

Gli accelerometri con il circuito di auto test.

La possibilità di provare i sensori in campo senza doverli rimuovere è un modo apprezzato per assicurare una ulteriore affidabilità del sensore. Questo articolo presenta un accelerometro piezoresistivo che offre questa caratteristica. Con questa soluzione tecnica si garantisce il controllo di funzionalità del trasduttore e la sua stabilità agli effetti termici. Una soluzione unica in un accelerometro piezoresistivo; questo approccio permette di provare il dispositivo tramite la deflessione elettrostatica della un massa gravitazionale. Questo rappresenta una nuova classe di trasduttori “ intelligenti” in quanto essi possono soddisfare la fase di ricalibrazione in campo, Altri esempi di questi trasduttori sono i servoaccelerometri impiegati in ambito militare per i sistemi inerziali. Un certo numero di vantaggi per il servoaccelerometro scaturiscono dalla molla a effetto pendolo della massa sismica che cambia la sua caratteristica con variazioni di temperatura che corrisponde poi a un segnale di polarizzazione sullo zero calibrato, lo stesso effetto causa variazioni dei coefficienti dell'elemento piezoresistivo. Le applicazioni della tecnica di auto-test sono la compensazione della temperatura, testabilità ed applicazioni unidirezionali di bilanciamento della forza.

Introduzione

Gli accelerometri piezoresistivi rappresentano nuove aree applicative e sorgono nuovi problemi. Storicamente, i sensori costruiti in silicio sono stati progettati per garantire la funzionalità 3 fino 5 volte il normale valore di fondo scala. Allora, un costruttore che produce un sensore da 1 bar dovrà stimare il dispositivo da 3 a 5 bar senza la rottura dello stesso. Per l'accelerazione, questo limite è restrittivo. È comune virtualmente per tutti i sensori fare esperienza con un'accelerazione di 300 a 400g, come ad esempio quando cadono da un tavolo. Per un accelerometro da 2g, questa caduta rappresenta una forza di 150 a 200 volte il suo fondo scala. I primi accelerometri al silicio non erano protetti contro questi urti ed allora erano considerati fragili e facilmente danneggiabili. In alcune applicazioni come armamenti militari, o lo scoppio dell' air-bag, l'accelerometro rappresenta il sensore primario e il suo guasto può minacciare la sicurezza dell'utilizzatore. In considerazione di queste condizioni, il preavviso di sensore guasto è una caratteristica vincolante. Due tipi di guasti sono possibili: il primo è che il dispositivo sia rotto a causa di un guasto elettronico e il secondo è che la massa sismica si sia danneggiata alterando il movimento della massa sismica. Il primo tipo di

guasto può essere rilevato misurando l'assorbimento e l'eventuale caduta di tensione sull'alimentazione e verificando il segnale di uscita. Nel secondo caso è sufficiente orientare l'accelerometro sull'asse verticale di gravità e misurare il segnale in uscita, mentre se lo stesso lo si posiziona con l'asse orizzontale si misurerà un segnale vicino allo zero se il posizionamento non sarà perfetto o un segnale di polarizzazione dato dal costruttore. Usando un'eccitazione elettrostatica tra la massa ed un elettrodo di riferimento fisso si determina una forza che movimentata la massa sismica che simula la variazione di posizione rispetto la gravità.

Progetto di un accelerometro

Gli attuali accelerometri piezoresistivi sono fabbricati usando una doppia trave, altri utilizzano la trave quadrupla in modo da eliminare flessioni ad effetto pendolo. La differenza nello spostamento nei riguardi dell'accelerazione sono rappresentati in Figura 1. La massa a doppia mensola a sbalzo si muove come un pistone quando sottoposta ad una accelerazione; questa struttura mantiene il parallelismo tra la superficie della massa e la superficie del telaio o struttura. La mensola a sbalzo singola funziona tipo un pendolo dove il centro della massa e la massa rigida oscilla lungo un arco. In queste condizioni, la mensola ad incastro doppiamente supportata, quando è sottoposta ad un carico laterale, ruoterà vicino al centro della massa muovendo un supporto verso l'alto ed un supporto verso il basso come mostrato in Figura 3. A causa dell'accoppiamento incrociato i resistori posizionati sulla struttura, ^{2,3} la struttura a doppio supporto visualizzerà un minimo segnale d'uscita di fuori asse. In contrapposizione, la struttura con supporto singolo produrrà un'uscita come il pendolo oscilla su e giù. È noto che questi effetti possono essere compensati allineando il centro di rotazione della mensola a sbalzo singola con il centro della massa [1, 4]. Tipicamente, per i dispositivi al silicio con la mensola a sbalzo, questo errore angolare va da 3° a 8°. Nessuna struttura è in grado di resistere ad una forza 200 volte superiore al proprio campo d'impiego. Per questo fatto, vari costruttori hanno cercato molteplici tecniche per prevenire i movimenti estremi. Per i dispositivi a mensola con doppio incastro, un blocco posta sopra la massa risolve il problema, come mostrato in Figura 4.

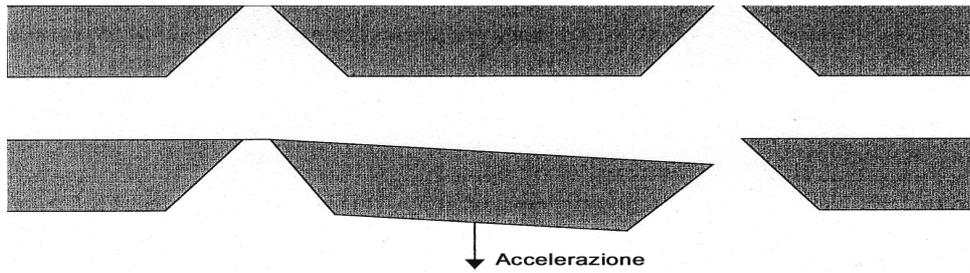


Fig.1 Sezione di un accelerometro a mensola singola senza sopra.

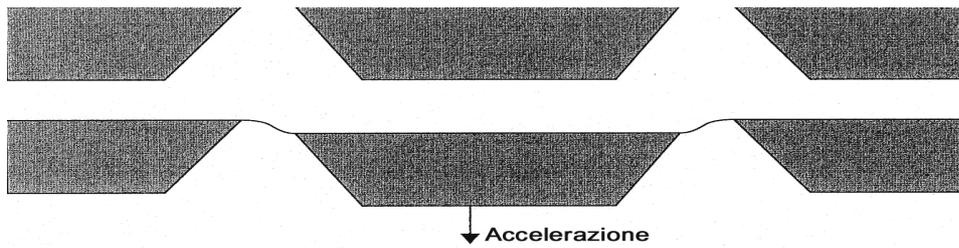


Fig. 2 Sezione di un accelerometro a trave con doppio incastro senza (sopra) e (sotto) accelerazione.

Questo sistema prevede dei fermi di blocco così come lo smorzamento viscoso ad aria; una serie di strette incisioni tra la massa e la struttura servirà anche a produrre un dispositivo con smorzamento ad aria. Delle coperture come quelle mostrate in

Fig. 4 hanno il vantaggio della sigillata e una garanzia di sigillatura all'inquinamento. Le strutture che non hanno alcuna copertura sono esposte sporizia al momento dell'assemblaggio.

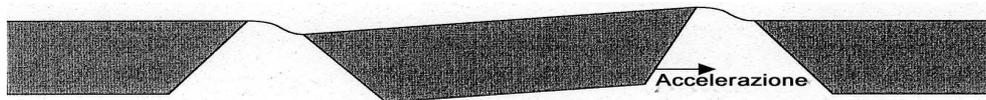


Fig. 3 Sezione di un accelerometro con trave a doppio supporto con applicata un'accelerazione trasversale.

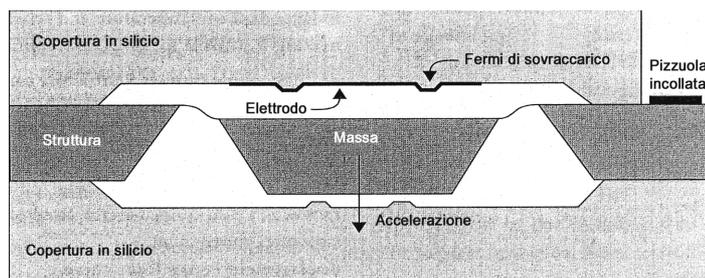


Fig. 4 Sezione di un accelerometro con copertura, blocchi meccanici a fondo scala ed elettrodo di auto test

Caratteristica del dispositivo

La caratteristica del dispositivo di auto test (diagnostica) interno provvede a due benefici. Il primo è che l'utilizzatore può confermare che la massa è libera di muoversi nelle condizioni di funzionamento; questo è una semplice prova di sicurezza. Il secondo dispositivo di prova interno provvede ad applicare una forza nota alla massa che non può essere distinta da una forza d'accelerazione. Di qui, usando questa forza elettrostatica, l'accelerometro può essere calibrato in temperatura e nel tempo.

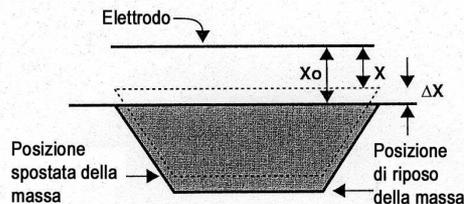


Fig. 5 Sezione del dispositivo di prova interno per il calcolo delle forze.

Deflessione elettrostatica

Il funzionamento dell'accelerometro è basato sulle equazioni dello spostamento semplice. La somma di tutte le forze che agiscono su una massa teorica è zero:

$$0 = m \cdot g \cdot 9,8 - F_{\text{elettrostatici}} \quad (1)$$

Dove: $m \cdot g$ è la forza d'accelerazione gravitazionale (accelerazione in g), $k_s(x_0 - x) = k_s \cdot \Delta x$ è la forza di ripristino prevista dalle molle, e $F_{\text{elettrostatica}}$ è la forza elettrostatica:

$$F_{\text{elettrostatica}} = 0,5 \pi e A (V/x)^2 \quad (2)$$

Dove V è la tensione applicata tra gli elettrodi, A è l'area dell'elettrodo, ed e è la costante dielettrica della media di smorzamento. Se la forza elettrostatica è uguale a zero, allora lo spostamento, Δx , è proporzionale all'accelerazione con la costante di proporzionalità uguale a m/k_s . Poiché la sollecitazione del trasduttore piezoresistivo nella molla e lo sforzo sono direttamente connessi al Modulo di Young, lo spostamento può essere ricavato misurando la variazione nella tensione d'uscita del ponte di Wheatstone in questo modo rappresenta l'accelerometro normale senza la caratteristica dell'auto-test.

Se una forza elettrostatica è applicata, l'equazione diventa non lineare:

$$0 = mg9.8 - 0.5\pi e A \frac{V^2}{x_0^2 \left(1 - \frac{\Delta x}{x_0}\right)^2} - k_s \Delta x \quad (3)$$

Per deflessioni ridotte ($\Delta x/x < 5\%$) Δx può essere trascurata a confronto di x_0 perché la forza elettrostatica sarà modulata solo dalla variazione dello spazio introducendo un errore

inferiore al 10%. Tipicamente, per un dispositivo di 50 g con uno spazio di 5 μm tra la massa inerziale e l'elettrodo, la deflessione elettrostatica è dell'ordine del 3% del fondo scala con un errore ideale risultante di 5,9%.

Si dovrebbe notare che la non-idealità è una cosa che rispecchia il punto di vista di costruzione per grandi volumi; tuttavia, per un utilizzatore, anche una deflessione del 50% potrebbe non essere di interesse sostanziale perché la forza è conosciuta e riproducibile. Un diagramma dell'errore della forza di deflessione per grandi forze elettrostatiche è mostrato in Figura 6. E indica che come lo spostamento relativo si avvicina a zero, gli errori diventano sostanziali.

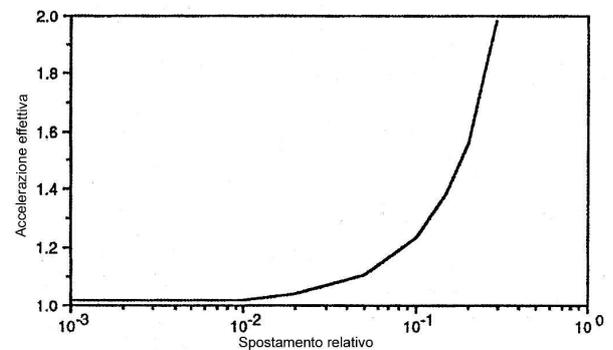


Figura 6. Accelerazione effettiva verso lo spostamento relativo ($\Delta x/x$)

Applicando una tensione V all'elettrodo corrisponde a sottoporre la massa sismica ad un'accelerazione di:

$$g_{\text{electro}} \approx \frac{\pi e A V^2}{19.6 m x_0^2} \quad (4)$$

assumendo che ci siano piccole deflessioni. Questa forza dipende solo dalla tensione applicata e dalla geometria, ed è essenzialmente indipendente dalla temperatura e sensibilità del dispositivo, rendendolo adatto per scopi di calibrazione. Anche la struttura a singola trave può avere l'auto-test come opzione aggiunta se il dispositivo ha l'incapsulamento sia inferiore che superiore. In questa condizioni, tuttavia, la risposta non è così lineare come la risposta della trave a doppio incastro perché la forza media è una funzione complessa della spaziatura.

I risultati della prova

Una caratteristica della struttura di questo dispositivo è che la parte può essere provata sopra

un ampio campo di temperatura per permettere la calibrazione. Usando questo approccio, i dati sono stati ottenuti su un accelerometro con l'opzione di auto-test. Il valore grossolano della sensibilità di un accelerometro in un campo di temperatura (-25° a +100°C) è stata misurata e l'uscita dovuta alla forza elettrostatica è stata tabulata con una tensione fissa applicata all'elettrodo. La sensibilità normalizzata è stata calcolata, così come lo è stato l'errore relativo da 25°C. La sensibilità normalizzata è definita come:

$$\frac{\left(\frac{\text{sensitivity at temperature}}{\text{sensitivity per electrode force at temperature}} \right)}{\left(\frac{\text{sensitivity at 25°C}}{\text{sensitivity per electrode force at 25°C}} \right)}$$

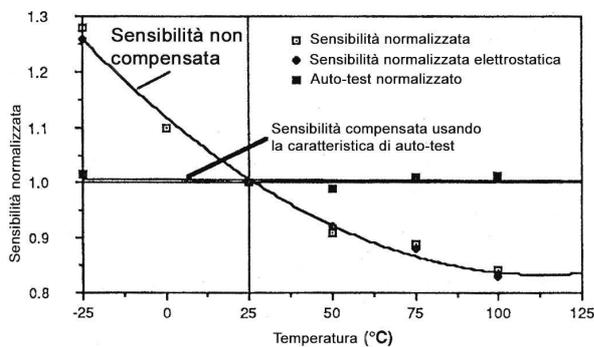


Figura 7. Prestazione di un accelerometro con auto test mostra la compensazione in temperatura fino a 150°C. La sensibilità normalizzata della parte non compensata è mostrata nel riquadro bianco dei dati (in alto a sinistra). Il rapporto della parte normalizzata non compensata rispetto alla sensibilità misurata dall'auto test produce la linea indicata dai riquadri ingrossati. L'errore totale è stato inferiore a 1,6% per un accelerometro con un errore da +28% a -17% senza la compensazione in temperatura. La Figura 7 rappresenta i dati per una sensibilità in g, la sensibilità elettrostatica e la sensibilità normalizzata quando il diagramma è stato normalizzato ad 1,00 alla temperatura di 25°C. Un miglioramento di 10 volte delle prestazioni in temperatura è stato raggiunto usando la progettazione con auto-test.

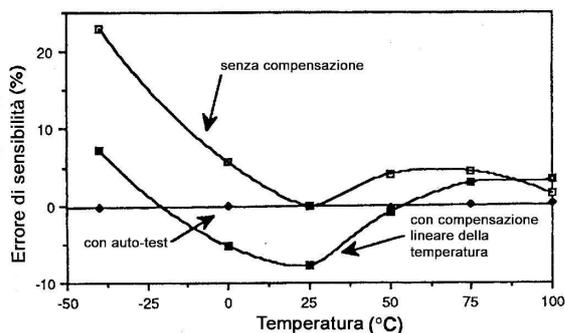


Fig. 8 Dati di compensazione per un accelerometro scelto per il suo comportamento non lineare con la temperatura.

Un caso ugualmente interessante per l'auto test è dove la sensibilità dell'accelerometro con la temperatura non è lineare e monotona. Usando gli approcci convenzionali di compensazione, il dispositivo può essere compensato solo per il primo ordine usando una correzione lineare o il buonsenso; microprocessori dedicati per il trattamento del segnale sono stati usati per approssimare le curve di temperatura se è necessaria una precisione di grado più elevato. L'auto test elimina la necessità sia della compensazione lineare che la compensazione che dipende dal microprocessore. L'auto test può teoricamente anche correggere la sensibilità dipendente dalla discontinuità della temperatura. Come mostrato in Figura 8 per un dispositivo non compensato, l'errore residuo, con una compensazione semplicemente del primo ordine non dovrebbe compensare l'accelerometro così come potrebbe fare la funzione di auto-test. Infatti, da -40°C a +100°C, l'errore totale con l'aiuto della calibrazione auto test è inferiore a 0,4%. Questo significa che la parte può essere calibrata alla temperatura ambiente e la sensibilità verrà corretta entro lo 0,4% senza altri algoritmi di correzione della temperatura.

L'approccio della compensazione lineare della temperatura, come usato nei sensori di pressione piezoresistivi, ha un errore del +7%.

Applicazioni dell'accelerometro con auto test

L'opzione di auto test sull'accelerometro fornisce un'uscita normalizzata per l'accelerometro si può separare il segnale dovuto all'accelerometro dal segnale dovuto alla forza elettrostatica. Le moderne tecniche di conversione A-D forniscono un messaggio digitale in funzione del rapporto tra il segnale sconosciuto ed una tensione di riferimento. Modulando il riferimento, la separazione di un settore può essere migliorata. Nel caso di un accelerometro con auto test, il problema è alquanto più complicato perché il segnale dell'accelerometro ed il segnale di auto test possono coincidere. Un primo approccio per un'uscita normalizzata verso la temperatura è di usare un circuito AD come mostrato in Figura 9. In questo caso, l'uscita dell'accelerometro è fatta arrivare tramite un demultiplexer che è sincronizzato con la tensione di controllo dell'elettrodo di auto test. Quando non è applicata tensione a questo elettrodo, l'uscita dell'accelerometro passa attraverso il primo stadio di amplificazione e attraverso il multiplexer all'ingresso normale del convertitore AD. Quando il dispositivo è nel modo di auto test, la tensione è

applicata all'elettrodo il percorso del segnale è variato per permettere l'acquisizione del segnale di auto test. Poiché il segnale di auto test sovrapposto al segnale che l'accelerometro sta in quel momento sentendo, è necessario calcolare la differenza tra la tensione d'uscita immediatamente prima dell'auto test e durante l'auto test. La differenza è semplicemente la forza esercitata sull'accelerometro dovuta all'auto test. Questo è fatto con un amplificatore differenziale con guadagno 1 mostrato nella figura. Il segnale è invertito e inviato ad un semplice circuito campionario e di memorizzazione e quindi all'ingresso di riferimento del convertitore AD. In pratica, ci sono due modi in cui il dispositivo necessita di funzionare. Il primo è un campionamento molto lento. L'ultimo esempio è quando l'accelerometro viene alimentato e campionato per verificare il funzionamento ed impostare il guadagno. Il secondo approccio è un modo continuo con un campionamento ad alta frequenza. In questo caso, l'auto test dovrebbe essere campionato a due volte la più elevata frequenza di interesse per provvedere a una normalizzazione in "tempo reale". Questo circuito è stato perfezionato per questo tipo di accelerometro e sconsigliato per altri tipi. La sensibilità grossolana del dispositivo è misurata vincolando il riferimento del convertitore AD a una tensione fissa. Nell'uso normale, il guadagno 1 dell'amplificatore differenziale mostrato in Figura 9 è regolato una volta alla temperatura ambiente per impostare la conversione LSB dell'accelerazione; in seguito, la funzione di auto test va oltre ed automaticamente regola la sensibilità alle altre temperature.

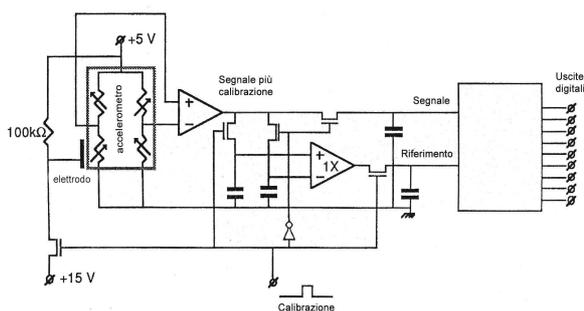


Fig. 9 Processore di segnale e Demultiplexer per un accelerometro auto test

Auto test per un'accelerazione dinamica

Gli accelerometri con auto test prevedono a un certo numero di vantaggi unici, uno può essere verificato il funzionamento e possono essere ricavati dati di calibrazione supplementari. L'auto test per se stesso non corregge gli errori di zero e le condizioni d'accelerazione in cui il sensore è usato. Se, per esempio, il sensore è sottoposto all'accelerazione di fondo scala, allora il fattore di calibrazione sarà alterato perché la distanza tra l'elettrodo e la massa è stata modificata. In queste condizioni, l'auto test può dare errori non quantizzabili. Qual. Tipicamente, l'accelerometro non è sottoposto a una continua accelerazione e solo nei momenti di riposo è possibile utilizzare l'auto test. Nei casi dove l'accelerometro è continuamente sottoposto a sollecitazioni si può utilizzare questo calcolo aggiuntivo.

$$S_{\text{elettro}} = \frac{\pi e A V^2}{19.6 m x_0^2 \sqrt{(1 - \Delta x / x_0)^2 (1 + \Delta x / x_0)^2}} = \frac{\pi e A V^2}{19.6 m x_0^2 (1 - (\Delta x / x_0)^2)}$$

Un'altra logica di utilizzo è impostare una soglia sul segnale di uscita dall'accelerometro al disopra della quale non può essere attivato l'auto test. Questo approccio risolve il problema dell'accelerazione dinamica. Il costruttore è in grado di portare modifiche all'accelerometro aggiungendo un ulteriore elettrodo nella parte inferiore dell'elemento in modo di bilanciare la forza di eccitazione meccanica della massa sismica. Gli accelerometri con auto test sono previsti per aumentare l'affidabilità, la capacità di questo auto test è di eliminare gli approcci di compensazione nelle misure o una pre elaborazione dei dati da analizzare eliminando gli approcci di compensazione attiva e passiva nei confronti della temperatura. L'accelerometro con auto test rientra nella famiglia dei trasduttori "intelligenti".

J. H. Jerman IC Sensors Measurement Specialties