fatto che:

- il termine sensore viene utilizzato per indicare o l'intero dispositivo di misura o il solo elemento sensibile;
- il termine trasduttore viene utilizzato per indicare o l'intero dispositivo di misura o il solo dispositivo di trasduzione.

Un trasduttore è un sensore ma un sensore non è necessariamente un trasduttore. Se il sensore non è un trasduttore può essere chiamato *corpo di prova* e richiedere in cascata un trasduttore (Figura 1.7).

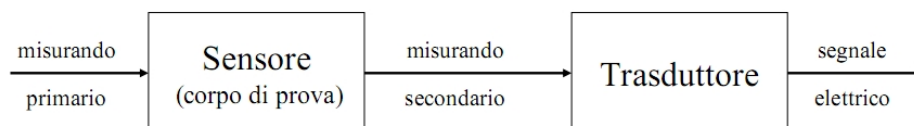


Figura 1.7: Trasduttore in cascata ad un sensore.

In figura 1.8 viene rappresentato un trasduttore, composto da due trasduttori elementari, che effettua la trasformazione di una forza in un segnale elettrico mediante una conversione intermedia in spostamento. In questo caso il sensore è costituito dall'elemento elastico (molla o elica) che trasforma la forza incognita in uno spostamento. Lo spostamento costituisce quindi la grandezza di servizio che viene a sua volta applicata in ingresso al trasduttore potenziometrico, cioè al secondo elemento della catena di trasduzione, che la converte in una tensione elettrica misurabile da un voltmetro collegato in uscita al trasduttore.

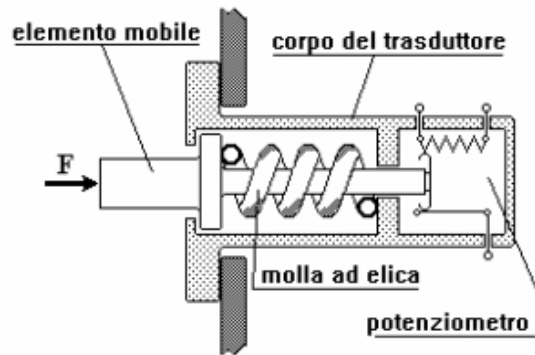


Figura 1.8: Trasduttore forza-tensione elettrica.

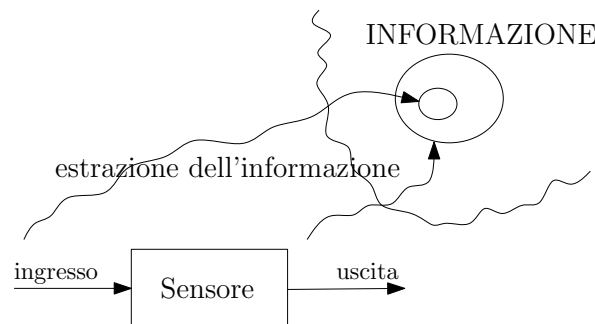


Figura 1.9: Sensore, segnale e informazione.

1.4 Il ruolo del sensore in un sistema di misura

Il compito di un sensore consiste nel trasformare la grandezza oggetto della misurazione, il misurando, in un'altra grandezza fisica, della stessa specie o di specie diversa, più adatta alle elaborazioni che devono essere effettuate dai blocchi successivi: potrà trattarsi della vera e propria misurazione (cioè della trasformazione in un numero), o della trasmissione ad una certa distanza, o di una preelaborazione. È tipico il caso in cui il sensore viene utilizzato per trasformare il misurando in una grandezza di tipo elettrico (una tensione, una corrente, una resistenza, etc.), più adatta alle successive elaborazioni. Si richiede dunque al sensore di conservare inalterata l'informazione contenuta nel segnale d'ingresso, restituendola nel segnale d'uscita. Dal segnale d'ingresso si passa all'informazione (un sottoinsieme nello spazio dell'informazione) mediante una determinata relazione che dipende dallo scopo della misurazione; dal segnale d'uscita si dovrebbe poter ottenere, mediante un'altra opportuna relazione, lo stesso sottoinsieme; in realtà, a causa dell'incertezza introdotta dal sensore, si giunge a un sottoinsieme che lo contiene (figura 1.9). Vale la pena sottolineare una peculiarità del sensore che lo differenzia significativamente dagli altri dispositivi presenti nella catena di misurazione: mentre questi ultimi trattano segnali in una certa misura adattati alle loro esigenze (ad esempio, il convertitore analogico digitale ha come segnale d'ingresso una grandezza elettrica variabile entro un ben definito campo), il sensore ha un ingresso obbligato, sia come tipo di grandezza fisica, sia come campo di variabilità. In altre parole, fra tutti gli elementi della catena di misurazione, il sensore costituisce il più critico, in quanto il più condizionato dalle caratteristiche del sistema misurato e dunque il più indipendente rispetto alle scelte del progettista del sistema di misura.

Il sensore, come abbiamo visto, si inserisce in una catena di misura per il controllo di un processo, ora vogliamo mettere in evidenza i sistemi fisici con i quali il sensore

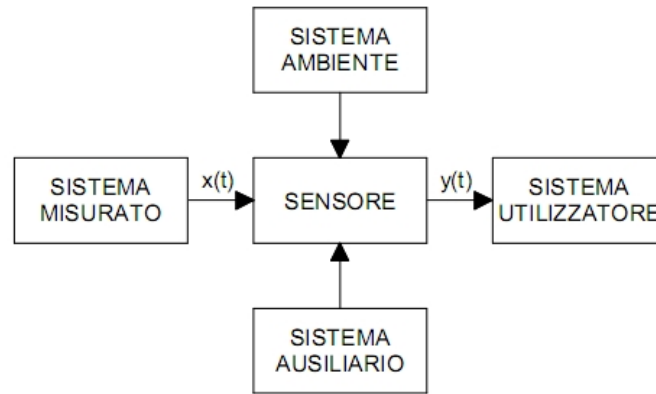


Figura 1.10: Rappresentazione schematica a blocchi dei collegamenti fra il sensore e gli altri sistemi.

risulta collegato (figura 1.10).

- A monte il sensore è collegato con il **sistema misurato**, cioè con il sistema fisico dal quale gli proviene l'informazione convogliata dal segnale d'ingresso;
- A valle il sensore 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.

Si noti come il termine utilizzazione sia molto generico e metta in evidenza solamente la relazione funzionale con il sensore. Di fatto questo sistema può essere molto diverso di volta in volta, andando dai casi più semplici, come quando il sensore è direttamente collegato al dispositivo che fornisce come uscita direttamente la misura, ai casi più complessi, come quando il sensore si collega al primo elemento di una catena di dispositivi atti a modificare o a trasmettere il segnale, per la realizzazione di una regolazione o un controllo.

- Il sensore 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 o ad un campione di riferimento.

- 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 sensore che non sono riferibili agli altri tre sistemi.

Vi sono dunque grandezze di influenza rappresentate dallo stato dell'ambiente in cui è inserito il trasduttore (temperatura, pressione, umidità, etc.), grandezze di influenza che si ricercano nei sistemi collegati in uscita al trasduttore o originate dalla circuiteria ausiliaria del sistema. Le principali sono la temperatura dell'ambiente esterno e la variabilità della tensione di alimentazione per quei sensori che necessitano di alimentazione ausiliaria. E' evidente che le grandezze di influenza devono condizionare il valore della grandezza di uscita in maniera estremamente meno sensibile di quanto faccia la grandezza di ingresso del trasduttore. Si potrebbe pensare di valutare l'entità delle grandezze di influenza in modo da poter introdurre una correzione nella grandezza

d'uscita del trasduttore, ma questo costituirebbe un'evidente complicazione del sistema: ci vorrebbero trasduttori supplementari per correggere il trasduttore principale. Normalmente si cerca di costruire trasduttori poco sensibili alle grandezze di influenza.

L'interconnessione del sensore con i sistemi che lo circondano comporta anche uno scambio di energia fra essi. Escludendo le interazioni fra sensore e sistema ambiente (in quanto si tende a minimizzare lo scambio di energia fra di essi in modo da limitare le interferenze) è possibile individuare le seguenti interazioni:

- l'interazione *sensore-sistema misurato* fa sì che si parli di **consumo** del sensore se il flusso di energia è dal sistema misurato al sensore, mentre si parla di **stimolo** o **eccitazione** del sistema misurato se il flusso di energia è dal sensore al sistema misurato; entrambi i tipi di interazione possono provocare grossolani errori di misura nel caso che l'energia ad essi connessa non sia trascurabile rispetto all'energia globale del sistema misurato, si ha quindi una modifica del misurando. Questa modifica non corrisponde necessariamente ad un incremento dell'incertezza con cui si effettua la misurazione, perchè il sensore riceve correttamente un segnale che corrisponde allo **stato** attuale del sistema misurato. L'incertezza viene introdotta nel momento in cui si vorrebbe conoscere come sarebbe il misurando se il sistema di misura non fosse collegato. In tal caso si possono avere amare sorprese, perchè le modifiche risultanti possono essere di entità tale da stravolgere completamente la situazione;
- l'interazione *sensore-sistema utilizzatore*, di tipo biunivoca, può essere vista dal lato del sensore e da quello del sistema utilizzatore; dal punto di vista del sensore, il sistema utilizzatore costituisce un **carico** che non deve alterare in modo inaccettabile il funzionamento del sensore stesso; dal punto di vista del sistema utilizzatore, il sensore costituisce la **sorgente di eccitazione** che non deve indurre perturbazioni al di fuori dei limiti entro i quali è garantito il normale funzionamento del sistema stesso;
- l'interazione *sistema ausiliario-sensore-sistema misurato* riguarda essenzialmente l'energia di cui il sensore ha bisogno per il suo funzionamento; nel caso di interazione sistema ausiliario-sensore, il sensore riceve tale energia dal sistema ausiliario, mentre il sistema misurato fornisce solo il segnale d'ingresso corrispondente alla grandezza d'interesse: in tal caso, il sensore è detto **passivo**; nel caso di interazione sistema misurato-sensore, l'energia per il funzionamento del sensore è trasferita dal sistema misurato insieme al segnale d'ingresso corrispondente alla grandezza d'interesse: in tal caso, si ricade nel caso relativo al consumo del sensore e lo stesso è detto **attivo**.

Dal punto di vista energetico abbiamo visto che esistono due grandi categorie per i sensori: quelli attivi che convertono direttamente l'energia dell'ingresso in energia di uscita, senza l'ausilio di sorgenti esterne, e quelli passivi che richiedono energia dall'esterno per effettuare la conversione.

1.5 Il modello di un sensore

1.5.1 Modello matematico del trasduttore

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

$$y(t) = f_d(x(t)) \quad (1.1)$$

Questa relazione è frutto di una drastica semplificazione poichè si trascurano le interconnessioni con gli altri sistemi. La funzione f va intesa nell'accezione dell'analisi funzionale, come la regola di corrispondenza che lega ciascuna delle possibili funzioni del tempo $x(t)$ con la conseguente $y(t)$. Nell'espressione della funzione di conversione diretta compare anche la variabile tempo t per significare che la velocità con cui si modifica la variabile di ingresso x condiziona la risposta del trasduttore, ma noi ora supporremo che la x si modifichi in modo tanto lento da poter trascurare tale dipendenza: questa ipotesi corrisponde di fatto al considerare il trasduttore come operante in regime stazionario. In regime stazionario la funzione di conversione diretta assume un'espressione più semplice:

$$y = f_d(x) \quad (1.2)$$

da cui si può ben vedere come l'uscita y sia una funzione della grandezza fisica di ingresso x . La grandezza di ingresso x è il cosiddetto misurando. Se si fanno comparire l'effetto delle grandezze di influenza g_1, g_2, K, g_n per rappresentare il vero comportamento del trasduttore, quando cioè esso è inserito nel mondo reale la funzione di conversione diretta assume la forma generale:

$$y = f_d(x, g_1, g_2, \dots, g_n) \quad (1.3)$$

La funzione di conversione diretta espressa dalla (1.3), pur esprimendo bene il legame causa-effetto che ha luogo nel trasduttore il quale fornisce un'uscita il cui valore è determinato dal valore del misurando, non risulta utile allo scopo di misura a cui il sensore è dedicato: è infatti attraverso la misurazione del segnale di uscita y che si vuole individuare il corrispondente valore del segnale di ingresso x . Risulta pertanto molto più utile la funzione di conversione inversa:

$$x = f_i(y) \quad (1.4)$$

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

$$x = f_i(y, g_1, g_2, \dots, g_n) \quad (1.5)$$

La funzione di conversione inversa (1.5), purtroppo, ha una forma che ne rende poco pratico l'uso: meglio è quindi, da un punto di vista applicativo, fare ricorso al cosiddetto "diagramma di taratura" che esprime, in modo grafico, il legame fra uscita e ingresso del trasduttore reale. Il diagramma di taratura rappresenta il modo più semplice e pratico per descrivere il funzionamento di un trasduttore reale in presenza delle grandezze di influenza. Congiungendo i punti che rappresentano i valori estremi superiori e quelli che rappresentano i valori estremi inferiori si ottengono due curve che delimitano i possibili punti di funzionamento del trasduttore; tale regione viene chiamata "fascia di valore". Congiungendo invece i punti mediani dei segmenti che collegano i diversi estremi superiori ai corrispondenti estremi inferiori si ottiene una terza curva,

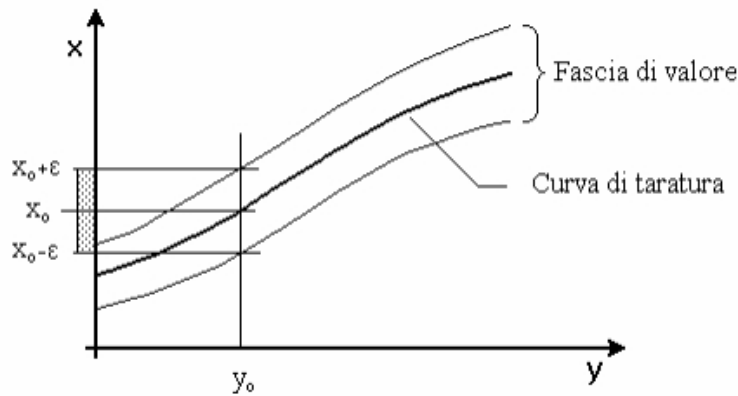


Figura 1.11: Diagramma di taratura di un trasduttore.

chiamata “curva di taratura“, che rappresenta una sorta di “comportamento medio“ del trasduttore. Esaminando la figura 1.11 possiamo così comprendere che se il trasduttore presenta in uscita un segnale di valore y_0 , allora il misurando, cioè la grandezza d’ingresso, può assumere qualsiasi valore compreso fra $(x_0 - \epsilon)$ e $(x_0 + \epsilon)$. Usando una espressione matematica di scrittura compatta possiamo anche scrivere che il valore del misurando che corrisponde all’uscita y_0 è dato da $(x_0 \pm \epsilon)$.

1.5.2 Grandezze di influenza

Nell’analisi del funzionamento di un sensore, volendo andare oltre l’approssimazione rappresentata dalla funzione di conversione definita in precedenza, occorre orientarsi verso un modello matematico più complesso, che tenga conto delle interconnessioni di cui si è parlato. 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 (figura 1.10). 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. Le grandezze di influenza interessano solamente il sensore, mentre viene trascurata la loro azione sul misurando a causa delle varie sorgenti di incertezza. Per fare un esempio la grandezza di influenza proveniente dal *sistema misurato* potrebbe essere rappresentata dalla temperatura di un flusso di cui si rileva la portata in un condotto mediante un flussometro. Quella proveniente dal *sistema utilizzatore* potrebbe essere costituita dalla resistenza d’ingresso del dispositivo utilizzatore (per esempio un amplificatore) che riceve il segnale d’uscita (una tensione) nel caso di un sensore di spostamento potenziometrico (figura 1.8). Dal *sistema ausiliario* abbiamo la tensione fornita da tale generatore nel caso in cui sia presente; dal *sistema ambiente* dobbiamo quasi sempre tener conto della temperatura, che tende a modificare quella dei componenti del sensore 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.

Un altro modo per fornire informazioni riguardo agli effetti delle grandezze d’influenza è quello di introdurre le cosiddette **funzioni d’influenza**. Tali funzioni possono essere introdotte con riferimento a qualunque caratteristica metrologica del sensore. Se consideriamo la funzione di conversione g , l’effetto della grandezza d’influenza z_i può

essere espresso dalla funzione w_i :

$$dy = w_i(dz_i), \quad (1.6)$$

dove dy è la variazione del segnale d'uscita e dz_i è la variazione della grandezza d'influenza che l'ha provocata. Si noti come la definizione richieda l'ipotesi che ogni grandezza d'influenza operi sul segnale d'uscita indipendentemente dalle altre. Inoltre, in particolari circostanze, spesso verificate (effetti piccoli, o tolleranze ammesse molto ampie), la funzione può essere linearizzata e dunque gli effetti possono essere rappresentati da una semplice costante, spesso chiamata **fattore d'influenza**.

1.5.3 La dipendenza dal tempo

I singoli componenti di un sensore sono inevitabilmente soggetti ad 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, etc.). Tutto ciò di regola influisce sul sensore nel suo complesso e richiede dunque che fra le sue caratteristiche fondamentali si consideri la dipendenza dal tempo del suo funzionamento. Questa dipendenza dal tempo potrebbe essere ricondotta alla categoria di fenomeni a cui si è accennato in precedenza, introducendo fra le diverse grandezze d'influenza anche la variabile tempo. Di solito si preferisce considerare separatamente i due tipi di fenomeni, sia per la peculiarità della variabile tempo (non assoggettabile a controllo, come invece sono, almeno in teoria, le altre grandezze d'influenza), sia per l'inopportunità di attribuire tale grandezza a un determinato sistema fisico.

1.5.4 I campi di variabilità del misurando

Il funzionamento di un sensore 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 sensore, cioè la sua funzione di conversione, a parità di approssimazione, è diverso secondo l'ampiezza del campo di variabilità del segnale d'ingresso. Consideriamo un sensore di temperatura a resistenza: il suo modello matematico, cioè la relazione fra le due variazioni relative della temperatura e della resistenza, può essere espresso, in generale, come segue (il simbolo T indica la temperatura):

$$dR/R_0 = a(dT/T_0) + b(dT/T_0)^2 + c(dT/T_0)^3 + \dots \quad (1.7)$$

dove T_0 rappresenta una determinata temperatura, presa come riferimento, ed R_0 è il corrispondente valore della resistenza R del sensore. A parità di approssimazione accettata nella formulazione del modello matematico, il secondo membro può essere fermato al primo termine (modello lineare), se i valori massimi delle variazioni di temperatura sono sufficientemente piccoli; dev'essere invece esteso al termine quadratico (modello parabolico), se le variazioni sono di maggiore entità, e così via.

Viene definito il **campo di misura**, che precisa i limiti entro i quali deve variare la grandezza d'ingresso affinché il sensore funzioni secondo le specifiche fornite per caratterizzarlo. Inoltre, poichè il segnale è sempre associato ad una certa energia, segnali ad energia troppo elevata possono danneggiare il sensore. 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 sensore.

1.5.5 Il campo di variabilità dell'uscita

L'uscita di un sensore costituisce il segnale di ingresso per il dispositivo utilizzatore che viene collegato a valle del sensore stesso: è dunque di importanza fondamentale conoscerne la natura e il campo di variabilità. Ci interessano i due tipi di informazione seguenti:

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

Al di fuori del campo di misura la funzione di conversione può risultare molto alterata. Si possono avere fenomeni di saturazione o di esaltazione dell'uscita al crescere del misurando.

1.5.6 Funzionamento in regime stazionario o dinamico

Un sensore opera in regime stazionario quando le variazioni nel tempo del misurando sono tali che la funzione di conversione del sensore 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 sensore, 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. Spesso si preferisce parlare di sistema, anziché di regime, dinamico, mettendo in evidenza le caratteristiche intrinseche del sistema anziché le sue condizioni di funzionamento; anche in questo caso, però, si ipotizza una certa classe di ingressi e un certo grado di approssimazione. Le cause a cui si addebitano queste differenze di comportamento risiedono nella natura del sensore stesso; un sensore 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, etc.), e i conseguenti scambi energetici con l'esterno.

1.5.7 Funzionamento in regime dinamico

Il modello matematico generale

Per semplificare lo studio di un sensore si utilizza, almeno in prima approssimazione, un **modello di tipo lineare**. Ricorreremo al concetto di **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, l'uscita $y(t)$ corrispondente a $x(t)$ è ottenibile come somma delle due uscite corrispondenti ai due segnali in cui si è scomposto l'ingresso. In formula:

$$g[x_1(t) + x_2(t)] = g[x_1(t)] + g[x_2(t)] \quad (1.8)$$

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. Precisato il campo di variabilità di tutti i possibili segnali di ingresso, la funzione d'ingresso può essere scomposta in una somma di funzioni appartenenti a un'unica famiglia. Le funzioni più comunemente usate per effettuare la decomposizione sono quelle sinusoidali (secondo Fourier) e quelle a gradino. In corrispondenza, si analizza la risposta del sensore a segnali sinusoidali di varia frequenza, oppure la risposta al gradino.

1.5.8 L'analisi nel tempo

I modi

Si può affermare che, mentre l'andamento nel tempo assunto dal termine di regime della risposta in evoluzione forzata dipende sostanzialmente dal segnale d'ingresso, la risposta in evoluzione libera e il transitorio della risposta in evoluzione forzata sono costituiti da funzioni del tempo dello stesso tipo, che dipendono dalle caratteristiche strutturali del sensore e del sistema che lo rappresenta. Poichè le informazioni sulla risposta in evoluzione libera provengono dalla soluzione dell'equazione omogenea associata, a questa si fa riferimento parlando di **modi** della risposta, o del sistema. Considerando l'equazione omogenea associata:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = 0 \quad (1.9)$$

la soluzione si determina introducendo la corrispondente equazione caratteristica:

$$a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0 = 0 \quad (1.10)$$

che è di grado n e ha r radici p_i . Si hanno radici reali o coppie di radici complesse coniugate e ciascuna ha molteplicità μ (la somma di tutti i μ_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 μ_i , che sono del tipo

$$(A_{\mu_i-1} t^{\mu_i-1} + \dots + A_1 t + A_0) \exp(-t/\tau_i) \quad (1.11)$$

- i termini che corrispondono a una coppia p_i e p_i^* di radici complesse coniugate di molteplicità μ_i , che sono del tipo

$$(M_{\mu_i-1} t^{\mu_i-1} + \dots + M_1 t + M_0) \exp(-t/\tau_i) \sin(\Omega_i t + \Phi_i), \quad (1.12)$$

dove τ_i e Ω_i sono legati univocamente alle due radici p_i e p_i^* ($-1/\tau_i$ è la parte reale, Ω_i è il coefficiente dell'immaginario di p_i). I vari coefficienti A_i ed M_i e gli sfasamenti Φ_i sono introdotti per ottenere che la combinazione lineare dei vari termini soddisfi alle condizioni iniziali imposte. Ciascuno degli addendi che costituiscono l'integrale dell'equazione omogenea associata viene dunque chiamato **modo** della risposta, o del sistema. Quelli che corrispondono alle radici reali sono chiamati **modi aperiodici**, mentre quelli che corrispondono a coppie di radici complesse coniugate sono i **modi pseudoperiodici**. In ciascuna delle due espressioni 1.11 e 1.12 sono riportati μ_i modi, tutti dello stesso tipo, pari al grado di molteplicità delle radici considerate.

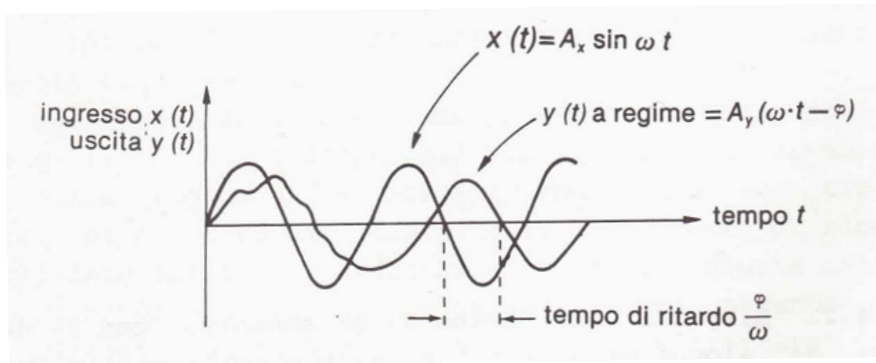


Figura 1.12: Risposta di un sensore ad un ingresso sinusoidale. L'uscita è costituita dalla somma di una funzione sinusoidale isofrequenziale con l'ingresso e sfasata in ritardo (la risposta a regime) e di una funzione che tende a zero in un tempo finito (il termine transitorio).

La risposta al gradino

Diamo un breve cenno allo studio del sensore 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 $t > 0$ (vedi figura 1.17). 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:

$$y(t) = x(0)w(t) + \int_0^t w(t - \tau)x'(\tau)d\tau, \quad (1.13)$$

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

1.5.9 L'analisi in frequenza

Abbiamo accennato la possibilità di studiare le caratteristiche di un sensore utilizzando come segnali di ingresso funzioni appartenenti a una determinata classe che sia una base nello spazio degli ingressi. Le funzioni sinusoidali costituiscono un ingresso comodo, perchè le sue derivate, di qualunque ordine, sono ancora funzioni sinusoidali. Vale la pena di ricordare che proprio su questa peculiarità degli ingressi di tipo esponenziale (le funzioni sinusoidali non sono altro che esponenziali con esponente complesso) si basa il metodo operativo. Sotto questa luce 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**. 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 sensori reali, tende a zero in un tempo finito. Una situazione simile è stata illustrata in figura 1.12. Prendendo in esame solamente la risposta a regime, al variare della frequenza, a parità di ampiezza della sinusoide di ingresso, la sinusoide in uscita varia in ampiezza e fase.

È chiamato **risposta in frequenza** del sensore l'insieme delle due curve che forniscono, al variare della frequenza di ingresso, mantenuto costante in ampiezza e di valore unitario, le variazioni dell'ampiezza e dello sfasamento dell'uscita. Le due curve che danno la risposta in frequenza non sono altro che il modulo e la fase della **funzione di trasferimento** di Fourier $G(\Omega)$, cioè del rapporto fra le trasformate di Fourier

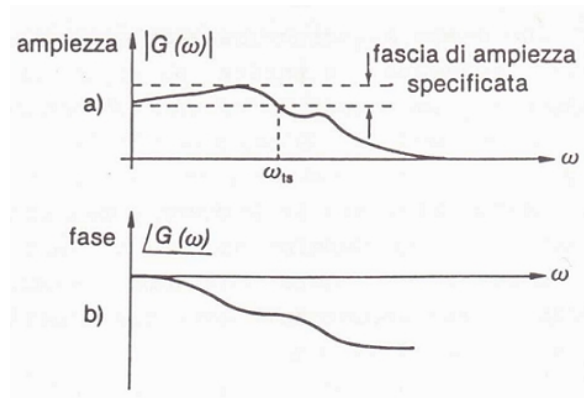


Figura 1.13: Curve di risposta in frequenza di un sensore.

dell'uscita, $Y(\Omega)$, e dell'ingresso, $X(\Omega)$:

$$G(\Omega) = Y(\Omega)/X(\Omega), \quad (1.14)$$

dove con Ω si è indicata la pulsazione della sinusoidale. La parte più caratteristica della funzione di trasferimento è costituita dal suo denominatore, le cui radici, che sono chiamate i **poli** del sistema (le radici del numeratore della funzione di trasferimento sono gli **zeri** del sistema), consentono di calcolare facilmente la risposta in evoluzione libera, cioè i vari *modi* del sistema. In figura 1.13 abbiamo un esempio di risposta in frequenza, si possono notare la curva di ampiezza e quella di fase. Le caratteristiche comuni a tutti i sensori sono le seguenti:

- 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 si nota una fascia di tolleranza, la zona in cui la curva si mantiene in tale fascia in un certo campo di frequenza (da 0 a Ω_{ts}). Il significato delle curve di risposta in frequenza è legato essenzialmente alla possibilità di applicare la sovrapposizione degli effetti, cioè alla validità dell'ipotesi di linearità.

Le condizioni di non distorsione

Un sensore **distorce** quando la forma della funzione del tempo che costituisce l'uscita risulta alterata in modo apprezzabile rispetto a quella dell'ingresso. Una definizione quantitativa del grado di distorsione si può dare in modi molto diversi; 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. Per comprendere questo fenomeno rimaniamo nel campo dei sistemi lineari (quelli non lineari distorcono sempre) e ricorriamo all'analisi in frequenza. Nella pratica interessano le distorsioni presenti nella risposta a regime, che corrisponde al termine di regime della risposta in evoluzione forzata. Supponiamo di avere un ingresso $x(t)$ scomponibile in un numero discreto di sinusoidi e si considerino le corrispondenti uscite; affinché il sensore non distorca devono essere verificate le seguenti condizioni:

- Le ampiezze delle varie sinusoidi d'uscita devono stare negli stessi rapporti in cui stanno le ampiezze delle sinusoidi d'entrata;

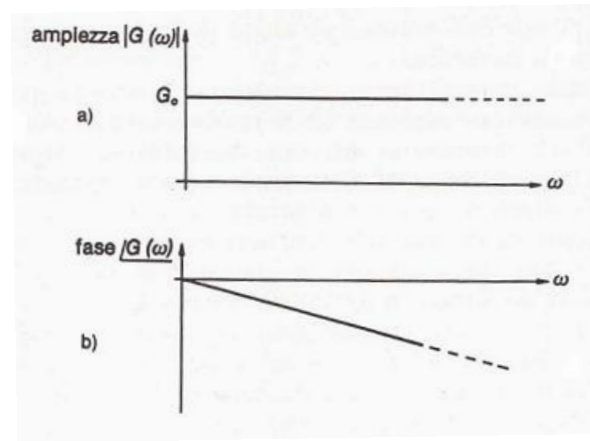


Figura 1.14: Curve di risposta in frequenza relative a un sistema ideale non distortente.

- Lo sfasamento temporale fra le varie sinusoidi d'uscita deve coincidere con quello delle corrispondenti sinusoidi d'ingresso.

In formula, se si considera una generica componente

$$x(t) = x_M \sin \Omega t \quad (1.15)$$

e l'uscita corrispondente

$$y(t) = y_M \sin \Omega(t + \tau) = y_M \sin(\Omega t + \phi), \quad (1.16)$$

con $\phi = \Omega \tau$, le due condizioni precedenti si traducono nelle due seguenti relazioni:

1. Rapporto costante fra le ampiezze delle componenti isofrequenziali di uscita e di ingresso, al variare di Ω :

$$Y_M(\Omega)/X_M(\Omega) = G_0 \quad (1.17)$$

2. Ritardo (temporale) costante fra le componenti isofrequenziali di uscita e di ingresso, al variare di Ω :

$$\tau(\Omega) = \tau_0 \quad (1.18)$$

Relazioni che, con riferimento alla funzione di trasferimento di Fourier, si possono esprimere nelle formule:

$$\text{Modulo di } G(\Omega) = G_0 \quad (1.19)$$

$$\text{Fase di } G(\Omega) = \tau_0 \Omega \quad (1.20)$$

Queste condizioni corrispondono a chiedere che i diagrammi di modulo e fase della funzione di trasferimento abbiano l'andamento riportato in figura 1.14. Si noti che in un sensore reale le due curve possono essere considerate approssimate dalle curve ideali sempre soltanto in un limitato campo di frequenze. Se si volesse che il sistema non distorcesse per qualsiasi andamento di $x(t)$, le due curve 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 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 sopra precisate.

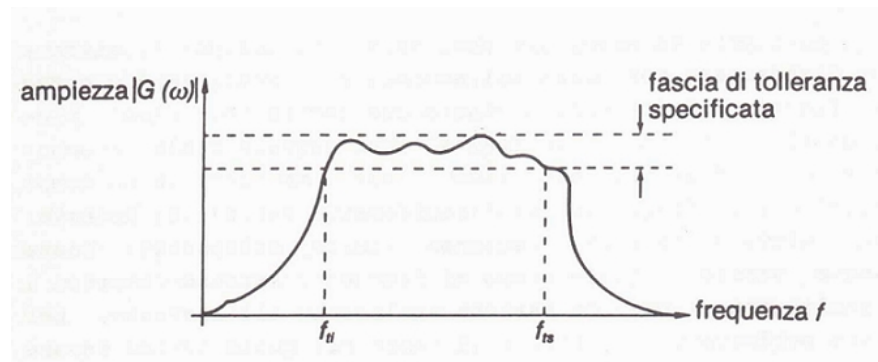


Figura 1.15: Frequenze di taglio di un sensore. Definizione della frequenza di taglio inferiore e della frequenza di taglio superiore, con riferimento alla curva di ampiezza, modulo della funzione di trasferimento di Fourier $G(\Omega)$, e a una fascia di tolleranza specificata.

Per definire il campo di frequenze entro il quale un determinato sensore 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 verificare l'andamento della fase. Quando la curva di risposta ha l'andamento della figura 1.15, 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 *passa-basso*, cioè tale che il campo di frequenza utile si estende fino ad $\Omega = 0$.

1.6 Elementi di caratterizzazione di un sensore

1.6.1 Premessa

In questa sezione cerchiamo di riportare in maniera molto schematica l'insieme dei termini, con le rispettive definizioni, che vengono usualmente impiegati per specificare le caratteristiche di un sensore viste dall'angolo di visuale dell'utente. E' evidente che un determinato sensore 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 sensore verrà a trovarsi in tali condizioni di funzionamento. Riporteremo inoltre i termini in ambito internazionale qualora la terminologia non sia normalizzata e si possa creare ambiguità di significato.

1.6.2 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento deve essere noto per poter utilizzare il sensore in modo corretto; non sempre, infatti, le specifiche date dal costruttore sono chiare ed esaurienti e solo la loro interpretazione alla luce di una conoscenza più generale del sensore consente di superare tali ostacoli. La nomenclatura per indicare il principio fisico su cui si basa un determinato sensore non è affatto codificata, tuttavia con un po' di cultura di base sull'argomento e grazie ai manuali è possibile acquisire le informazioni necessarie.

1.6.3 Misurando (measurand)

1. **Specie** del misurando: natura della grandezza fisica che costituisce il misurando.
2. **Campo di misura (Input range)**: insieme dei valori che può assumere il misurando, entro il quale, se sono rispettate le condizioni operative, il sensore funziona secondo le specifiche fornite. Spesso si parla di *portata* (range), o di *valore di fondo scala* (full scale), riferendosi al limite superiore del campo di misura
3. **Campo di sicurezza del misurando**: insieme dei valori che può assumere il misurando senza che il funzionamento del sensore resti permanentemente alterato rispetto alle specifiche fornite. I valori estremi del campo di sicurezza vengono chiamati valori di *sovraccarico* del misurando (measurand *overload* values). Si parla anche semplicemente di sovraccarico (overload, *overrange*), intendendo il limite superiore del campo di sicurezza e sottintendendo che il limite inferiore coincida con il limite inferiore del campo di misura.

1.6.4 Uscita (Output)

1. **Specie** del segnale d'uscita: natura della grandezza fisica che costituisce il segnale d'uscita. Molto spesso è un segnale di tipo elettrico al quale l'informazione è associata in modo analogico o digitale.
 2. Campo di **normale funzionamento** dell'uscita (**output range**): insieme dei valori che assume il segnale d'uscita quando il misurando varia entro il campo di misura.
 3. Valori di **sovraccarico** dell'uscita (output **overload** values): i valori più elevati assunti dal segnale d'uscita quando il misurando varia entro il campo di sicurezza. E' importante valutarne l'ordine di grandezza, per essere in grado di proteggere il sistema utilizzatore collegato.
 4. **Potenza erogabile (output power)**: il valore limite della potenza che il sensore può fornire al sistema utilizzatore entro il quale il sensore può funzionare secondo le specifiche fornite. A volte si parla di corrente massima erogabile (se il segnale d'uscita è una tensione), o di tensione massima in uscita, o di valore massimo dell'impedenza di carico (*load impedance*) (se il segnale d'uscita è una corrente).
 5. **Impedenza di uscita (output impedance)**: valore dell'impedenza (quando la parte reattiva è trascurabile si parla di resistenza di uscita) equivalente presentata attraverso i due morsetti d'uscita, dal sensore al sistema utilizzatore.
 6. **Incertezza (intrinseca) 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. Si tratta di un'incertezza legata alla natura stessa di grandezza fisica dell'uscita e alle caratteristiche dell'interfaccia di collegamento del sensore con il sistema utilizzatore.
-

1.6.5 Alimentazione ausiliaria (Auxiliary supply)

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

1.6.6 Caratteristiche metrologiche in regime stazionario (Static metrological characteristics)

Sono l'insieme delle indicazioni necessarie a legare l'uscita del sensore al misurando, quando il sensore funziona in regime stazionario. Ci riferiremo sempre alla funzione che consente di risalire dall'uscita al misurando, nonostante si possano dare le definizioni con riferimento al legame visto in senso inverso.

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

- **Curva di taratura (Calibration curve):** è la relazione biunivoca tra ogni valore della grandezza di uscita e il corrispondente valore da assegnare al punto centrale della fascia di valore relativa al misurando. Equivale alla *funzione di conversione*. Quando la curva di taratura è rettilinea, cioè esiste una relazione di proporzionalità fra uscita e misurando, essa viene espressa con un coefficiente chiamato *costante di taratura (calibration factor)*.
- **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 modo più o meno equivalente si parla di *errore (error, uncertainty)*, o di *fascia (o banda) di errore (error band)*, sempre con riferimento a un determinato valore dell'uscita. A volte si parla 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:

- **Sensibilità (Sensitivity):** è una grandezza che può essere definita con riferimento a un punto qualsiasi della curva di taratura e coincide con la pendenza della curva stessa. Più il coefficiente angolare della retta è elevato più il trasduttore è sensibile e minore sarà il range di funzionamento. Essa viene espressa con l'unità di misura del misurando e della grandezza di uscita. In campo metrologico il termine sensibilità viene impiegato per indicare una grandezza completamente diversa, qui chiamata *risoluzione*.
- **Linearità (linearity)** (vedi figura 1.16): è un'indicazione di quanto la curva di taratura si discosta dall'andamento rettilineo. Viene specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita. Si definiscono tanti

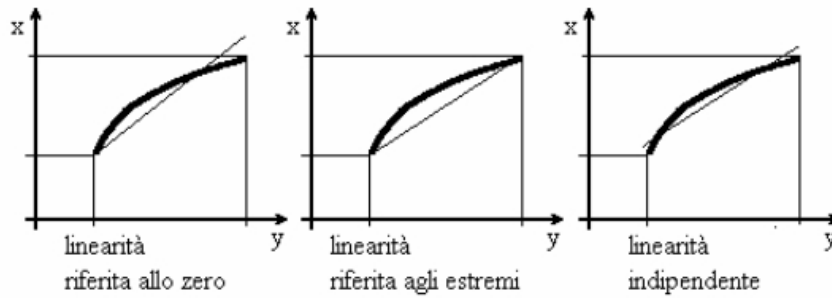


Figura 1.16: I principali modi per definire la linearità di un sensore.

tipi di linearità quanti sono i modi di scegliere la retta di riferimento. Le più interessanti sono:

- **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;
- **Linearità riferita agli estremi (End point linearity)**: la retta di riferimento congiunge i due estremi della curva di taratura corrispondenti ai due estremi del campo di misura;
- **Linearità secondo i minimi quadrati (Least squares linearity)**: la retta di riferimento è quella che corrisponde al valore minimo della somma dei quadrati degli scostamenti;
- **Linearità indipendente (Independent linearity)**: la retta di riferimento è quella che rende minimo il più elevato (in valore assoluto) degli scostamenti.

Quale che sia la retta a cui si fa riferimento, la linearità, cioè il massimo scostamento, viene espressa di regola in valore relativo. Un sensore è buono quando la sua non linearità non è superiore allo 0,1%.

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 e può essere espressa in valore assoluto o in valore relativo. Come abbiamo già detto, la grandezza che qui abbiamo chiamato risoluzione viene detta anche sensibilità; altre volte viene chiamata *banda morta (dead band)*. La risoluzione rappresenta la capacità del sensore a funzionare come rivelatore differenziale nell'intorno di un determinato valore del misurando. Quando il sensore funziona intorno allo zero, al termine risoluzione si preferisce *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)*.
3. **Ripetibilità (Repeatability)**: specifica l'attitudine del sensore 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. Viene espressa con le medesime modalità dell'incertezza di taratura.
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 da quello superiore. L'isteresi congloba anche l'incertezza dovuta alla risoluzione. A volte i due fenomeni vengono divisi e si attribuisce il significato di differenza fra l'isteresi nel senso da noi definito e la risoluzione. Viene espressa specificando la variazione massima che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto, relativo, o ridotto, a parità di misurando e di condizioni operative, espresso in unità di misura del misurando, considerandola legata alla stabilità riferita all'uscita tramite la curva di taratura per passare dalla differenza fra i valori dell'uscita alla corrispondente differenza fra i valori del misurando.

5. **Stabilità (Stability)**: è la capacità del trasduttore di conservare inalterate le sue caratteristiche di funzionamento per un intervallo di tempo relativamente lungo (mesi o anni). Si vuole mettere in evidenza la variabile d'influenza *tempo*, mentre con la ripetibilità si vuole tenere conto degli effetti delle altre grandezze d'influenza, nella loro variabilità a breve termine. Viene espressa specificando la variazione massima che si può verificare nell'uscita, in valore assoluto, relativo, o ridotto, a parità di misurando e di condizioni operative entro un determinato intervallo di tempo. Può anche essere espressa in unità di misura del misurando, considerandola legata alla stabilità riferita all'uscita tramite la curva di taratura. Come termine equivalente si usa *deriva (offset o shift)*, oppure *deriva dello zero (zero shift, oppure offset drift)* con riferimento all'*uscita con misurando nullo*.

1.6.7 Caratteristiche metrologiche in regime dinamico (Dynamic characteristics)

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

1. **Risposta in frequenza (Frequency response)**: è un'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. Si riportano graficamente, in funzione della frequenza, il rapporto fra l'ampiezza dell'uscita e l'ampiezza del misurando (curva del modulo) e lo sfasamento fra la sinusoide di uscita e quella che costituisce il misurando (curva di fase). Si usano scale logaritmiche, specialmente per l'asse delle frequenze, per ampliare il campo riportato in diagramma e non perdere in capacità di lettura nella zona dei bassi valori. Forniamo una sintesi delle informazioni contenute nelle curve della risposta in frequenza:
 - **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. A volte si parla semplicemente di campo di frequenze del sensore. Questo campo è delimitato dalla frequenza di taglio inferiore e da quella superiore.
 - **Frequenza di risonanza (Resonant frequency)**: è la frequenza alla quale la curva di risposta in modulo presenta un massimo. Quando il sensore è rappresentato da un sistema di grado superiore al terzo, potrebbe presentare

più di una frequenza di risonanza; in tal caso si fornisce l'indicazione della più bassa.

2. **Risposta al gradino (step response)**: è la risposta del sensore a una variazione a gradino del misurando. Costituisce un'informazione molto ricca sul comportamento dinamico del sensore (figura 1.17). Altre definizioni:

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

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.

Tempo di salita (Rise time): fissate due frazioni del valore di regime dell'uscita, una relativamente piccola (10%), l'altra relativamente elevata (90%), 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.

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

Tempo di assestamento (Settling time): fissata una fascia di valore intorno al valore di regime dell'uscita (ad esempio 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.

Frequenza delle oscillazioni di assestamento (Ringing frequency): è la frequenza delle oscillazioni smorzate che si verificano quando il sistema è sottosmorzato.

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 sovravelongazioni successive, nell'ipotesi che tale rapporto sia indipendente dalla coppia di sovravelongazioni considerate. L'ipotesi è tanto più verificata, quanto più è corretta la rappresentazione del sensore mediante un sistema del secondo ordine.

3. **Risposta libera (Natural response)**: è il modo in cui l'uscita del sensore evolve nel tempo, partendo da un valore iniziale non nullo, in assenza di misurando. Coincide con l'evoluzione libera ed è interessante perchè mette in luce i modi del sistema. Di solito non si riporta la risposta libera sotto forma di diagramma in funzione del tempo perchè l'informazione sarebbe ridondante, ma si fornisce la cosiddetta *frequenza naturale (natural frequency)*, che è la frequenza del termine sinusoidale che appare nella formula 1.12. Il numero dei modi dipende dall'ordine del sistema, si possono avere più di una frequenza naturale. In pratica, ci interessa solo la frequenza naturale di valore più basso, in quanto è abbastanza raro che un sensore debba essere rappresentato con un sistema di ordine superiore al secondo. A volte si definisce anche la *frequenza naturale a smorzamento nullo (natural undamped frequency)*, che è il valore teorico che assumerebbe la frequenza naturale se il sistema non fosse per nulla smorzato.

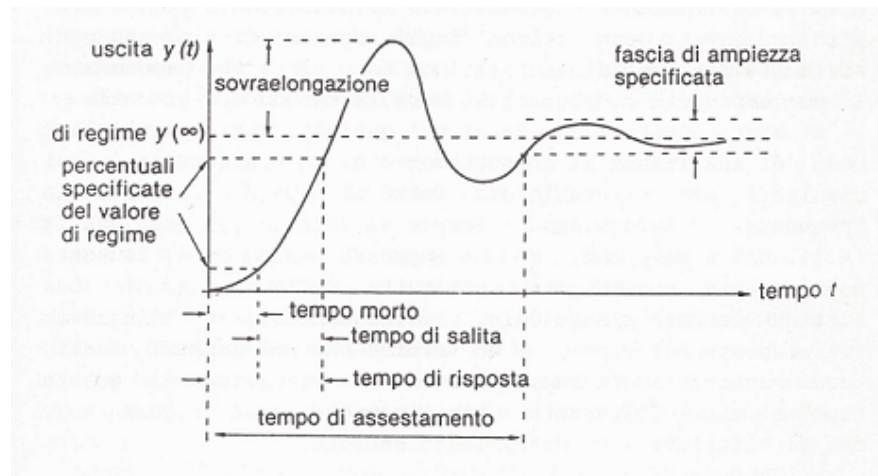


Figura 1.17: Risposta al gradino di un sensore, con la definizione di alcuni parametri. Il valore della soglia per la definizione del tempo morto è in generale specificato in valore assoluto; i valori delle varie fasce necessarie alla definizione del tempo di salita, del tempo di risposta e del tempo di assestamento sono di solito espressi come frazioni del valore di regime.

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.
5. **Tempo di recupero (Recovery time):** è l'intervallo di tempo richiesto, dopo un evento specificato (un sovraccarico, una variazione a gradino nell'alimentazione ausiliaria, un cortocircuito sull'uscita), affinché il sensore riprenda a funzionare secondo le caratteristiche specificate.
6. **Rumore (Noise):** è una variazione del segnale non correlata ad alcuna informazione. Di solito viene fornito in valore efficace, precisando la banda di frequenze entro la quale viene preso in considerazione. Si parla di rumore sul misurando e 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 sensore si fa l'ipotesi che il rumore sia presente solo sull'uscita; la sua entità costituisce evidentemente un'importante indicazione sulla capacità del sensore di non inquinare l'informazione che proviene dal misurando. L'entità del rumore è una grandezza fornita di frequente, soprattutto quando si prevede che il misurando possa variare velocemente nel tempo (cioè corrisponda ad una banda di frequenze molto ampia); in ogni caso la risoluzione è un'informazione sintetica che dovrebbe conglobarne l'effetto.

1.6.8 Condizioni operative (Environmental conditions)

Con questo termine si definisce l'insieme delle condizioni a cui risulta soggetto il sensore. 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 essenzialmente i campi di valore in cui devono essere mantenute le grandezze d'influenza, ma si riferiscono anche ad altre condizioni. Si intendono tutte le grandezze, diverse dal misurando, le cui variazioni alterano in modo significativo le caratteristiche metrologiche del sensore.

1. Per ogni grandezza d'influenza vengono definiti i seguenti campi di valore:

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 sensore, o di una eventuale verifica successiva.

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 sensore, affinché siano utilizzabili le informazioni relative alle caratteristiche metrologiche.

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

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

2. Spesso viene anche riportata la *funzione d'influenza (Operating influence)*, cioè 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.
-

1.6.9 Vita (Life)

E' la durata minima garantita di funzionamento del sensore in condizioni di piena validità delle sue caratteristiche metrologiche. Essa può essere specificata in modi diversi, secondo il tipo di sensore e, per lo stesso sensore, secondo l'informazione che si vuole dare.

1. **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;
2. **Tempo di funzionamento (Operating life):** è l'intervallo di tempo nel quale il sensore è in funzione. Di regola si specifica se si intende *funzionamento continuo (continuous rating)* oppure *intermittente (intermittent rating)*;
3. **Tempo di magazzino (Storage life):** è l'intervallo di tempo che il sensore trascorre in magazzino, senza funzionare, a determinate *condizioni di magazzino (storage conditions)*.

1.6.10 Caratteristiche fisiche (Physical characteristics)

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

1. **Dimensioni (Dimensions):** le dimensioni fisiche esterne del sensore;
 2. **Peso (Weight):** il peso del sensore e dei suoi eventuali accessori;
 3. **Montaggio (Mounting):** le modalità con cui il sensore viene collegato al sistema misurato (viti, flange, collanti, etc.) e al sistema utilizzatore (spine, connettori, etc.);
 4. **Materiali di costruzione (Materials of construction):** i materiali usati in prevalenza nella costruzione delle varie parti del sensore (acciaio inossidabile, plastica, etc.);
 5. **Accessori (Accessories):** le apparecchiature ausiliarie che sono opportune, o necessarie, per il corretto funzionamento del sensore;
 6. **Regolazioni (Adjustments):** le modalità con cui si effettuano, quando è possibile, le regolazioni dello *zero*, cioè dell'uscita con misurando nullo, e della *sensibilità (sensitivity)*.
-

Capitolo 2

I sensori di prossimità: principi di funzionamento

2.1 Introduzione

La misurazione di posizioni e spostamenti di oggetti fisici è essenziale per molte applicazioni: controllo di un processo a retroazione, controllo qualità, controllo del traffico dei mezzi di trasporto, robotica e sistemi di sicurezza, solo per nominarne alcune. Per *posizione* si intende la determinazione delle coordinate (lineari o angolari) di un oggetto valutate secondo un punto di riferimento selezionato. *Spostamento* significa il movimento da una posizione ad un'altra per una specificata distanza o angolo. In altre parole, uno spostamento viene misurato quando un oggetto è riferito alla sua posizione precedente piuttosto che a un altro riferimento. Una distanza critica viene misurata dai sensori di prossimità (proximity). In effetti, un sensore di prossimità è una versione di soglia di un rilevatore di posizione. Un sensore di posizione è spesso un dispositivo lineare il quale segnale d'uscita rappresenta la distanza di un oggetto da un certo punto di riferimento. Un sensore di prossimità è, tuttavia, in un certo senso un dispositivo più semplice che genera il segnale di uscita quando una certa distanza dall'oggetto diventa essenziale come indicazione. Per citare un esempio, molti meccanismi di movimento nel controllo di processo e nella robotica utilizzano un semplice ma altamente affidabile sensore di prossimità, il finecorsa o interruttore di sicurezza. E' un interruttore elettrico che possiede contatti normalmente aperti o normalmente chiusi. Quando un oggetto in movimento attiva l'interruttore tramite contatto fisico, quest'ultimo invia un segnale al circuito di controllo. Il segnale è un'indicazione che l'oggetto ha raggiunto la posizione finale (dove l'interruttore è posizionato). Ovviamente, questi interruttori di contatto presentano numerosi svantaggi (per esempio un carico meccanico molto alto sull'oggetto in movimento e isteresi). Un sensore di spostamento è spesso parte di un sensore più complesso dove la rilevazione di movimento rappresenta uno di molti passi nella conversione del segnale. Un esempio è un sensore di pressione dove essa viene tradotta nello spostamento di una membrana, che a sua volta viene convertito in un segnale elettrico che rappresenta la pressione. Sensori di posizione e spostamento sono sensori statici che presentano velocità di risposta di solito non critiche per le prestazioni, comunque la velocità massima di risposta viene specificata dal costruttore.

Recenti sviluppi nella tecnologia dell'elettronica hanno significativamente migliorato le prestazioni e l'affidabilità dei sensori, in tal modo si è incrementato il numero di applicazioni possibili. Come conseguenza, molti impianti industriali che storicamente utilizzavano interruttori di sicurezza di tipo meccanico possono scegliere ora tra una varietà di alternative di dispositivi senza contatto per i loro bisogni di rilevamento.

Le caratteristiche di affidabilità mostrate da questi sensori li rendono opportuni per operazioni in ambienti difficili ed avversi, fornendo un'alta velocità di risposta e lunghi tempi di vita. Possono essere progettati strumenti che resistono a colpi e vibrazioni significative, con la capacità di governare forze superiori a $3 \cdot 10^5$ N e pressioni di quasi 10^4 Pa. I sensori di prossimità sono preziosi per rilevare oggetti che si muovono a velocità elevatissime, quando il contatto fisico può causare danni, o quando è richiesta una discriminazione tra oggetti metallici e non. I *proximity* sono diventati componenti essenziali anche nel campo della robotica, in particolare nei robot manipolatori per applicazioni che necessitano di afferrare oggetti o nei robot mobili per la navigazione. L'applicazione principale di questo tipo di sensori è quella di costituire una guida per i robot. Per questo motivo sarebbe desiderabile avere alta sensibilità e accuratezza quando, per esempio, una pinza si avvicina a un determinato oggetto con lo scopo di afferrarlo. I segnali ricevuti dal circuito di interfaccia elettronico dovrebbero essere processati senza limitare il range operativo richiesto del sensore e il circuito, inoltre, dovrebbe minimizzare gli effetti di interferenza nelle vicinanze. Dovrebbe inoltre adoperarsi per ridurre l'interferenza del rumore di fondo e proporre limitazioni all'interno del range dinamico. L'operazione del robot non dovrebbe essere rallentata dal sensore: la vicinanza dall'oggetto dovrebbe essere stimata in un intervallo di tempo compreso tra 1 ms e 10 ms. Al giorno d'oggi le tecniche elettro-ottiche sembrano essere le più appropriate per le applicazioni robotiche, sensori di questo tipo sono relativamente più piccoli in dimensioni, hanno un range di operazione più vasto e non impongono quasi nessuna restrizione sul materiale dell'oggetto. Recentemente sono stati fabbricati nuovi sensori di prossimità ad ultrasuoni e capacitivi direttamente come circuiti integrati.

I sensori di prossimità forniscono di solito un segnale on/off che indica la *presenza* o l'*assenza* di un oggetto. Sensori induttivi, capacitivi, fotoelettrici, a effetto Hall sono largamente utilizzati come sensori di prossimità. I sensori induttivi consistono di una bobina avvolta attorno a un nucleo di ferro dolce. L'induttanza del sensore si modifica quando un oggetto ferromagnetico si trova nella sua prossimità, infine questa variazione viene convertita in un segnale di tensione. I sensori di tipo capacitivo sono simili a quelli induttivi eccetto che la prossimità di un oggetto cambia la distanza e influisce sulla capacità. I sensori fotoelettrici sono normalmente allineati con una sorgente di luce infrarossa e la prossimità di un oggetto in movimento interrompe il fascio di luce, causando una variazione del livello di tensione. Nei sensori Hall, una tensione dovuta all'effetto Hall viene prodotta quando un conduttore portatore di corrente viene esposto a un campo magnetico trasversale. La tensione è proporzionale alla distanza che intercorre tra il sensore a effetto Hall e l'oggetto in sua vicinanza. Questi e molti altri tipi di sensori verranno analizzati, descrivendo in particolar modo i loro principi di funzionamento.

Quando si progetta o si sceglie un rilevatore di posizione e spostamento, dovremmo porci le seguenti domande:

- Quanto grande è lo spostamento e di che tipo (lineare, circolare)?
 - Quale risoluzione e quale accuratezza sono richiesti?
 - Di che materiale è costituito l'oggetto misurato (metallo, plastica, liquido, ferromagnetico, etc.)?
 - Quanto spazio abbiamo a disposizione per posizionare il rilevatore?
 - Di quanto spazio di movimento si dispone tra i pezzi da montare e qual'è la distanza di rilevazione richiesta?
-

- Quali sono le condizioni operative (umidità, temperatura, sorgenti di interferenza, vibrazione, materiali corrosivi, etc.)?
- Di quanta potenza si dispone per il funzionamento del sensore?
- Quanta usura meccanica possiamo aspettarci rispetto al tempo di vita del sensore?
- Qual'è la quantità di produzione dell'apparato sensore (numero limite, volume medio, produzione di massa)?
- Qual'è il costo che ci poniamo per l'apparato sensore?

Un'analisi oculata può portare a ingenti dividendi sul lungo termine, inoltre scegliere la tecnologia adatta ad una certa applicazione è sintomo di affidabilità, quando questa è indispensabile nelle applicazioni di sicurezza dove sono a rischio sia parti meccaniche sia, in particolare, l'incolumità dell'uomo.

2.2 I sensori di prossimità induttivi

I sensori induttivi sono largamente utilizzati in diverse applicazioni industriali. Essi sono robusti e compatti e sono meno influenzati da fattori ambientali (come umidità, polvere, etc.) in confronto ad altri sensori (tipo quelli capacitivi). I sensori induttivi sono basati essenzialmente sui principi dei circuiti magnetici. Possono essere classificati come auto-rigenerativi (self-generating) o passivi. Quelli rigenerativi utilizzano il principio del generatore elettrico: quando un conduttore si trova in movimento all'interno di un campo magnetico viene indotta una tensione ai capi del conduttore. In alternativa, anche un campo magnetico variante nel tempo che concatena un conduttore in quiete produce una tensione sul conduttore. Nelle applicazioni di strumentazione, il campo magnetico può variare in frequenza e il conduttore può essere pure in movimento allo stesso tempo. Nei sensori induttivi, il movimento relativo tra campo elettrico e conduttore viene prodotto da cambiamenti nel misurando, di solito per mezzo di qualche movimento meccanico. Dall'altra parte, il trasduttore passivo richiede una sorgente di potenza esterna: in questo caso, l'azione del trasduttore è semplicemente la modulazione del segnale di eccitazione. Per la spiegazione dei principi base dei sensori induttivi osserviamo un semplice circuito magnetico in figura 2.1. Il circuito magnetico consiste di un nucleo, fatto di un materiale ferromagnetico, il quale è avvolto da una bobina che forma su di esso un numero di spire pari a n . La bobina agisce come una sorgente di forza magnetomotrice (f.m.m.) che guida il flusso ϕ attraverso il circuito magnetico. Se si assume nullo il traferro d'aria (intendendo con *traferro* un'interruzione dell'anello di materiale ferromagnetico sufficientemente piccola da non determinare una dispersione eccessiva del flusso magnetico), l'equazione per il circuito magnetico può essere espressa come:

$$f.m.m. = Flusso \cdot Riluttanza = \Phi \cdot R \quad [A - spira] \quad (2.1)$$

così che la riluttanza R limita il flusso nel circuito magnetico così come la resistenza limita la corrente in un circuito elettrico. Scrivendo la forza magnetomotrice in termini di corrente, il flusso magnetico può essere espresso come:

$$\Phi = ni/R \quad [Weber] \quad (2.2)$$

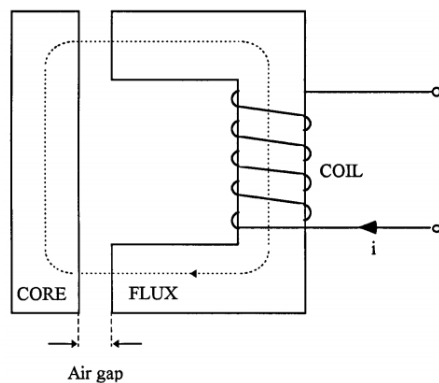


Figura 2.1: Un sensore induttivo elementare consiste di un circuito magnetico realizzato con un nucleo ferromagnetico avvolto da una bobina.

In figura si osserva il flusso concatenato per un singolo avvolgimento come descritto dall'equazione 2.2; ma il flusso totale concatenato dall'intero numero n di spire della bobina è:

$$\Psi = n\Phi = n^2 i / R \quad [\text{Weber}] \quad (2.3)$$

L'equazione 2.3 porta all'autoinduttanza L della bobina, che viene descritta come il flusso totale (Ψ [Weber]) per unità di corrente per quella particolare bobina; che è:

$$L = \Psi / I = n^2 / R \quad (2.4)$$

Questo indica che l'autoinduttanza di un elemento induttivo può essere calcolata attraverso le proprietà di un circuito magnetico. Esprimendo la riluttanza R in termini di dimensioni abbiamo:

$$R = l / \mu \mu_0 A \quad (2.5)$$

dove l è la lunghezza totale del percorso che compie il flusso, μ è la permeabilità relativa del materiale del circuito magnetico, μ_0 è la permeabilità del vuoto ($=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$) e A è la sezione dell'area percorsa dal flusso magnetico. Il modello illustrato in figura 2.1 rappresenta un sensore induttivo basilare se al traferro viene consentito di variare. In questo caso, il nucleo ferromagnetico è separato in due parti dal traferro. La riluttanza totale del circuito ora è la somma della riluttanza del nucleo e della riluttanza del traferro. La permeabilità relativa dell'aria si avvicina molto all'unità, e quella relativa al materiale ferromagnetico è nell'ordine di poche migliaia, indicando che la presenza del traferro causa un grande incremento della riluttanza del circuito e una corrispondente diminuzione del flusso. Quindi, una piccola variazione del traferro provoca una variazione misurabile nell'induttanza. La maggior parte dei trasduttori induttivi si basa su questo principio e in seguito ne discuteremo in dettaglio le varie tipologie.

E' possibile suddividere i sensori induttivi in tre grandi categorie:

1. A variazione di permeabilità magnetica
2. A variazione di lunghezza
3. A variazione del numero di spire

I diversi tipi illustrati in figura 2.2 sfruttano le variazioni possibili dei parametri presenti nelle leggi di funzionamento 2.4 e 2.5:

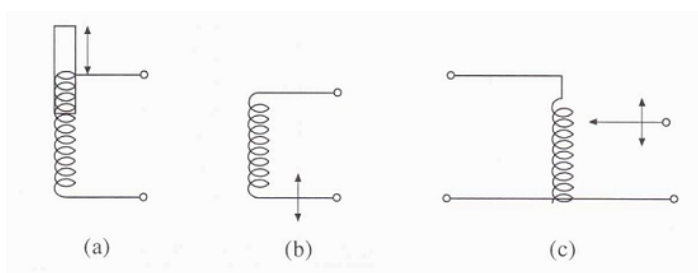


Figura 2.2: Tipi di trasduttori induttivi: a) a variazione di permeabilità, b) a variazione di lunghezza, c) a variazione di numero di spire.

1. **A variazione di permeabilità:** sfruttano la variazione di permeabilità totale del mezzo interposto mediante l'inserimento di un nucleo nella bobina stessa. Un tipico esempio applicativo è costituito dal rilievo di spostamenti mediante inserimento di un nucleo ferromagnetico all'interno della bobina. L'inserimento di un nucleo di diverso materiale provoca una variazione della riluttanza del circuito magnetico dovuto alla variazione di permeabilità del mezzo interposto, data la diversa permeabilità relativa dei materiali rispetto al vuoto (o rispetto all'aria data la quasi equivalenza di permeabilità). I materiali nei confronti dei campi magnetici possono essere del tipo:

- Diamagnetici, con permeabilità relativa: $\mu_r = 1 - \text{qualche ppm}$
- Paramagnetici, con permeabilità relativa: $\mu_r = 1 + \text{qualche ppm}$
- Ferromagnetici, con permeabilità relativa: $\mu_r \gg 1$

Riportiamo in tabella la permeabilità relativa di alcuni materiali più comuni:

Materiale	Tipo	Permeabilità relativa
Diamagnetici	Acqua	~ 0.99999
	Argento	"
	Rame	"
	Mercurio	"
Paramagnetici	Aria	1.0000004
	Ossigeno	1.00133
	Alluminio	1.00002
Ferromagnetici	Ferro-temprato	5000
	Ferro-Silicio	10000
	Leghe speciali	20000 – 1000000

Figura 2.3: Permeabilità relativa di alcuni materiali.

2. **A variazione di lunghezza:** sfruttano la variazione di lunghezza provocata da uno spostamento di trazione o compressione della bobina stessa. Sono scarsamente utilizzati dati i limiti elastici ed isteretici dei materiali componenti le bobine.
3. **A variazione del numero di spire:** sfruttano la possibilità di prelevare mediante un cursore un numero variabile di spire. Sono pertanto come dei potenziometri induttivi con caratteristica di uscita non lineare ma del tipo quadratico data la legge di funzionamento. Questo motivo e l'usura tra cursore e spire ne limita fortemente la pratica applicabilità.

Nei tipi illustrati non si sono menzionati quelli a variazioni di area, date le difficoltà realizzative e le scarsissime applicazioni. Oltre i trasduttori base precedentemente illustrati sono molto applicati anche i seguenti loro derivati: i sensori a variazione di induttanza, a variazione di mutua induttanza e quelli a trasformatore differenziale.

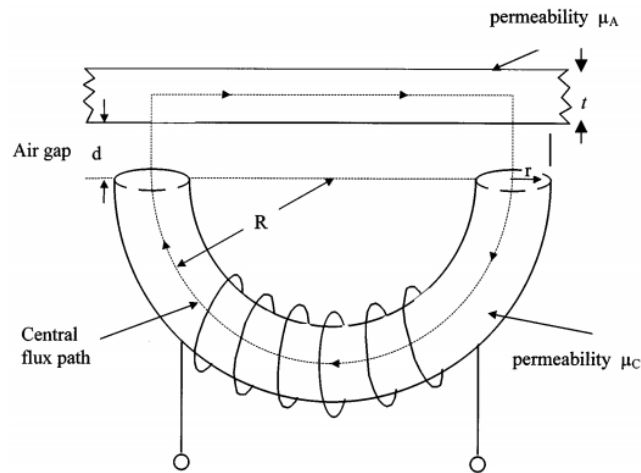


Figura 2.4: Un tipico sensore a riluttanza variabile a singola bobina. Il sensore consiste di tre elementi: un nucleo ferromagnetico a forma di anello semicircolare, un traferro d'aria e una lamina ferromagnetica. La riluttanza della bobina è dipendente da una singola variabile. La riluttanza aumenta in maniera non lineare all'aumentare del traferro.

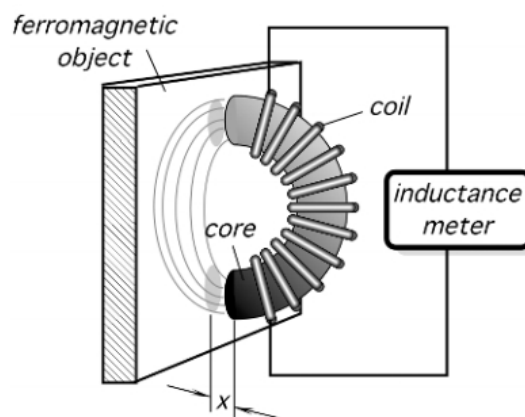


Figura 2.5: Sensore di prossimità induttivo.

2.2.1 Il sensore a riluttanza variabile lineare a singola bobina (The Single-Coil Linear Variable-Reluctance Sensor)

I trasduttori a riluttanza variabile sono basati sulla variazione di riluttanza lungo il percorso effettuato dal flusso magnetico. Possono essere costruiti per essere adatti per rilevazioni di spostamenti così come per quelle di velocità. Un sensore di questo tipo è illustrato in figura 2.4. Il sensore è formato da un nucleo ferromagnetico a forma di anello semicircolare, da un traferro d'aria e da una piastra ferromagnetica. La riluttanza totale del circuito magnetico è la somma delle riluttanze individuali:

$$R_T = R_C + R_G + R_A \quad (2.6)$$

dove R_C , R_G e R_A sono le riluttanze del nucleo (core), del traferro (air gap) e dell'armatura (armature) rispettivamente. Ognuna di queste riluttanze può essere determinata utilizzando le proprietà dei materiali coinvolti, come nell'equazione 2.5. In questo caso particolare, la riluttanza R_T può essere approssimata come:

$$R_T = R/\mu_C\mu_0r^2 + 2d/\mu_0\pi r^2 + R/\mu_A\mu_0rt \quad (2.7)$$

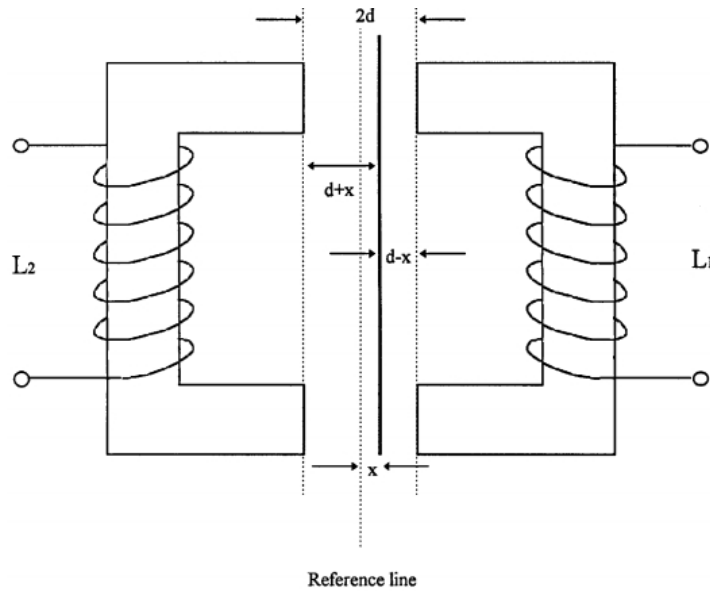


Figura 2.6: Un sensore a riluttanza variabile-differenziale. Questo modello risolve il problema della non linearità inerente ai sensori a singola bobina.

Per ottenere l'equazione 2.7, la lunghezza del percorso del flusso nel nucleo è stata presa come πR . L'area della sezione è stata assunta essere uniforme, con il valore di πr^2 . La lunghezza totale del percorso del flusso in aria è $2d$, e si suppone che non ci siano frange o pieghe del flusso attraverso il traferro. La lunghezza media del percorso di flusso centrale nell'armatura è $2R$. Il calcolo dell'area della sezione dell'armatura è difficile, ma può essere approssimato a $2rt$, dove t rappresenta lo spessore dell'armatura. Nell'equazione 2.7 tutti i parametri sono fissati eccetto quello della variabile indipendente, il traferro. Quindi può essere così semplificata:

$$R_T = R_0 + kd \quad (2.8)$$

dove $R_0 = R/\mu_0 r [1/\mu_C r + 1/\mu_A t]$ e $k = 2/\mu_0 \pi r^2$. Utilizzando le equazioni 2.4 e 2.8, l'induttanza può essere scritta come:

$$L = n^2/(R_0 + kd) = L_0/(1 + \alpha d) \quad (2.9)$$

dove L_0 è l'induttanza in assenza di traferro e $\alpha = k/R_0$. I valori di L_0 e di α possono essere determinati matematicamente: essi dipendono dalla geometria del nucleo, permeabilità, etc., come spiegato precedentemente. Dall'equazione 2.9 si nota che la relazione tra L e α non è lineare. A dispetto di questa non linearità, questi tipi di sensori trovano applicazioni in numerose aree.

2.2.2 Il sensore a riluttanza variabile-differenziale (The Variable-Differential Reluctance Sensor)

Il problema della non linearità può essere superato modificando il sistema a singola bobina con un sensore a riluttanza variabile-differenziale (chiamato anche sensore push-pull), come mostrato in figura 2.6. Questo sensore è costituito da un'armatura che si muove in mezzo a due nuclei identici e separati da una distanza fissa $2d$. Ora, l'equazione 2.9 può essere riscritta per entrambe le bobine:

$$L_1 = L_{01}/[1 + \alpha(d - x)] \quad (2.10)$$

$$L_2 = L_{02}/[1 + \alpha(d + x)] \quad (2.11)$$

Anche se la relazione tra L_1 ed L_2 è ancora non lineare, il sensore può essere incorporato in un ponte a deflessione ac per produrre un'uscita lineare per piccoli movimenti. L'errore di isteresi di questo trasduttore è quasi interamente limitato ai componenti meccanici. Questi sensori rispondono sia a misure statiche che dinamiche, hanno una risoluzione continua e uscite elevate, ma possono presentare prestazioni irregolari in risposta a campi magnetici esterni. Un tipico sensore di questa tipologia possiede uno span d'ingresso di 1 cm, un'induttanza di bobina di 25 mH e una resistenza di bobina di 75 Ω . La resistenza della bobina dev'essere presa in considerazione attentamente quando si progettano circuiti oscillatori. Inoltre, la massima non linearità del sensore è dello 0,5%.

Un tipico sensore variabile differenziale disponibile in commercio è mostrato in figura 2.7: il nucleo di ferro è collocato a metà strada tra due strutture a forma di E. Il flusso generato dalla bobina primaria dipende dalla riluttanza del percorso magnetico, la riluttanza principale è costituita dal traferro. Qualsiasi movimento del nucleo fa aumentare il traferro da un lato e lo diminuisce dall'altro, causando una variazione di riluttanza, in accordo ai principi illustrati in precedenza e di conseguenza inducendo una tensione maggiore su una bobina rispetto che sull'altra. Il movimento nell'altra direzione rovescia l'azione con uno sfasamento di 180° del segnale di uscita. La variazione di induttanza dipende dalle linee di forza del campo magnetico concatenato dalla barretta di materiale ferromagnetico interposto: quanto più vicina è la barretta ad un avvolgimento tanto più sono numerose le linee di forza che concatenano l'avvolgimento stesso. La tensione di uscita può essere modificata, in dipendenza dai requisiti di elaborazione del segnale, attraverso sistemi di raddrizzamento, demodulazione o filtraggio. In questi strumenti, i movimenti devono essere estremamente piccoli, nell'ordine di pochi centimetri. In generale, i trasduttori a riluttanza variabile presentano un range più esiguo e sono anche utilizzati come trasduttori di pressione. Le forze magnetiche imposte sull'armatura sono abbastanza grandi e questo limita severamente le loro applicazioni. Questi trasduttori vengono adoperati con successo nel rilievo di spostamenti (figura 2.8): per piccoli spostamenti è preferibile quello precedentemente descritto, data la maggior variazione di induttanza prodotta (L_1 aumenta e L_2 diminuisce, o viceversa, provocando pertanto variazione doppia di segnale), mentre per medi spostamenti possono essere applicate anche soluzioni ad unica induttanza con la barretta di materiale ferromagnetico che si avvicina o si allontana (in questo caso si avrà una variazione singola di segnale, metà della precedente).

Vi è una piccola distinzione tra trasduttori a riluttanza variabile e a induttanza variabile. Matematicamente, i principi dei trasduttori a induttanza variabile linearmente sono molto simili a quelli a riluttanza variabile. Un tipico induttore variabile linearmente consiste di un nucleo ferromagnetico, capace di muoversi e che fornisce l'input

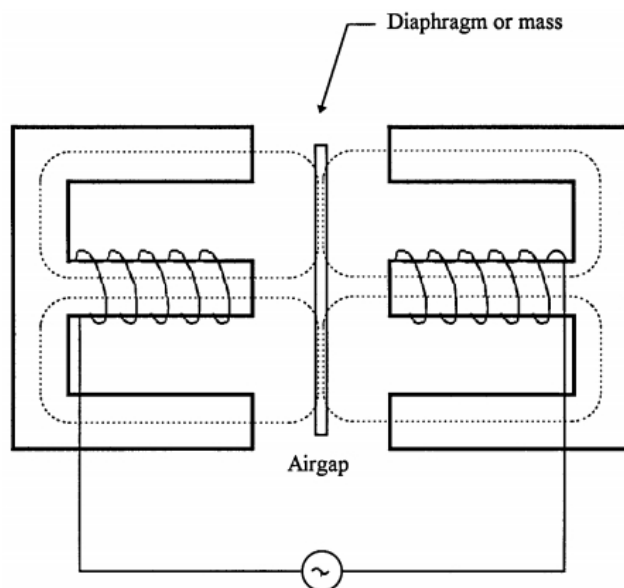


Figura 2.7: Un tipico sensore variabile differenziale disponibile in commercio.

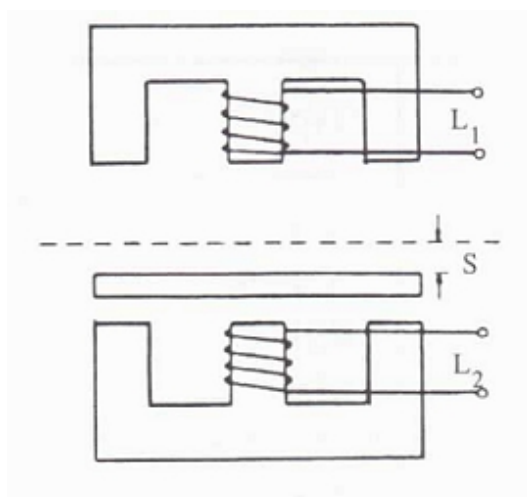


Figura 2.8: Trasduttore a variazione di induttanza.

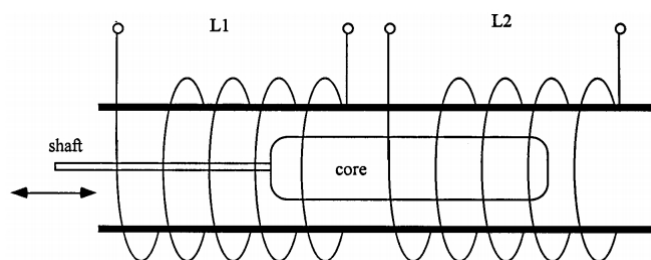


Figura 2.9: Un tipico induttore variabile linearmente.

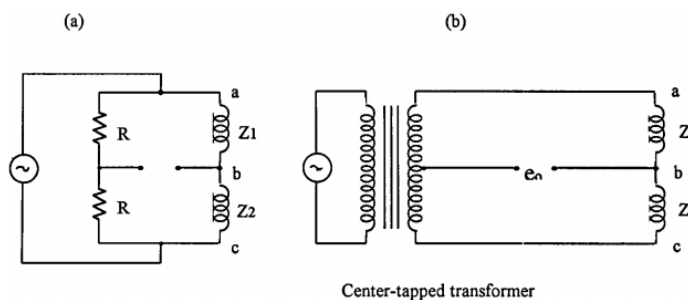


Figura 2.10: Due bobine di un induttore variabile linearmente sono posizionate per formare i bracci di un circuito a ponte, con due resistori uguali che bilanciano il circuito (a). Può essere utilizzato un trasformatore per ridurre la potenza dissipata sotto forma di calore nei resistori (b).

meccanico, e di due bobine che formano i due lati di una rete a ponte. Un esempio di un simile trasduttore è il trasduttore ad accoppiamento variabile.

2.2.3 Trasduttori ad accoppiamento variabile (Variable-Coupling Transducers)

Questi trasduttori consistono di un pistone ferromagnetico all'interno di una bobina che presenta una cavità centrale, come si vede in figura 2.9. Il pistone e le due bobine hanno la stessa lunghezza l e quando il pistone si muove, le induttanze delle bobine variano. Le due induttanze sono di solito posizionate per formare due bracci di un circuito a ponte con due resistori ugualmente bilanciati, come mostrato in figura 2.10(a). Il ponte viene eccitato con tensione alternata da 5 V fino a 25 V con una frequenza che va dai 50 Hz ai 5 kHz. Alla frequenza di eccitazione, l'impedenza totale del trasduttore a condizioni nulle è imposta tra un range di 100 Ω e 1 k Ω . I resistori sono scelti in maniera da avere le stesse impedenze del trasduttore. Il carico per l'uscita del ponte dev'essere almeno 10 volte il valore della resistenza R . Quando il pistone è nella posizione di riferimento, ogni bobina ha la stessa induttanza di valore L ; con il movimento del pistone di una distanza δL , le variazioni di induttanza in $+\delta L$ e $-\delta L$ creano una tensione in uscita dal ponte. Progettando opportunamente il ponte, la tensione di uscita può essere resa una funzione lineare dello spostamento del pistone entro un determinato intervallo di valori. In alcuni trasduttori, per ridurre le perdite di potenza dovute al riscaldamento dei resistori, possono essere utilizzati trasformatori cavi all'interno come parte della rete a ponte (figura 2.10(b)). In questo caso, il circuito diventa più induttivo e ancora più attenzione dev'essere fatta per evitare il mutuo accoppiamento tra trasformatore e trasduttore.

E' particolarmente facile costruire trasduttori di questo genere. I trasduttori a induttanza variabile sono commercialmente disponibili in dimensioni da 2 mm a 500 cm. Il range di sensibilità va dall'1% del fondo scala allo 0,02% in quelli più lunghi. Questi dispositivi sono conosciuti anche con il nome di trasduttori di spostamento lineare o LDT e si possono trovare in svariate forme e dimensioni. Ci sono anche induttori rotativi, i quali nuclei magnetici hanno forme particolari per applicazioni di rotazione. La loro non linearità può variare tra lo 0,5% e l'1% rispetto al valore di fondo scala su un range di rotazione di 90°. La loro sensibilità può arrivare fino a 100 mV per grado di rotazione.

2.2.4 Il trasformatore di spostamento variabile linearmente (Linear Variable-Differential Transformer)

Il trasformatore lineare variabile-differenziale, LVDT, è un trasduttore passivo induttivo che trova numerosissime applicazioni. Consiste di un singolo avvolgimento primario posizionato tra due identici avvolgimenti secondari avvolto in un tubo ferromagnetico, come si vede in figura 2.11. L'avvolgimento primario viene alimentato con una tensione alternata di frequenza variabile tra i 50 Hz e i 20 kHz. I due avvolgimenti secondari sono identici in quanto hanno lo stesso numero di spire e la stessa geometria, vengono connessi in opposizione serie così che le tensioni di uscita indotte si oppongono l'una con l'altra. In molte applicazioni le uscite sono collegate in senso opposto, come mostra la figura 2.12. Le tensioni d'uscita dei secondari v_1 e v_2 in posizione di riposo sono illustrate in figura 2.13: esse sono uguali in modulo e hanno la stessa fase. In connessione opposta, qualsiasi spostamento del nucleo di una posizione x dal punto di riferimento causa una variazione dell'ampiezza della tensione d'uscita v_0 e uno sfasamento α . La forma d'onda della tensione d'uscita v_0 in relazione alla posizione del nucleo è mostrata in figura 2.14. Quando il nucleo è posizionato al centro esiste un uguale accoppiamento tra gli avvolgimenti primari e secondari, che costituisce un punto di riferimento per il sensore. Fino a quando il nucleo rimane vicino alla parte centrale della bobina, l'uscita è molto lineare, i range di linearità dei trasformatori differenziali in commercio sono chiaramente specificati, e i dispositivi sono raramente utilizzati al di fuori dell'intervallo di linearità. Il nucleo ferromagnetico o il pistone si muovono liberamente all'interno della cavità, alterando la mutua induttanza tra primario e secondario. Con il nucleo al centro, in posizione di riferimento, le forze elettromotrici indotte negli avvolgimenti secondari sono uguali; e dato che si oppongono a vicenda, la tensione d'uscita è nulla. Quando il nucleo si muove, per esempio a sinistra, rispetto al centro, un flusso magnetico maggiore si concatena con la parte sinistra della bobina rispetto che in quella di destra. La tensione indotta nella bobina di sinistra è maggiore e la tensione d'uscita è più grande di quella che si ha nella posizione di riferimento ed è uguale alla differenza delle tensioni dei due avvolgimenti secondari. La tensione d'uscita netta è in fase con la tensione della bobina di sinistra. L'uscita del dispositivo è quindi un'indicazione dello spostamento del nucleo. Allo stesso modo, un movimento nella direzione opposta rovescia l'effetto, e la tensione d'uscita è ora in fase con la forza elettromotrice della bobina di destra. Per un'analisi matematica dell'LVDT è possibile utilizzare la figura 2.12. Le tensioni indotte possono essere scritte come:

$$v_1 = M_1 s i_p \quad e \quad v_2 = M_2 s i_p \quad (2.12)$$

dove M_1 e M_2 sono le mutue induttanze tra le bobine primarie e secondarie per una posizione fissata del nucleo; s è l'operatore di Laplace; e i_p è la corrente primaria. Nel

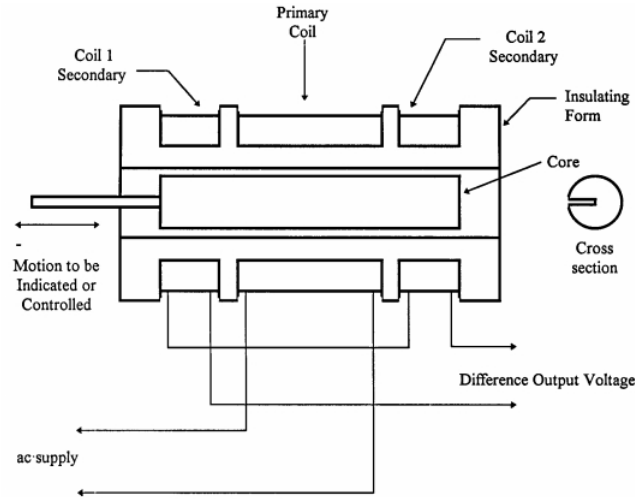


Figura 2.11: Un trasformatore lineare variabile-differenziale.

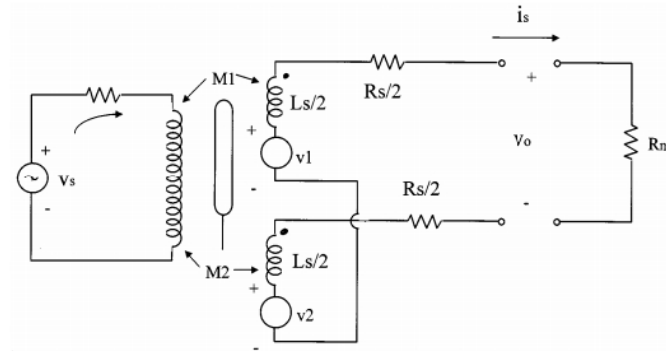


Figura 2.12: Le tensioni indotte negli avvolgimenti secondari del trasformatore LVDT.

caso di connessioni opposte, la tensione d'uscita può essere scritta come:

$$v_0 = v_1 - v_2 = (M_1 - M_2)si_p \quad (2.13)$$

$$v_s = i_p(R + sL_p) \quad (2.14)$$

Sostituendo i_p nella 2.12 si ottiene la funzione di trasferimento del trasduttore:

$$v_0/v_s = (M_1 - M_2)s/(R + sL_p) \quad (2.15)$$

Tuttavia, se esiste una corrente dovuta all'elaborazione del segnale d'uscita, possiamo modificare le equazioni scrivendo:

$$v_0 = R_m i_s \quad (2.16)$$

$$\text{dove } i_s = (M_1 - M_2)si_p/(R_s + R_m + sL_s) \quad (2.17)$$

$$\text{e } v_s = i_p(R + sL_p) - (M_1 - M_2)si_s \quad (2.18)$$

Eliminando i_p e i_s dalle equazioni 2.16 e 2.18 risulta la seguente funzione di trasferimento:

$$v_0/v_s = R_m(M_1 - M_2)s / \{ [(M_1 - M_2)^2 + L_s L_p]s^2 - [L_p(R + R_m) + R L_s]s + (R_s + R_m) + R \} \quad (2.19)$$

Questa equazione rappresenta un sistema del secondo ordine, dal numeratore dell'equazione 2.19 si nota che lo sfasamento del sistema cambia da $+90^\circ$ alle basse frequenze

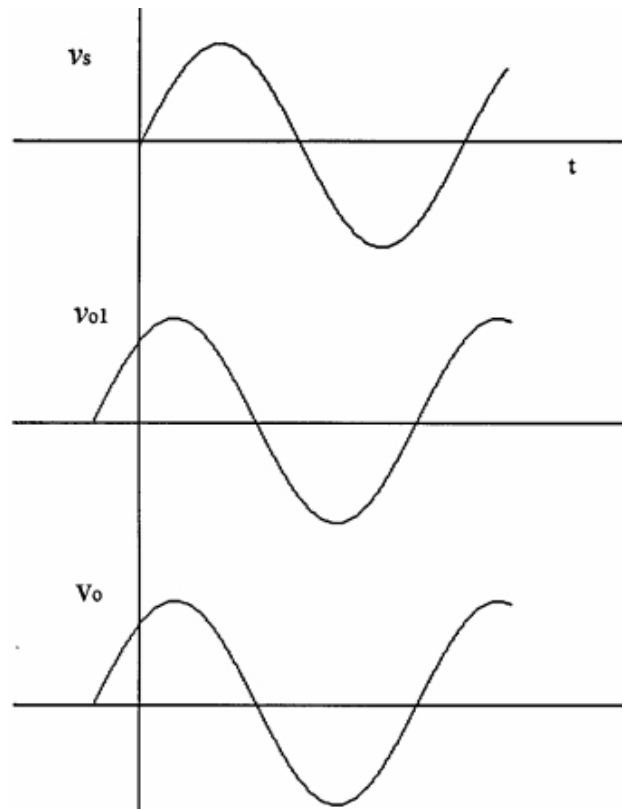


Figura 2.13: Le tensioni in uscita individuali degli avvolgimenti secondari v_1 e v_2 nella posizione di riferimento.

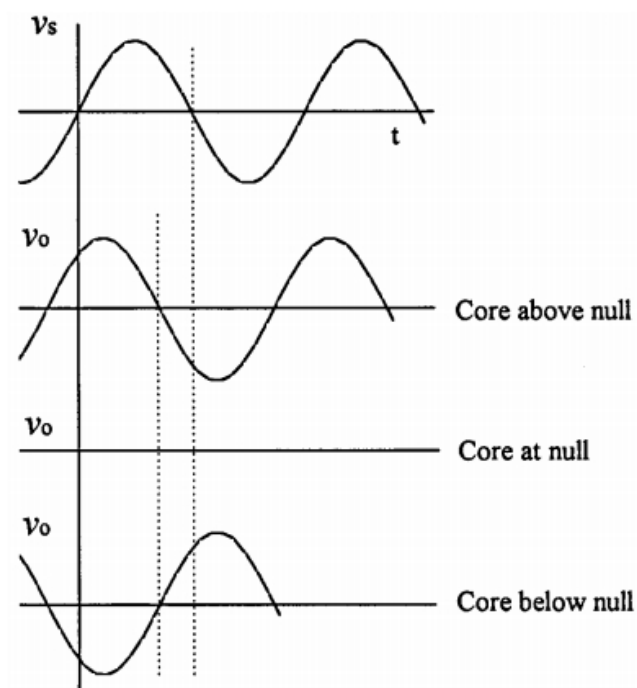


Figura 2.14: Sfasamento delle tensioni di uscita in riferimento alla posizione del nucleo.

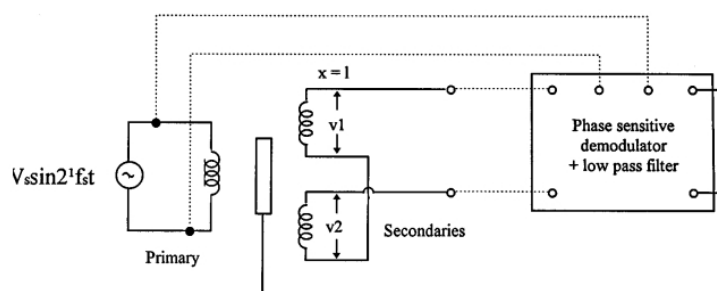


Figura 2.15: Un demodulatore sensibile alla fase.

a -90° alle alte frequenze. Nelle applicazioni pratiche, la frequenza di alimentazione viene scelta in modo che nella posizione di riferimento del nucleo, lo sfasamento del sistema sia nullo. Le ampiezze delle tensioni d'uscita degli avvolgimenti secondari sono dipendenti dalla posizione del nucleo. Queste uscite possono essere direttamente elaborate per ogni avvolgimento secondario per lenti spostamenti del nucleo e quando la direzione di spostamento del nucleo non è rilevante. Per spostamenti veloci, tuttavia, i segnali dovrebbero essere convertiti in tensioni continue e può essere rilevata la direzione di spostamento. È possibile utilizzare un demodulatore sensibile alla fase seguito da un filtro passa-basso (figura 2.15) o un semplice circuito raddrizzatore. Il demodulatore viene utilizzato per ottenere segnali proporzionali allo spostamento dell'LVDT e da altri tipi di sensori induttivi. Esso converte uscite da corrente alternata in corrente continua e indica la direzione di movimento del nucleo dalla sua posizione di riferimento. Una tipica uscita del demodulatore sensibile alla fase è illustrata in figura 2.16, in relazione alla tensione di uscita v_o , allo spostamento x e allo sfasamento α . I demodulatori sensibili alla fase sono usati estensivamente nei sensori induttivi di tipo differenziale. Essi convertono semplicemente le uscite in alternata in valori in continua indicando inoltre il movimento del nucleo dalla posizione di origine. È possibile costruire il demodulatore con un circuito a diodi, vedi figura 2.17. Questa scelta è adatta per spostamenti molto lenti, di solito inferiori a 1-2 Hz. Nella figura, il primo ponte agisce da circuito raddrizzatore per l'avvolgimento secondario 1 e il secondo ponte svolge la stessa funzione per l'avvolgimento secondario 2. L'uscita netta è la differenza tra le uscite dei due ponti, come si vede in figura 2.18. La posizione del nucleo può essere determinata dall'ampiezza dell'uscita in dc, e la direzione del movimento del nucleo è determinata dalla polarità della tensione dc. Per spostamenti molto veloci del nucleo, le uscite dei ponti a diodi devono essere filtrate, dove solamente le frequenze relative al movimento del nucleo attraversano il filtro e tutte le altre frequenze prodotte dal processo di modulazione vengono filtrate, per questo scopo, è sufficiente utilizzare un semplice filtro RC .

La risposta in frequenza dell'LVDT è principalmente limitata dalle caratteristiche di inerzia del dispositivo. In generale, la frequenza della tensione applicata dovrebbe essere 10 volte quella della risposta in frequenza desiderata. Gli LVDT commerciali sono disponibili in una larga gamma di dimensioni e sono ampiamente utilizzati per misure di spostamenti in varie applicazioni. Questi sensori di spostamento coprono un intervallo da $\pm 0,25$ mm a $\pm 7,5$ cm. Sono abbastanza sensibili per rispondere a spostamenti molto sotto gli $0,0005$ mm. Presentano intervalli di temperatura operativa da 265°C a 600°C . Per un tipico sensore di intervallo ± 25 mm, la tensione di alimentazione raccomandata è quella che va dai 4 V ai 6 V, con una frequenza nominale di 5 kHz e una massima non linearità dell'1% del fondo scala. Diversi modelli commerciali producono una tensione di uscita di 300 mV per un 1 mm di spostamento del nucleo.

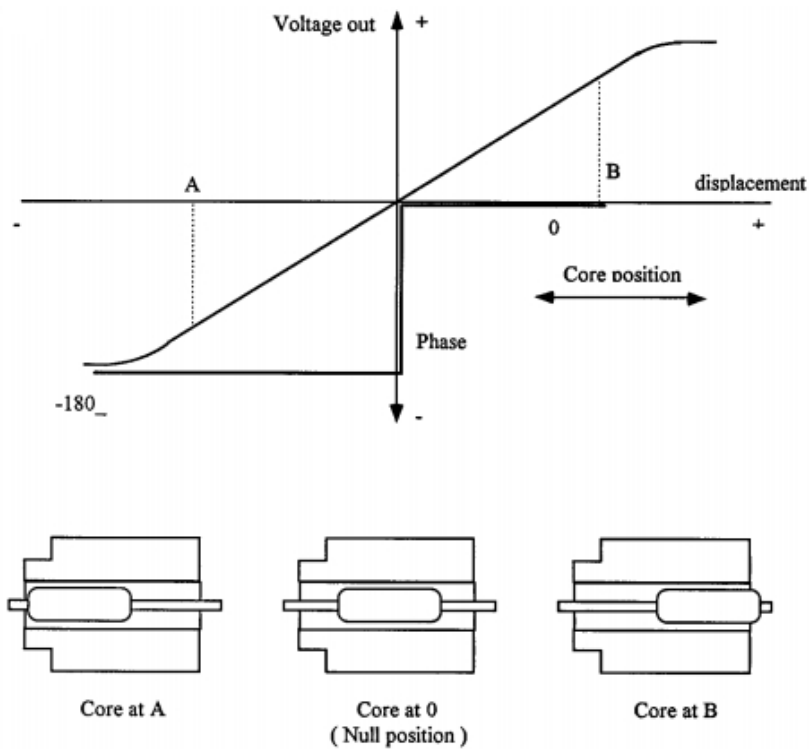


Figura 2.16: Segnale in uscita dal demodulatore.

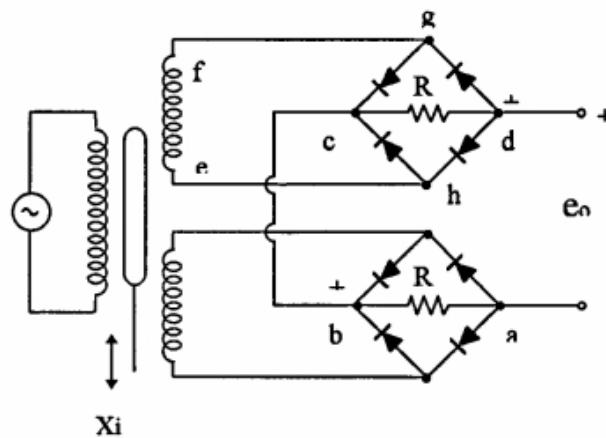


Figura 2.17: Un tipico circuito di demodulazione sensibile alla fase basato su un ponte a diodi.

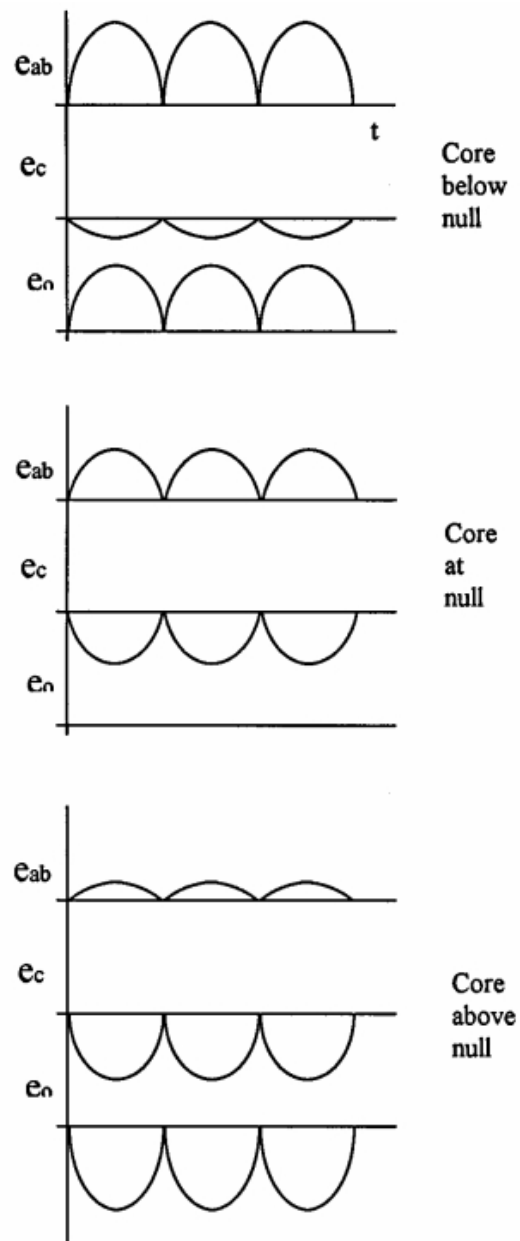


Figura 2.18: Forme d'onda relative alle uscite del ponte a diodi dove il primo raddrizza il secondario 1 e il secondo ponte raddrizza il secondario 2.

Un importante vantaggio dell'LVDT è che non esiste contatto fisico tra il nucleo e la bobina, quindi non si ha attrito o usura. Ciò nonostante, si presentano sempre forze magnetiche radiali e longitudinali sul nucleo. Queste forze magnetiche possono essere considerate come delle molle magnetiche che tentano di spostare il nucleo dalla sua posizione di equilibrio. Questo fattore può essere critico in alcune applicazioni. Un problema del trasformatore differenziale è che non è sempre facile costruire due avvolgimenti secondari identici; le loro induttanze, resistenze e capacità possono essere differenti. Un altro problema è associato alle regolazioni della posizione di riferimento: le armoniche provenienti dalla tensione di alimentazione e le capacità parassite provocano una piccola tensione diversa da zero. Questa tensione può essere ridotta con un'appropriata messa a terra, che riduce gli effetti capacitivi.

— campo di misura	2 mm	
— linearità	0,3%	
— risoluzione	limitata esclusivamente dalla sensibilità del circuito condizionatore	
— isteresi	nulla	
— sensibilità	2,5 KHz 3,5 KHz 5 KHz	190 mV/V/mm 210 mV/V/mm 220 mV/V/mm
— impedenza primaria	2,5 KHz 3,5 KHz 5 KHz	140 Ω 175 Ω 220 Ω
— impedenza secondaria	2,5 KHz 3,5 KHz 5 KHz	190 Ω 200 Ω 220 Ω
— campo di temperatura	-40°C ÷ +85°C	
— deriva max della sensibilità con la temperatura	150 · 10 ⁻⁶	
— azionamento	tramite astina di carburo di tungsteno	
— protezione	tramite soffiato	

Figura 2.19: A titolo di esempio in questa tabella vengono riportate le caratteristiche tecniche di un LVDT per impieghi industriali.

Vantaggi dell'LVDT

- Il sensore è un dispositivo senza bisogno di contatto fisico, con pochissima resistenza di attrito e piccole forze resistive;
- Isteresi magnetica e meccanica trascurabile;
- Bassa impedenza di uscita;
- Bassa suscettibilità al rumore e alle interferenze;
- La sua costruzione è solida e robusta;
- E' possibile ottenere una risoluzione infinitesimale.

2.2.5 Trasduttori induttivi a correnti di eddy

I trasduttori induttivi basati sulle correnti di eddy sono principalmente delle sonde, che contengono due avvolgimenti come mostrato in figura 2.20. Specifichiamo che queste correnti parassite o correnti di Foucault o correnti di eddy (dall'inglese "eddy" significa vortice) sono delle correnti indotte in masse metalliche conduttrici che si trovano immerse in un campo magnetico variabile o che, muovendosi, attraversano un campo magnetico costante o variabile. La variazione del flusso magnetico è quindi responsabile di queste correnti. Uno dei due avvolgimenti, chiamato avvolgimento attivo, è influenzato dalla presenza di un materiale conduttore; l'avvolgimento secondario, chiamato avvolgimento di bilanciamento, serve a completare il circuito a ponte e a fornire una compensazione in termini di temperatura. Il flusso magnetico dall'avvolgimento attivo passa nel materiale conduttivo per mezzo di una sonda. Quando la sonda è vicina all'oggetto, il flusso dalla sonda si concatena con l'oggetto, producendo delle correnti di eddy nel conduttore (figura 2.21 e figura 2.22). Più vicino è l'oggetto alla bobina, più grande sarà la variazione dell'impedenza magnetica. La densità delle correnti di eddy è maggiore sulla superficie dell'oggetto e diventa trascurabile a circa 3 volte la profondità di penetrazione della corrente δ (vedi effetto pelle) sotto la superficie. La profondità di penetrazione dipende dal tipo di materiale utilizzato e dalla frequenza di eccitazione. La profondità di penetrazione si calcola con la seguente formula:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{(\pi f \mu \sigma)}} \quad (2.20)$$

dove f è la frequenza e σ la conducibilità dell'oggetto. Quando l'oggetto si avvicina alla sonda, le correnti di eddy diventano più intense; questo causa una variazione dell'impedenza dell'avvolgimento attivo e altera il bilanciamento del circuito a ponte in relazione alla posizione dell'oggetto. Questa tensione di sbilanciamento del ponte può essere demodulata, filtrata e linearizzata producendo una tensione continua in uscita proporzionale allo spostamento dell'oggetto preso come target. L'oscillazione del ponte può essere di 1 MHz. Alte frequenze permettono l'impiego di oggetti molto sottili e forniscono un buon sistema di risposta in frequenza. Le sonde sono disponibili in commercio con un diametro che va dai 0,25 ai 30 mm con una non linearità dello 0,5% e una risoluzione massima di 0,0001 mm. Solitamente si effettua una misura senza contatto di parti meccaniche. Per materiali non conduttivi, è necessario l'impiego di adesivi da applicare sulla superficie del materiale da misurare. Dato che il materiale, la forma dell'oggetto, etc., influenzano l'uscita, è necessario calibrare il sistema statisticamente per ogni target specificato.

Un'altra maniera per indurre le correnti di eddy su un materiale magnetico è attraverso l'utilizzo di un oscillatore (figura 2.23), di questo particolare tipo di sensore discuteremo ampiamente nel capitolo successivo.

Esistono due configurazioni per i sensori di eddy: quelli schermati e quelli non schermati. I sensori schermati hanno una protezione di metallo che circonda il nucleo in ferrite e l'insieme della bobina che serve per focalizzare il campo elettromagnetico sulla parte frontale del sensore. Questo permette al sensore di essere integrato all'interno di una struttura di metallo senza influenzare l'intervallo di rilevamento. I sensori non schermati sono sensibili sia frontalmente che lateralmente. Di conseguenza il range di rilevamento di un sensore non schermato è in un certo senso più grande di quello di un sensore schermato dello stesso diametro. Per funzionare nella maniera appropriata, i sensori non schermati richiedono di essere circondati da oggetti non metallici.

Il vantaggio dei sensori a correnti di eddy è quello di non richiedere materiali magnetici per il funzionamento, e quindi possono risultare molto efficaci alle alte temperature

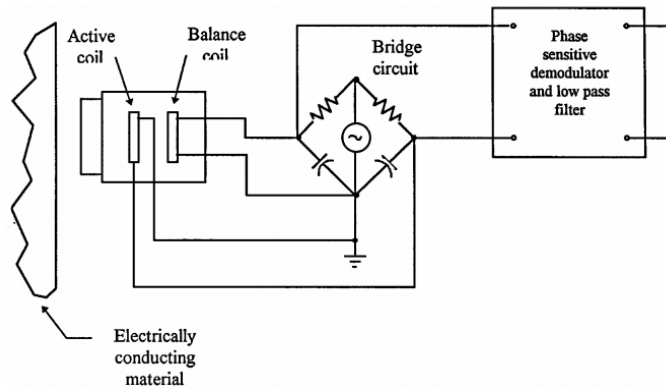


Figura 2.20: Trasduttore a correnti di eddy.

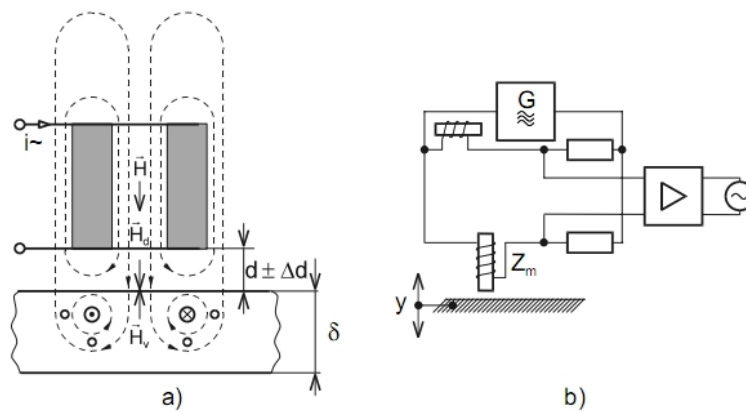


Figura 2.21: Il campo magnetico H induce le correnti di eddy sull'oggetto conduttivo da misurare. Queste generano il campo magnetico H_v , che in accordo alla legge di Lenz si oppone al campo di eccitazione, quello della bobina sensibile, e causa una diminuzione del campo originale H (a). L'effetto delle correnti di eddy può essere misurato come la variazione dell'impedenza nella bobina. Per misurare la distanza d (proximity detector) la variazione di impedenza attiva Z_m viene misurata dal circuito a ponte AC (b).

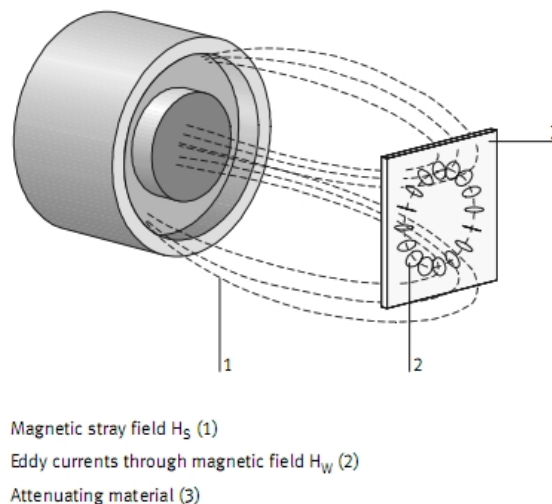


Figura 2.22: Altra visuale delle correnti di eddy indotte dal sensore magnetico.

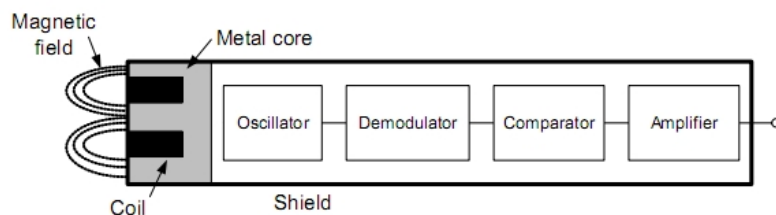


Figura 2.23: Un'altra possibilità per misurare la distanza d è quella di utilizzare un circuito oscillatore. Se un oggetto conduttivo si avvicina al campo magnetico della bobina, l'intensità delle correnti di eddy aumenta le perdite del circuito risonante di un oscillatore causando la caduta di ampiezza nelle oscillazioni. Il valore dell'ampiezza demodulata delle oscillazioni viene poi confrontata con un valore di soglia.

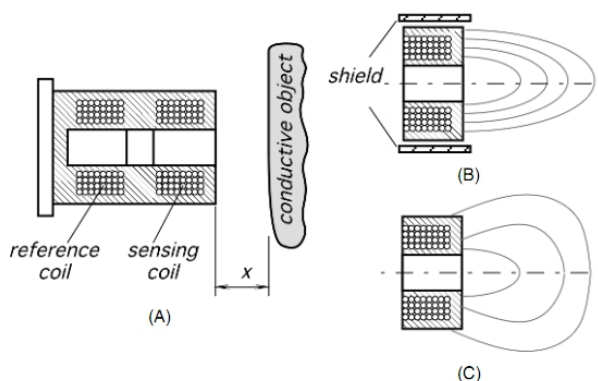


Figura 2.24: Sensore di prossimità elettromagnetico (A), sensore schermato (B), sensore non schermato (C).

(eccedendo di molto la temperatura di Curie di un materiale magnetico) e per la misura di distanze o di livelli di liquidi conduttivi, inclusi metalli fusi.

2.2.6 Schermatura e sensibilità dei sensori induttivi alle interferenze elettromagnetiche

I campi magnetici sono prodotti dalle correnti nei cavi o in maniera più marcata nelle bobine. I campi dovuti alle bobine sono importanti e causati dall'accoppiamento magnetico, in maniera particolare quando sono presenti due o più avvolgimenti nel circuito. L'accoppiamento magnetico tra bobine può essere controllato aumentando lo spazio tra le bobine, cambiando la loro orientazione, cambiandone la forma e schermando le bobine. I sensori induttivi vengono realizzati in svariate forme e dimensioni: mentre alcuni sensori hanno nuclei chiusi a forma toroidale, per esempio; altri hanno nuclei aperti e presentano traferri tra nucleo e bobina. Nuclei chiusi possono avere campi esterni praticamente nulli, eccetto per qualche piccolo flusso di dispersione. Anche se il sensore non ha nuclei chiusi, la maggior parte dei sensori induttivi variabili presentano campi esterni piuttosto limitati, dovuti a due insiemi di bobine vicine connesse in direzioni opposte per minimizzare i campi magnetici esterni. I sensori induttivi sono formati da conduttori chiusi, questo implica che, se il conduttore si muove in un campo magnetico, scorrerà una corrente in esso. In alternativa, una variazione magnetica produce una corrente in un conduttore chiuso che rimane fermo. A meno che non siano presi adeguati provvedimenti, ci possono essere campi magnetici esterni che si concatenano con le bobine del sensore (interferenza), producendo così delle correnti e delle risposte non

volute. A causa di operazioni inerenti, i sensori induttivi sono progettati per avere alta sensibilità alle variazioni di flusso magnetico. L'interferenza elettromagnetica esterna e i campi esterni possono seriamente influenzare le prestazioni dei sensori. E' noto che campi magnetici moderati si trovano nelle vicinanze di trasformatori di potenza, motori elettrici e linee di alimentazione. Questi piccoli campi producono una corrente negli elementi induttivi del sensore. Un modo per eliminare gli effetti esterni è quello di compiere una schermatura magnetica dei sensori ed effettuare una appropriata messa a terra. Nella schermatura magnetica, uno o più involucri di materiale ad alta permeabilità magnetica circondano le parti che devono essere schermate. Involucri multipli possono essere utilizzati per ottenere una schermatura veramente completa. Le parti finali di ogni involucro sono separate da un isolante così che l'involucro non costituisca un cortocircuito, in modo da non favorire un flusso intenso di corrente. Campi magnetici alternati sono anch'essi schermati interponendo fogli di metallo altamente conduttivo, come per esempio rame o alluminio, sul percorso del flusso magnetico. Le correnti di eddy indotte nello schermo producono una forza contro elettromotrice che tende ad eliminare il campo magnetico interferente. Questo tipo di schermatura è particolarmente efficace alle alte frequenze, tuttavia, dev'essere assicurata un'appropriata messa a terra. In molti sensori induttivi, le capacità parassite possono costituire un problema, specialmente quando il nucleo del sensore si trova nella posizione di quiete. Se l'effetto capacitivo è più grande di un certo valore, diciamo dell'1% del fondo scala dell'uscita, questo effetto può essere ridotto utilizzando un'alimentazione con un trasformatore a cavità centrale (center-tapped supply) e un'accurata messa a terra.

2.3 I sensori di prossimità capacitivi

I sensori capacitivi sono estensivamente utilizzati nelle applicazioni industriali e scientifiche. Si basano sulla variazione della capacità in risposta a una variazione fisica. Questi sensori trovano diversi impieghi, dalla misura dell'umidità alla rilevazione di spostamenti. In alcuni casi, i principi base di operazione e di rilevazione sono comuni in dissimili applicazioni; in altri casi, principi differenti possono essere sfruttati per le stesse applicazioni. Per esempio, i microfoni capacitivi sono basati sulla variazione spaziale tra le piastre in risposta a una pressione acustica, in questa maniera si convertono segnali audio in variazioni di capacità. Oppure, un indicatore di livello capacitivo utilizza la variazione di permittività relativa tra le piastre. Tuttavia, i sensori capacitivi sono meglio conosciuti essere associati a misure di spostamenti per movimenti rotazionali o traslazionali, come descriveremo in seguito.

La misura di distanze o spostamenti è un aspetto importante di molti sistemi industriali, scientifici, ingegneristici. Lo spostamento è principalmente il vettore rappresentante una variazione di posizione di un corpo o di un punto in relazione a un punto di riferimento. I sensori di posizione capacitivi soddisfano i requisiti delle applicazioni dove sono necessari una grande linearità e ampi intervalli (da pochi centimetri a qualche nanometro). Il principale elemento sensibile di un tipico sensore di spostamento consiste di due semplici elettrodi di capacità C . La capacità è funzione della distanza $d(\text{cm})$ tra gli elettrodi di una struttura, dell'area della superficie $A(\text{cm}^2)$ degli elettrodi, e della permittività ϵ ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ per l'aria) del dielettrico presente tra gli elettrodi; quindi:

$$C = f(d, A, \epsilon) \quad (2.21)$$

Esistono tre metodi basilari per realizzare un sensore di spostamento capacitivo: variando ϵ , A o d (figura 2.25).

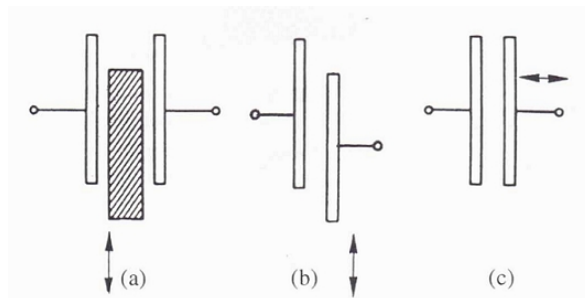


Figura 2.25: Tipi di trasduttori capacitivi: a variazione di permittività (a), a variazione di area affacciata (b), a variazione di distanza (c).

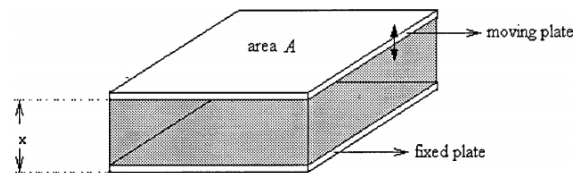


Figura 2.26: Un sensore di spostamento capacitivo a distanza variabile.

2.3.1 Sensori di spostamento a variazione di distanza

Un sensore di spostamento capacitivo, formato da due piastre piane parallele distanti x tra di loro, è illustrato in figura 2.26. Ignorando gli effetti sui bordi, la capacità di questo modello può essere espressa come:

$$C(x) = \epsilon A/x = \epsilon_r \epsilon_0 A/x \quad (2.22)$$

dove ϵ è la costante dielettrica o permittività, ϵ_r è la costante dielettrica relativa (in aria ϵ_r è circa uguale a 1), ϵ_0 è la costante dielettrica nel vuoto: $8,854188 \cdot 10^{-12}$ F/m, x è la distanza delle piastre in metri e A è l'area effettiva delle piastre in m^2 . La capacità di questo trasduttore è non lineare rispetto alla distanza x , presentando una funzione di trasferimento iperbolica. La sensibilità della capacità rispetto alla variazione della separazione delle piastre è:

$$dC/dx = -\epsilon_r \epsilon_0 A/x^2 \quad (2.23)$$

L'equazione 2.23 indica che la sensibilità è inversamente proporzionale a x . Tuttavia, dalle equazioni 2.22 e 2.23, segue che la variazione percentuale di C è proporzionale alla variazione percentuale di x . Questo si esprime come:

$$dC/C = -dx/x \quad (2.24)$$

Questo tipo di sensore è spesso utilizzato per misurare piccoli incrementi di spostamento senza offrire un contatto con l'oggetto.

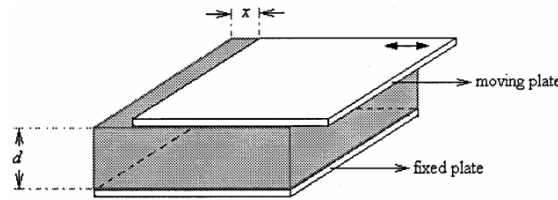


Figura 2.27: Un sensore di spostamento capacitivo a variazione di area.

2.3.2 Sensori di spostamento a variazione di area

In alternativa, gli spostamenti possono essere rilevati variando l'area della superficie degli elettrodi di un condensatore a facce piane, come illustrato in figura 2.27. In questo caso la capacità dev'essere:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 (A - wx) / d \quad (2.25)$$

dove w è la larghezza e wx è la riduzione di area dovuta al movimento di una piastra. In questa maniera il trasduttore è lineare con lo spostamento x . Questo tipo di sensore è implementato di solito come un condensatore capace di ruotare per misurare spostamenti angolari. La struttura del condensatore rotante viene anche utilizzata come trasduttore di uscita per misurare tensioni elettriche come voltmetro capacitivo.

In sintesi, quando una piastra del condensatore si muove in direzione normale all'altra piastra, allora la capacità C è una funzione *non lineare* della distanza x ; invece quando una piastra trasla in relazione all'altra, allora C è una funzione *lineare* dell'area sovrapposta A .

Il ponte capacitivo (The capacitive bridge)

Recentemente il ponte capacitivo è diventato sempre più popolare nella progettazione di sensori di spostamento. Un sensore lineare di posizione a ponte capacitivo è raffigurato in figura 2.28. Il sensore comprende due set di elettrodi planari che sono paralleli e adiacenti l'uno all'altro e separati da una distanza d . Per aumentare la capacità, lo spazio presente tra i due set di piastre è relativamente piccolo. Un gruppo di elettrodi statici è composto da quattro elementi rettangolari mentre un gruppo di elettrodi in movimento contiene due elementi rettangolari. Tutti e sei gli elementi hanno le stesse dimensioni (la dimensione è b). I quattro elettrodi del gruppo stazionario sono elettricamente connessi a formare una croce, costituendo una rete capacitiva a ponte. La sorgente di eccitazione del ponte fornisce una tensione sinusoidale (5-50 kHz) e la differenza di tensione tra la coppia di piastre in movimento viene rilevata dall'amplificatore operazionale la quale uscita è connessa all'ingresso di un rilevatore simultaneo (synchronous detector). La capacità di due piastre parallele, con distanza di separazione fissata, è proporzionale all'*area* della piastra che si affaccia direttamente sull'area corrispondente dell'altra piastra. La figura 2.29 mostra il circuito equivalente del sensore che ha la configurazione del ponte capacitivo. Il valore della capacità C_1 è:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 b}{d} \left(\frac{L}{2} + x \right) \quad (2.26)$$

Le altre capacità si derivano dalla stessa equazione. Da notare che le capacità in opposizione sono circa uguali: $C_1 = C_3$ e $C_2 = C_4$. Una variazione mutua delle piastre rispetto a una variazione simmetrica porta a uno sbilanciamento del ponte e porta a una variazione dell'uscita dell'amplificatore differenziale sensibile alla fase. Il vantaggio

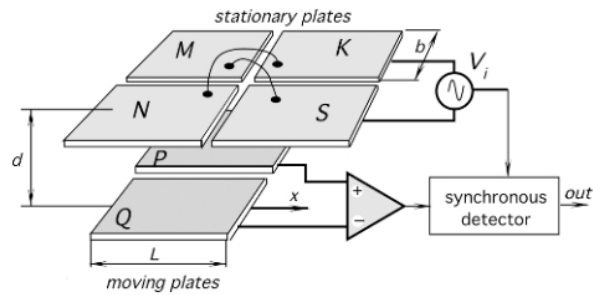


Figura 2.28: Sensore a ponte capacitivo a facce piane.

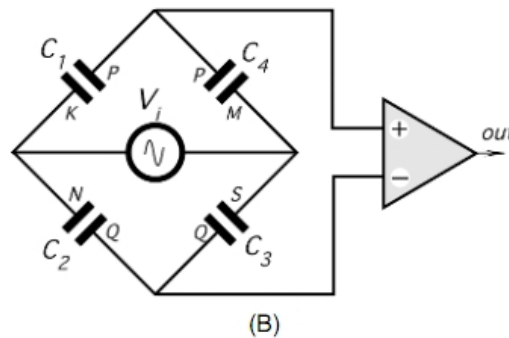


Figura 2.29: Schema del circuito equivalente.

del circuito a ponte capacitivo è lo stesso di tutti i circuiti a ponte: linearità e immunità al rumore.

2.3.3 Sensori di spostamento a variazione di permeabilità dielettrica

In alcuni casi, lo spostamento può essere rilevato dal movimento relativo di un materiale dielettrico che si trova tra le due piastre, come mostrato in figura 2.30. L'equazione corrispondente dev'essere:

$$C = \epsilon_0 w [\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1)x] \quad (2.27)$$

dove ϵ_1 è la permeabilità relativa del materiale dielettrico ed ϵ_2 è la permeabilità del materiale in cui avviene lo spostamento (un liquido per esempio). In questo caso, l'uscita del trasduttore è ancora lineare. Questo tipo di trasduttore è utilizzato in maniera predominante in forma di due cilindri concentrici per misurare il livello di fluidi nei serbatoi. Un liquido non conduttivo costituisce il materiale dielettrico. I valori di permittività relativi dei dielettrici e dei materiali più comuni sono riportati in figura 2.32.

2.3.4 Sensori capacitivi differenziali

Alcune non linearità nei sensori capacitivi possono essere eliminate utilizzando un modello capacitivo differenziale. Questi sensori sono basati principalmente su condensatori a tre terminali, come mostrato in figura 2.33. Piccole variazioni nella costruzione di questi sensori trovano numerose applicazioni differenti, inclusa la misura della pressione differenziale. In alcune versioni, la piastra centrale si muove in risposta a variazioni fisiche rispetto alle piastre fisse. In altre, la piastra centrale rimane fissa e sono le

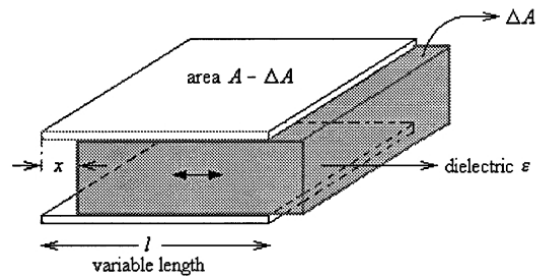


Figura 2.30: Un sensore di spostamento capacitivo a variazione di permeabilità dielettrica.

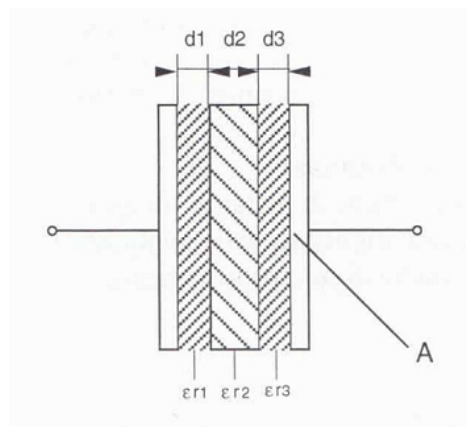


Figura 2.31: Esempio di trasduttore a variazione di permittività in cui $C = \epsilon_0 A / (d1/\epsilon_{r1} + d2/\epsilon_{r2} + d3/\epsilon_{r3})$.

Materiali	Permittività relativa
Vuoto	1
Aria	1.00054
PTFE	2.1
Politene	2.3
Olio siliconico	2.7
Araldite	3.3
Silice	3.8
PVC	4.0
Quarzo	4.5
Vetro	5.0 – 7.5
Porcellana	5.5 – 7.0
Mica	7.0
Allumina	8.5
Acqua	80
Titanato di bario	1000 – 10000

Figura 2.32: Permittività relativa di alcuni materiali.

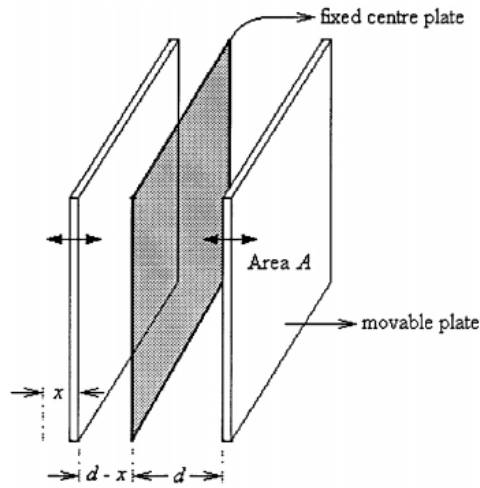


Figura 2.33: Un sensore capacitivo differenziale.

altre piastre a poter muoversi. L'uscita dalla piastra centrale è nulla nella posizione di riferimento ed aumenta se si muove a destra o a sinistra. L'intervallo è pari a due volte la separazione d . Per uno spostamento pari a d si ottiene:

$$2\delta C = C_1 - C_2 = \epsilon_r \epsilon_0 l w / (d - \delta d) - \epsilon_r \epsilon_0 l w / (d + \delta d) = 2\epsilon_r \epsilon_0 l w \delta d / (d^2 + \delta d^2) \quad (2.28)$$

e

$$C_1 + C_2 = 2C = \epsilon_r \epsilon_0 l w / (d - \delta d) + \epsilon_r \epsilon_0 l w / (d + \delta d) = 2\epsilon_r \epsilon_0 l w d / (d^2 + \delta d^2) \quad (2.29)$$

Si ottiene approssimativamente:

$$\delta C / C = \delta d / d \quad (2.30)$$

Questo indica che la risposta del dispositivo è più lineare in confronto alla risposta del sensore capacitivo a due piastre. Tuttavia, in pratica si presenta ancora un po' di non linearità dovuta agli effetti della struttura. Quindi, le uscite di questi tipi di sensori richiedono ancora di essere elaborate attentamente.

Osserviamo in figura 2.34 un altro modello di sensore capacitivo: la piastra superiore e inferiore vengono alimentate con due segnali sinusoidali sfasati di 180° . Entrambe le capacità si equivalgono quando la piastra centrale rimane in posizione di equilibrio e presenta quindi tensione nulla ai capi perchè le correnti che scorrono su C_1 e su C_2 sono identiche e si annullano a vicenda. Se la piastra centrale si muove in basso di una distanza x le capacità variano in questa maniera:

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{x_0 + x} \quad (2.31)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon A}{x_0 - x} \quad (2.32)$$

e il segnale relativo alla piastra centrale aumenta in maniera proporzionale allo spostamento e la fase di quel segnale indica la direzione di spostamento. L'ampiezza del segnale di uscita è:

$$V_{\text{out}} = V_0 \left(-\frac{x}{x_0 + x} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (2.33)$$

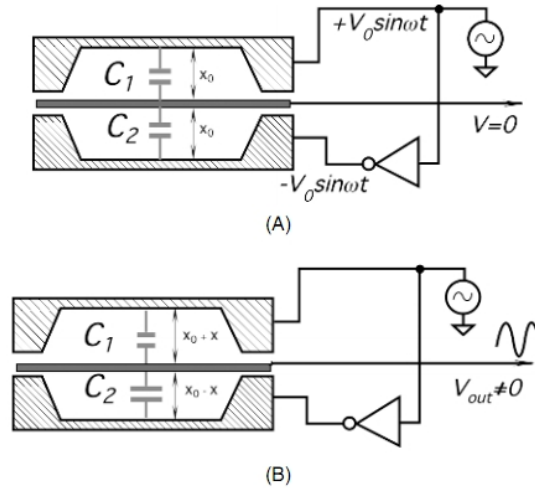


Figura 2.34: Un sensore capacitivo in posizione di equilibrio (A) e di sbilanciamento (B).

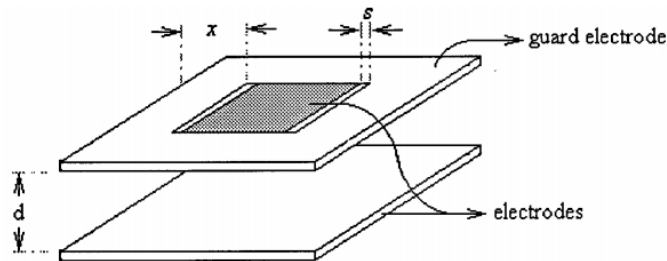


Figura 2.35: Un sensore intelligente capacitivo di posizione.

Fino a che $x \ll x_0$ la tensione di uscita può essere considerata una funzione lineare dello spostamento. Il secondo termine rappresenta una capacità iniziale che è la causa primaria di un offset in uscita. L'offset è causato anche dagli effetti sui bordi delle capacità nelle posizioni periferiche delle piastre e dalla forza elettrostatica. Questa forza è il risultato dell'attrazione e della repulsione di cariche applicate sulle facce del sensore e le piastre si comportano come delle molle. Il valore istantaneo di tale forza è:

$$F = -\frac{1}{2} \frac{CV^2}{x_0 + x} \quad (2.34)$$

2.3.5 Sensori di posizione capacitivi nei circuiti integrati

La figura 2.35 mostra la tipica microstruttura di un sensore di spostamento capacitivo. Il sensore consiste di due elettrodi fissi di capacità C_x e di un elettrodo mobile che si sposta in maniera infinitesimale rispetto agli altri due. Produce una risposta non lineare, per questo motivo contiene dei circuiti di linearizzazione. Dato che il sistema è semplice, la determinazione della capacità tra i due elettrodi è ormai chiara. L'elettrodo più piccolo è circondato da un elettrodo di protezione per rendere C_x indipendente da movimenti laterali e rotazionali del sistema parallelo alla superficie dell'elettrodo. Tuttavia, l'introduzione di una piastra di protezione porta a deviazioni relative nella capacità C_x tra i due elettrodi. Questo è in parte vero se la dimensione dell'elettrodo di protezione è più piccola di:

$$\delta < \exp(-\pi x/d) \quad (2.35)$$

dove x è la larghezza della protezione e d è la distanza tra gli elettrodi. Dato che questo scostamento introduce non linearità, δ è richiesto essere minore di 100 ppm. Un'altra forma di scostamento si presenta tra l'elettrodo più piccolo e quello di protezione, in particolare per distanze di

$$\delta < \exp(-\pi d/s) \quad (2.36)$$

dove s è la larghezza della fessura. Quando la larghezza della fessura s è minore di $1/3$ della distanza tra gli elettrodi, lo scostamento è trascurabile.

La capacità C_x è connessa ad un amplificatore operazionale invertente e oscillatore. Se i movimenti esterni sono lineari, tenendo in considerazione le capacità parassite e gli effetti di offset, possiamo scrivere la seguente relazione:

$$M_x = mC_x + M_{\text{off}} \quad (2.37)$$

dove m è il guadagno incognito e M_{off} è l'offset incognito. Effettuando la misura di una capacità di riferimento C_{ref} , misurando l'offset, M_{off} , e prendendo $m = 0$, i parametri m e M_{off} possono essere eliminati. La misura finale relativa alla posizione P_{os} può essere definita come:

$$P_{\text{os}} = \frac{M_{\text{ref}} - M_{\text{off}}}{M_x - M_{\text{off}}} \quad (2.38)$$

In questo caso, la capacità del sensore C_x può essere semplificata in questa maniera:

$$C_x = \frac{\epsilon A_x}{d_0 + \Delta d} \quad (2.39)$$

dove A_x è l'area dell'elettrodo, d_0 è la distanza iniziale tra di loro, ϵ è la costante dielettrica e Δd è lo spostamento che dev'essere misurato. Per elettrodi di riferimento, può essere trovata la seguente capacità di riferimento:

$$C_{\text{ref}} = \frac{\epsilon A_{\text{ref}}}{d_{\text{ref}}} \quad (2.40)$$

dove A_{ref} è l'area e d_{ref} la distanza. Sostituendo le equazioni 2.39 e 1.10 nelle equazioni 2.37 e 2.38 si ottiene:

$$P_{\text{os}} = \frac{A_{\text{ref}}(d_0 + \Delta d)}{A_x d_{\text{ref}}} = a_1 \frac{\Delta d}{d_{\text{ref}}} + a_0 \quad (2.41)$$

dove P_{os} è il valore che rappresenta la posizione con a_1 e a_0 incognite. Il parametro $a_1 = A_{\text{ref}}/A_x$ rimane costante fino a quando esiste un accoppiamento meccanico accettabile tra le aree dei due elettrodi. Il parametro $a_0 = (A_{\text{ref}}d_0)/(A_x d_{\text{ref}})$ è anch'esso costante per valori fissati di d_0 e d_{ref} . Questi valori sono spesso determinati per calibrazione ripetuta per un certo numero di volte. In numerose applicazioni, queste calibrazioni vengono omesse se il sensore di spostamento fa parte di un sistema più vasto dove è necessaria una calibrazione generale. L'accuratezza di questo tipo di sistema dev'essere più piccola di un μm su un intervallo di 1 mm, il tempo di misura totale è migliore di 0,1 s e l'intervallo di capacità va dal pF ai $50fF$.

Esistono quindi due tipologie di sensori capacitivi: quelli che si basano sul principio dei condensatori a facce piane (figura 2.36) e quelli che sfruttano le capacità di bordo. Nei primi il trasduttore costituisce una faccia del condensatore e l'oggetto da misurare forma l'altra faccia, questo tipo di sensori viene largamente impiegato nell'industria. Tuttavia possiede alcune limitazioni: l'oggetto sottoposto a misura dev'essere conduttivo, la relazione inversa della capacità della fessura è altamente non lineare e la sensibilità cade drasticamente nel caso di fessure ampie (gaps). In figura 2.37 si nota il

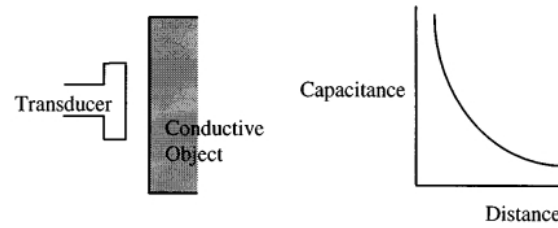


Figura 2.36: Sensore di prossimità basato sul principio del condensatore a facce piane, struttura e risposta del sensore.

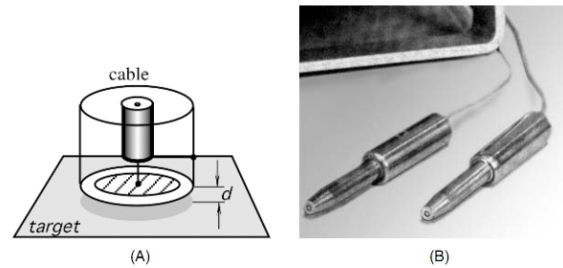


Figura 2.37: Una sonda capacitiva con anello di protezione: vista in sezione (A) e esternamente (B).

modello di un sensore capacitivo monopolare dove una faccia del condensatore è connessa al conduttore centrale di un cavo coassiale e l'altra faccia è formata dal target. Questa sonda è circondata da una protezione di messa a terra che minimizza l'effetto dei bordi e ne aumenta la linearità. Una tipica sonda capacitiva opera in un intervallo di frequenze di 3 MHz e può rilevare oggetti che si muovono molto velocemente, quando la risposta in frequenza della sonda è nell'intervallo di 40 kHz. Per migliorare la sensibilità e ridurre gli effetti sui bordi, il sensore capacitivo monopolare può essere alimentato da uno scudo guidato. Questa protezione viene posizionata attorno le parti non operative dell'elettrodo e viene alimentata da una tensione pari a quella dell'elettrodo. Poiché le tensioni della protezione e dell'elettrodo sono in fase e hanno la stessa ampiezza, non esiste un campo magnetico tra i due e tutti i componenti posizionati dietro lo scudo non hanno effetto nel funzionamento. La tecnica dello scudo guidato viene illustrata in figura 2.38.

Il secondo tipo di sensori, quello che sfrutta le capacità di bordo, possiede due elettrodi "vivi" e l'oggetto misurato non è necessario che faccia parte del sistema sensoriale. L'oggetto preso come target può essere conduttivo o meno, anche se la misurazione di

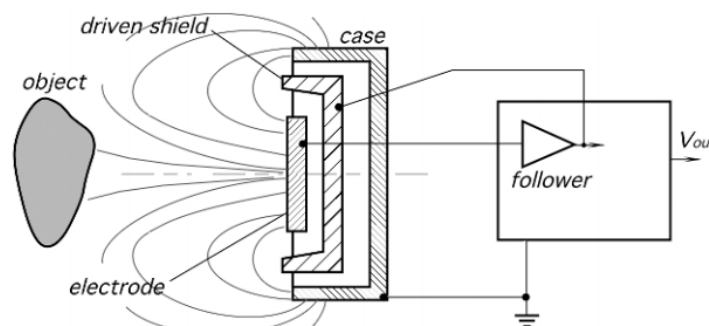


Figura 2.38: Scudo guidato attorno all'elettrodo in un sensore capacitivo di prossimità.

Type of sensor	Schematic symbol	Mathematical description	Transfer characteristic
single plate sensor with variable airgap		$C = \varepsilon \frac{S}{d(x)}; \quad \frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right)$	
differential plate sensor with variable airgap		$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d(x)};$ $C_2 = \varepsilon \frac{S}{d(x)};$ $\frac{\Delta C}{\Delta d} \doteq -\frac{C}{d} \left[1 + 2\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$	
plate sensor with dielectric layer and variable airgap		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1(x) + \frac{d_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2}};$ $\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{N} - \frac{\Delta d_1}{d_1 + d_2}}$ $N = \frac{\varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2}$	
plate sensor with variable thickness of dielectric layer		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_0 - d_1(x) \left(1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)}$	
plate sensor with variable area of overlapping		$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d}; \quad \frac{\Delta C}{\Delta l} \doteq -\frac{C_{\max}}{l_{\max}} \left(1 + \frac{\Delta d}{d}\right)$	

Figura 2.39: Riassunto dei principi dei sensori capacitivi per misure di piccoli spostamenti.

distanze è influenzata dal tipo di materiale. Per questo motivo devono essere realizzate calibrazioni specifiche per materiali differenti.

2.4 I sensori di prossimità magnetici

Parecchi tipi di dispositivi di misura di spostamento lineare ed angolare fanno affidamento ai campi elettromagnetici e alle proprietà magnetiche dei materiali nel funzionamento dei loro elementi sensibili basilari. Alcuni non possono essere comunemente attribuiti a sensori magnetici, ma sono invece chiamati in accordo alle loro specifiche tecniche di rilevamento. I sensori magnetici presentati qui utilizzano un magnete permanente o un elettromagnete alimentato in continua o in alternata. Assieme a svariati materiali utilizzati per rilevare il campo magnetico, la combinazione viene organizzata per ottenere una risposta che indica uno spostamento lineare o angolare. Il sensore può sia operare a causa di un campo magnetico applicato direttamente, sia perchè le sue proprietà sono derivate dall'uso di un campo magnetico. I tipi di sensori magnetici presentati in questa sezione includono quelli magnetoresistivi, magnetostrettivi, ad effetto Hall.

Un importante aspetto dei sensori magnetici è che utilizzano un elemento sensibile senza bisogno di contatto. Non c'è alcuna connessione meccanica o collegamento tra i componenti statici e quelli mobili di un sensore. In alcuni dispositivi che rilevano la posizione di un magnete o di un nucleo, il sensore può essere progettato per permettere la rimozione del magnete o del nucleo dall'elemento sensibile quando non sono richieste letture di misura (readings). L'assenza di contatto implica che il tempo di vita dell'elemento sensibile non sia limitato ad un numero finito di cicli a causa del-

Type of sensor	Schematic symbol	Mathematical description	Transfer characteristic
plate differential sensor with variable area of overlapping		$C = \varepsilon \frac{S(x)}{d}; \quad \frac{\Delta C}{\Delta l} \doteq -\frac{C_{\max}}{l_{\max}} \left[1 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]$	
plate differential sensor with variable area of dielectrical layer overlapping		$C = \frac{\varepsilon_1 S}{d_1 + d_2} \left[1 + \frac{l(x)}{l_{\max}} \cdot \frac{1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{\frac{d_1}{d_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \right]$	
coaxial sensor with variable area of overlapping		$C = \varepsilon \frac{2\pi \cdot l(x)}{\ln \frac{D_1}{D_2}}; \quad \frac{\Delta C}{\Delta l} \doteq -\frac{C_{\max}}{l_{\max}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right]$	
differential sensor with variable area of overlapping		$C = \varepsilon \frac{S(\alpha)}{d}$	

Figura 2.40: Riassunto dei principi dei sensori capacitivi per misure di medi e grandi spostamenti.

l'usura provocata dall'attrito. Questo fatto è molto importante per alcuni macchinari industriali. Tutti questi sensori utilizzano tecnologie prive di contatto fisico.

Lo spostamento si riferisce ad una variazione della posizione, piuttosto che ad una posizione assoluta. Nelle applicazioni industriali più comuni, tuttavia, i sensori di spostamento vengono tipicamente classificati come incrementali o assoluti. Un sensore incrementale indica la quantità di variazione tra la posizione presente e quella precedente. Se l'informazione che descrive la locazione corrente viene persa, a causa di una perdita di potenza o ad altri disturbi, il sistema dev'essere fatto ripartire. Durante lo stato di reset, il sensore deve rimanere nella sua posizione di riferimento. Molti sensori di spostamento vengono detti "assoluti": essi forniscono una misura di angolo o distanza rispetto a un punto fisso, invece che riferito alla posizione precedente. Letture consecutive di misure possono essere sottratte per ottenere un'indicazione incrementale. Un sensore assoluto indica la posizione corrente senza il bisogno di conoscere la posizione antecedente. Non richiede mai di essere azzerato, viene detto anche sensore di posizione. Descriveremo i sensori magnetici in base alle tecniche impiegate, piuttosto che alle applicazioni.

2.4.1 Sensori magnetostrettivi

Un sensore di spostamento magnetostrettivo utilizza un elemento ferromagnetico per rilevare la posizione di un magnete che si sposta lungo la sua lunghezza. Il magnete di posizione è attaccato all'oggetto di cui deve essere rilevata la posizione, e il corpo del sensore rimane stazionario (figura 2.42). Il magnete di posizione si muove lungo l'area di misura senza il contatto dell'elemento sensibile. I materiali ferromagnetici come il ferro, il nickel e il Permalloy (lega magnetica nichel-ferro: 68% Ni - 32% Fe) mostrano una proprietà chiamata **magnetostrizione**. La figura 2.41 evidenzia i tipici cicli di isteresi magnetica e quindi di induzione magnetica B dei predetti mate-

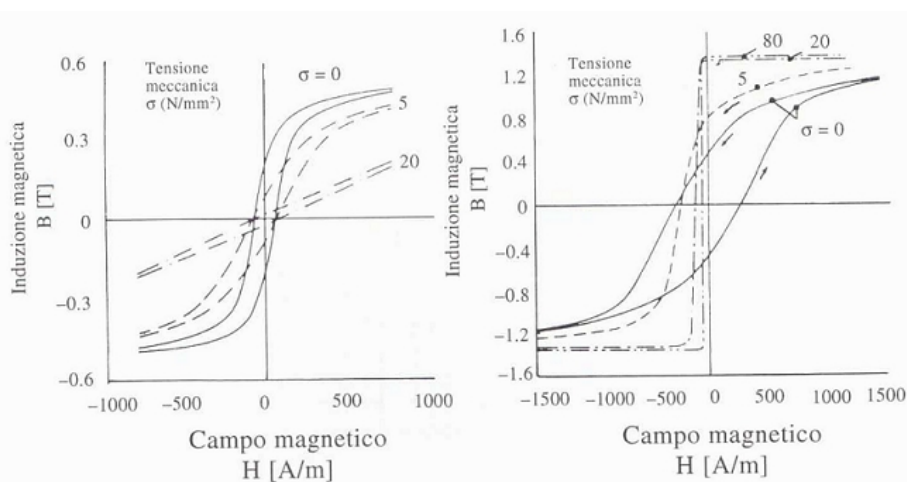


Figura 2.41: Cicli di isteresi magnetica di materiali magnetostrettivi: Nichel puro (a sinistra) e Permalloy 68 (a destra).

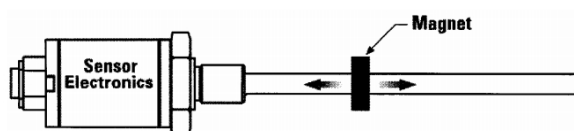


Figura 2.42: Sensore magnetostrettivo con magnete di posizione.

riali, in presenza del campo magnetico H e sottoposti a diverse tensioni meccaniche σ . L'applicazione di un campo magnetico a questi materiali causa una deformazione della struttura cristallina, risultando in una variazione nelle dimensioni e nella forma del materiale. Un materiale che possiede una magnetostrizione positiva si espanderà quando magnetizzato. Al contrario, in presenza di una magnetostrizione negativa, il materiale si contrae. Nei metalli come ferro, nichel e cobalto, il livello energetico $3d$ degli elettroni non è riempito completamente, questo permette la formazione di un momento magnetico (gli orbitali più vicini al nucleo sono completi, e non contribuiscono al momento magnetico). Quando la rotazione di un elettrone è variata da un campo magnetico, l'accoppiamento tra lo spin dell'elettrone e l'orbita dell'elettrone causa una variazione di energia dell'elettrone. Il cristallo si deforma in modo che gli elettroni sulla superficie possano rilassarsi a stati di energia più bassa. Questa risposta fisica di un materiale ferromagnetico è dovuta alla presenza di momenti magnetici, chiamati *domini*. Ogni dominio consiste di molti atomi e quando un materiale non è magnetizzato, i domini sono orientati casualmente. Tuttavia, quando un materiale viene magnetizzato, i domini sono orientati con i loro assi approssimativamente paralleli l'uno con l'altro. L'interazione di un campo magnetico esterno con i domini causa l'effetto magnetostrettivo (vedi figura 2.43). Questo effetto può essere ottimizzato controllando la disposizione attraverso una lega di selezione, la temperatura termica, la lavorazione a freddo, la forza del campo magnetico. Mentre l'applicazione di un campo magnetico causa deformazione fisica, come descritto sopra, è vero anche il contrario: esercitando uno stress, ciò causa alle proprietà magnetiche di variare (permeabilità, suscettibilità). Questo viene chiamato *effetto Villari*. Nei sensori magnetostrettivi, distorsioni uniformi di lunghezza offrono vantaggi limitati. Solitamente, la magnetizzazione viene ruotata con un campo magnetico poco intenso per indurre una distorsione locale, questo è l'effetto *Wiedemann*. Esso rappresenta una torsione meccanica che avviene in un punto lungo un cavo magnetostrettivo quando è attraversato da una corrente elettrica

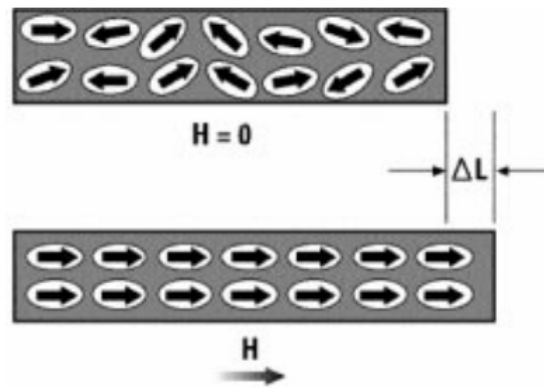


Figura 2.43: Domini magnetici: l'allineamento con il campo magnetico "H" causa variazioni dimensionali.

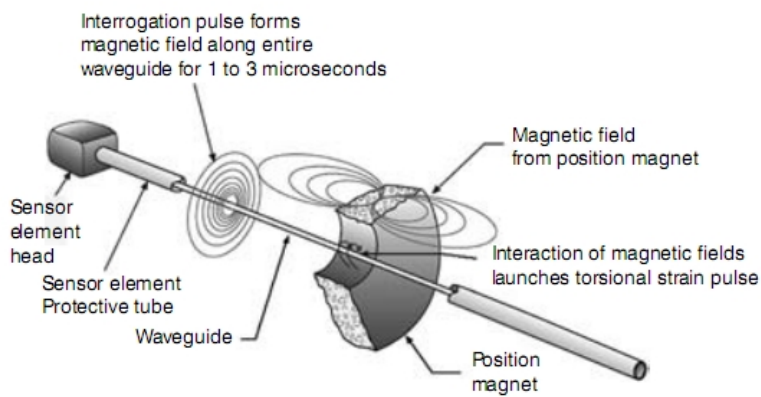


Figura 2.44: Funzionamento di un sensore di posizione magnetostrettivo.

mentre è soggetto ad un campo magnetico assiale. La torsione avviene nella posizione del campo magnetico assiale, il quale è fornito da un piccolo magnete permanente chiamato magnete di posizione.

In un sensore di spostamento, un cavo o tubo ferromagnetico, chiamato guida d'onda, viene utilizzato come elemento sensibile, vedi figura 2.44. Il sensore misura la distanza tra il magnete di posizione e il trasduttore. Per iniziare una misura, un impulso di corrente I (chiamato impulso di interrogazione) viene applicato alla guida d'onda. Questo causa un campo magnetico che istantaneamente lo circonda lungo tutta la sua lunghezza. In un sensore di posizione magnetostrettivo, l'impulso di corrente è approssimativamente della durata di 1-3 μs . Un'onda meccanica di torsione viene lanciata alla locazione del magnete di posizione dovuta all'effetto Wiedemann. Parte di quest'onda viaggia sia in un verso che nell'altro all'interno della guida verso il trasduttore. L'onda che viaggia nella guida viene rilevata quando raggiunge il trasduttore. Il tempo di misura tra l'applicazione dell'impulso di corrente (momento in cui viene lanciata l'onda di torsione al magnete di posizione) e il suo rilevamento da parte del trasduttore rappresenta la locazione del magnete di posizione. La velocità dell'onda è tipicamente di circa 3000 m/s. La porzione d'onda che viaggia lontano dal trasduttore può agire come segnale di interferenza dopo che è stato riflesso dall'estremità della guida d'onda. In questa maniera invece, è smorzata da un elemento attenuatore quando raggiunge l'estremità della guida opposta al trasduttore. Lo smorzamento viene di solito raggiunto attaccando un materiale elastomerico alla fine della guida. La parte finale della guida all'interno dell'elemento smorzatore è inutilizzabile per la determinazione

della posizione e viene chiamata quindi “zona morta“. Il tempo di misura può essere memorizzato e utilizzato direttamente come uscita del sensore o può essere condizionato al suo interno per fornire svariati tipi di uscite, incluse tensioni o correnti analogiche, modulazioni a larghezza di impulso, bus CAN, SSI, HART, Profibus, etc. I sensori di posizione magnetostrettivi possono essere realizzati corti fino a 1 cm o lunghi più di 30 m e la risoluzione può arrivare fino a 1 μm . I sensori sono intrinsecamente stabili, dato che la misura risiede sulle proprietà fisiche del materiale della guida d’onda. I sensori più lunghi diventano molto convenienti perchè la stessa apparecchiatura elettronica può guidare sensori di diversa lunghezza; solo la guida d’onda e la sua apparecchiatura aumentano in lunghezza per rendere il sensore più lungo. Il cavo magnetostrettivo può essere dritto per un sensore lineare, o a forma particolare per fornire misure di curvatura o rotazionali. I sensori di curvatura sono spesso utilizzati per misure angolari o per movimenti non lineari in applicazioni industriali, anche se i sensori magnetostrettivi rotanti non sono così tanto popolari.

2.4.2 Sensori magnetoresistivi

Nella maggior parte dei materiali magnetici, la resistenza elettrica diminuisce quando viene applicato un campo magnetico e la magnetizzazione è *perpendicolare* al flusso di corrente (scorre una corrente ogni qual volta si misura la resistenza elettrica) (vedi figura 2.45). La resistenza diminuisce all’aumentare della densità di flusso magnetico, fino a che il materiale raggiunge la saturazione magnetica. Il rapporto di diminuzione della resistenza è minore quando il materiale si avvicina alla saturazione. La variazione di resistenza è di circa l’1% a temperatura ambiente (3% nel ferro, 2% nel nickel). Quando il campo magnetico è *parallelo* alla corrente, la resistenza aumenta all’aumentare dell’intensità del campo magnetico. La sensibilità è maggiore quando il campo magnetico è perpendicolare al flusso di corrente. Queste sono le proprietà del fenomeno chiamato *magnetoresistenza* (MR). L’effetto MR è dovuto alla combinazione di due eventi: la riduzione della velocità dei portatori poichè i portatori sono costretti a muoversi lateralmente e la riduzione nell’area della sezione effettiva del conduttore come conseguenza dell’affollamento di portatori su un lato. Quando un magnete di posizione viene avvicinato a un singolo elemento sensibile MR, la variazione di resistenza è massima quando il magnete passa sopra lungo il punto centrale dell’elemento e si riduce fino a quando il magnete ha oltrepassato l’oggetto. La resistenza cambia in accordo a questa relazione:

$$\text{Resistività}' = \text{Tensione}/(\text{densità}' \text{ portatori} \cdot \text{velocità}' \text{ portatori}) \quad (2.42)$$

Utilizzando più elementi sensibili MR allineati tra loro, può essere modellato un dispositivo che misura spostamenti ancora più lunghi. I segnali provenienti dalla stringa di sensori vengono decodificati per trovare quali elementi sono stati influenzati dal magnete. Successivamente le misure individuali vengono utilizzate per determinare la posizione del magnete in maniera più precisa. In questo modo possono essere costruiti sensori con prestazioni relativamente molto alte. La sensibilità alla temperatura dei sensori MR deve essere compensata e i sensori più lunghi contengono più elementi sensibili individuali. Per questo motivo, sensori più lunghi sono difficili da essere realizzati, e sono quindi più costosi. I materiali MR anisotropici sono capaci di una variazione di resistenza in un intervallo che va dall’1 al 2%. L’effetto magnetoresistivo di un oggetto conduttore può essere incrementato creando una composizione di più strati di materiale aventi livelli differenti di magnetoresistenza. Strutture multistrato (a volte più di 10 strati) hanno reso capaci lo sviluppo di materiali che mostrano un effetto MR più

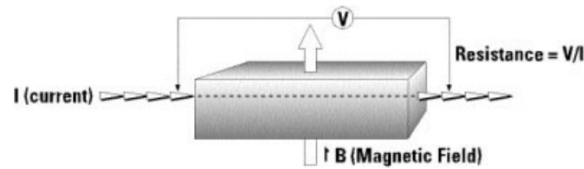


Figura 2.45: Magnetoresistenza.

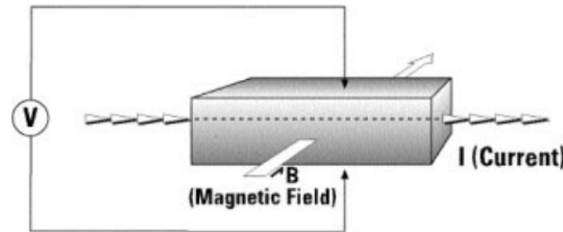


Figura 2.46: Effetto Hall.

elevato e che saturano per campi magnetici applicati più intensi. Questo effetto viene chiamato *magnetoresistenza gigante* (GMR). Gli elementi GMR possono venire connessi a ponte di quattro elementi (ponte di Wheatstone) per raggiungere una sensibilità più elevata e per compensare gli effetti dovuti alla temperatura. In questo modello, due elementi vengono schermati dal campo magnetico applicato. La sensibilità può essere inoltre aumentata incorporando concentratori di flusso sugli elementi sensibili. Nella connessione a ponte, la tensione d'uscita può variare più del 5% della tensione di alimentazione. Si stanno conducendo ulteriori ricerche su alcuni materiali MR per migliorare la sensibilità diminuendo la forza del campo magnetico necessario, e aumentando però la variazione di resistenza. Il livello più alto di prestazioni dei materiali MR viene detto *magnetoresistenza colossale* (CMR). A causa di alcune limitazioni sul range di temperatura operativo, l'effetto CMR non viene ancora utilizzato in pratica nei sensori industriali. Nonostante gli MR, GMR e CMR siano limitati in questo momento come utilizzo di sensori di spostamento a causa del loro costo, degli effetti della temperatura e dei vincoli di fabbricazione, la ricerca è ancora in progresso. Probabilmente il prossimo livello di magnetoresistenza raggiunta sarà quello HMR (Huge/Humongous Magnetoresistance).

2.4.3 Sensori a effetto Hall

Introduzione

L'effetto Hall è una proprietà che si rivela in un conduttore influenzato da un campo magnetico. Una caduta di potenziale V_H , chiamata tensione di Hall, si instaura ai capi del conduttore quando viene applicato un campo magnetico perpendicolare rispetto al flusso di corrente. Il modulo della tensione di Hall è proporzionale alla densità di flusso magnetico e alla corrente. Il campo magnetico provoca un gradiente di concentrazione dei portatori attorno al conduttore. Il gran numero di portatori su un lato del conduttore, confrontato con quello dell'altro lato, causa la tensione V_H (vedi figura 2.46). La tensione varia con la corrente e con il campo magnetico applicato in accordo alla seguente relazione:

$$V_H = K_H \beta I / z \quad (2.43)$$

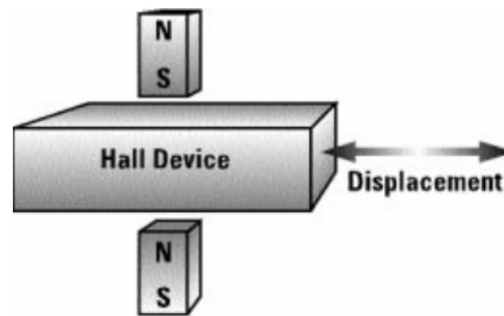


Figura 2.47: Sensore Hall a due magneti.

dove V_H è la tensione di Hall, K_H è la costante di Hall, β è la densità di flusso magnetico, I è il flusso di corrente che scorre nel conduttore e z è lo spessore del conduttore. I sensori che utilizzano l'effetto Hall sono tipicamente costituiti da materiale semiconduttore, con il conseguente vantaggio di poter implementare l'elettronica di condizionamento del segnale direttamente sullo stesso materiale. Vengono utilizzati materiali semiconduttori di *tipo-n* o di *tipo-p*, con la polarità associata del flusso di corrente. Un segnale di uscita maggiore si raggiunge con materiali con costante di Hall elevata, il che richiede un'alta mobilità di portatori. Una bassa resistività limita la tensione di rumore termico, per un efficiente rapporto segnale-rumore (SNR). Queste condizioni vengono ottimizzate impiegando semiconduttori di tipo *n*. Un sensore di spostamento può essere realizzato con un elemento sensibile a effetto Hall e da un magnete mobile, con un'uscita proporzionale alla distanza tra i due. Due magneti possono essere adattati ad un sensore Hall come in figura 2.47 per ottenere un campo magnetico di intensità nulla quando il sensore è equidistante dai magneti. Queste configurazioni di dispositivi a effetto Hall presentano un intervallo di linearità veramente limitato. Sensori di spostamento con range più elevato possono essere costruiti utilizzando molteplici sensori Hall disposti lungo un substrato di portatori. Un magnete viene mosso in prossimità dei portatori, quando il magnete si avvicina e poi si allontana da ogni elemento di Hall, i rispettivi sensori mostreranno prima un'uscita crescente e poi una decrescente. L'uscita della batteria di sensori viene dedotta leggendo le uscite individuali dei sensori più vicini al magnete e decodificando quei particolari sensori che sono stati letti. Questo metodo può produrre sensori di spostamento con prestazioni relativamente elevate fino a qualche metro di lunghezza. Sensori più lunghi diventano via via più difficili da produrre e sono costosi a causa del gran numero di sensori che devono essere multiplessati.

L'effetto Hall

L'effetto fisico è stato scoperto nel 1879 alla Johns Hopkins University da Edwin Hall. Inizialmente, questo effetto aveva una limitata ma preziosa applicazione come strumento per lo studio della conduzione elettrica nei metalli, nei semiconduttori e in altri materiali conduttivi. Recentemente, i sensori Hall vengono utilizzati per rilevare campi magnetici e la posizione o gli spostamenti di oggetti. L'effetto si basa sull'interazione tra portatori elettrici in movimento e un campo magnetico esterno. Nei metalli, questi portatori sono gli elettroni. Quando un elettrone si muove all'interno, una forza laterale agisce su di esso:

$$\vec{F} = qv\vec{B} \quad (2.44)$$

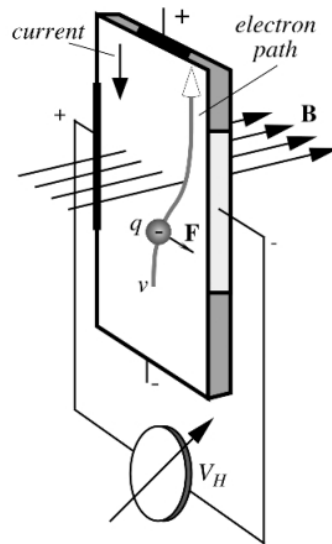


Figura 2.48: Sensore a effetto Hall. Il campo magnetico deflette il moto delle cariche elettriche.

dove $q = 1,6 \cdot 10^{-19}C$ è la carica dell'elettrone, v è la velocità delle'elettrone e B è il campo magnetico. La notazione vettoriale indica che la direzione della forza e il suo modulo dipendono dalla relazione spaziale tra il campo magnetico e la direzione dell'elettrone in movimento. Supponiamo che gli elettroni si muovano all'interno di una striscia piana conduttiva posizionata su un campo magnetico \vec{B} (figura 2.48). La striscia presenta due contatti aggiuntivi alla sua destra e alla sua sinistra dove viene collegato un voltmetro. Altri due contatti vengono posizionati sopra e sotto la striscia. Questi vengono collegati ad un generatore di corrente elettrica. A causa del campo magnetico, una forza di deflessione varia il movimento degli elettroni verso la parte destra della striscia, la quale è caricata negativamente rispetto alla parte sinistra. In questo modo il campo magnetico e la corrente elettrica producono una *differenza di potenziale di Hall trasversa* V_H . Il segno e il modulo di questo potenziale dipendono sia dall'intensità e dalla direzione del campo magnetico che dalla corrente elettrica. Per una temperatura prestabilita, si ottiene:

$$V_H = hiB\sin(\alpha) \quad (2.45)$$

dove α è l'angolo compreso tra il vettore campo magnetico e la lamina di Hall (figura 2.49) e h è il coefficiente della sensibilità totale, il quale valore dipende dal materiale della lamina, dalla sua geometria (area effettiva) e dalla sua temperatura. La sensibilità totale dipende dal *coefficiente di Hall*, che può essere definito come il gradiente di potenziale elettrico trasverso per unità di intensità di campo magnetico per unità di densità di corrente. In accordo con la teoria degli elettroni liberi nei metalli, il coefficiente di Hall dovrebbe essere:

$$H = \frac{1}{Ncq} \quad (2.46)$$

dove N è il numero di elettroni liberi per unità di volume e c è la velocità della luce.

In base alla struttura cristallina del materiale, le cariche possono essere sia elettroni (negative) sia lacune (positive). Di conseguenza, l'effetto Hall può essere sia positivo o negativo.

Un sensore a effetto Hall lineare è solitamente contenuto (packaged) in un alloggiamento a quattro terminali. I terminali sui quali si applica il controllo di corrente

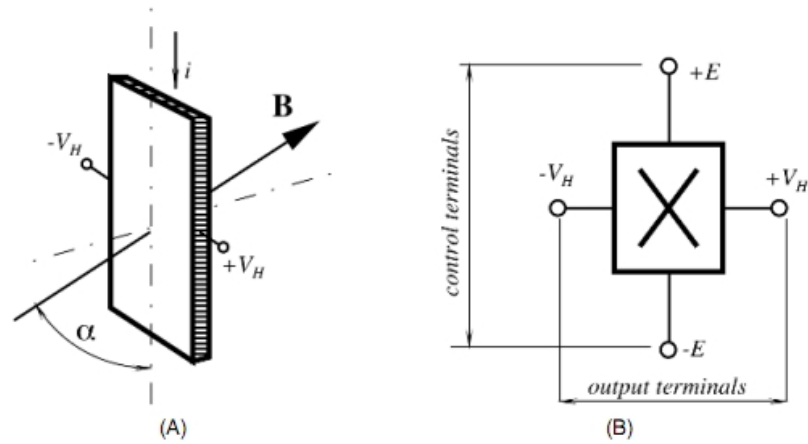


Figura 2.49: Il segnale di uscita di un sensore Hall dipende dall'angolo tra il vettore campo magnetico e la lamina (A); sensore di Hall a quattro terminali (B).

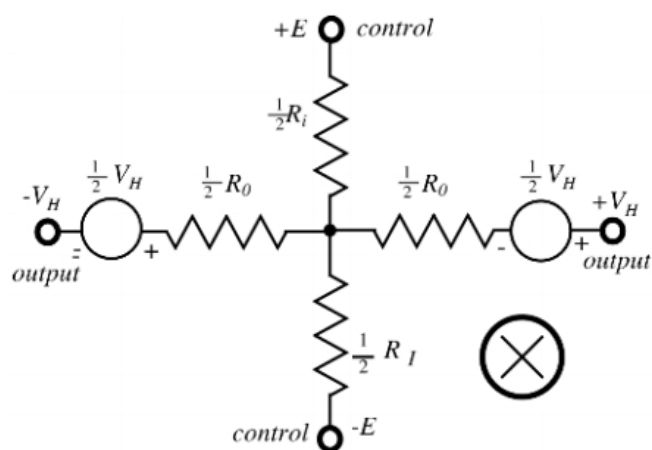


Figura 2.50: Circuito equivalente di un sensore Hall.

Control current	3 mA
Control resistance, R_i	2.2 k Ω
Control resistance versus temperature	+0.8%/°C
Differential output resistance, R_O	4.4 k Ω
Output offset voltage	5.0 mV (at $B = 0$ G)
Sensitivity	60 μ V/G
Sensitivity versus temperature	+0.1%/°C
Overall sensitivity	20 V/ Ω kG
Maximum magnetic flux density, B	Unlimited

Figura 2.51: Caratteristiche tipiche di un sensore a effetto Hall lineare.

vengono detti *terminali di controllo* e la resistenza tra di loro viene chiamata *resistenza di controllo* R_i . I terminali dove viene visualizzata la tensione di uscita vengono chiamati *terminali di uscita differenziale* e la resistenza ai loro capi viene detta *resistenza di uscita differenziale* R_O . Il circuito equivalente (vedi figura 2.50) del sensore può essere rappresentato da resistori connessi a stella e da due generatori di tensione connessi in serie ai terminali di uscita. La croce \otimes in figura 2.49 e 2.50 indica la direzione del campo magnetico entrante nel piano. Il sensore viene descritto attraverso le sue resistenze, R_i ed R_O , ai capi di entrambe le coppie di terminali, la tensione di offset quando non viene applicato alcun campo magnetico, la sensibilità, e il coefficiente di temperatura della sensibilità (figura 2.51). Numerosi sensori a effetto Hall vengono fabbricati dal silicio e si dividono in due categorie generali: sensori elementari e sensori integrati. Altri materiali utilizzati per la fabbricazione di questi sensori sono InSb, InAs, Ge e GaAs. Nei sensori al silicio un circuito elettronico di interfaccia può essere incorporato all'interno dello stesso wafer. Questa integrazione è specialmente importante perchè la tensione di effetto Hall è abbastanza bassa.

Un circuito elettronico di interfaccia può contenere un dispositivo a soglia, rendendo il sensore integrato un dispositivo a due stati: l'uscita è "zero" quando il campo magnetico rimane sotto questa soglia, e vale "uno" quando il campo magnetico è intenso a sufficienza da oltrepassare la soglia. A causa della piezoresistività del silicio, i sensori a effetto Hall sono suscettibili a effetti di stress meccanico. Il sensore è inoltre sensibile alle variazioni di temperatura proprio perchè la temperatura influenza la resistenza del sensore. Se l'oggetto viene alimentato da un generatore di tensione, la temperatura cambierà la resistenza di controllo e di conseguenza il controllo di corrente.

Un modo di fabbricare un sensore Hall è quello di utilizzare un substrato di silicio di tipo-p sul quale vengono impiantate sacche di tipo-n (vedi figura 2.52(A)). I contatti elettrici forniscono una connessione per i terminali di alimentazione e costituiscono le uscite del sensore. Un elemento Hall è un semplice quadrato con una sacca di quattro elettrodi uniti sulle diagonali (figura 2.53(B)). Un modo intuitivo per capire il sensore Hall è quello di rappresentarlo come un ponte resistivo (figura 2.53(C)). Questa configurazione rende le sue applicazioni pratiche più convenzionali perchè i circuiti a ponte sono i tipi di rete più popolare che hanno metodi di progettazione molto ben stabiliti.

Esistono sensori Hall lineari e a soglia (figura 2.54): un sensore lineare di solito contiene un amplificatore per un più facile interfacciamento con i circuiti periferici. Rispetto a un sensore elementare come quello di figura 2.48, essi operano su un intervallo più esteso di tensione e sono più stabili in un ambiente rumoroso. Questi sensori non sono così lineari se confrontati con la densità di campo magnetico (vedi figura 2.55(A)) e quindi le misure di precisione richiedono una certa calibrazione. In aggiunta all'am-

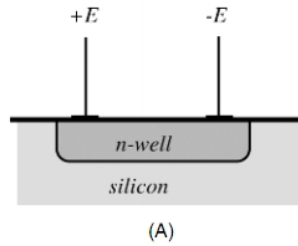


Figura 2.52: Un sensore Hall al silicio con n-well.

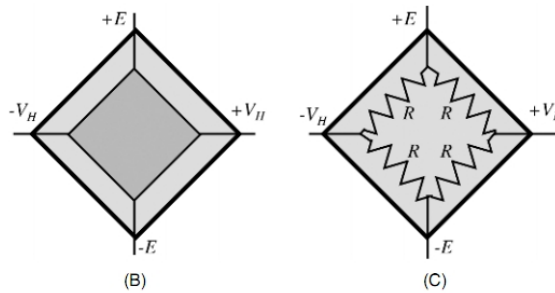


Figura 2.53: Circuito resistivo a ponte equivalente.

plificatore, il modello a soglia contiene un trigger di Schmitt ad isteresi. Il segnale di uscita come funzione della densità di campo magnetico è visualizzato in figura 2.55(B). Il segnale è a due livelli e presenta chiaramente il profilo di isteresi rispetto al campo magnetico. Quando la densità di flusso magnetico applicato eccede una certa soglia, il trigger fornisce un netto transitorio dalla posizione OFF a quella ON. L'isteresi elimina le oscillazioni spurie introducendo una zona di banda-morta, nella quale l'azione viene disabilitata dopo che si è oltrepassato il valore di soglia.

Il sensore Hall può essere utilizzato come interruttore a commutazione per un oggetto in movimento. In questa modalità, il magnete di attivazione e il sensore Hall sono montati assieme e tra loro vi è un traferro d'aria (figura 2.56). In questa maniera, il sensore viene mantenuto nella modalità ON dal magnete permanente. Se una piastra ferromagnetica viene posizionata tra il magnete ed il sensore Hall, la piastra forma un deviatore che allontana il flusso di campo magnetico dal sensore. Questo porta il sensore a scattare nella posizione di OFF. Il sensore e il magnete potrebbero essere modellati in uno stesso alloggiamento, eliminando il problema dell'allineamento. Le piastre di ferro che interrompono il flusso magnetico possono muoversi in maniera lineare oppure ruotare.

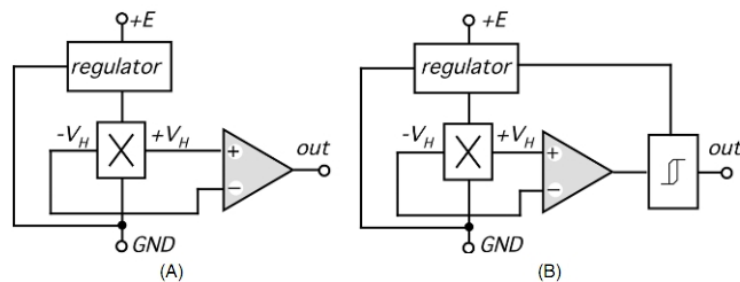


Figura 2.54: Schema circuitale del sensore Hall lineare (A) e di quello a soglia (B).

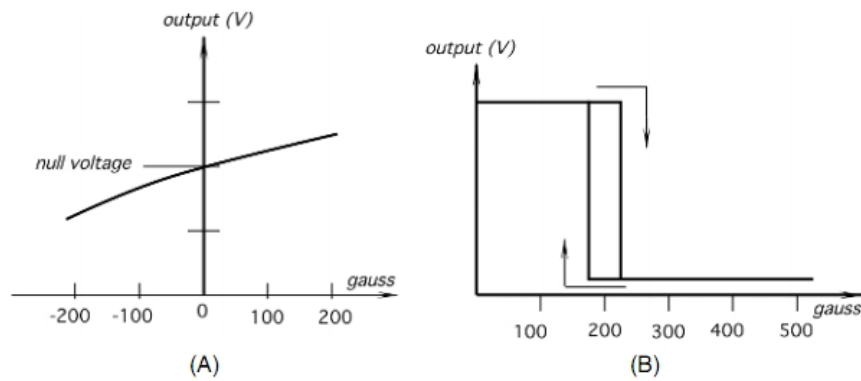


Figura 2.55: Funzione di trasferimento del sensore lineare (A) e di quello di soglia (B).

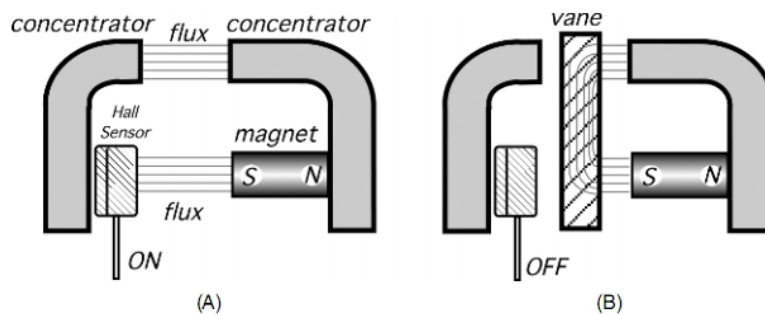


Figura 2.56: Il sensore a effetto Hall nella modalità di interruttore: il flusso magnetico accende il sensore (A), il flusso magnetico viene deviato dalla piastra (B).

Technology	Manufacturers	Description	Price
Magnetostrictive	MTS Systems Corp. Cary, NC & Germany	Lengths to 20 m; 2 μm resolution; CAN, SSI, Profibus, HART	\$150-\$3000
	Balluff Germany	Lengths to 3.5 m, 20 μm resolution no standard interfaces in head	\$400-\$2300
Magnetoresistive	Nonvolatile Electronics Eden Prairie, MN	GMR sensors with flux concentrator and shield	\$2.50-\$6.00
	Midori America Fullerton, CA	Rotary MR sensors Linear MR up to 30 mm	\$64-\$500 \$67-\$200
	Hall Effect Optec Technology, Inc. Carrollton, TX	Linear position	\$5-\$50
Magnetic encoder	Spectec Emigrant, MT	Standard and custom sensors	Approx. \$90
	Heidenhain Schaumburg, IL	Rotary and linear encoders	\$300-\$2000
	Sony Precision Technology America Orange, CA	Rotary and linear encoders	\$100-\$2000

Figura 2.57: Sensori magnetici e loro produttori.

Capitolo 3

Sensori di prossimità industriali e loro applicazioni

3.1 Caratteristiche principali dei sensori di prossimità

Abbiamo già analizzato nel Capitolo 1 le caratteristiche principali che deve possedere un sensore affinché possa svolgere il suo compito e possa essere scelto dall'utente nell'applicazione più opportuna. Forniamo di seguito un elenco delle specifiche tipiche dei sensori di prossimità, caratteristiche che determinano quanto effettivamente un sensore è performante e di conseguenza il costo relativo dello stesso. I termini esatti possono differire da produttore a produttore, anche se oramai i concetti basilari sono ampiamente unificati all'interno dell'industria.

3.1.1 Distanza di rilevamento

Quando si utilizza un sensore per una determinata applicazione è necessario valutare la distanza *nominale* di rilevamento e quella *effettiva*.

Distanza nominale di rilevamento

È la distanza operativa per il quale il sensore è stato progettato. Questa valutazione è raggiunta utilizzando criteri standard sotto condizioni medie.

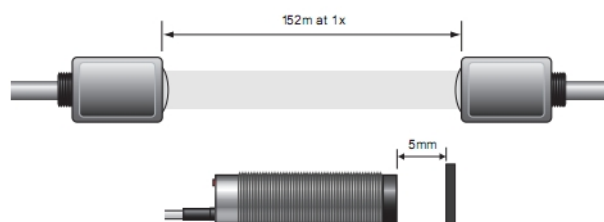


Figura 3.1: Distanza nominale di rilevamento.

Distanza effettiva di rilevamento

E' l'attuale distanza di rilevamento raggiunta in un'applicazione installata. Questa distanza è compresa all'incirca tra la distanza nominale di rilevamento ideale e la distanza nominale valutata al caso peggiore.

3.1.2 Isteresi

L'isteresi o percorso differenziale è la differenza tra i punti di azionamento (accensione) e di rilascio (spegnimento) quando il target si sta allontanando dalla faccia del sensore e viene espresso come percentuale della distanza di rilevamento. Senza una sufficiente isteresi un sensore di prossimità continuerà ad accendersi o a spegnersi quando sarà applicata un'eccessiva vibrazione al target o al sensore. L'isteresi può essere resa regolabile attraverso una circuiteria aggiuntiva.

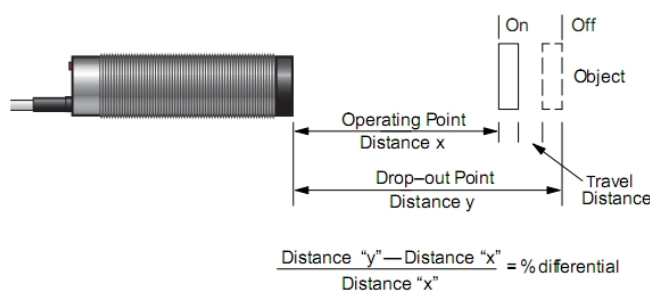


Figura 3.2: Isteresi in un sensore di prossimità.

3.1.3 Ripetibilità

E' l'abilità del sensore di rilevare lo stesso oggetto alla stessa distanza in ogni circostanza. Viene espresso come percentuale della distanza nominale di rilevamento in condizioni di temperatura ambiente e tensione di alimentazione costanti.

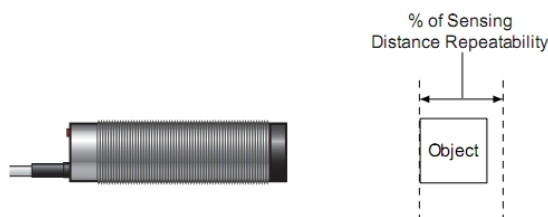


Figura 3.3: Ripetibilità.

3.1.4 Frequenza di commutazione

Rappresenta il numero di operazioni di commutazione al secondo raggiungibile sotto condizioni standard. In termini generali è la velocità relativa del sensore (figura 3.4).

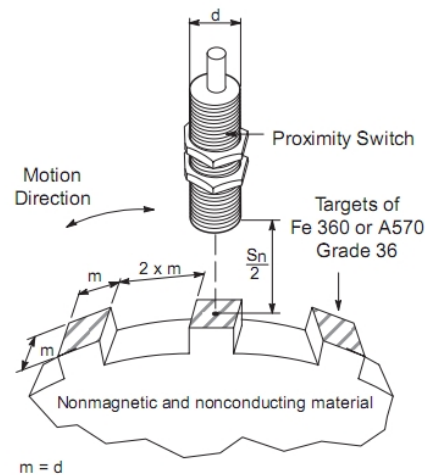


Figura 3.4: Setup relativo alla frequenza di commutazione.

3.1.5 Tempo di risposta

È l'intervallo di tempo che intercorre dal momento della rilevazione del target e la variazione di stato del dispositivo in uscita (da ON a OFF o viceversa). È anche il tempo che impiega il dispositivo in uscita a variare il suo stato una volta che il target non è più rilevato dal sensore. Il tempo di risposta richiesto per una particolare applicazione è funzione della dimensione del target e della velocità con la quale si avvicina al sensore.

3.2 Sensori di prossimità e sensori logici

I sensori di prossimità o di presenza per applicazioni industriali sono molto spesso realizzati per informazioni di tipo logico, utilizzate per il controllo e la supervisione delle sequenze operative e delle condizioni di funzionamento del sistema produttivo. Lo schema di funzionamento tipico dei sensori logici di prossimità è quello rappresentato in figura 3.5. Il rivelatore di soglia è solitamente caratterizzato da una certa *isteresi*, per migliorare la stabilità dell'uscita nell'intorno del punto di commutazione. Il valore dell'isteresi, insieme a quello della *massima frequenza di commutazione* dell'uscita, sono sempre caratteristiche fondamentali per la valutazione di un sensore logico, oltre, naturalmente, alle dimensioni del *campo d'azione*. I vari tipi di sensori si classificano poi in base alla realizzazione del blocco generatore di campo.

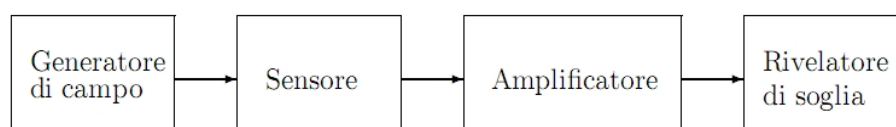


Figura 3.5: Schema a blocchi di un sensore di prossimità logico.

3.2.1 Proximity induttivi attivi

I sensori di prossimità induttivi si possono dividere in due categorie: attivi e passivi. A loro volta i sensori attivi comprendono sensori autoamplificati e non amplificati. Entrambe queste tipologie si presentano in due esecuzioni: sensori di tipo a scatto o di prossimità e sensori lineari. Descriviamo brevemente le caratteristiche delle varie famiglie:

- *Sensori autoamplificati a scatto o di prossimità*: Sono i più diffusi in campo industriale essendosi proposti in sostituzione dei microinterruttori meccanici nei confronti dei quali presentano i seguenti vantaggi: assenza dell'effetto di rimbalzo dei contatti; assenza di logorio elettrico e meccanico con conseguente numero praticamente illimitato di manovre; elevata velocità di risposta; ridotta sensibilità a vibrazioni, urti, polvere e sporcizia; capacità di rilevare oggetti leggeri e fragili, comunque inadeguati ad azionare sensori elettromeccanici; possibilità di realizzare un sensore ermetico; possibilità di pilotare direttamente carichi statici o anche induttivi.

Si possono avere esecuzioni in corrente continua ($10 \div 30$ V DC) oppure in corrente alternata ($24 \div 220$ V AC) e forme cilindriche (diametro 5, 12, 18, 30 mm), rettangolari e a forcella.

- *Sensori non amplificati a scatto*: tali prodotti sono sostanzialmente costituiti dal blocco oscillatore e dal blocco rivelatore con soglia (trigger). Talvolta è lo stesso oscillatore che, particolarmente studiato, offre uno smorzamento di tipo on-off cosicché il circuito di soglia non è più necessario. I sensori in argomento vengono progettati secondo le norme tedesche Namur che regolano l'impiego delle apparecchiature elettriche nei luoghi potenzialmente esplosivi. Un sensore Namur è simulabile con una resistenza variabile del valore da $0 \div 10$ k Ω in serie con un diodo Zener con caduta di 2 V. L'uscita lavora con tensioni da $5 \div 24$ V DC e le correnti in gioco sono nel campo di $1 \div 10$ mA. L'uscita in corrente in funzione della distanza dell'azionatore è di tipo non lineare.
- *Sensori induttivi lineari*: non è presente il circuito a soglia agente sull'ampiezza dell'oscillazione. L'oscillatore viene studiato in maniera tale che l'ampiezza di oscillazione si smorzi con maggiore difficoltà rispetto alla penetrazione dell'azionatore attraverso un circuito fortemente retroazionato.

Un tipico sensore lineare con uscita in tensione possiede un campo di tensione che si aggira sui $10 \div 30$ V DC, un campo della distanza di intervento con uscita lineare da $3 \div 5$ mm, un campo di tensione in uscita da $130 \div 1050$ mV, una sensibilità (a 20°C) di 450 mV/mm, un errore di ripetibilità di 0,03 mm e una resistenza di carico ammessa superiore a 1 k Ω .

Interessanti sono anche le versioni lineari con uscita in corrente da $4 \div 20$ mA standard molto impiegati in campo industriale. Riportiamo alcune delle caratteristiche di un sensore cilindrico da 12 mm di diametro: tensione di alimentazione sui $18 \div 27$ V DC, resistenza di carico massima da 0,4 k Ω , campo della distanza di lavoro da $0,1 \div 3$ mm, campo della temperatura di lavoro da $0^\circ\text{C} \div 50^\circ\text{C}$ e un'uscita lineare da $4 \div 20$ mA.

Sensore induttivo ECKO

Funzionamento. Gli interruttori di prossimità induttivi attivi (figura 3.6) sono oggi i sensori industriali più comunemente utilizzati per la rilevazione di oggetti metallici ferrosi e non (per esempio acciaio, ottone, alluminio, rame) su piccole distanze. Sono state disponibili per oltre un decennio configurazioni cilindriche con diametro di 4 mm. A causa della loro capacità intrinseca di rilevare attraverso materiali non metallici, questi sensori possono essere rivestiti, conservati, o sigillati, permettendo operazioni in zone di lavoro contaminate, o anche sommersi in liquidi. Nei sensori induttivi attivi, detti anche a correnti parassite, un circuito oscillatore alimenta un solenoide avvolto su un nucleo di ferrite aperto (viene generato un campo oscillatorio a radiofrequenza $100 \text{ kHz} \div 1 \text{ MHz}$), in modo tale da realizzare un generatore di flusso magnetico con linee di flusso che influenzano il campo di azione nel quale si viene a trovare l'oggetto da rilevare, chiamato azionatore. Lo schema di principio di tale tipologia di sensori è illustrato in figura 3.7(a). La presenza dell'azionatore, un qualunque oggetto con proprietà conduttive (in genere metallico) in prossimità del solenoide, fa sì che il campo magnetico induca delle correnti parassite sul corpo (correnti di eddy che producono un campo magnetico secondario che interagisce con il campo della sonda), a causa delle quali parte della potenza del campo magnetico viene dissipata. Ciò provoca una riduzione di ampiezza dell'oscillazione. Il circuito attivo è in grado di compensare le perdite fino ad una certa distanza dell'azionatore del sensore, mantenendo l'oscillazione, dopodiché l'oscillazione si smorza (figura 3.8). Se l'ampiezza dell'oscillazione, rilevata a valle di un filtro passa-basso e di un raddrizzatore da un trigger con isteresi, diminuisce oltre la soglia impostata, il sensore porta l'uscita logica al livello alto. Quando l'oggetto lascia la zona di campo elettromagnetico, l'oscillatore si ricarica e il sensore ritorna al suo stato normale. Il circuito equivalente è schematizzabile in figura 3.7(b): la bobina della sonda viene modellizzata come un induttore L_p con in serie una resistenza R_p , e il cavo che connette la bobina e l'elemento attivo è mostrato come una capacità C . Quando un materiale conduttivo entra nel campo, gli effetti della componente resistiva R_p dominano e le perdite nel circuito RLC aumentano, smorzando l'oscillazione. Quando la distanza diventa sempre più piccola, l'ampiezza del segnale d'uscita nell'oscillatore continua a diminuire, fino a quando si raggiunge un punto in cui l'oscillazione non può più essere sostenuta. Questo effetto dà luogo alla nomenclatura ECKO (Eddy-current-killed Oscillator) per questo tipo di configurazione. Con questi tipi di sensori attivi amplificati si possono raggiungere risposte in frequenza fino a 10 kHz. Si può dimostrare che la perdita per effetto Joule e quindi lo smorzamento dell'oscillazione, oltre che dalla distanza dell'azionatore dipendono: in modo linearmente proporzionale dallo spessore dell'azionatore, in modo quadraticamente proporzionale dalla superficie investita dal campo, in modo quadraticamente proporzionale dalla frequenza del campo magnetico generato, in modo inversamente proporzionale dalla resistività del materiale. Quest'ultima relazione suggerisce che si può ottenere maggiore sensibilità del sensore con materiali maggiormente resistivi (es. ferro dolce).

Monitorando l'ampiezza dell'uscita dell'oscillatore con un rilevatore di soglia interno si crea un interruttore di prossimità con uscita digitale on/off (figura 3.9). Quando l'oggetto di metallo si avvicina al sensore, la tensione d'uscita dell'oscillatore decade come mostrato, eventualmente andando sotto un livello di trigger predefinito, dopo di che il comparatore a soglia alterna dallo stato off allo stato on. L'aumentare della distanza causa un'innalzamento ancora una volta della tensione, e l'uscita commuta a off quando si eccede il livello di *release*. La voluta differenza tra il livello di trigger e il livello di *release*, chiamata *isteresi*, previene le instabilità in uscita in prossimità della soglia di rilevamento. I tipici valori di isteresi (in termini di margine di distanza)

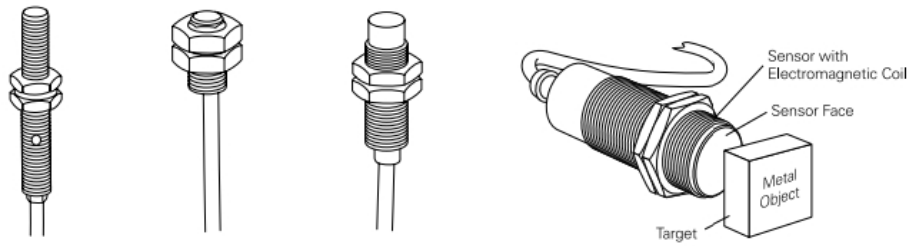


Figura 3.6: Possibili configurazioni di un sensore induttivo (a sinistra), bobina elettromagnetica e target metallico (a destra).

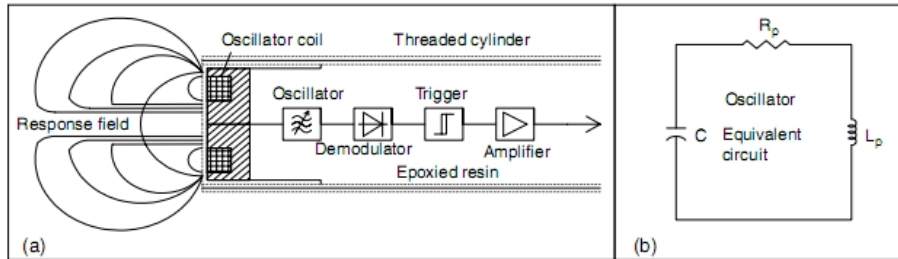


Figura 3.7: Diagramma a blocchi di un sensore di prossimità induttivo di tipo ECKO (a), circuito oscillatorio equivalente (b).

variano intorno al 3%÷20% del massimo range effettivo.

Target standard e fattori di correzione. Il range effettivo di rilevazione è approssimativamente uguale al diametro della bobina sensibile ed è influenzato dal materiale, dalle dimensioni e dalla forma del target. Il target standard industriale (per il quale viene specificata la distanza di rilevamento nominale) è un quadrato di 1 mm di spessore fatto di acciaio dolce con larghezza pari al diametro della faccia sensibile del sensore, o tre volte la distanza di rilevamento nominale S_n , che è comunque più grande (figura 3.10). Nelle applicazioni tipiche, la distanza operativa è influenzata non solo dalla composizione del target, ma anche dalle sue dimensioni e dalla sua forma. La distanza operativa dello standard in acciaio deve essere moltiplicata per un fattore di correzione per determinare la distanza operativa degli altri materiali (figura 3.11). La composizione del target ha un grande effetto sulla distanza sensibile di un sensore induttivo. Se viene utilizzato un target costruito con un materiale presente in figura 3.11, si deve moltiplicare la distanza nominale sensibile per il suo fattore di correzione. Si nota che i sensori non selettivi dei materiali ferrosi non rileveranno acciaio o altri tipi di acciaio inossidabile.

Sensori induttivi schermati e non schermati. Ribadiamo che questi sensori sono disponibili con schermatura e senza schermatura (figura 3.12). La distanza operativa è funzione del diametro della bobina rilevatrice e se è schermato o meno (figura 3.13). Le nuove configurazioni di proximity induttivi permettono intervalli di rilevazione più estesi. I sensori schermati sono costruiti con un anello schermante che circonda il nucleo e la bobina (figura 3.14). Questo concentra il campo elettromagnetico sulla parte frontale del sensore. Nei sensori con alloggiamenti metallici, l'alloggiamento in sé fornisce la schermatura. Le configurazioni schermate permettono al sensore di essere montato vicino a materiali metallici senza causare un evento di trigger inaspettato (figura 3.15).

I sensori non schermati non sono costruiti con una banda metallica che circonda l'insieme bobina/nucleo (figura 3.16). Il campo elettromagnetico generato da un sensore

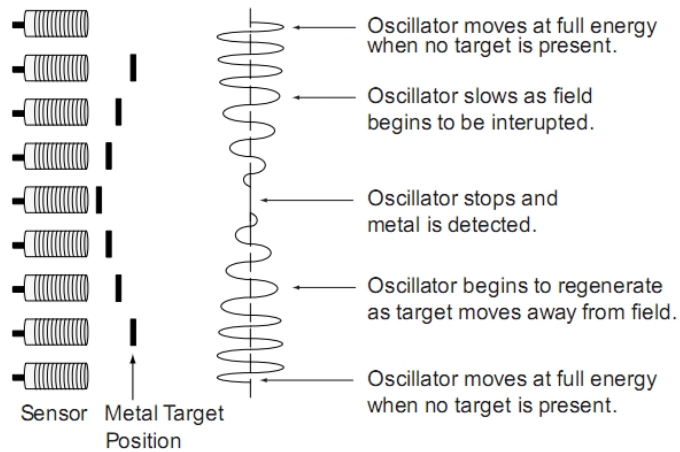


Figura 3.8: Funzionamento tipico di un proximity induttivo.

Nominal Sensing Ranges for Material Other Than Mild Steel Must Be Adjusted Using the Above Attenuation Factors

Material	Attenuation Factor
Cast Iron	1.10
Mild Steel	1.00
Stainless Steel	0.70-0.90
Brass	0.45
Aluminum	0.40
Copper	0.35

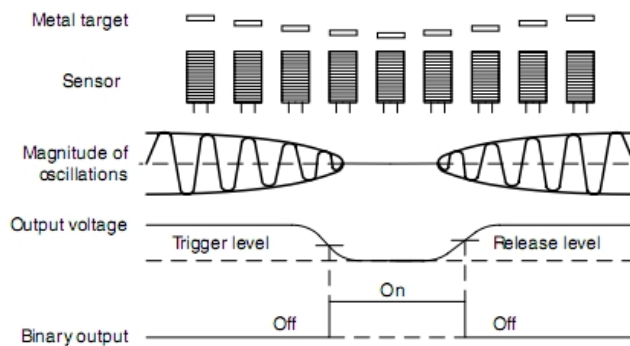


Figura 3.9: Una piccola differenza tra il livello di trigger e il livello di release (isteresi) elimina l'instabilità in uscita quando il target si muove dentro e fuori il suo intervallo.

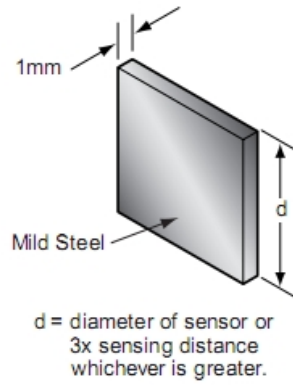


Figura 3.10: Target standard per sensori di prossimità induttivi.



Material	Correction Factor	
	Shielded	Unshielded
Mild Steel, Carbon	1.00	1.00
Aluminum Foil	0.90	1.00
300 Series Stainless Steel	0.70	0.08
Brass	0.40	0.50
Aluminum	0.35	0.45
Copper	0.30	0.40

Figura 3.11: Tipici fattori di correzione.

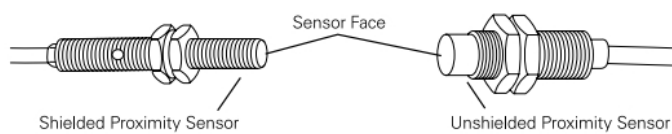


Figura 3.12: Sensori schermati e non schermati.

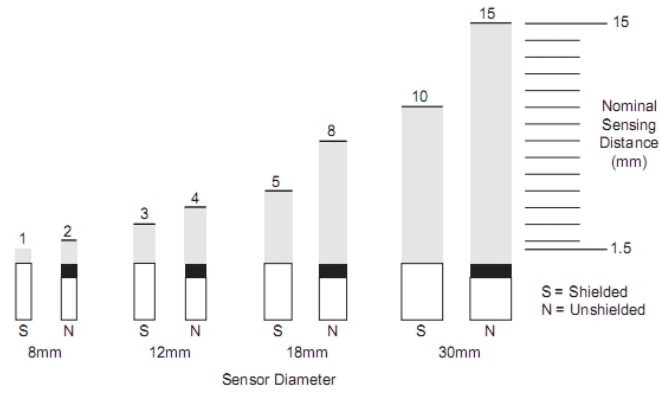


Figura 3.13: Distanza di rilevamento nominale tipica dei sensori schermati e non.

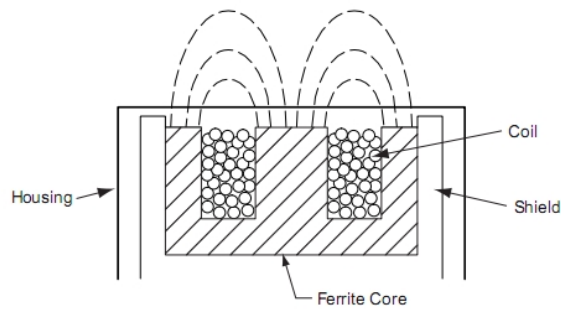


Figura 3.14: Sensore induttivo schermato.

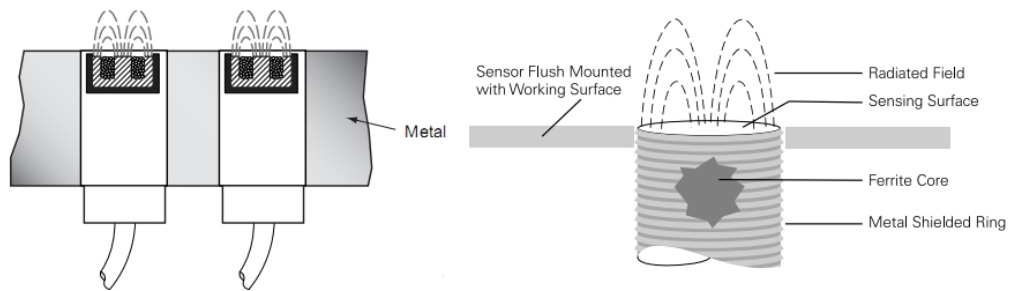


Figura 3.15: Sensori induttivi montati ad incasso in un materiale metallico.

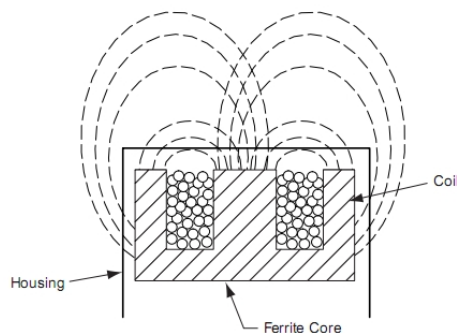


Figura 3.16: Sensore induttivo non schermato.

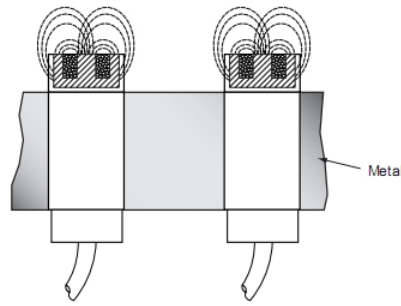


Figura 3.17: Sensori induttivi non schermati con zona metallica libera.

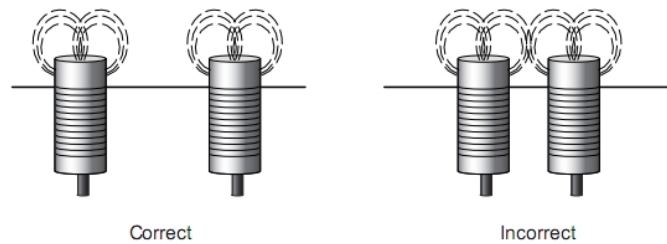


Figura 3.18: Distanza tra sensori non schermati adiacenti.

non schermato non è concentrato solo sulla parte frontale del sensore come nei sensori schermati. Questo rende i sensori non schermati più sensibili agli oggetti metallici nelle vicinanze. Le configurazioni non schermate permettono il 50% in più di intervallo di rilevamento di un sensore schermato delle stesse dimensioni. A causa della distanza più elevata, target difficili possono essere più facilmente rilevati utilizzando sensori non schermati. I sensori non schermati non possono essere montati su di una fila metallica ad incasso. Per evitare falsi eventi di trigger, i sensori non schermati devono essere montati in una zona priva di metalli nelle vicinanze (figura 3.17).

Requisiti di spazio tra sensori adiacenti o affacciati. Il diametro della bobina sensibile determina lo spazio che può intercorrere tra due sensori. I sensori non schermati devono essere posizionati abbastanza più lontani rispetto a quelli schermati perchè i loro campi elettromagnetici debordano lateralmente dalla faccia del sensore e possono fornire errori di misura se sovrapposti (figura 3.18). I requisiti di spazio per sensori specifici possono variare. I sensori schermati tuttavia, generalmente richiedono una distanza di un diametro della faccia sensibile tra sensori adiacenti e due diametri tra sensori montati faccia a faccia (figura 3.19). I sensori non schermati generalmente richiedono uno spazio di 3 diametri di faccia sensibile tra sensori adiacenti e 4 diametri se affacciati tra loro (figura 3.20).

Dimensione del target La dimensione e la forma del target devono essere prese in considerazione quando si sceglie un sensore di prossimità induttivo (figura 3.21). Alcuni accorgimenti: sono preferibili target piatti, quelli smussati possono ridurre la distanza di operazione, i materiali non ferrosi di solito riducono la distanza operativa per tutti i modelli sensibili ai metalli, i target più piccoli della faccia del sensore riducono la distanza operativa, le lamine la aumentano. Se il target è più grande del target standard, l'intervallo di rilevamento non cambia. Se è più piccolo, o a forma irregolare, la distanza di rilevamento S_n decresce. Più piccola è l'area del target, più vicina deve trovarsi la faccia del sensore per rilevare l'oggetto. Un fattore di correzione deve essere applicato con oggetti più piccoli del target standard. Per determinare la distanza di rilevamento (S_{new}) si moltiplica la distanza di rilevamento (S_{rated}) per il fattore di

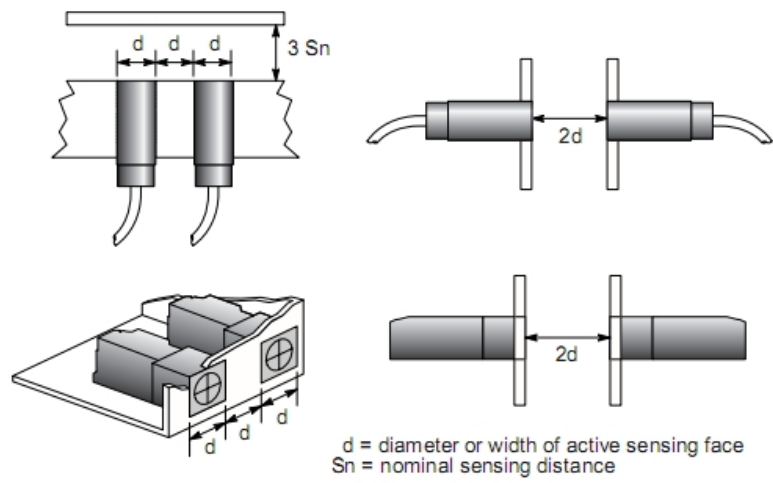


Figura 3.19: Sensori schermati adiacenti e affacciati.

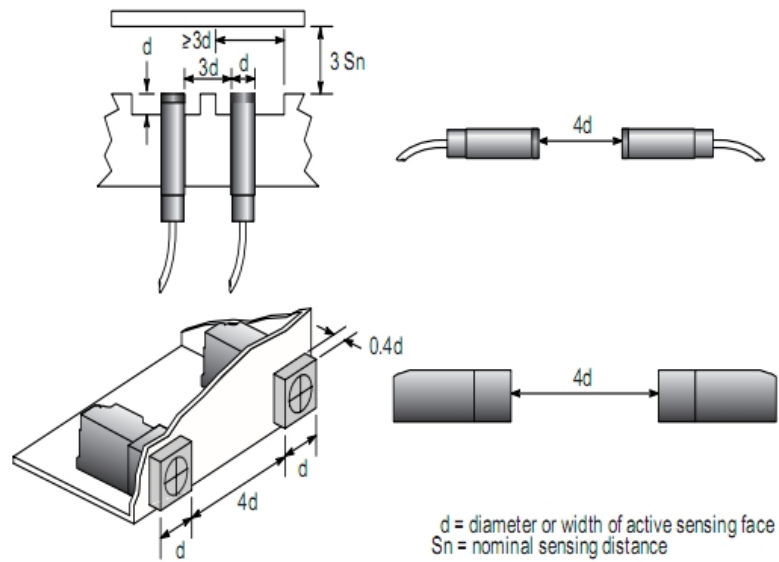


Figura 3.20: Sensori non schermati adiacenti e affacciati.

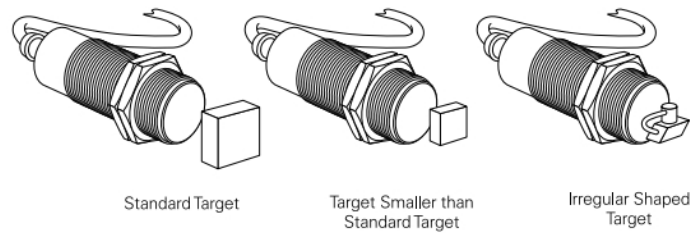


Figura 3.21: Le dimensioni del target influiscono sulla distanza di rilevamento.

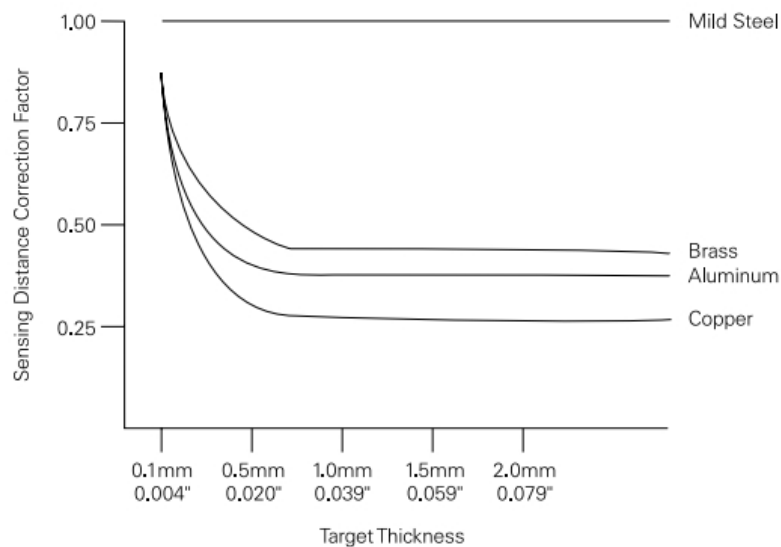


Figura 3.22: Distanza di rilevamento in funzione dello spessore del target.

correzione (T), in questa maniera: $S_{\text{new}} = S_{\text{rated}} \cdot T$.

Anche lo spessore del materiale è un fatto da tenere in considerazione. Per i metalli ferrosi, l'incremento dello spessore del target ha un effetto trascurabile. I materiali più conduttivi non ferrosi come rame e alluminio portano ad un ridotto intervallo di rilevamento, come mostrato in figura 3.9. Per tali metalli non ferrosi, più grandi distanze di rilevamento (più o meno equivalenti a quelle dell'acciaio) possono essere raggiunte con dei target a lamina sottile che hanno uno spessore minore della distanza di attenuazione del campo interno. La distanza di rilevamento è costante per un target standard. Tuttavia, nei materiali non ferrosi come l'ottone, l'alluminio, il rame, avviene un fenomeno chiamato effetto pelle. La distanza di rilevamento decresce all'aumentare dello spessore (figura 3.22). Anche qui deve essere applicato un fattore di correzione (figura 3.23).

Size of Target Compared to Standard Target	Correction Factor	
	Shielded	Unshielded
25%	0.56	0.50
50%	0.83	0.73
75%	0.92	0.90
100%	1.00	1.00

Figura 3.23: Fattori di correzione per le dimensioni del target.

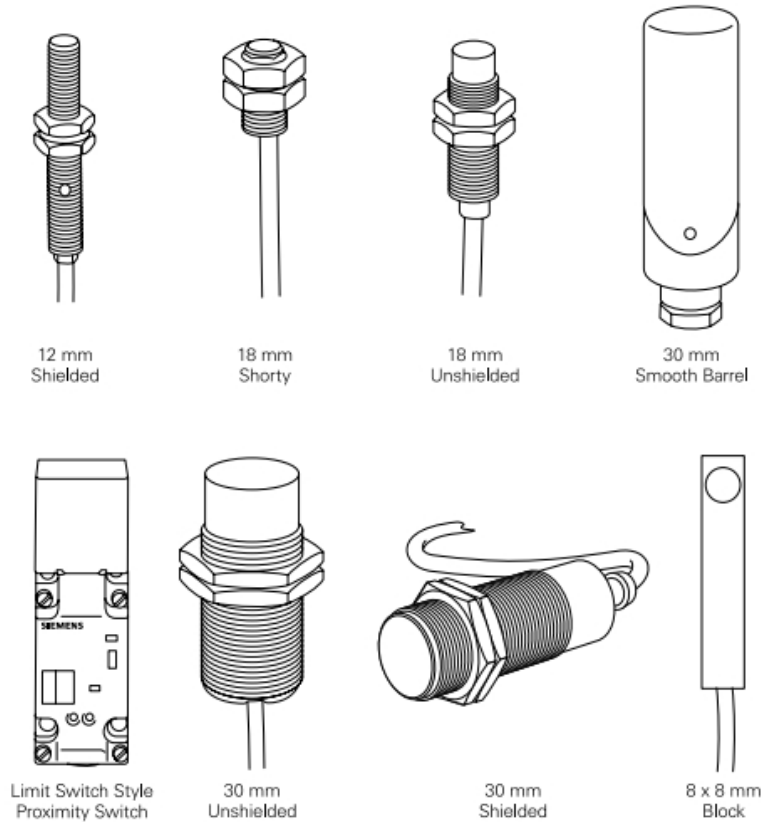


Figura 3.24: Tipologie di sensori induttivi.

Parameter	Value
Object material	Metals
Operating voltage	10 – 30 V
Nominal switching distance	0.8 – 10 mm, maximal 250 mm
Maximum switching current	75 – 400 mA
Vibration	10 – 50 Hz, 1 mm amplitude
Sensitivity to dirt	insensitive
Service life	very long
Switching frequency	10 – 5000 Hz, maximal 20 kHz
Design	cylindrical, block-shaped
Size (examples)	M8x1, M12x1, M18x1, M30x1, Ø 4 – 30 mm, 25 mm x 40 mm x 80 mm
Protection class to IEC 529 (DIN 40050)	up to IP67
Ambient operating temperature	-25 – +70 °C

Figura 3.25: Caratteristiche tecniche di un sensore induttivo attivo di tipo ECKO.

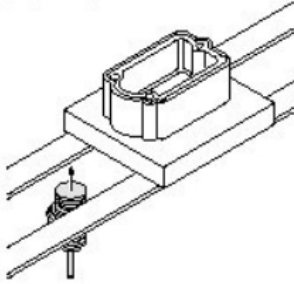
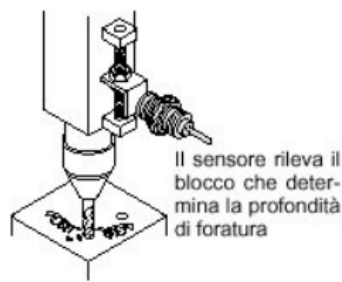
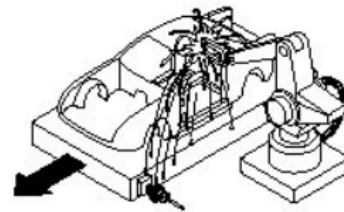
APPLICAZIONI**Rilevamento passaggio pallets in alluminio****Controllo profondità di foratura****Posizionamento oggetti in aree di saldatura**

Figura 3.26: Alcune applicazioni dei sensori induttivi in ambito industriale.

Vantaggi dei proximity induttivi

1. Non sono influenzati dall'umidità
2. Non sono influenzati da ambienti polverosi o sporchi
3. Non ci sono parti in movimento e non vi è usura meccanica
4. Non sono dipendenti dal colore
5. Sono meno dipendenti dalla superficie rispetto alle altre tecnologie di rilevamento
6. Non esistono zone cieche (blind zone).

Svantaggi dei proximity induttivi

1. Rilevano la presenza di soli oggetti magnetici
2. Il range operativo è più piccolo rispetto ad altre tecnologie
3. Possono essere influenzati da intensi campi elettromagnetici.

Applicazioni dei sensori di prossimità induttivi

I sensori induttivi di tipo ECKO rappresentano senza dubbio i sensori di prossimità più diffusi su macchine automatiche e sono gli unici che, grazie alla maturità raggiunta dalla tecnologia, godono di una normalizzazione a livello internazionale (CENELEC, comitato europeo per la normalizzazione elettrotecnica). Vengono utilizzati come rilevatori di posizione di oggetti metallici nei macchinari automatici, nella rilevazione di parti metalliche negli impianti automatizzati e nel rilevamento della presenza di contenitori metallici negli impianti automatici di confezionamento di cibi e bevande.

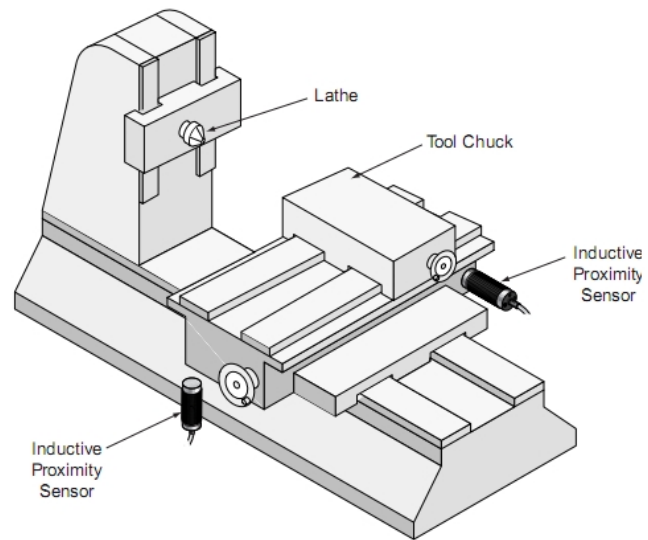


Figura 3.27: Macchine utensili.

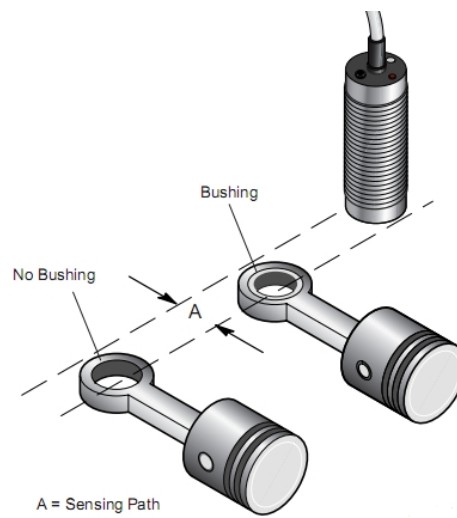


Figura 3.28: I sensori di prossimità possono rilevare la presenza delle bocche nei pistoni.

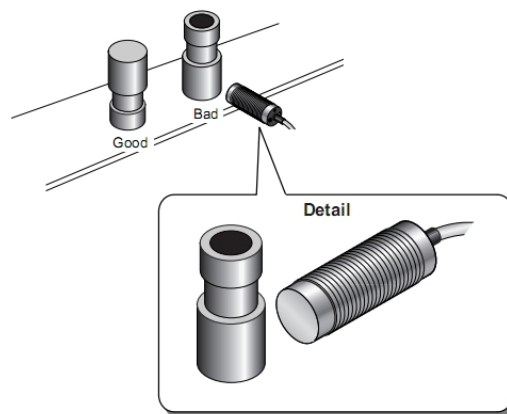


Figura 3.29: Rilevazione dell'orientamento di posizione in componenti metallici.

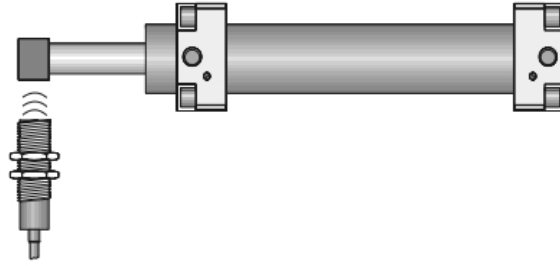


Figura 3.30: Rilevazione della biella di un pistone su un cilindro pneumatico o idraulico.

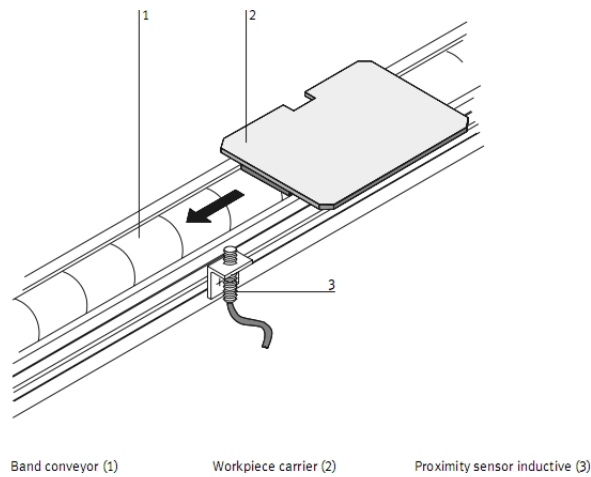


Figura 3.31: Rilevazione di una lamiera su un nastro trasportatore.

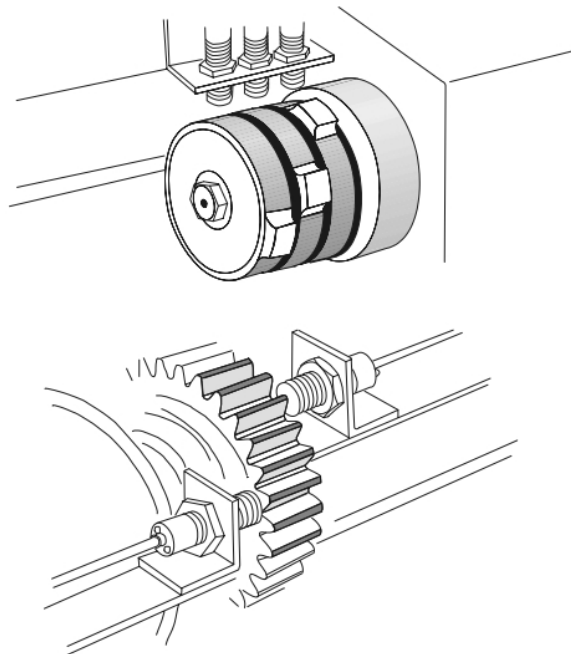


Figura 3.32: Rilevazione delle camme di un albero a motore per mezzo di sensori induttivi (in alto). Misure di velocità e direzione di rotazione (in basso).

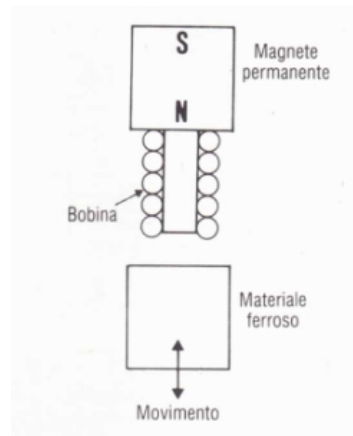


Figura 3.33: Costituzione di un sensore induttivo passivo.

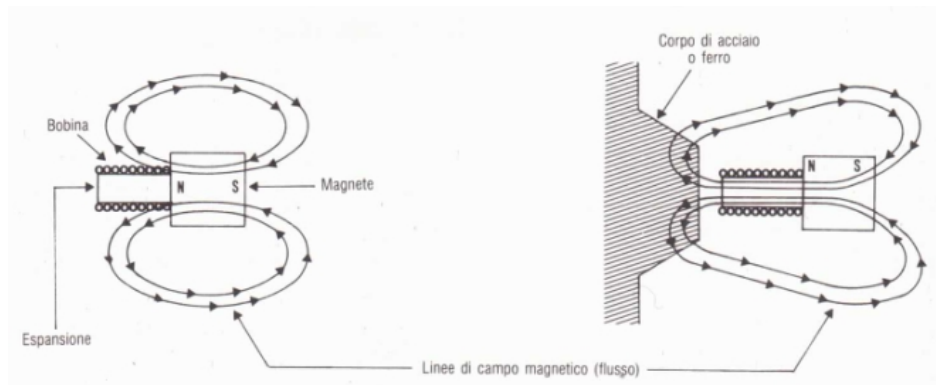


Figura 3.34: Deformazione delle linee di forza all'avvicinarsi di un corpo metallico.

3.2.2 Sensori induttivi passivi

I sensori induttivi passivi, non avendo componenti attivi all'interno, sono in grado di sentire dinamicamente la presenza di un azionatore ferromagnetico nel loro campo di influenza. Sono costituiti da un magnete permanente affiancato ad un'espansione di ferro su cui è avvolta la bobina di captazione (figura 3.33). In condizioni di riposo, il campo magnetico non si concatena con il solenoide. Quando invece si porta il sensore in vicinanza di un materiale ferromagnetico si ha una deformazione delle linee di forza del campo magnetico (figura 3.34). A causa della variazione nel tempo del flusso concatenato, nel solenoide viene indotta una certa tensione. Se la tensione di uscita supera la soglia di attivazione, l'uscita logica viene portata ad un valore alto. Si noti che questa volta non è la distanza in sé a provocare l'attivazione dell'uscita, ma il movimento dell'azionatore. Di conseguenza, tale tipo di sensore viene spesso utilizzato per misurare la velocità di rotazione di ruote dentate, come un qualunque componente di un ingranaggio meccanico. Questo fatto, che in condizioni statiche non provoca induzione nella bobina, in condizioni dinamiche, quando cioè l'azionatore ferromagnetico entra o esce nel campo magnetico, induce nella bobina un segnale di tensione la cui ampiezza e forma sono proporzionali alla velocità di variazione del flusso (figura 3.35). La forma d'onda della tensione osservata all'uscita della bobina costituisce l'elemento indicatore della prossimità dell'azionatore. L'impiego più frequente dei sensori in argomento si ha nella misura della velocità di ruote dentate di materiale ferromagnetico (figura 3.36).

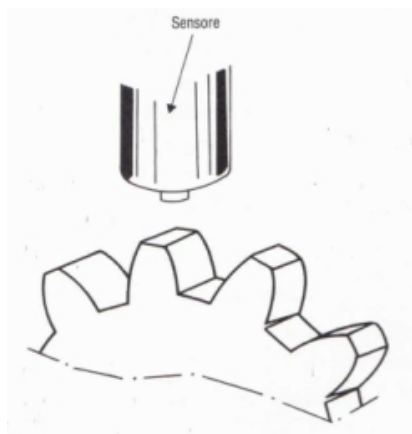


Figura 3.35: Misure di velocità di rotazione.

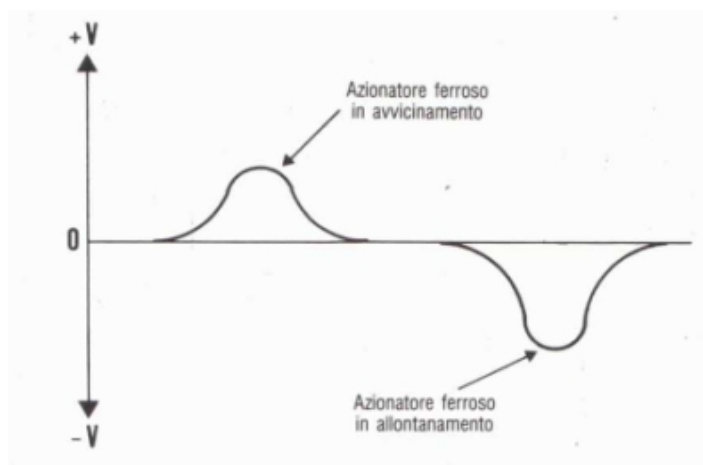


Figura 3.36: Forme d'onda all'uscita della bobina.

La frequenza dell'impulso prodotto in uscita è proporzionale alla velocità di rotazione della ruota, mentre la sua ampiezza e forma dipendono dalla variazione di riluttanza del circuito magnetico.

3.2.3 Sensori industriali capacitivi

Funzionamento. I sensori di prossimità a principio capacitivo sfruttano, come abbiamo già visto, la variazione di capacità parassita che si crea tra faccia sensibile del sensore e l'oggetto in avvicinamento (figura 3.37). Non sono soltanto sensibili ai materiali metallici ma vengono utilizzati anche per rivelare la presenza di tutti i materiali liquidi e solidi. Lo schema a blocchi di un sensore capacitivo è riportato in figura 3.38. In corrispondenza a una determinata distanza fra oggetto e faccia sensibile, entra in

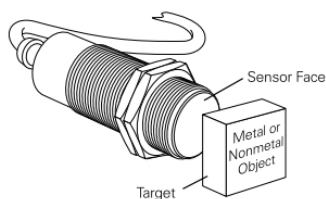


Figura 3.37: Sensore capacitivo in presenza di un oggetto.

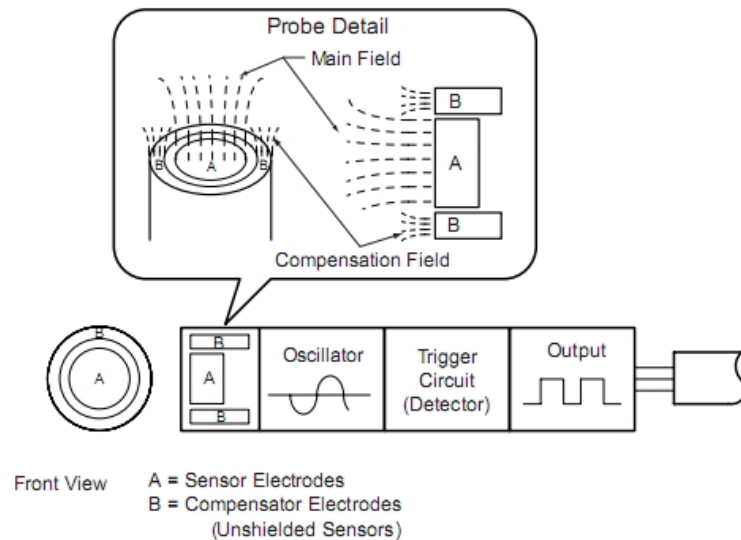


Figura 3.38: Sensore di prossimità capacitivo.

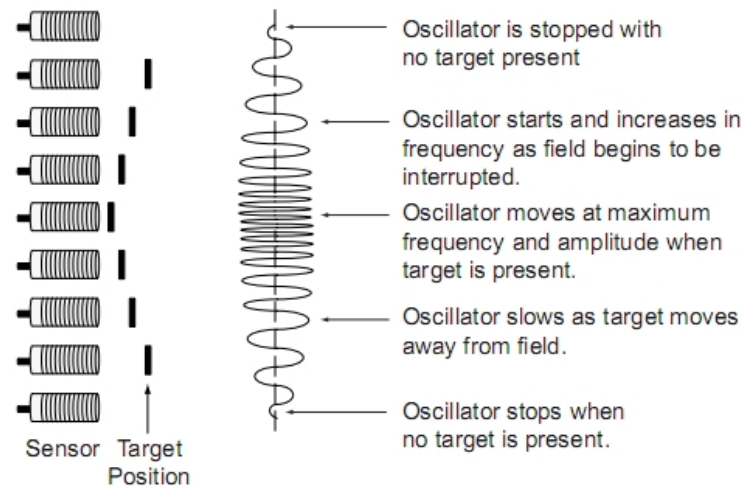


Figura 3.39: Funzionamento di un proximity capacitivo.

oscillazione l'oscillatore e l'insorgere o il cessare di tale oscillazione viene sentita da un rivelatore a soglia che comanda un amplificatore fornendo il segnale in uscita. Nei sensori di tipo capacitivo l'elemento connesso ad un oscillatore è un condensatore a facce piane e concentriche, il dielettrico è quindi costituito dall'aria e dall'oggetto azionatore. A differenza dei sensori induttivi, quindi, l'azionatore può anche essere di materiale non metallico, liquido o solido. Infatti, molto spesso, questo principio viene sfruttato per la realizzazione di sensori di livello. Sempre a differenza di un sensore induttivo (attivo) l'oscillazione viene provocata, anziché attenuata, dall'avvicinamento dell'oggetto (aumento della capacità per variazione dello spessore del dielettrico o variazione della costante dielettrica)(figura 3.39). L'elemento capacitivo è normalmente costituito da un supporto isolante sul quale è depositata una superficie circolare di rame separata da una corona circolare esterna. La capacità in aria è molto piccola, dell'ordine di 2-3 pF. Quando un oggetto si avvicina si modificano le linee di campo elettrico (figura 3.40); se immaginiamo la corona esterna riferita a massa, l'effetto provocato dal circuito esterno è quello di aumentare la capacità dell'elemento capacitivo e ciò consente ad un certo punto all'oscillatore di entrare in oscillazione.

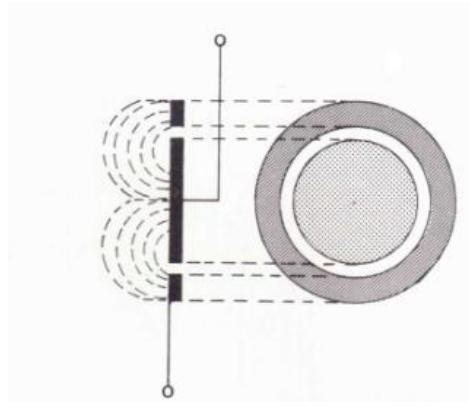


Figura 3.40: Elemento capacitivo e linee di campo elettrico.

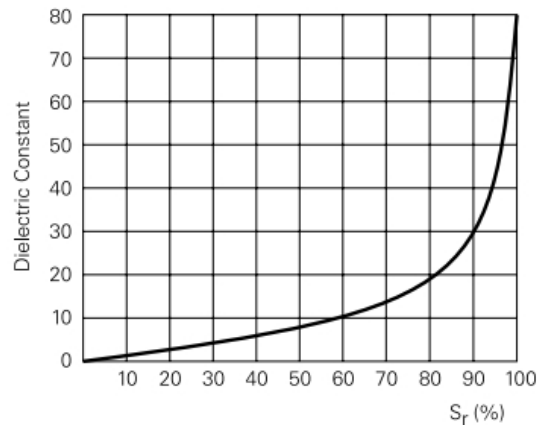


Figura 3.41: Distanza di rilevamento e costante dielettrica.

Sono simili per dimensioni, forma e concetto ai sensori induttivi. I sensori capacitivi, però, reagiscono alle alterazioni in un campo elettrostatico. La sonda sotto la faccia del sensore forma la piastra di un condensatore. Quando viene applicata potenza al sensore, un campo elettrostatico viene generato e reagisce alla variazione di capacità causata dalla presenza del target. Quando il target è fuori dal campo elettrostatico, l'oscillatore è inattivo, quando il target si avvicina, un accoppiamento capacitivo si sviluppa tra il target e la sonda capacitiva. Quando la capacità raggiunge una specificata soglia, l'oscillatore si attiva, triggerando l'uscita del circuito per cambiare stato da ON a OFF.

Caratteristiche del target. L'abilità del sensore di rilevare il target è determinata dalla sua dimensione, dalla costante dielettrica e dalla distanza dal sensore. Materiali con costante dielettrica più elevata sono più facili da rilevare rispetto agli altri. Il grafico mostra la relazione tra la costante dielettrica del target e l'abilità del sensore a rilevare un certo materiale in base alla sua distanza di rilevamento S_r (figura 3.41). La tabella in figura 3.42 mostra le costanti dielettriche di alcuni materiali. Se, per esempio, un sensore capacitivo possiede una distanza di rilevamento di 10 mm e il target è l'alcol, la distanza effettiva di rilevamento (S_r) è approssimativamente l'85% della distanza rilevata, cioè 8.5 mm. Più largo è il target, più forte è l'accoppiamento capacitivo tra la sonda e il target; più piccola è la distanza tra target e sonda, più forte è l'accoppiamento (figura 3.43).

La sonda capacitiva irradia un campo elettrostatico che genera un accoppiamento capacitivo tra la sonda e il target che entra nel campo. L'oscillatore fornisce energia elettrica alla sonda capacitiva. Il circuito di trigger rileva variazioni nell'ampiezza

Material	Dielectric Constant	Material	Dielectric Constant
Alcohol	25.8	Polyamide	5
Araldite	3.6	Polyethylene	2.3
Bakelite	3.6	Polypropylene	2.3
Glass	5	Polystyrene	3
Mica	6	Polyvinyl Chloride	2.9
Hard Rubber	4	Porcelain	4.4
Paper-Based Laminate	4.5	Pressboard	4
Wood	2.7	Silica Glass	3.7
Cable Casting Compound	2.5	Silica Sand	4.5
Air, Vacuum	1	Silicone Rubber	2.8
Marble	8	Teflon	2
Oil-Impregnated Paper	4	Turpentine Oil	2.2
Paper	2.3	Transformer Oil	2.2
Paraffin	2.2	Water	80
Petroleum	2.2	Soft Rubber	2.5
Plexiglas	3.2	Celluloid	3

Figura 3.42: Costanti dielettriche di alcuni materiali.

Material thickness [mm]	Switching distance [mm]
1.5	-
3.0	0.2
4.5	1.0
6.0	2.0
7.5	2.3
9.0	2.5
10.5	2.5
12.0	2.5

Figura 3.43: Variazione della distanza di rilevamento in funzione dello spessore del target utilizzando una striscia di cartone di larghezza 30 mm.

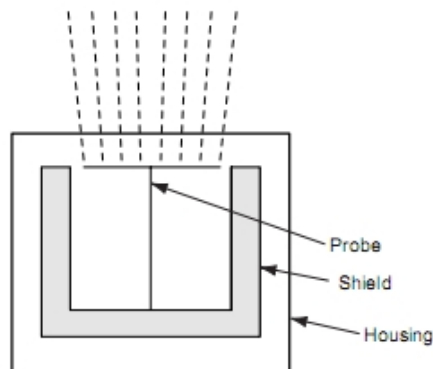


Figura 3.44: Sonda capacitiva schermata.

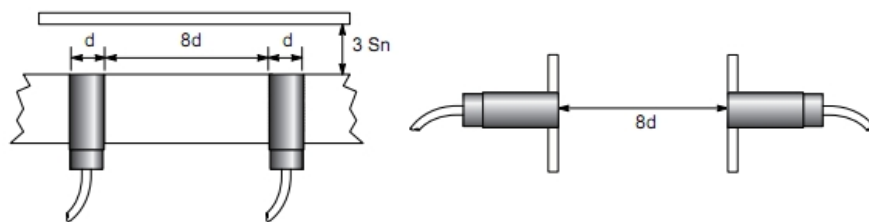


Figura 3.45: Sensori capacitivi adiacenti e affacciati.

dell'oscillazione. Le variazioni avvengono quando un target entra o esce dal campo elettrostatico irradiato dal sensore. Quando una variazione sufficiente nel campo elettrostatico viene rilevata, l'uscita genera un segnale elettrico che può essere interpretato da un PLC. Questo segnale indica la presenza del target nel campo sensibile.

Sensori schermati e non schermati. I sensori capacitivi schermati sono più adatti a rilevare materiali con costante dielettrica più bassa come conseguenza dei loro campi elettrostatici altamente concentrati (figura 3.44). Questo permette di rilevare oggetti che i sensori non schermati non possono rilevare. Come i sensori induttivi, quelli capacitivi possono essere installati adiacenti in fila oppure affacciati uno con l'altro (figura 3.45). I sensori non schermati sono più adatti nei serbatoi di plastica, per le applicazioni di rilevazione del livello di un liquido (figura 3.46). Il serbatoio è montato all'interno di una cavità e il sensore viene fatto scivolare all'interno del recipiente. Il sensore rileva il liquido nel serbatoio attraverso la parete del recipiente. Il campo elettrostatico di un sensore non schermato è meno concentrato rispetto a uno schermato, per questo viene utilizzato per rilevare materiali ad alta costante dielettrica. Per alcuni tipi di materiali presentano distanze operative più elevate rispetto ai sensori schermati (figura 3.47). Modelli non schermati provvisti di una sonda di compensazione riescono ad ignorare nebbia, polvere, porzioni piccole di sporco, piccole gocce d'olio, o accumuli di acqua sul sensore. La sonda di compensazione migliora la resistenza del sensore alle variazioni di umidità nell'ambiente.

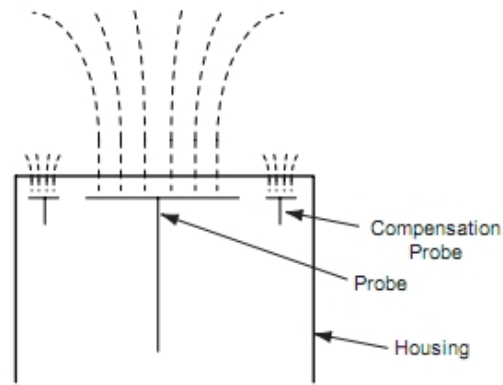


Figura 3.46: Sonda capacitiva non schermata.

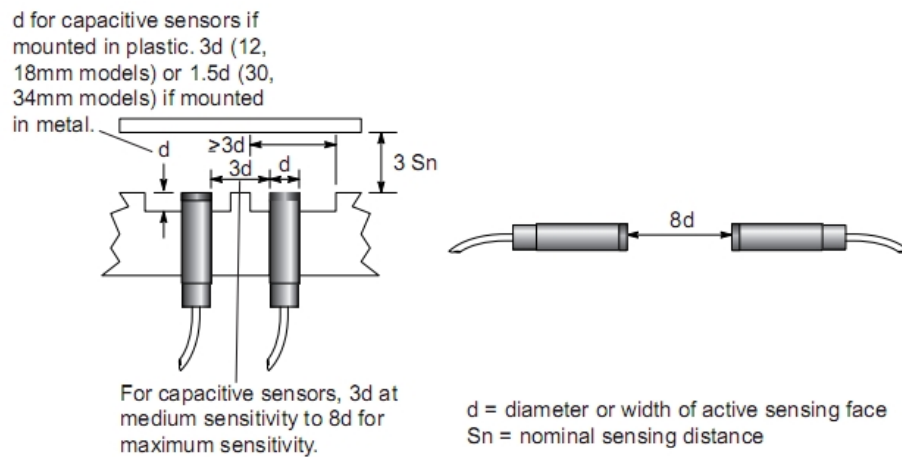


Figura 3.47: Sensori non schermati montati sotto oggetti metallici.

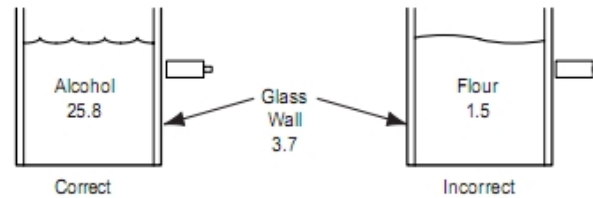


Figura 3.48: Rilevazione del livello dell'alcol o della farina.

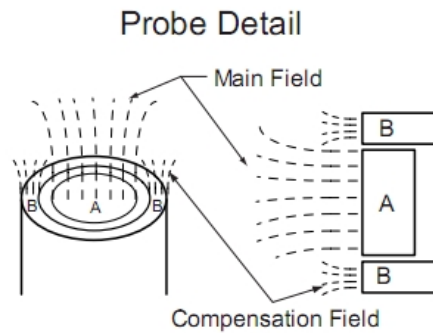


Figura 3.49: Funzionamento della sonda di compensazione.

Costanti dielettriche dei recipienti. Materiali con valori di costanti dielettriche elevate sono più facili da rilevare in confronto a quelli con valori più bassi. Un sensore di prossimità capacitivo è molto sensibile all'acqua, con costante dielettrica di 80, il che lo rende ideale per le applicazioni in cui è richiesto il riconoscimento del livello di un liquido in un recipiente. Lo stesso sensore, però, non sarebbe sensibile all'aria, con costante dielettrica unitaria. Materiali con alta costante dielettrica possono essere rilevati attraverso pareti di recipienti fatti con materiali di costante dielettrica più bassa, ma non viceversa. Un esempio è la rilevazione di alcol o di farina attraverso un recipiente di vetro: il livello dell'alcol può essere rilevato, mentre quello della farina no (figura 3.48).

Sonda di compensazione. Qualsiasi materiale che entra in un campo elettrostatico di un sensore di prossimità capacitivo può causare un segnale di uscita. Questo include nebbia, sporco, polvere o altri agenti contaminanti sulla faccia del sensore. L'utilizzo di elettrodi di compensazione aiuta a stabilizzare un sensore non schermato in modo che la polvere e lo sporco non inducano una variazione del segnale di uscita. Il campo di compensazione non si estende lontano dal sensore. Quando il target entra nel campo sensibile il campo di compensazione risulta immutato. Quando agenti contaminanti risiedono direttamente sulla faccia del sensore, entrambi i campi (del sensore e di compensazione) sono influenzati. Il sensore non vede questa variazione di capacità e quindi non produce un segnale di uscita perché la capacità del sensore aumenta dello stesso rapporto della capacità di compensazione.

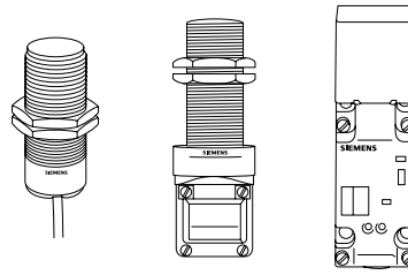


Figura 3.50: Tipologie di sensori capacitivi.

Parameter	Value
Object material	all materials with dielectric constant ≥ 1
Operating voltage	10 – 30 V DC or 20 – 250 V AC
Nominal switching distance	5 – 20 mm, max. 60 mm (usually variable, adjustable via potentiometer)
Maximum switching current	500 mA
Sensitivity to dirt	sensitive
Service life	very long
Switching frequency	up to 300 kHz
Design	cylindrical, block-shaped
Size (examples)	M12x1, M18x1, M30x1, up to \varnothing 30 mm, 25 mm x 40 mm x 80 mm
Protection (IEC 529, DIN 40050)	up to IP67
Ambient operating temperature	-25 – +70 °C

Figura 3.51: Specifiche tecniche dei sensori di prossimità capacitivi.

Specifiche di un sensore di prossimità capacitivo. Le caratteristiche di un sensore cilindrico di diametro 32 mm sono: distanza di intervento nominale 20 mm, massima tolleranza sulla distanza di intervento nominale $\pm 15\%$ (% Sn), corsa differenziale ≤ 15 (%Sn), massima corrente di uscita 150 mA, campo della tensione di alimentazione 10÷30 V DC, massimo assorbimento a vuoto 15 mA, massima frequenza di commutazione 100 Hz.

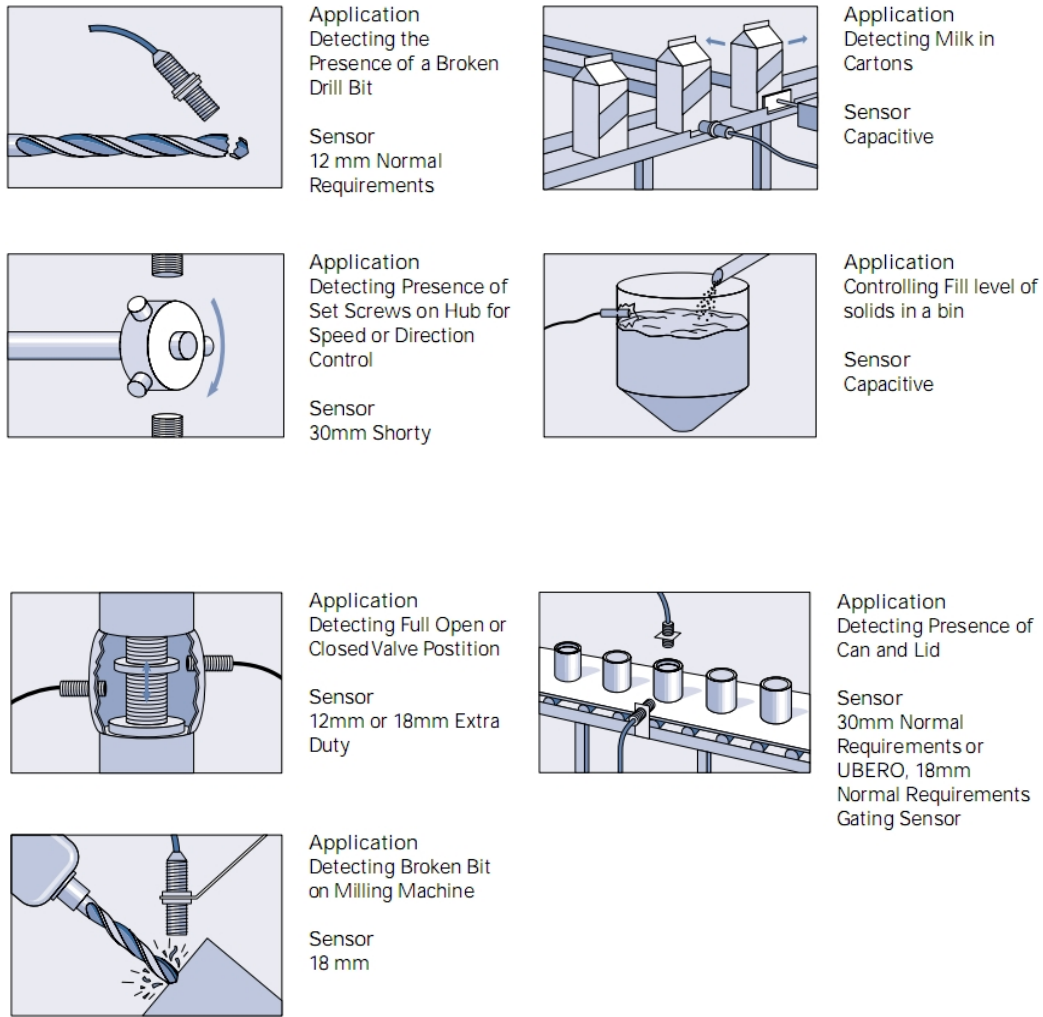


Figura 3.52: Possibili applicazioni dei proximity induttivi e capacitivi.

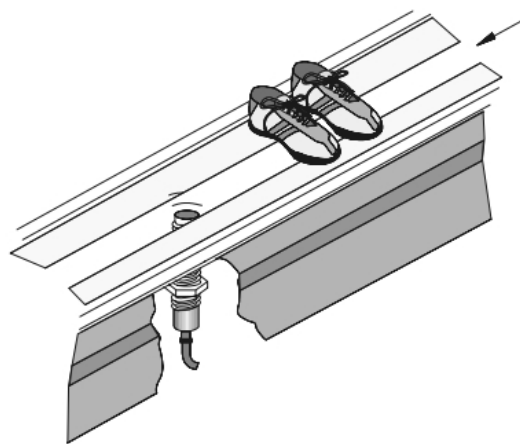


Figura 3.53: Rilevazione delle soles di gomma nelle scarpe. I sensori capacitivi rilevano oggetti di gomma, pelle e plastica che non sono riconosciuti dai sensori ottici più diffusi e dove quelli ad ultrasuoni risultano troppo costosi per tale applicazione.

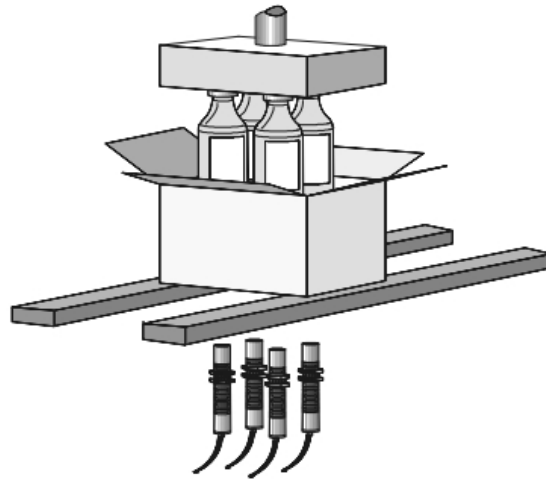


Figura 3.54: Controllo del contenuto delle confezioni attraverso il cartone.

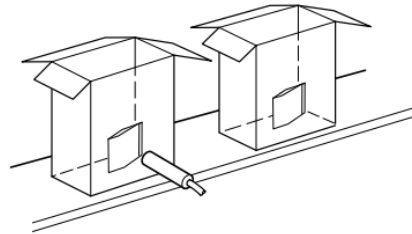


Figura 3.55: Rilevazione di un prodotto attraverso la sua confezione.

Vantaggi dei proximity capacitivi

1. Rilevazione di materiali metallici e non, liquidi e solidi
2. Capacità di rilevamento attraverso materiali (contenitori o recipienti)
3. Tempi di vita molto lunghi
4. Numerose configurazioni di montaggio.

Svantaggi dei proximity capacitivi

1. Piccole distanze di rilevamento variano in accordo al materiale utilizzato
 2. Molto sensibili ai fattori ambientali, l'umidità può influenzare il segnale di uscita
 3. Non sono estremamente selettivi, bisogna sempre controllare con attenzione ciò che si avvicina al sensore.
-

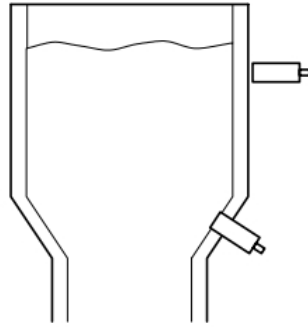


Figura 3.56: Rilevazione di livello attraverso una tramoggia, con sensori montati su vetro o inseriti nel materiale.

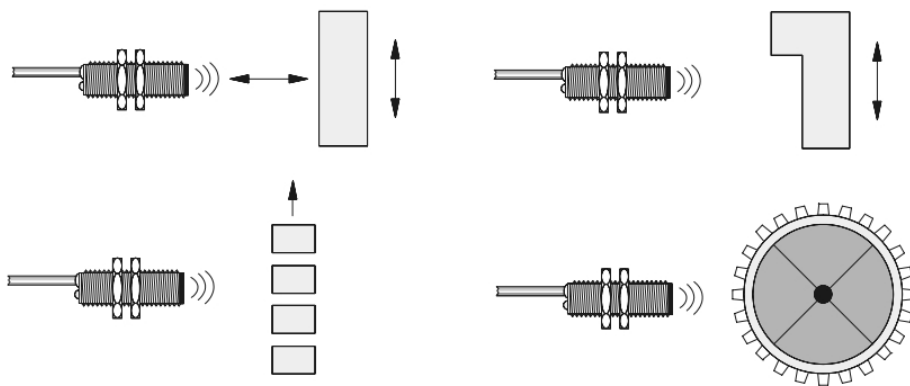


Figura 3.57: Principali impieghi di un proximity: rilevamento oggetti, posizionamento, conteggio, misure di velocità rotazionale.

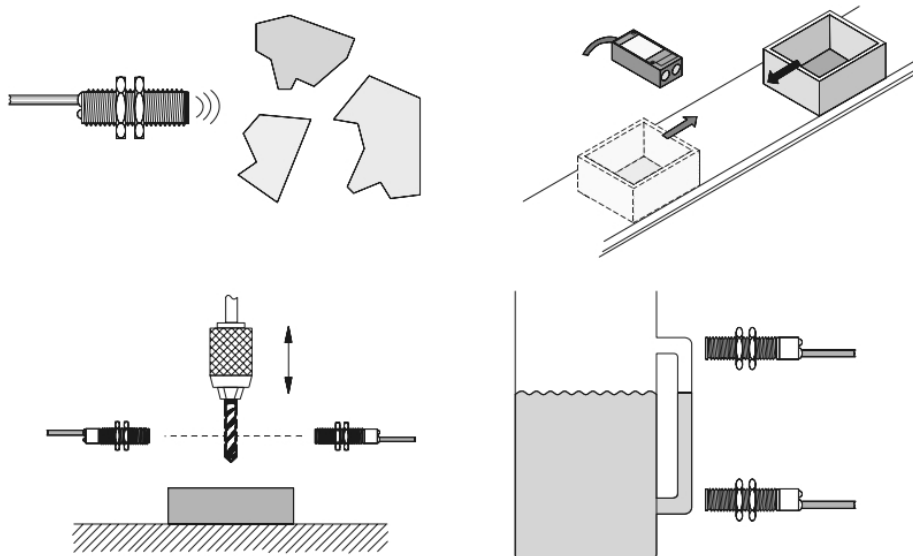


Figura 3.58: Rilevamento di materiali, definizione della direzione di un movimento, monitoraggio di utensili (controllo di rottura di un trapano), livello di riempimento liquidi.

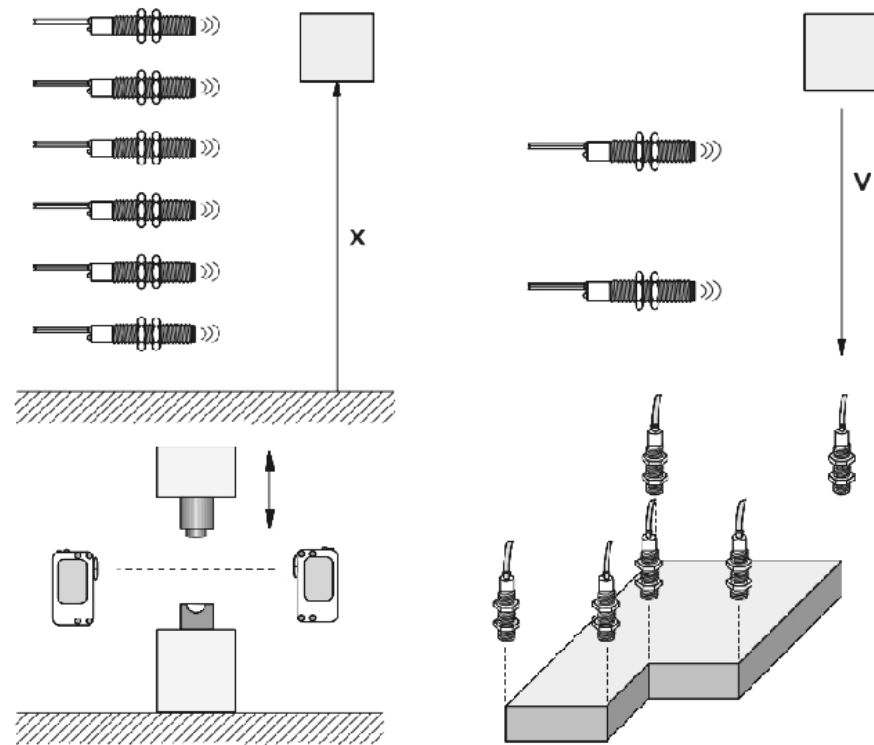


Figura 3.59: Misura di distanze, misura di velocità, protezione dei macchinari, riconoscimento del contorno di un oggetto.

3.2.4 Interruttori Hall

Gli interruttori Hall si riferiscono a dispositivi che producono un'uscita binaria quando l'intensità del campo magnetico eccede o no un certo valore di soglia (figura 3.60). Questi interruttori costituiscono un dispositivo a tre terminali, la tensione di alimentazione del sensore varia dai 3 ai 24 V. Solitamente l'uscita è riferita fisicamente a massa, o meno, in dipendenza dallo stato magnetico. L'azionamento della soglia va dai 10^{-4} T (il campo magnetico terrestre è di $5 \cdot 10^{-5}$ T) fino a 10^{-2} T tipici dei magneti permanenti. Gli interruttori Hall presentano isteresi: la loro soglia di accensione può essere differente da quella di spegnimento. Alcune volte l'isteresi viene sfruttata per creare un latch a commutazione, che rimane nel suo ultimo stato (on oppure off) fino a quando non cambia di polarità il suo campo magnetico applicato. Gli interruttori Hall che non hanno funzione di latch possono essere unipolari (rispondono solamente ad un orientamento del campo elettrico) o bipolari (rispondono ad entrambe le polarità). L'accensione e lo spegnimento avvengono nell'ordine dei microsecondi. Essi presentano intervalli di temperatura operativi molto ampi e sono molto utilizzati nei motori delle automobili. Un altro vantaggio è che non sono suscettibili ai liquidi e allo sporco come gli interruttori ottici o meccanici. Mentre spesso la parte in movimento che viene rilevata è un magnete, è possibile impiegare un magnete stazionario polarizzato che amplifica l'effetto dell'interruttore Hall con l'avvicinamento di un pezzo di ferro, come un ingranaggio dentato (figura 3.61), assicurando la rilevazione di oggetti non magnetizzati. Applicazioni tipiche sono la rilevazione di componenti in movimento, al posto di utilizzare un interruttore di finecorsa meccanico. L'interruttore Hall non presenta parti in movimento o esposte ed è immune all'usura. Un altro utilizzo abbastanza comune consiste nell'indirizzamento di movimenti traslatori e rotazionali. L'interruttore viene installato per rilevare una posizione e il suo impulso in uscita viene utilizzato come riferimento per un encoder incrementale che calcola la distanza dal punto di riferimen-

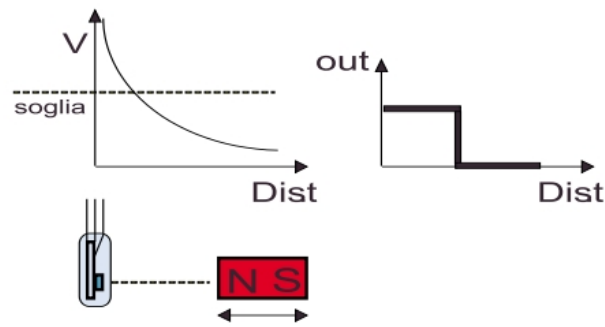


Figura 3.60: Sensore di prossimità ad effetto Hall con caratteristica non lineare.

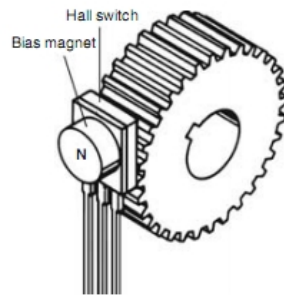


Figura 3.61: Rilevamento di un ingranaggio dentato in un materiale di ferro utilizzando un interruttore Hall e un magnete polarizzato.

to. Questi interruttori sono economici e piccoli, così che un certo numero di sensori può essere posizionato ad intervalli di distanza di millimetri formando un encoder a bassa risoluzione lineare o rotativo o un interruttore di molte posizioni. Un encoder o interruttore di questo genere possiede la stessa robustezza di un sensore Hall.

Vantaggi dei sensori Hall: *costo limitato* dovuto alla possibilità di integrare su un unico chip l'elemento sensore vero e proprio, l'amplificatore, il regolatore, il trigger di Schmitt etc.; *basso consumo* tipicamente compreso tra 4 e 7 mA; *elevata frequenza di lavoro* fino a 25 kHz; *elevata linearità* sia al variare della tensione di alimentazione che della temperatura; *molteplicità di applicazioni* nel campo automobilistico, sistemi di accensione, controlli di velocità, di direzione, bloccaggio cinture di sicurezza.

3.2.5 Sensori Hall analogici

In un package con più o meno le stesse dimensioni di un interruttore Hall, si possono ottenere dispositivi che presentano un'uscita analogica proporzionale all'intensità del campo magnetico (figura 3.62). Tipicamente hanno una sensibilità di fondo scala al campo magnetico nell'ordine dei 10^{-2} T. I sensori Hall analogici sono utili come encoder lineari o rotazionali. Due sensori Hall possono essere posizionati ad angolo retto per rilevare il seno e il coseno dell'angolo che forma un magnete permanente, ottenendo in questa maniera un sensore rotazionale assoluto. Dispositivi in commercio di questa natura vengono chiamati "potenziometri di Hall" e presentano una varietà di uscite (seno e coseno, rampa lineare che si ripete ad ogni rotazione, etc.). In contrasto con i potenziometri a strisce o cursori resistivi, i potenziometri di Hall permettono rotazioni continue di 360° e non presentano usura. Tuttavia i dispositivi ad effetto Hall sono sensibili ai campi magnetici esterni. I sensori Hall sono anche eccellenti trasduttori

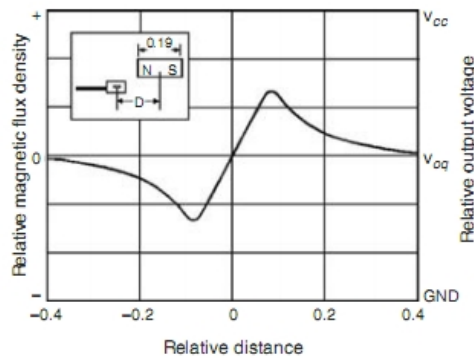


Figura 3.62: Uscita di un sensore Hall analogico in relazione alla posizione del magnete.

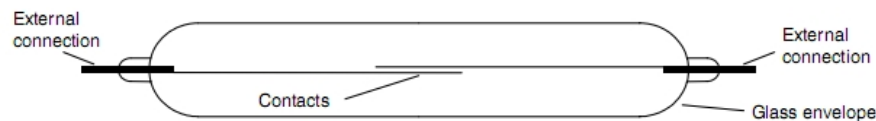


Figura 3.63: L'interruttore a contatto reed magnetico sigillato ermeticamente, con contatti normalmente aperti, è riempito di un gas inerte ed è impermeabile alla polvere e alla corrosione.

di piccoli movimenti lineari o ad arco. Il movimento di una barra magnetica su un sensore Hall espone il sensore ad un campo magnetico, che può essere adattato per variare linearmente con lo spostamento, su di un intervallo di pochi millimetri fino a pochi centimetri (la barra magnetica compie uno spostamento inferiore alla sua lunghezza). Implementazioni commerciali sono conosciute come sensori di posizione a farfalla (throttle).

3.2.6 Contatti reed

Rappresentano la forma più semplice di sensore di prossimità magnetico. I sensori di prossimità magnetici a reed sono costituiti da contatti reed le cui lamine di materiale ferromagnetico (Ferro-Nichel), a bassa riluttanza, racchiuse in un bulbo di vetro contenente gas inerte, sono sensibili all'influenza di campi magnetici. Le estremità delle lamine (opposte ai contatti) fuoriescono dal contenitore e costituiscono i terminali del dispositivo (figura 3.63). I campi magnetici generati da magneti permanenti o da bobine percorse da corrente, producono sulle lamine, per il fenomeno di induzione magnetica, polarità di segno opposto. Quando la forza di attrazione supera la resistenza elastica delle lamine, queste si flettono l'una verso l'altra, realizzando un contatto elettrico. La chiusura dei contatti dipende dalla sensibilità dei reed e dalla forza del magnete nella fase di avvicinamento. Le superfici di contatto delle lamine dei reed sono rivestite con materiale pregiato (Oro, Rodio, Tungsteno) che li rende adatti a comandare, a seconda del materiale di rivestimento impiegato, circuiti a basse correnti o forti carichi induttivi. Rispetto ai contatti tradizionali ad azionamento meccanico i sensori a reed presentano diversi vantaggi:

- la chiusura ermetica in gas inerte protegge i contatti dalla polvere, dall'ossidazione e dalla corrosione;
- l'azionamento dei contatti avviene senza complicati e ingombranti meccanismi, sfruttando l'influenza di un campo magnetico;

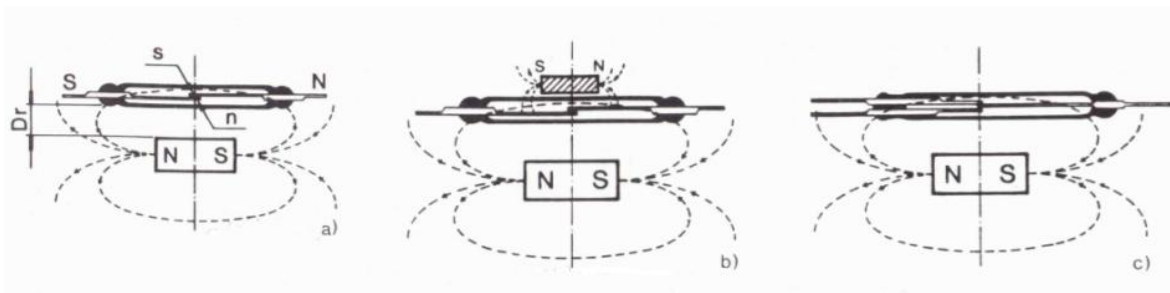


Figura 3.64: Funzioni realizzate dai sensori magnetici a contatto reed: a) normalmente aperto, b) normalmente chiuso, c) scambio.

- alta velocità di funzionamento, fino a 300 Hz per alcuni tipi, breve tempo di attrazione (1,5-3 ms, compresi i rimbalzi);
- la particolare concezione costruttiva e l'alta qualità dei materiali impiegati assicurano ai contatti una lunga vita (10^7 - 10^8 operazioni);
- assenza di manutenzione e ridottissimo ingombro.

Le funzioni realizzate dai sensori magnetici a contatto reed sono:

- funzione *normalmente aperto* (NA): il contatto, chiamato anche di lavoro, è normalmente aperto quando il magnete di azionamento è ad una distanza tale da non riuscire ad influenzarlo; si chiude quando il magnete si avvicina al punto da polarizzarlo (figura 3.64(a)).
- funzione *normalmente chiuso* (NC): il contatto, chiamato anche di riposo, risulta già chiuso a mezzo di un magnete a contatto con il bulbo di vetro del reed; l'avvicinarsi del magnete di azionamento, di polarità opposta, annulla il campo magnetico preesistente provocando l'apertura. Occorre tenere presente che esiste, per i suddetti sensori, una minima distanza (d_m), dall'involucro del sensore all'unità magnetica, sotto la quale il contatto potrebbe chiudersi. Tale distanza minima dipende dal formato del reed impiegato e dall'unità magnetica di azionamento (figura 3.64(b)).
- funzione *scambio* (S): in un unico bulbo di vetro sono realizzate le funzioni NA e NC, per cui all'avvicinarsi o all'allontanarsi del magnete di azionamento, il contatto commuta dalla condizione di riposo a quella di lavoro e viceversa (figura 3.64(c)).
- funzione *bistabile*: il contatto bistabile è realizzato a mezzo di un magnete interno che prepolarizza le lamine dei reed senza avere la forza di chiuderle. All'avvicinarsi del magnete di azionamento, con polarità concorde, il campo magnetico viene rinforzato e pertanto, il contatto si chiude e rimane chiuso anche quando il magnete di azionamento esce dalla zona di influenza. Per riaprirlo occorre che il magnete si avvicini con polarità discorde dal campo fisso di mantenimento. la funzione bistabile può essere anche realizzata anche su un contatto in scambio (figura 3.65).

L'azionamento dei contatti reed a mezzo di un magnete permanente, può avvenire in diversi modi, alcuni dei quali indicati negli esempi di figura 3.66 e 3.67. In figura 3.66 (a sinistra) l'asse di mezzzeria del magnete coincide con i punti di contatto e in tal

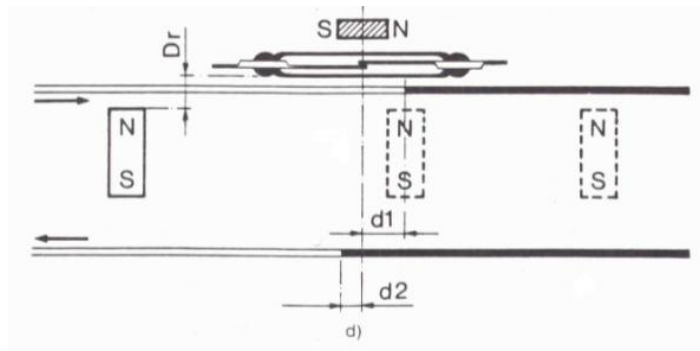


Figura 3.65: Funzione bistabile di un sensore magnetico a contatto reed.

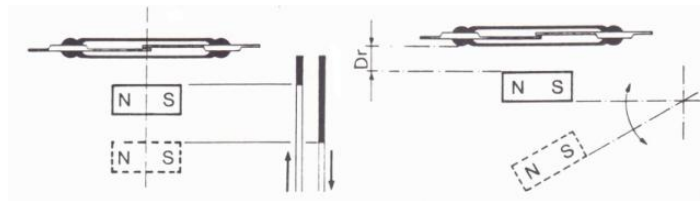


Figura 3.66: Spostamento del magnete perpendicolare all'asse del reed e spostamento angolare.

modo si realizza una singola chiusura e apertura per tutta l'ampiezza di movimento del magnete. Come evidenziato, tra la posizione del magnete in fase di attrazione del reed e la posizione dello stesso magnete nel momento del rilascio, intercorre una certa distanza definita *corsa differenziale*. In figura 3.66 (a destra) per realizzare una singola chiusura e apertura occorre un'ampia rotazione del magnete. In figura 3.67 (in alto) alla distanza $d \leq 0,2 \div 0,5 D_r$ (quest'ultima dipende dal formato del reed impiegato e dal magnete), si realizzano tre chiusure con il massimo movimento dell'unità magnetica; mentre alla distanza D_r si ottiene una singola chiusura e apertura con il minimo spostamento del magnete (condizione di minima corsa differenziale). In figura 3.67 (in basso) ad ogni rotazione del magnete di 180° si realizza una chiusura del contatto reed; i contatti si aprono quando l'asse del magnete sta raggiungendo la posizione ortogonale rispetto all'asse del reed. Quando i reed vengono impiegati in condizioni tali da non provocare usura del contatto, la vita degli stessi dipende dalle sole caratteristiche meccaniche e può arrivare a 10^8 operazioni. Occorre però tenere presente che valori di tensioni o di correnti superiori ai limiti consentiti dai contatti provocano una sensibile riduzione della vita elettrica degli stessi, causandone l'incollamento o la craterizzazione. E' necessario valutare anche le condizioni transitorie e non solamente quelle di regime. Solo in queste condizioni la vita elettrica dei contatti può essere considerata pressochè coincidente con la vita meccanica. In tabella vengono fornite le specifiche per un comune sensore reed (figura 3.68). Si nota, inoltre, che la risposta del sensore varia in base all'orientazione dell'asse del polo del magnete (figura 3.69). Installando un sensore reed dobbiamo essere sicuri che nelle vicinanze non ci sia un campo magnetico più intenso di $0,16 \text{ mT}$, altrimenti il sensore deve essere opportunamente schermato affinché possa fornire una misura affidabile.

Questi dispositivi poco costosi e robusti sono comunemente utilizzati come sensori di apertura e chiusura di porte nelle applicazioni di sicurezza. Alcuni problemi si possono incontrare a causa del rimbalzo dei contatti, vibrazioni strutturali e infossamento delle superfici che si accoppiano nel caso di carichi induttivi o capacitivi che suggeriscono alla maggior parte dei progettisti ad utilizzare i più affidabili sensori Hall. La

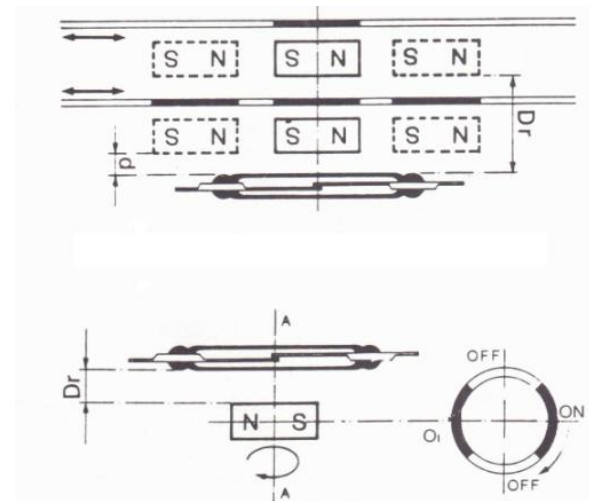


Figura 3.67: Spostamento del magnete parallelo all'asse e rotazione del magnete attorno all'asse.

— Vita meccanica: $10^7 \div 10^8$ operazioni
— Frequenza di manovra: fino a 300 Hz per tipi aperti e chiusi fino a 150 Hz per i tipi in scambio fino a 50 Hz per i tipi con uscita a triac
— Temperatura in esercizio: $-25 \text{ °C} \div +75 \text{ °C}$
— Precisione alla ripetibilità: tipicamente 0,05 mm
— Resistenza ad urti: 50 g
— Resistenza a vibrazioni: 35 g
— Grado di protezione: IP 65

Figura 3.68: Specifiche di un sensore magnetico a contatti reed.

distanza di intervento è funzione della sensibilità del reed, dell'intensità del campo magnetico e anche dalla sua forma nel caso in cui non sia uniforme (per es. nei cilindri con pistone magnetico). I materiali non ferrosi o ferrosi amagnetici, interposti tra sensore e magnete, non alterano il funzionamento del reed perchè il campo magnetico attraversa queste pareti. Bisogna invece prestare particolare attenzione a materiali ferrosi o altri magneti posti a pochi centimetri dal campo magnetico (per es. trucioli in ferro, supporti, viti di fissaggio, cilindri con pistone magnetico) perchè possono influenzare il campo e farlo deviare. Tali campi, generati da magneti permanenti o da bobine percorse da corrente, producono sulle lamine, per il fenomeno di induzione magnetica, polarità di segno opposto. Questi interruttori di prossimità (reed o hall effect) sono principalmente usati per determinare la posizione del pistone magnetico in un cilindro pneumatico idraulico.

Se l'oggetto da rilevare è legato ad un magnete è possibile effettuare: misura della velocità rotazionale di qualsiasi materiale, rilevazione selettiva di pezzi da lavoro individuali presi da una simile serie, spostamento incrementale nei sistemi di encoder, dispositivi di conteggio, interruttori per porte, posizionamento di materiali.

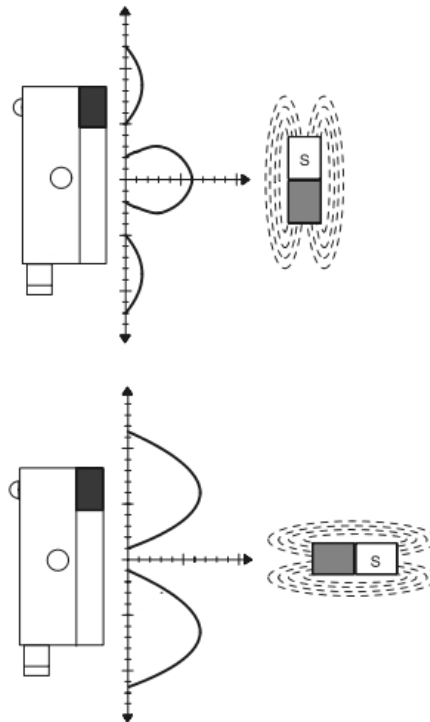


Figura 3.69: Caratteristica della risposta di un sensore reed.

Parameter	Value
Switching voltage	12 – 27 V DC or AC
Switching accuracy	±0.1 mm
Maximum contact rating	40 W
Maximum magnetic interference induction	0.16 mT
Maximum switching current	2 A
Maximum switching frequency	500 Hz
Switching time	≤2 ms
Conductance	0.1 Ω
Contact service life (with protective circuit)	5 Million switching cycles
Protection class (IEC 529, DIN 40050)	IP66
Ambient operating temperature	-20 – +60 °C

Figura 3.70: Caratteristiche tecniche di un sensore magnetico reed.

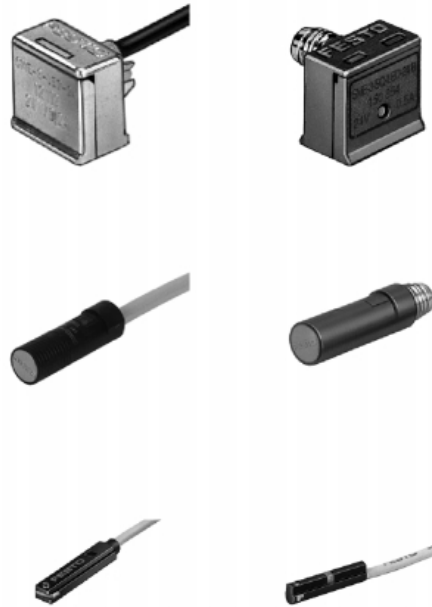


Figura 3.71: Tipologie di sensori reed.

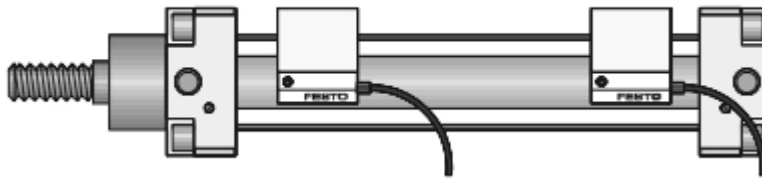


Figura 3.72: Cilindro pneumatico provvisto di sensori di prossimità magnetici.

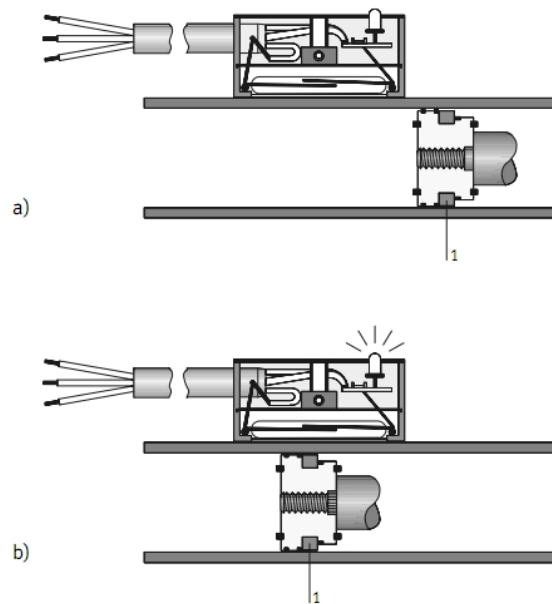


Figura 3.73: Magnete permanente sul cilindro di un pistone (1). Il sensore di prossimità è inattivo, i contatti risultano aperti (a). Con l'avvicinamento di un campo magnetico i contatti si chiudono (b).

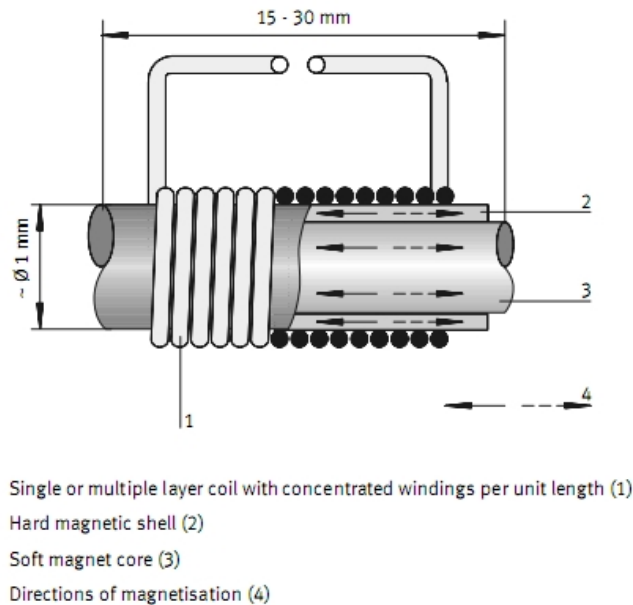


Figura 3.74: Bobina avvolta attorno a un cavo Wiegand che forma il sensore.

3.2.7 Il cavo Wiegand

Il sensore Wiegand si basa sulla generazione di una tensione su una bobina, che possiede un nucleo ferromagnetico, quando un campo esterno causa una variazione nel campo magnetico del nucleo (figura 3.74). Il componente principale del sensore Wiegand è il cavo Wiegand (o cavo impulsivo), che ha una superficie magnetica molto dura e presenta un alto campo coercitivo. Le proprietà magnetiche del cavo Wiegand sono simili a quelle dei materiali ferromagnetici con solo un dominio. Al variare del campo magnetico all'interno del cavo da una saturazione positiva a negativa si ottiene una generazione di grandi tensioni e un aumento di sensibilità. I cavi Wiegand vengono utilizzati principalmente come interruttori di prossimità con il vantaggio che non si ha bisogno di una sorgente di tensione esterna. Il sensore Wiegand genera un impulso ad alta tensione quando il campo magnetico raggiunge una determinata soglia. L'impulso di tensione è indipendente dal rapporto di variazione del campo magnetico e il dispositivo è passivo, possedendo solamente due terminali (figura 3.75).

Un cavo di materiale ferromagnetico con un singolo dominio magnetico viene utilizzato come mezzo sensore. La polarizzazione magnetica può interessare solo una delle due direzioni parallele al cavo. Il nucleo magnetico dolce è racchiuso in un guscio di metallo più duro. In presenza di un campo magnetico esterno, avviene un rovesciamento del campo magnetico su tutta la lunghezza del cavo. Si crea un segnale di tensione sulla bobina che avvolge il cavo. Segnali di tensione da 2-8 V di ampiezza vengono forniti da un sensore lungo 15-30 mm. Non richiede alimentazione esterna, inoltre l'intervallo di temperatura va dai -196°C ai 175°C .

I sensori vengono realizzati con un cavo da 0,3 mm di Vicalloy (lega formata da cobalto-ferro-vanadio) che viene avvolto per causare una deformazione plastica che porta ad un'alta coercitività nel guscio più esterno e uno stress elastico nella parte centrale. L'effetto di Barkhausen è la causa dell'impulso di tensione generato e si verifica quando il singolo dominio centrale rovescia la sua magnetizzazione. Impulsi di 2,5 V ad una frequenza che va da 100 Hz a 1 MHz possono essere generati da un cavo lungo 30 mm con una bobina composta da 1000 spire. Le condizioni ottimali per il funzionamento vanno ricercate quando la direzione di magnetizzazione della parte

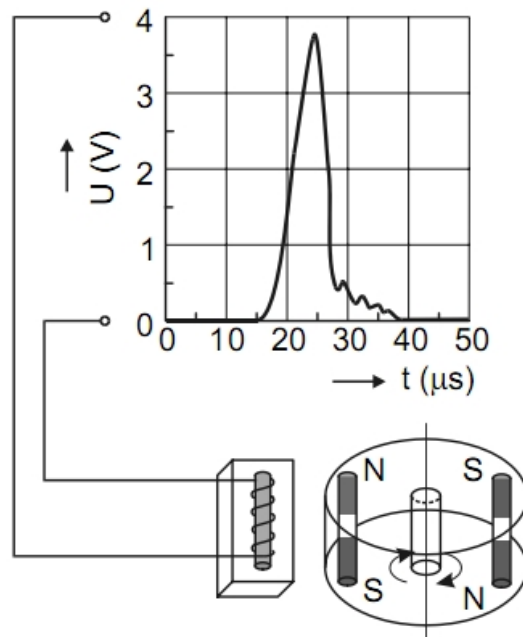


Figura 3.75: Sensore Wiegand.

interna si rovescia, mentre la magnetizzazione della parte esterna rimane costante. La caratteristica del dispositivo è asimmetrica, e un grande impulso viene generato solo in una direzione della variazione del campo. I cavi Wiegand vengono utilizzati nelle schede di accesso o negli apparecchi antifurto dove la bobina sensibile è parte del dispositivo di rilevamento stazionario. L'impulso rilevato può essere facilmente identificato nel rumore, perchè possiede una forma molto caratteristica.

Bibliografia

- [1] Pavel Ripka e Alois Tipek. *Modern Sensors Handbook*. London e Newport Beach: ISTE, 2007.
 - [2] Robert H. Bishop. *Mechatronic systems, Sensors and Actuators: Fundamentals and Modeling*. Second Edition. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
 - [3] Allen Bradley. *Fundamental of Sensing: Training Manual*. URL: <http://www.ces-pasco.com/manuals/FUNDAMENTALS%20OF%20SENSING.pdf>.
 - [4] Emilio Sardini: docente nel corso di Laurea di Ingegneria dell'Automazione Industriale all'Università di Brescia. "Rilevamento e misura nell'automazione". In: *Media Planet - Automation* (2008). URL: <http://doc.mediaplanet.com/projects/papers/Automation.pdf>.
 - [5] Alessandro Brunelli. *Caratteristiche generali sensori e trasduttori. Simbologia e caratteristiche generali della strumentazione. Sensori, trasduttori e condizionatori dei segnali di misura*. Seconda edizione. Milano: G.I.S.I., 1993.
 - [6] CSATA. *Sensori per applicazioni industriali*. Valenzano: Tecnopolis, 1987.
 - [7] Festo. *Festo: Sensors for handling and processing technology. Textbook*. URL: <http://www.festo-didactic.com>.
 - [8] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications*. Third Edition. San Diego: Springer, 2004.
 - [9] Renzo Frulla. *Sensori e trasduttori industriali*. Milano: Il Rostro, 1992.
 - [10] John G. Webster. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. Third Edition. U.S.A.: CRC Press, 1999.
 - [11] Università di Ferrara Ing. Marcello Bonfè. *Dispensa Ingegneria e Tecnologia dei Sistemi di Controllo*. URL: www.unife.it/ing/informazione/itsc/.../dispense-i-parte-trasduttori.pdf.
 - [12] Ing. Daniele Rapisarda. *Dispensa del corso di Automazione Industriale*. 2003.
 - [13] Siemens. *Basic of Sensors*. URL: <http://www3.sea.siemens.com/step/pdfs/sensors.pdf>.
 - [14] Ian R. Sinclair. *Sensors and Transducers*. Third Edition. Oxford: Newnes, 2001.
-