

## Evoluzione del trasformatore differenziale a variazione lineare

Il trasformatore differenziale a variazione lineare (LVDT), descritto brevemente in precedenza, basato comparativa sulla Tabella 2.1, può essere considerato un ottimo elemento trasduttore per parecchi sistemi di misura. Per questa ragione vale la pena conoscere lo sviluppo dell' LDVT e verificarne anche l'attuale stato dell'arte.

### Storia recente dello sviluppo dell' LVDT

L' LVDT è stato usato come dispositivo di controllo elettrico da circa 100 anni. Per esempio il brevetto U.S. Patent 808,944 (Porte & Currier, 2 Gennaio 1906.) descrive l'uso di un trasformatore differenziale variabile come un dispositivo di inversione senza contatto di un motore AC. Il circuito, mostrato in Fig.3.1, ha un avvolgimento di un motore a induzione a due fasi connesso ad un paio di secondari connessi in differenziale. L'eccitazione originale per quell'avvolgimento del motore è collegata al primario del trasformatore differenziale. Il nucleo mobile è accoppiato ad una leva. L'altro avvolgimento del motore è connesso alla propria usuale sorgente di alimentazione.

C'è una inversione di fase di  $180^\circ$  della tensione di uscita dal trasformatore differenziale come il nucleo passa per il centro. Questo cambiamento di fase modifica la fase relativa tra gli avvolgimenti del motore di  $180^\circ$ , provocando l'inversione del senso di rotazione del motore. L'ampiezza della tensione applicata all'avvolgimento controllato del motore è, naturalmente, determinata dalla posizione del nucleo. La rotazione del motore si inverte senza contatti, evitando i conseguenti archi o scintille. Questo tipo di trasformatore differenziale deve essere grande e forte per adattarsi alla potenza richiesta del motore elettrico, così da soddisfare i requisiti dei sistemi di misura. Tuttavia, è storicamente importante, perché usa un nucleo mobile magnetico e coassiale per variare l'accoppiamento, e quindi la mutua induttanza dei secondi riposti simmetricamente, con il risultato di un'uscita differenziale con reversibilità di fase che varia in funzione della posizione del nucleo. Questa caratteristica lo fa diventare il diretto antenato del moderno LVDT e lo differenzia dai dispositivi a riluttanza variabile come il sensore tipo "E" descritto nel capitolo precedente.

### Il primo trasduttore a trasformatore differenziale

Fino al 1930 circa, il trasformatore differenziale variabile rimase nell'oscurità semplicemente perché la necessità di dispositivi elettromeccanici che

misurassero lo spostamento era minima. Ma la crescita delle industrie di processo chimico nel tardo 1920 ed agli inizi del 1930 indussero i costruttori di controllo di processo ad interessarsi ad un sistema elettrico telemetrico per ottenere indicazioni a distanza delle variabili di processo. La ricerca di un adeguato elemento per trasduttore generò un rinnovato interesse per i trasformatori differenziali variabili. Il risultato fu lo sviluppo di un trasduttore come descritto nel brevetto U.S. Patent 2.050.629 (Quereau & Williams- 11 Agosto 1936).

Un disegno semplificato di un "dispositivo telemetrico di pressione" (trasduttore) è mostrato nella Fig. 3.2.

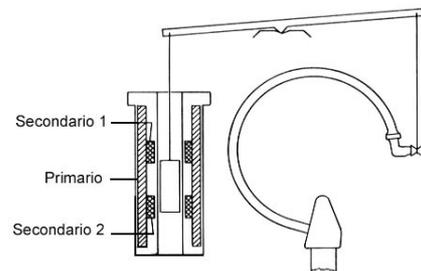


Fig. 3.2 Brevetto Quereau & Williams (semplificato), il primo trasduttore con trasformatore differenziale variabile.

Esso consiste in un tubo di Bourdon che è l'elemento sensibile alla pressione connesso tramite una leva ad un trasformatore differenziale montato verticalmente. Le variazioni di pressione espandono il tubo modificando tramite il leverismo la posizione del nucleo del trasformatore variabile differenziale. L'uscita differenziale è connessa ad un indicatore di "zero" (galvanometro AC) ed un potenziometro a filo su un vetrino usato come un voltmetro potenziometrico. In questo modo, la posizione del cursore del potenziometro può essere calibrata per i valori della pressione applicata. Questo era presumibilmente il primo trasduttore di pressione commerciale che utilizzava un trasformatore differenziale variabile.

### Il primo trasformatore differenziale a variazione lineare

Fino a questo punto non si è mai accennato al termine "lineare" in unione al trasformatore differenziale variabile. Sebbene questa proprietà fosse già stata sospettata o anche utilizzata, non c'era alcunché di scritto che attribuisse questa proprietà ad un trasformatore differenziale variabile fino al 1936. A quell'epoca, il Sig. G. B. Hoadley presentò un brevetto su un argomento che può essere meglio descritto come "trasformatore differenziale a riluttanza variabile con nucleo coassiale" Questo era un ibrido tra un sensore tipo

E ed un LVDT. In questa applicazione brevettata (U.S. Patent 2.196.809-1 Aprile 1940) il Sig. Hoadley descrisse il campo lineare del nucleo in movimento e presentò una registrazione dell'ampiezza d'uscita e dell'angolo di fase in funzione della posizione del nucleo

### Gli sviluppi del moderno LVDT

All'inizio della 2° Guerra Mondiale, l' LVDT era stato accettato, in generale, come elemento di trasduzione nella strumentazione industriale di processo e nei controlli. La richiesta di impiego era come indicatore della posizione meccanica di "zero" nei sistemi di controllo elettromeccanici a circuito chiuso a bordo di aerei e sottomarini. L'elemento LVDT trovò impiego negli equipaggi di prova per l'assicurazione di qualità. Ancora, nonostante l'aumento di applicazioni per l' LVDT dalla fine della guerra, solo un numero relativamente piccolo di tecnologi della strumentazione aveva conoscenza del funzionamento, delle proprietà e caratteristiche dell'LVDT. Per rimediare a questa situazione e mettere l' LVDT nella giusta luce per un ampio segmento di progettisti, il Dott. Herman Schaevitz pubblicò "*The Linear Variable Differential Transducer*" nel 1946 (Procedimento del SESA, Volume V, n°2). Questo documento diventò una pietra miliare nella storia dell'LVDT, non solo perché per la prima volta raccoglieva informazioni applicative, ma anche perché i potenziali utilizzatori si rendevano conto che l' LVDT era disponibile come prodotto commerciale. Prima di allora la maggior parte degli LVDT erano costruiti dalle ditte di controllo di processo per le loro esclusiva strumentazione.

### LVDT risonante

Al tempo della pubblicazione di queste note, il Dott. Herman Schaevitz continuava il suo lavoro di sviluppo sugli LVDT. Uno sviluppo interessante in quel periodo fu il trasformatore differenziale descritto nel brevetto U.S. Patent 2.461.238 (Schaevitz, 8 Febbraio 1949). In questo dispositivo le bobine secondarie erano avvolte in maniera che la capacità distribuita delle bobine fosse aumentata notevolmente. La capacità così incrementata modifica l'impedenza delle bobine e permette una risonanza parziale ad una frequenza di eccitazione relativamente bassa. Il risultato è una tensione di uscita eccezionalmente alta come mostrato nella curva di tensione uscita - posizione del nucleo di Fig. 3.3.

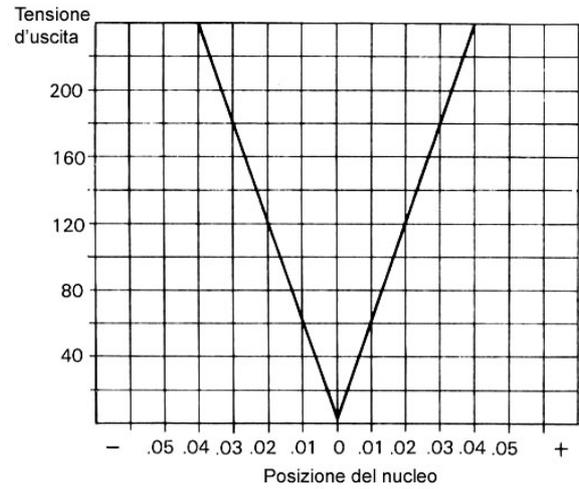


Fig.3.3 Caratteristica di uscita di un LVDT a risonanza.

Il dispositivo è oggi solo di interesse storico perché i moderni condizionatori di segnale ad alto guadagno escludono la necessità di una uscita elevata del trasduttore.

### Trasformatore differenziale a variazione rotante

Un altro importante dispositivo sviluppato dal Dott. Herman Schaevitz nel dopo guerra fu il trasformatore differenziale a variazione angolare RVDT (U.S. Patent 2.494.493 Schaevitz-10 Gennaio 1950). Come illustrato in Fig. 3.4, il cuore di questo dispositivo è un nucleo magnetico a forma di camma impernato su un albero al centro della bobina.

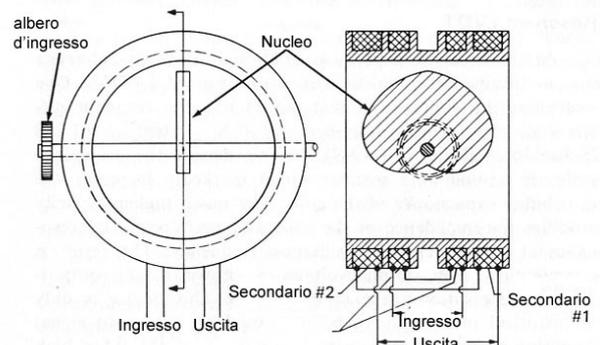


Fig. 3.4 Trasformatore differenziale a variazione angolare (RVDT)

La bobina è formata da due avvolgimenti identici distanziati simmetricamente sotto e sopra la mezzaria dell'albero. Questo dispositivo reagisce alla posizione angolare, come l'LVDT reagisce alla posizione lineare d'ingresso. Il campo massimo è di circa  $\pm 60^\circ$  come mostrato nella Fig. 3.5.



fig. 3.5 Caratteristica d'uscita di un RVDT

L'RVDT è descritto più ampiamente in un altro capitolo.

### Miglioramenti del progetto LVDT

L'interesse negli LVDT dovuto alle pubblicazioni del Dott. Herman Schaevitz, menzionate precedentemente non era limitato solo agli utilizzatori. Altri costruttori riconobbero il potenziale dell'LVDT. Questa consapevolezza sfociò in progetti e tecniche di avvolgimento alternativi per LVDT. Il principale miglioramento progettuale fu descritto dal Sig. W. D. MacGeorge nel brevetto U.S. Patent 2.427.866 (23 Settembre 1097). Questo schema divenne il modello di costruzione di base per i moderni LVDT fig.3.5.

Il brevetto del Sig. MacGeorge copre in particolare gli LVDT avvolti con secondari uguali, simmetricamente spazati con il primario al centro su un unico supporto. Il nucleo è più lungo dell'avvolgimento primario. Schemi più recenti hanno il primario avvolto sopra i secondari e viceversa, in funzione della linearità e della fase tra primario e secondario. Durante il 1950, gli ulteriori miglioramenti, seppur minimi, vennero fatti sugli LVDT, principalmente nell'utilizzo dei materiali da costruzione. Tuttavia molti importanti tentativi di miglioramento portarono a cambiamenti significativi nelle prestazioni. Per esempio, i tentativi di migliorare la simmetria dell'avvolgimento primario usando una bobina avvolta bifilarmente risulta una eccessiva capacità tra primario e secondario con corrispondente limitazione della frequenza di eccitazione. Ancora, tentando di migliorare la linearità modificando il percorso magnetico generalmente significa che il nucleo non dovrebbe ruotare sul suo asse.

### LVDT con un terzo avvolgimento

Uno sviluppo di interesse storico fu l'uso di un avvolgimento secondario addizionale per spostare lo "zero" dell'LVDT. (U.S. Patent 2.985.854, Brosh, 23 Maggio 1961). Questa tecnica era

particolarmente utile in misurazioni di spostamenti molto lunghi dove il campo di misura è ristretto ad una sola direzione rispetto allo "zero" Fig. 3.6.

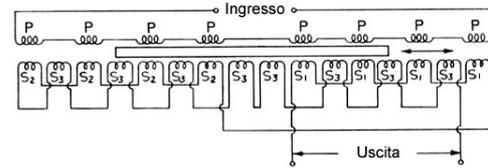
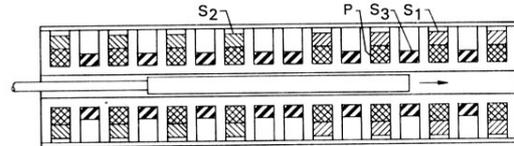


Fig. 3.6 Fotografia (in alto), sezione (in mezzo) e diagramma schematico (sotto) di un LVDT con avvolgimento multiplo.

La tensione nell'avvolgimento addizionale era in fase per sovrapporsi alla tensione differenziale del secondario che in ogni caso doveva svilupparsi alla fine della corsa. Questo fine diventa il punto "zero" e l'ampiezza dell'uscita aumenta come il nucleo si muove verso l'interno, raggiungendo il massimo dall'altra parte della corsa usuale.

L'LVDT con corsa lunga, Fig. 3.6, funziona con questo principio eccetto che vengono usate parecchie bobine interconnesse tra loro per fare ogni avvolgimento. Tutte queste bobine distribuiscono il flusso magnetico lungo la lunghezza del supporto permettendo l'uso di un lungo nucleo. Questo schema mantiene la linearità che altrimenti sarebbe persa se fosse usata una singola bobina ed un lungo nucleo.

### LVDT con avvolgimento rastremato

Benché l'LVDT a lunga corsa descritto nel precedente paragrafo sia storicamente interessante, esso soffre di molte limitazioni. Una è che il nucleo ed il trasformatore devono avere dimensioni troppo lunghe. Un'altra è che il trasformatore diventa più sensibile alla temperatura. Oggi, la proprietà che si desidera è un buon rapporto tra corsa e lunghezza del nucleo. Questo può essere raggiunto usando un avvolgimento che va rastremandosi come descritto dal Sig. J. Lipshutz nel brevetto U.S. Patent 3.054.976 (18 settembre 1962).

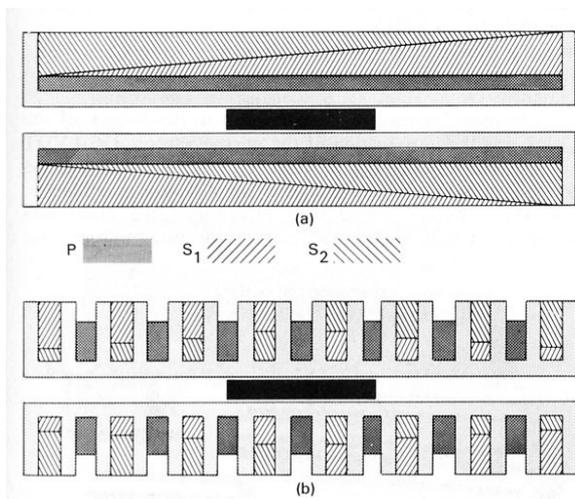


Fig. 3.7 LVDT a corsa lunga con avvolgimento che decresce gradualmente (sopra) ed avvolgimento complementare che decresce gradualmente (sotto)

La Fig.3 mostra il concetto di questo tipo di avvolgimento. In un LVDT convenzionale, lo spostamento massimo del nucleo per un funzionamento Fig.3.7 lineare è raggiunto quando il nucleo comincia a muoversi fuori dal percorso magnetico di accoppiamento di uno o dell'altro degli avvolgimenti secondari. L'avvolgimento rastremato evita questo problema prevedendo un percorso magnetico di accoppiamento tra il primario ed entrambi i secondari ovunque il nucleo sia mosso lungo l'intera lunghezza del supporto della bobina. Per fare in modo che l'uscita in tensione "zero" corrisponda al centro meccanico del supporto della bobina, è utilizzata la tecnica di Fig.3.7. Questo provvede essenzialmente allo stesso grado di accoppiamento tra primario e l'uno o l'altro dei secondari quando il nucleo è centrato. Ciò minimizza anche l'eccessiva perdita di flusso e le capacità tra gli avvolgimenti con il risultato di un migliore funzionamento nel campo lineare. In pratica, il funzionamento lineare è possibile praticamente fino all'80% della lunghezza del trasformatore. Questo rappresenta un rapporto corsa - lunghezza di 0,8 comparato ad un rapporto corsa - lunghezza dello 0,3 di alcuni trasformatori avvolti convenzionalmente. Quindi, questa tecnica rappresenta un avanzamento significativo nello sviluppo dell' LVDT.

### LVDT con funzionamento in DC

Il più recente sviluppo nella storia dell' LVDT è stato introdotto nel 1966 dalla Schaevitz Engineering con l'utilizzo del condizionatore - amplificatore all'interno del corpo dell'LVDT. Sappiamo che questi trasduttori necessitano di un oscillatore, un amplificatore a frequenza portante, un demodulatore e dei filtri. Il tentativo di incorporare un'elettronica nell' LVDT fu per molto tempo un insuccesso a causa delle dimensioni, della bassa affidabilità e delle insoddisfacenti prestazioni

dei circuiti. Il Dott. Schaevitz combinò con successo un condizionatore di segnale a film sottile contenente tutta la necessaria elettronica inseribile direttamente nel corpo dell' LVDT- AC. Questo dispositivo è mostrato in Fig. 3.8 con il suo circuito in tecnica microelettronica provvede a tutte le desiderate specifiche dell'LVDT.

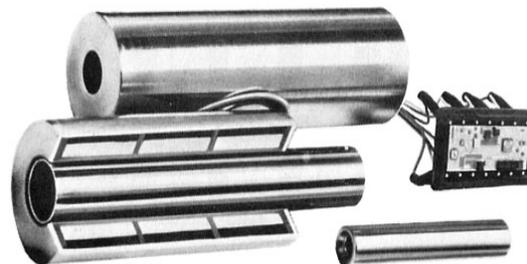


Fig. 3.8 LVDT-DC con il suo modulo miniaturizzato di condizionamento

La microelettronica affidabile e la semplicità di un funzionamento in DC fanno di questo tipo di trasduttore un elemento di forma compatta ed economica con specifiche generalmente attribuite ad altri trasduttori come il potenziometro resistivo e gli estensimetri piezoresistivi. Il trasduttore LVDT-DC è discusso in dettaglio in un altro Capitolo.

### Il moderno LVDT

La sezione di un moderno LVDT- AC è mostrata in Fig. 3.9. Il trasformatore consiste di tre bobine simmetricamente spaziate attentamente avvolte su un rocchetto isolato. I fili di connessione escono da una apertura praticata nello schermo esterno, generalmente in uno dei fondelli terminali. Uno schermo cilindrico in materiale ferromagnetico è sovrapposto alle rondelle metalliche terminali dopo che gli avvolgimenti sono stati impregnati sotto vuoto con un composto conservante adatto per le condizioni ambientali di lavoro. Il trasformatore terminato è dopo questo trattamento abbastanza impenetrabile all'umidità o all'influenza di normali campi magnetici esterni. Questa tecnica costruttiva Fig.3.9 rende il dispositivo estremamente robusto ed affidabile.

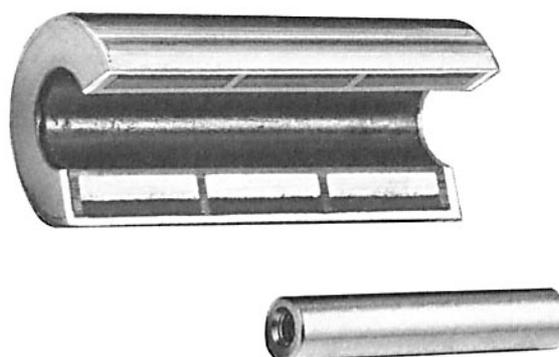


Fig. 3.9 Fotografia della sezione di un LVDT-AC

Il nucleo di un moderno LVDT è costituito da un cilindro pieno di una lega di nichel - ferro accuratamente temperata per migliorare ed omogeneizzare la propria permeabilità magnetica. Il nucleo è generalmente filettato internamente così da permettere un conveniente accoppiamento all'attuatore esterno. I moderni LVDT sono costruiti in una varietà di dimensioni e configurazioni, alcune delle quali sono mostrate in Fig. 3.10 per soddisfare le richieste di misurazioni e di condizioni ambientali per la maggior parte delle applicazioni, incluse:

- applicazioni convenzionali
- applicazioni in spazio ridotto o miniatura
- applicazioni speciali o sub - miniatura
- applicazioni dove necessita un foro passante di grande diametro
- applicazioni con lunghi spostamenti fig..3.10

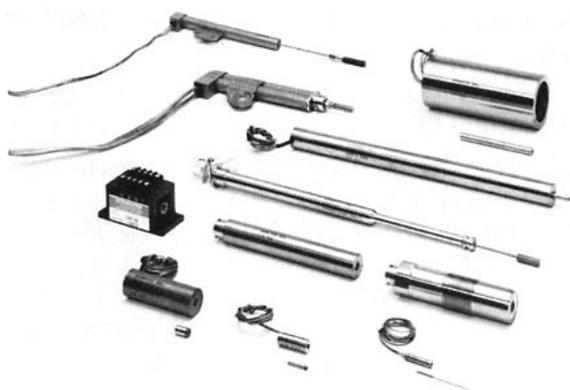


Fig. 3.10 Varie dimensioni e forme di LVDT

Gli LVDT convenzionali sono costruiti nelle configurazioni non sigillate, o sigillati alla pressione o ermeticamente sigillati per funzionare in molte condizioni ambientali, incluso:

- industriale e militare
- industriale gravoso
- fluido od atmosfera corrosiva
- temperature criogeniche
- alte temperature
- radiazioni nucleari
- alte temperature e radiazioni nucleari

I particolari modelli sono discussi in un altro capitolo.

### Caratteristiche salienti dell' LVDT

L'LVDT ha molte caratteristiche di rilievo che lo rendono utile per una vasta gamma di applicazioni.. Alcune di queste caratteristiche sono uniche per l'LVDT e non sono disponibili in alcun altro trasduttore. Queste caratteristiche provengono dal fatto che l' LVDT è un trasformatore elettrico con un nucleo separato privo di contatto.

### Misurazioni senza contatto

Di solito, non c'è contatto fisico tra il nucleo e la struttura della bobina, il che significa che l' LVDT è un dispositivo senza frizione. Questo permette il suo uso in misurazioni critiche che possono tollerare l'aggiunta della piccola massa del nucleo ma non possono sopportare un carico dovuto alla frizione. Due esempi di qualche applicazione sono la deflessione dinamica o prove di vibrazione di materiali delicati e prove di allungamento o slittamento su fibre o altri materiali elastici.

### Vita meccanica infinita

L'assenza di frizione e contatto tra la bobina ed il nucleo di un LVDT significa che non c'è alcun logorio. Ciò permette di considerare l' LVDT come un trasduttore dalla vita essenzialmente infinita. Questa è la richiesta più significativa in applicazioni come la prova a fatica di materiali e strutture. La vita meccanica infinita è importante anche in meccanismi e sistemi ad alta affidabilità in campo avionico, missilistico, nei veicoli spaziali e in critici equipaggiamenti industriali.

### Separazione del nucleo e della bobina

La separazione tra il nucleo e la bobina dell' LVDT permette l'isolamento di un media come può essere un fluido pressurizzato, corrosivo o caustico dall'assemblaggio della bobina tramite una barriera non magnetica interposta tra il nucleo e la parte interna della bobina eliminando la necessità di un sigillante "dinamico" sulla parte mobile. Solo un sigillante "statico" è necessario per sigillare l'assemblaggio della bobina all'interno di un sistema pressurizzato. Una applicazione abbastanza comune con questa caratteristica è nella strumentazione di misura che richiede un trasduttore flottante come nei rotometri, densimetri e rilevatori di livello dove il nucleo è parte integrante con il fluido ed è isolato dalla bobina da un tubo di vetro o metallico non magnetico. Un'altra applicazione tipica è l'utilizzo dell' LVDT nei sistemi di controllo di servovalvole ed attuatori di sistemi a circuito chiuso idraulici o pneumatici.

### Risoluzione infinita

Il funzionamento senza frizione dell' LVDT combinato con il principio dell'induzione su cui l' LVDT funziona dà ad esso due rilevanti caratteristiche. La prima è una vera risoluzione infinita. Questo significa che l' LVDT può rispondere al più piccolo movimento del nucleo e produce un' uscita. La limitazione di leggibilità di questo segnale è rappresentata dai dispositivi esterni di lettura.

### **Ripetibilità dello “zero”**

La costruzione simmetrica di un LVDT produce un'altra caratteristica, la ripetibilità dello “zero”. La posizione di “zero” di un LVDT è estremamente stabile e ripetibile. Allora l' LVDT può essere utilizzato come un eccellente indicatore di posizione “zero” nei sistemi a circuito chiuso e ad alto guadagno. È anche utile nei sistemi a rapporto dove l'uscita “zero” risultante è proporzionale a due variabili indipendenti.

### **Isolamento ingresso/uscita**

Il fatto che l' LVDT sia un trasformatore significa che c'è un completo isolamento tra l'eccitazione d'ingresso (primario) e le uscite (secondarie). L' LVDT pertanto non necessita di un amplificatore intermedio a questo scopo. Inoltre facilita l'isolamento del segnale e dell'eccitazione dalla terra in misurazioni ad alte prestazioni nei sistemi di controllo ad “anello chiuso”.

### **Reiezione di cross-axis**

La sensibilità dell' LVDT è predominante al movimento assiale del nucleo. Però la relativa insensibilità al movimento perpendicolare può essere utilizzata per certe applicazioni. Per esempio, le componenti su tre assi di un punto che si muove in relazione ad un punto di riferimento possono essere determinate usando tre LVDT a foro largo fissati perpendicolarmente tra di loro avendo la precauzione che il foro passante dell' LVDT sia più grande dei movimenti trasversali.

La precedente discussione dell' LVDT con le sue caratteristiche uniche sono state puramente descrittive. Un'analisi matematica completa del suo funzionamento è contenuta in un'appendice.

Dott. Edward E. Herceg Handbook of Measurement and Control  
Traduzione. DSPM Industria Milano