

CONTENUTI

- C7.1 Introduzione
- C7.2 Trasduttori di prossimità induttivi
- C7.3 Trasduttori di prossimità capacitivi
- C7.4 Trasduttori di prossimità optoelettronici
- C7.5 Trasduttori a ultrasuoni
- C7.6 Trasduttori di prossimità magnetici



Comparatori e trigger di Schmitt

TRASDUTTORI DI PROSSIMITÀ

C7.1 Introduzione

I trasduttori di **prossimità**, detti anche **proximity**, sono in grado di percepire e indicare la presenza di un oggetto all'interno del loro campo di azione senza avere contatti fisici con l'oggetto stesso; la distanza entro cui questi trasduttori rilevano oggetti è definita **distanza di rilevamento nominale**.

Poiché rilevano solo la presenza o l'assenza di un oggetto, il segnale elettrico d'uscita è di tipo *on/off* (presenza/assenza): i proximity sono pertanto realizzati con circuiti in grado di fornire informazioni di tipo logico (alcuni modelli dispongono anche di un sistema di regolazione per poter calibrare la distanza).

L'assenza di meccanismi d'attuazione meccanica e di un contatto fisico fra trasduttore e oggetto, conferisce a questi trasduttori una elevata affidabilità.

L'uscita è in genere progettata per operare con segnali a bassa tensione (fino a 48V) e basse correnti (fino 200 mA), non idonee per comandare direttamente gli attuatori, come elettrovalvole, teleruttori e motori, ma in grado di alimentare ingressi di schede di controllo.

I proximity possono essere realizzati con diversi tipi di tecnologie, in funzione delle quali sono così classificati:

- trasduttori induttivi;
- trasduttori capacitivi;
- trasduttori optoelettronici;
- trasduttori a ultrasuoni;
- trasduttori magnetici.

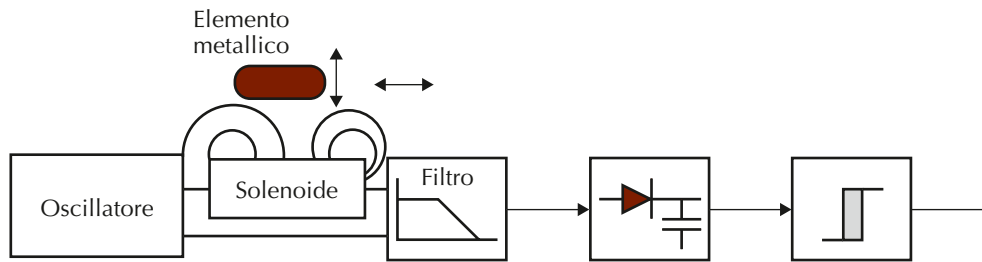


Figura C7.1 Schema di principio di un trasduttore induttivo passivo.

C7.2 Trasduttori di prossimità induttivi

Il funzionamento dei trasduttori di prossimità induttivi è basato sulla rilevazione delle perdite dovute alle **correnti parassite**¹ che si generano in un oggetto di materiale ferroso, quando è investito da un campo magnetico variabile.

Si dividono in due categorie: **passivi** e **attivi**.

Trasduttori induttivi passivi

Nei trasduttori induttivi passivi, detti anche a correnti parassite, dei quali nella **figura C7.1** è mostrato lo schema di principio, un circuito oscillatore alimenta un solenoide avvolto su un nucleo aperto di ferrite, in modo da realizzare un generatore di flusso magnetico le cui linee di flusso influenzano un campo d'azione abbastanza ampio, nel quale è localizzato l'oggetto da rilevare, detto **azionatore**. La presenza dell'azionatore in prossimità del solenoide consente l'induzione, da parte del campo magnetico, di correnti parassite che determinano una dissipazione di potenza per effetto Joule.

Fino a una certa distanza dell'azionatore dal solenoide (detta **distanza di rivelazione**), l'entità delle perdite è tale per cui l'oscillatore riesce a compensarle e quindi l'oscillazione viene mantenuta; quando però l'azionatore si avvicina al solenoide superando la distanza di rivelazione, l'oscillatore non è in grado più di compensare le perdite e l'oscillazione tende a smorzarsi.

L'oscillazione smorzata viene rilevata dal filtro passa-basso, raddrizzata e inviata all'ingresso di un **trigger di Schmitt**, particolare tipo di comparatore di soglia con isteresi che consente di trasformare un segnale analogico d'ingresso in un segnale di uscita variabile soltanto tra due valori

di tensione, a seconda che l'ingresso superi una certa soglia (soglia alta) o sia inferiore a una seconda (soglia bassa), come mostrato nella **figura C7.2** nella quale ne è riportata la caratteristica ingresso-uscita.

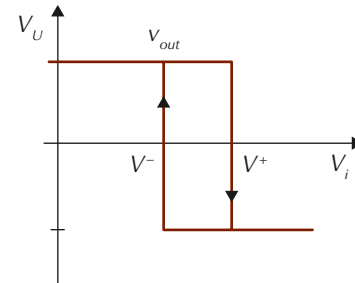


Figura C7.2 Caratteristica ingresso-uscita del trigger di Schmitt.

Si può osservare che la soglia più bassa (V^-) produce la commutazione al livello alto, mentre quella più alta V^+ al livello basso.

La commutazione dell'uscita deve avvenire in un tempo idealmente nullo, praticamente impossibile; in ogni caso deve essere molto minore del tempo con cui varia il segnale in ingresso.

Quando la distanza dell'oggetto dal solenoide diminuisce oltre la distanza di rivelazione, il segnale di ingresso decresce oltre la soglia V^- e il trigger si porta a livello alto, segnalandone la presenza.

È importante osservare che la perdita per effetto Joule e quindi lo smorzamento dell'oscillazione, oltre che dalla distanza dell'azionatore, dipende anche:

- dallo spessore dell'azionatore;
- dalla superficie investita dal campo;
- dalla frequenza del campo magnetico generato;
- dalla resistività del materiale.

Trasduttori induttivi attivi

Lo schema di principio di tali trasduttori è sostanzialmente identico a quello relativo ai trasdutto-

¹ Le **correnti parassite** o **di Foucault** sono correnti indotte in masse metalliche conduttrici immerse in un campo magnetico variabile o che, muovendosi, attraversano un campo magnetico costante o variabile; in entrambi i casi è la variazione del flusso magnetico che genera le correnti.

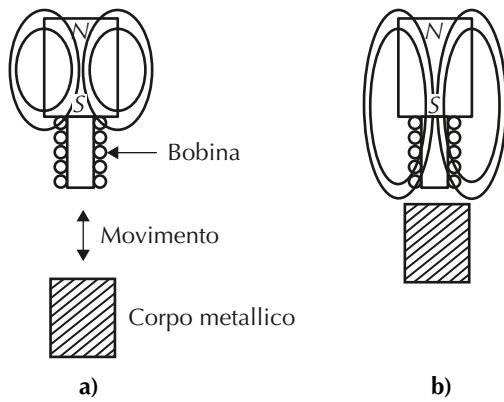


Figura C7.3 Trasduttore di prossimità induttivo attivo: a) azionatore distante dal solenoide; b) azionatore in prossimità del solenoide.

ri passivi, salvo la mancanza di alimentazione del solenoide, realizzato su un magnete permanente, come mostrato in **figura C7.3**.

Finché l'azionatore (di materiale metallico) è sufficientemente distante dal magnete, il campo magnetico non si concatena con il solenoide [**fig. C7.3a**]; quando, invece, l'azionatore si approssima al trasduttore, parte del campo magnetico viene deviata verso il solenoide [**fig. C7.3b**] concatenandosi con quest'ultimo.

A causa della variabilità del flusso, per il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, nel solenoide viene indotta una tensione, la quale, se supera la soglia di attivazione del trigger, ne fa commutare l'uscita al valore alto, segnalando così la presenza dell'oggetto.

È importante sottolineare che in tal caso non è solo la distanza a provocare l'attivazione dell'uscita, ma anche il movimento dell'azionatore (altrimenti non sarebbero presenti variazioni del flusso magnetico e quindi le tensioni indotte).

C7.3 Trasduttori di prossimità capacitivi

Il funzionamento dei trasduttori di prossimità capacitivi è basato sulla rilevazione delle variazioni della capacità elettrica di un condensatore.

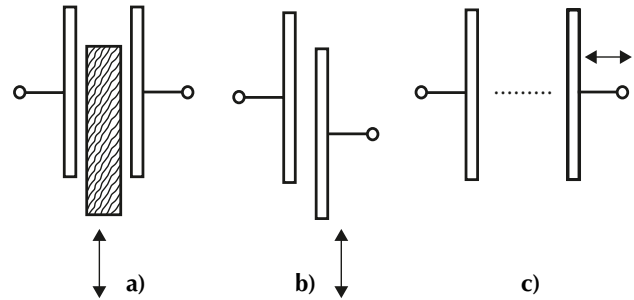


Figura C7.4 Variazione della capacità di un condensatore piano: a) variazione della permittività; b) variazione dell'area affacciata tra le due armature; c) variazione della distanza tra le armature.

Per un condensatore costituito da due armature piane e parallele di area S , separate da un dielettrico avente costante dielettrica (o permittività elettrica) ϵ e spessore d (condensatore piano), la capacità vale:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (7.1)$$

Dalla relazione C7.1 appare evidente che la variazione della capacità del condensatore può essere ottenuta variando:

- la permittività, ovvero la posizione del materiale dielettrico entro le armature [**fig. C7.4a**];
- l'area affacciata tra due armature [**fig. C7.4b**];
- la distanza tra le due armature [**fig. C7.4c**].

Nella **figura C7.5** è mostrato lo schema di principio di un trasduttore di prossimità capacitivo.

Si può osservare che lo schema di **figura C7.5** è simile quello di **figura C7.1** relativo a un trasduttore di prossimità induttivo (attivo): la differenza sostanziale è che l'oscillatore non è connesso al solenoide e il suo circuito oscillante è costituito da un'induttanza L collegata a una superficie metallica piana [**fig. C7.6a**], detta **superficie sensibile**.

In assenza, di oggetti nelle vicinanze della son-

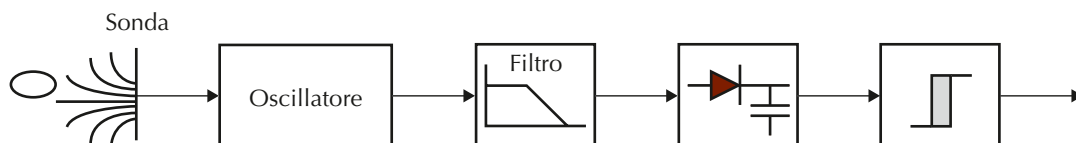


Figura C7.5 Schema di principio di un trasduttore di prossimità capacitivo.

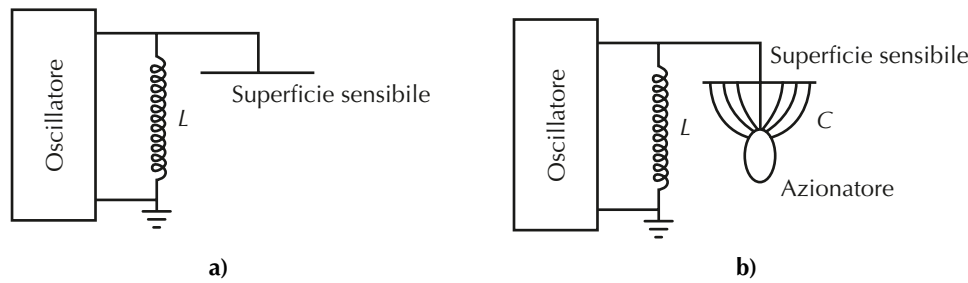


Figura C7.6 Principio di funzionamento del trasduttore di prossimità capacitivo: a) in assenza dell'azionatore non c'è la capacità C ; b) in presenza dell'azionatore si crea un condensatore di capacità C che insieme all'induttanza L genera l'innescò dell'oscillazione e quindi la rilevazione della sua presenza.

da, l'oscillatore è inibito poiché non è presente la capacità che, insieme all'induttanza L , genera e mantiene l'oscillazione (oscillatore LC).

Quando un oggetto conduttore (azionatore) si avvicina all'oscillatore, si crea un condensatore le cui armature sono costituite dalla superficie sensibile e dall'azionatore stesso [fig. C7.6b].

La capacità di tale condensatore dipende dalla distanza dell'azionatore dalla superficie sensibile: a una certa distanza, la capacità assume un valore che determina l'innescò dell'oscillatore, il quale si attiva generando in uscita una tensione sinusoidale.

Tale tensione viene filtrata, raddrizzata e inviata al trigger di Schmitt, la cui uscita commuta al livello alto quando il suo ingresso supera la soglia di riferimento, rilevando così la presenza dell'azionatore.

La presenza di un oggetto (di materiale metallico) nelle vicinanze del trasduttore costituisce, pertanto, l'armatura mancante del condensatore del circuito oscillante.

La variazione della capacità può essere anche ottenuta variando la permittività: in tal caso il circuito oscillante è costituito da un'induttanza L in parallelo a un condensatore piano ad armature fisse separate da un dielettrico mobile [fig. C7.7]: la variazione della posizione del dielettrico deter-

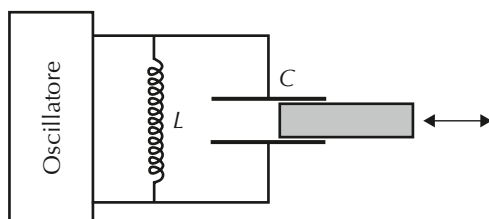


Figura C7.7 Variazioni della capacità dovute al dielettrico mobile.

mina la variazione della permittività del condensatore e quindi della capacità.

Questo principio viene utilizzato per realizzare i trasduttori di livello di un liquido contenuto all'interno di un serbatoio: in tal caso quando il liquido, che funge da dielettrico, raggiunge un determinato livello, la capacità del condensatore assume un valore tale che, insieme all'induttanza L , provoca l'innescò dell'oscillatore [fig. C7.8], segnalando così il raggiungimento del livello.

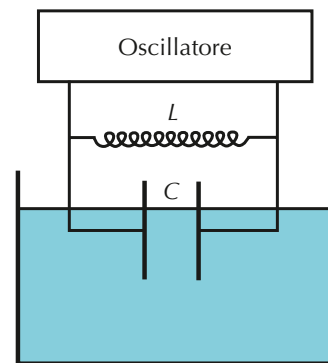


Figura C7.8 Principio di funzionamento di un trasduttore di livello: quando il livello del liquido raggiunge un determinato valore avviene l'innescò dell'oscillatore.

C7.4 Trasduttori di prossimità optoelettronici

I sensori di prossimità optoelettronici si basano sull'effetto fotoelettrico, cioè nell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica, quando viene investita da una radiazione luminosa: l'energia incidente della radiazione viene assorbita, sotto forma di energia cinetica, dagli elettroni colpiti, che conseguentemente iniziano

a vibrare all'interno della struttura cristallina del metallo.

Se tale energia è sufficiente a rompere i legami che li vincolano ai propri nuclei, essi si liberano nello spazio circostante.

È da osservare che l'effetto fotoelettrico non si verifica soltanto nei metalli, nei quali il fenomeno è molto evidente, ma anche nei semiconduttori, nei quali prende il nome di **effetto fotoconduttivo**.

Gli importanti risultati ottenuti dallo studio dell'effetto fotoelettrico possono essere riassunti in tre punti fondamentali:

- si ha emissione fotoelettrica solo se la frequenza della radiazione incidente è superiore a un determinato valore;
- l'energia cinetica degli elettroni emessi dipende dalla frequenza della radiazione incidente e non dalla sua intensità;
- il numero degli elettroni emessi per unità di tempo aumenta all'aumentare dell'intensità della radiazione elettromagnetica incidente.

Einstein riuscì a spiegare tale fenomeno ipotizzando che l'energia dell'onda luminosa non è continua, ma concentrata in pacchetti discreti chiamati **fotoni**, la cui energia dipende dalla frequenza dell'onda secondo la relazione:

$$E = h\nu \quad (7.2)$$

dove h è la costante di Planck pari a $6,63 \cdot 10^{-34}$ joule·s e ν la frequenza della radiazione emessa.

Con tale ipotesi, l'energia cinetica E_c acquistata dagli elettroni è uguale a quella ceduta dai fotoni, cioè:

$$E_c = h\nu - w_0 \quad (7.3)$$

in cui w_0 rappresenta l'energia di estrazione, ovvero l'energia necessaria per liberare gli elettroni dai loro legami con i rispettivi nuclei.

Dalla C7.3 ponendo $w_0 = h\nu_0$ si ottiene che la frequenza ν della radiazione incidente deve essere maggiore di $\nu_0 = w_0/h$.

Ciò significa che ν_0 rappresenta la frequenza minima della radiazione necessaria per estrarre un elettrone dal metallo: tale frequenza prende il nome di **soglia fotoelettrica**.

L'intensità del raggio incidente determina, invece, il numero degli elettroni che riescono a superare i legami con i nuclei: più sono i fotoni incidenti, più elettroni sono emessi dal metallo.

Cellula fotoelettrica

L'effetto fotoelettrico trova immediata applicazione nella **cellula fotoelettrica**, uno dei più importanti dispositivi per la rilevazione della luce e della sua intensità, che costituisce l'elemento base dei sistemi di trasduzione optoelettronici di prossimità. Fondamentalmente una cellula fotoelettrica è costituita da un involucro sotto vuoto (o contenente gas inerte), sul quale incide la radiazione luminosa L , all'interno del quale sono disposti due elettrodi: l'**anodo** (indicato con A), collegato al polo positivo di un generatore di corrente continua E , e il **catodo** (indicato con K), costituito o rivestito da sostanze fotosensibili e collegato al polo negativo, come mostrato in **figura C7.9**.

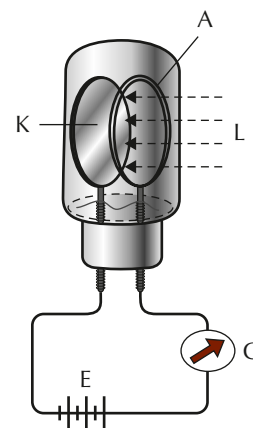


Figura C7.9 Struttura di principio di una fotocellula.

Il **galvanometro** G consente di misurare correnti anche di debole intensità.

Quando il catodo K viene illuminato dalla radiazione L , per l'effetto fotoelettrico emette elettroni, i quali sono attratti dall'anodo A , avente carica positiva: nel circuito in cui è inserita la cellula fotoelettrica, si crea allora una corrente elettrica, avente intensità proporzionale a quella dell'illuminazione. Interponendo un ostacolo tra la sorgente luminosa e il catodo, quest'ultimo non è più raggiunto dal fascio luminoso e quindi non emette più elettroni, provocando l'interruzione della corrente.

Su tale principio si basa il funzionamento dei trasduttori di prossimità optoelettronici, che consentono di rilevare la presenza di oggetti di qualsiasi materiale, semplicemente interrompendo un raggio luminoso.

Normalmente è impiegato un fascio di raggi infrarossi, in quanto tale radiazione difficilmente interferisce con i disturbi generati da altre fonti luminose. In generale un trasduttore di prossimità optoelettronico è composto da una sorgente luminosa,

detta **emettitore** (generalmente costituita da un LED), e da un **ricevitore** ottico, costituito da una fotocellula, in grado di rivelare il raggio luminoso emesso dal primo.

Quando il fascio luminoso, generato dall'emettitore e rilevato dalla fotocellula, viene interrotto da un oggetto qualsiasi che si interpone tra loro, la sua uscita cambia stato logico rilevando così l'oggetto che ha provocato l'interruzione.

Naturalmente, affinché la fotocellula possa rilevare il raggio luminoso, deve essere perfettamente allineata con l'emettitore.

Classificazioni dei trasduttori optoelettronici

I trasduttori di prossimità optoelettronici possono essere classificati in tre categorie:

- **trasduttori a barriera;**
- **trasduttori a riflessione;**

Nei trasduttori a barriera l'emettitore e il ricevitore (fotocellula) sono separati, come mostrato nella **figura C7.10**. Qualunque oggetto non trasparente interposto tra loro interrompe il raggio luminoso e viene pertanto rilevato; questo tipo di trasduttore è generalmente impiegato quando sono richieste elevate distanze da coprire (anche dell'ordine di diversi metri).

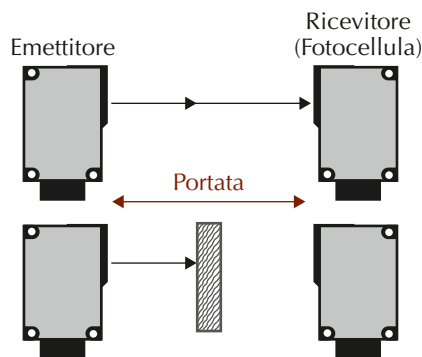


Figura C7.10 Trasduttori a barriera.

Nei sistemi a riflessione, utilizzati per medie distanze di copertura (uno, massimo due metri), l'emettitore e il ricevitore sono integrati nello stesso contenitore; il riflettore prismatico che riflette il raggio trasmesso verso il ricevitore è posizionato di fronte all'elemento fotoelettrico, come mostrato in **figura C7.11**, anche in questo caso a ogni interruzione/ripristino del raggio luminoso cambia lo stato dell'uscita.

Nella **figura C7.12** sono infine mostrate le due tipologie di trasduttori.

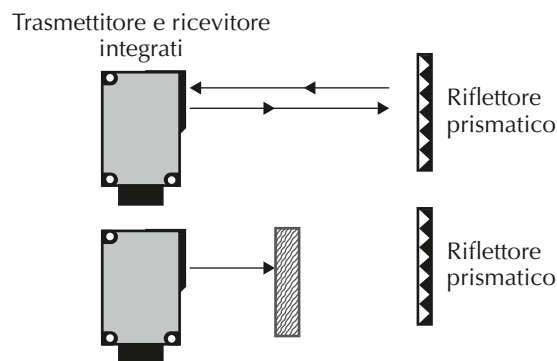


Figura C7.11 Trasduttori a riflessione.



Figura C7.12 Fotocellula a barriera (a) e fotocellula a riflessione (b).

C7.5 Trasduttori a ultrasuoni

I trasduttori di prossimità a ultrasuoni sono basati sul fenomeno della riflessione del suono: essi, infatti, emettono impulsi nella gamma degli ultrasuoni e rilevano l'eventuale eco di ritorno generato dalla presenza di un oggetto all'interno della portata nominale.

Come mostrato nella **figura C7.13**, la distanza e quindi la presenza di un oggetto viene determinata inviando un treno di impulsi acustici a frequenze superiori alla gamma udibile (oltre 20 kHz) e analizzando il tempo di ritardo nella ricezione degli impulsi riflessi.

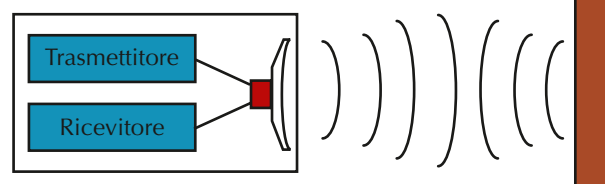


Figura C7.13 Schema di principio di un trasduttore a ultrasuoni.

Nota la velocità di propagazione delle onde acustiche V_c e l'angolo θ tra la direzione di propagazione e la perpendicolare alla superficie riflettente (*angolo di incidenza*), la relazione che lega la distanza al tempo di ritardo T_r è la seguente:

$$d = \frac{1}{2} V_c T_r \cos \theta \quad (7.4)$$

Se l'oggetto è sufficientemente distante dalla coppia emettitore/ricevitore l'angolo di incidenza è prossimo allo zero ($\cos \theta \approx 1$).

C7.6 Trasduttori di prossimità magnetici

I trasduttori di prossimità magnetici funzionano rilevando il campo magnetico generato da un magnete permanente appositamente posizionato sull'oggetto da rilevare; sono basati sul principio dei **contatti Reed** e sull'**effetto Hall**.

Trasduttori di prossimità a contatto Reed

Fondamentalmente il contatto Reed è un interruttore a lamina che si chiude in presenza di un campo magnetico.

Nella forma più semplice è costituito da due lamine, realizzate con materiale ferromagnetico, parzialmente sovrapposte e separate da qualche decimo di millimetro [fig. C7.14]; sulle lamine contrapposte sono riportati dei contatti, generalmente in oro diffuso.

Ampolla sotto vuoto

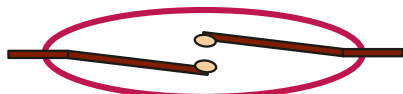


Figura C7.14 Schema di principio di un contatto Reed.

Le lamine vengono sigillate all'interno di un piccolo contenitore di vetro riempito di gas inerte (azoto o argon); le estremità delle lamine (opposte ai contatti) che fuoriescono dal contenitore costituiscono i terminali del contatto.

Il campo magnetico generato dal magnete permanente applicato all'oggetto da rilevare, induce sulle due lamine polarità magnetiche di segno opposto, che pertanto tendono ad attrarsi: se il campo magnetico è sufficientemente elevato, la forza d'attrazione supera la resistenza alla flessione delle lamine, che così chiudono il circuito elettrico nel quale sono inserite [fig. C7.15].

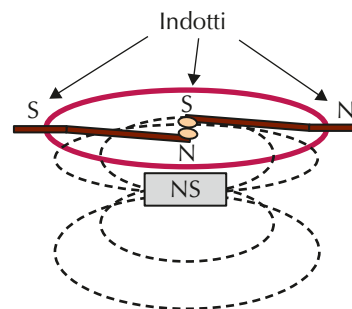


Figura C7.15 Induzione dei poli opposti e chiusura del contatto Reed.

Essendo il funzionamento del trasduttore basato sull'elasticità delle lamine, il tempo medio di vita del dispositivo non è molto elevato (circa 10^8 operazioni).

Inoltre, occorre tener presente i livelli di tensione e corrente del circuito nel quale il contatto Reed è inserito, in quanto, nel caso superino i valori di funzionamento stabiliti, possono provocare l'incollamento dei contatti che rende il dispositivo non più utilizzabile.

Sono infine da considerare gli effetti di rimbalzo in seguito alla chiusura del contatto, che possono limitare la frequenza di funzionamento.

Rispetto ai contatti tradizionali ad azionamento meccanico il contatto Reed presenta i seguenti vantaggi:

- la chiusura ermetica protegge i contatti dalla polvere, dall'ossidazione e dalla corrosione;
- l'azionamento dei contatti è molto semplice (non sono presenti meccanismi) in quanto avviene mediante un campo magnetico;
- velocità di funzionamento fino a 300 Hz e breve tempo di attrazione (1,5 – 3 m/s compresi i rimbalzi);
- assenza di manutenzione e ingombro limitato.

Trasduttori di prossimità a effetto Hall

Il campo magnetico generato dal magnete permanente posizionato sull'oggetto da controllare può essere rilevato anche da un trasduttore a effetto Hall (unità C6), il quale genera una tensione V_H che dipende dall'intensità del campo magnetico e che decresce (secondo una relazione non lineare) con l'aumentare della distanza del magnete dal trasduttore.

Se tale tensione pilota un rivelatore di soglia con isteresi (**Schmitt Trigger**), all'uscita di quest'ultimo si ha un segnale di livello alto nel caso il trasduttore arrivi entro la zona di azionamento, di basso livello in caso contrario.