

Servo accelerometro Servo inclinometro

Accelerometro è il nome che generalmente viene dato a un trasduttore che sente una accelerazione in una (o più) direzioni. Inclinometro è il nome che viene attribuito ad un accelerometro lineare con un campo di misura ridotto e generalmente viene usato per la rilevazione della pendenza o del grado di inclinazione, poiché è molto sensibile alle variazioni dell'accelerazione gravitazionale. Di seguito esamineremo le proprietà e i parametri sia di accelerometri a LVDT (loop aperto) che di accelerometri servo bilanciati che rappresentano ancora oggi lo "stato dell'arte" per questa tipologia di sensori.

Trasduttori di accelerazione

Sistemi sismici

L'elemento sensibile di un accelerometro consiste di un sistema molla - massa che si flette quando viene sottoposto ad una accelerazione nella direzione del suo asse sensibile. La massa è spesso chiamata elemento sismico e, la combinazione molla - massa, che può essere di tipo meccanico o il suo equivalente elettrico, è generalmente chiamata sistema sismico. La massa sismica risponde all'accelerazione producendo una forza proporzionale all'accelerazione applicata. La molla si flette fino a sviluppare una forza di reazione uguale. Questa deflessione è una funzione lineare dell'accelerazione applicata entro le limitazioni imposte dalla frequenza naturale e dal rapporto di smorzamento del sistema sismico.

Un sistema sismico può essere accoppiato ad un elemento sensibile, allo spostamento come un LVDT per realizzare un trasduttore la cui uscita elettrica è proporzionale all'accelerazione applicata al sistema sismico. In pratica, il nucleo dell' LVDT ed il suo assemblaggio esterno sono usati come massa sismica. Il trasduttore così formato è un accelerometro ad "anello aperto" perché la misura che non determina alcuna relazione di contro reazione tra segnale di ingresso ed uscita.

Frequenza naturale e smorzamento

I due importanti parametri di un accelerometro ad "anello aperto" sono la frequenza naturale e il rapporto di smorzamento. La frequenza naturale di un sistema massa - molla è la frequenza a cui la massa sismica vibra senza alcun sistema di smorzamento applicato. Ovvero è la misura di una velocità con cui un sistema può muoversi quando sollecitato da un impulso. La frequenza naturale di un accelerometro non smorzato deve essere parecchie volte più alta della più alta frequenza che

deve essere misurata in modo che lo strumento che deve visualizzare la misura ne dia una corretta rappresentazione. Tuttavia, un'alta frequenza naturale implica di avere un sistema di misura relativamente rigido e poco sensibile. La sensibilità di un accelerometro non smorzato è inversamente proporzionale al quadrato della frequenza naturale. Allora, un'alta frequenza naturale permette la misura di accelerazioni in un ampio campo di frequenze, mentre una frequenza naturale bassa ha una sensibilità più elevata. Questa relazione può essere modificata aggiungendo uno smorzatore al sistema. Se un accelerometro ad "anello aperto" non è smorzato, la massa sismica continuerà a vibrare e di conseguenza avremo delle letture che continueranno anche quando l'accelerazione non è più applicata al trasduttore. Inoltre, una accelerazione molto piccola con una frequenza vicina alla frequenza naturale di un accelerometro non smorzato causerà un ingiustificato alto valore di lettura dello strumento. Un rapporto di smorzamento approssimativamente di 0,6 a 0,7 della critica estenderà il campo di utilizzo di un accelerometro a circa $\frac{3}{4}$ della propria frequenza naturale, come è possibile vedere nel diagramma di Fig.1.

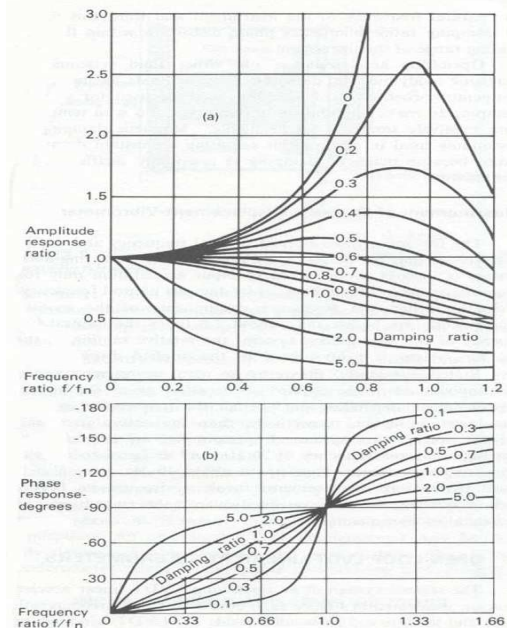


Fig.1 - Curve di risposta dinamica di un sistema meccanico smorzato - (a) ampiezza (b) fase

Nel riprodurre una forma d'onda complessa, la distorsione di fase risulta dall'insufficiente linearità tra il ritardo di fase del corrispondente elemento (massa sismica) e i componenti in frequenza della forma d'onda applicata. La Fig.1 mostra che il rapporto di smorzamento nel campo da 0,6 a 0,7 produce un ritardo di fase abbastanza lineare per frequenze fino a quella naturale dello strumento, eliminando la distorsione di fase nell'ambito del campo operativo dello strumento.

Gli accelerometri ad “anello aperto” usano per lo smorzamento sia un fluido viscoso o un campo magnetico (eddy-current). I fluidi al silicone avendo un basso coefficiente di viscosità verso la temperatura devono essere usati per lo smorzamento con fluido per ottenere una bassa se non addirittura insignificante variazione dello smorzamento al variare della temperatura. Viceversa lo smorzamento magnetico è comunemente usato in quelle applicazioni dove è richiesto un rapporto di smorzamento costante, perché il campo magnetico è essenzialmente non influenzato dalla temperatura.

Misura di spostamento dinamico vibrometri

La precedente discussione sulla frequenza naturale e lo smorzamento mette in risalto che l'uscita di un accelerometro con sistema molla - massa è linearmente proporzionale all'accelerazione applicata solo per frequenze di circa il 40% della sua frequenza naturale smorzata. Tuttavia, quando le componenti in frequenza del movimento che si sta studiando sono più alte di circa 2,5 volte la frequenza naturale del sistema molla - massa, il relativo movimento della massa sismica è proporzionale allo spostamento applicato. Formulato in altra maniera, la risposta di un sistema molla - massa è proporzionale all'accelerazione applicata o allo spostamento applicato, in funzione della frequenza se è rispettivamente bassa o alta rispetto alla frequenza naturale del sistema molla - massa. Per esempio, un accelerometro che abbia una frequenza naturale di 20Hz e progettato per misurare frequenze di accelerazione fino a circa 10Hz, può anche essere usato per misurare spostamenti con frequenza di 50Hz. I trasduttori di spostamento con massa sismica sono spesso chiamati vibrometri.

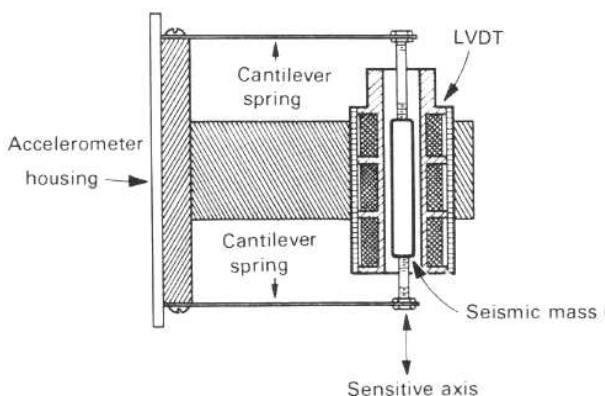


Fig.2 – Accelerometri lineari LVDT open loop (anello aperto)

Il sistema sismico di un accelerometro lineare LVDT ad “anello aperto”, mostrato in Fig.2, consiste di un nucleo ferromagnetico e del suo sistema di sospensione includente anche le prolunghe del nucleo all'interno degli avvolgimenti dell' LVDT

montato su due molle parallele a sbalzo. Il corpo dell' LVDT e la base delle molle a sbalzo sono entrambe fissate al corpo dell'accelerometro. Quando il corpo dell'accelerometro è sottoposto ad una accelerazione, il nucleo si sposta proporzionalmente ad essa, pertanto l'uscita elettrica è proporzionale all'accelerazione applicata.

La linearità di un accelerometro lineare LVDT ad “anello aperto” è migliore dell'1%FS. La sensibilità all'accelerazione nell'asse perpendicolare all'asse sensibile (sensibilità di cross - axis) è migliore del 5%. Questo significa che se applichiamo una accelerazione trasversale di 1g avremo un'uscita equivalente a 0,05g dell'asse sensibile. La frequenza naturale è relativa al campo di misura dell'accelerometro e generalmente aumenta all'aumentare di questa. Gli accelerometri di questo tipo erano una volta molto popolari, ma attualmente sono stati sostituiti dagli accelerometri servo assistiti nella maggior parte delle applicazioni. Tuttavia, quando i campi di misura sono elevati (100-1000g), un accelerometro LVDT ad “anello aperto” può essere il solo dispositivo disponibile, perché il sistema di sospensione di un servo accelerometro potrebbe non essere in grado di sopportare accelerazioni così elevate.

Inclinometri e sistemi di livella

Un accelerometro lineare che ha un fondo scala nominale di $\pm 1g$ o inferiore è spesso chiamato in clinometro. Un accelerometro usato come un inclinometro ha una sensibilità relativamente alta alle accelerazioni gravitazionali di una frazione di g in ampiezza. Per questa ragione gli inclinometri possono essere usati per misurare deviazioni angolari molto piccole rispetto alla verticale o al livello del piano. Possono essere anche usati per determinare una vera verticale o orizzontale e superfici veramente orizzontali. Un'applicazione tipica è il sistema di allarme di gru come in Fig.3. L'angolo del braccio mobile di una gru è sentito dall'inclinometro. Se l'angolo di inclinazione supera quello permesso dalla combinazione del carico e dall'effettiva lunghezza del braccio mobile, un allarme viene attivato per avvertire l'operatore della gru.

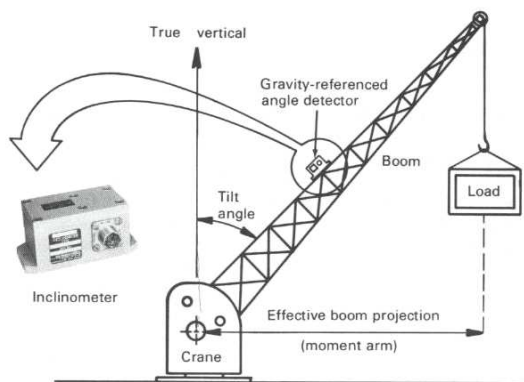


Fig.3 – Applicazione di un inclinometro in un sistema di allarme anti capovolgimento di una gru

Ci sono molte applicazioni per gli inclinometri nel campo delle macchine utensili con controllo automatico della superficie. Tipici usi sono lo stabilire il livello della superficie d'appoggio nelle macchine di sollevamento, nel provare la forma quadrata o la perpendicolarità di un'asse su una grande attrezzatura di perforazione, nel misurare gli angoli di una macchina per foratura e per livellare un grande macchinario durante la sua installazione.

Servo accelerometri

I servo accelerometri sono trasduttori contro reazionati (closed-loop) a bilanciamento di forza con una precisione ed una stabilità molto più elevate di quelle ottenibili con gli accelerometri ad anello aperto (open-loop). Questi trasduttori sono caratterizzati da un robusto sensore di accelerazione integrato con circuito allo stato solido funzionante in dc che permette di ottenere un segnale proporzionale all'accelerazione. Alcuni modelli di servo accelerometri sono mostrati nella Fig.4

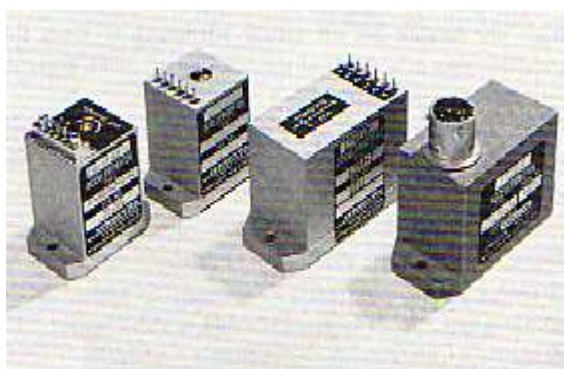
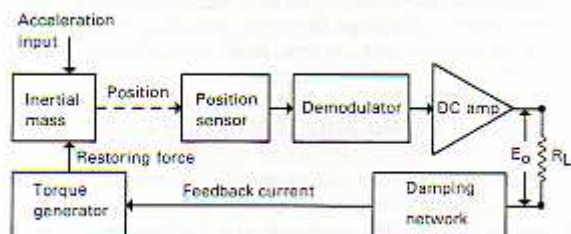


Fig.4 – Vari tipi di servo accelerometri



Teoria di funzionamento

Un servo accelerometro è un dispositivo ad anello chiuso (closed-loop), come mostrato nel diagramma a blocchi di Fig.5. Una massa a pendolo reagisce ad una accelerazione d'ingresso ed incomincia a muoversi. Un sensore di posizione rileva questo minimo movimento e sviluppa un segnale d'uscita.

Fig.5 – Diagramma a blocchi di un servo accelerometro

Questo segnale è modulato, amplificato ed applicato come contro reazione ad un generatore elettrico di coppia accoppiato alla massa. Questo motore di coppia sviluppa una coppia proporzionale alla corrente ad esso applicata. L'ampiezza e la direzione di questa coppia va a bilanciare la coppia che tende a muovere la massa pendolo determinata dall'accelerazione d'ingresso, prevenendo l'ulteriore movimento della massa. Poiché entrambe le coppie sono uguali, e poiché l'uscita del generatore di coppia è proporzionale alla propria corrente d'ingresso, la corrente d'ingresso è proporzionale alla coppia che tende a far muovere la massa pendolo. Questa coppia è, infatti, uguale al prodotto del momento di inerzia (una costante) e della accelerazione. Quindi, la corrente del generatore di coppia è proporzionale all'accelerazione applicata. Se questa corrente passa attraverso un resistore stabile, la tensione sviluppata è proporzionale all'accelerazione applicata. La costruzione meccanica dettagliata di un servo accelerometro, Fig.6, mostra che il generatore di coppia è costituito da un movimento d'Arsonval come quello normalmente utilizzato negli strumenti indicatori analogici ma con caratteristiche più performanti.

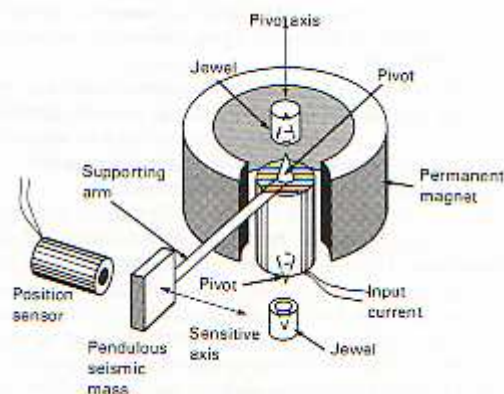


Fig.6 – Meccanismo semplificato di un servo accelerometro

Come si può vedere c'è una bobina fissata con perni rotanti su supporti di rubino. La bobina è inserita tra le espansioni polari di un magnete permanente. La massa sismica a pendolo, è montata su un braccetto perpendicolare agli assi di supporto della bobina. L'asse di sensibilità è perpendicolare sia al braccetto che all'asse del supporto della bobina. Per gli accelerometri lineari, la massa è sbilanciata; viceversa, per gli accelerometri angolari, è bilanciata. Alcune versioni di servo accelerometri usano supporti che possono flettersi invece di supporti di rubino. Ciò può aumentarne le prestazioni, ma può tuttavia produrre un non desiderato aumento della sensibilità trasversale (cross-axis). Il sensore di posizione è del tipo a correnti parassite ad alta frequenza. Esso si comporta come un trasduttore a riluttanza variabile, eccetto l'eccitazione a radio frequenza (RF). Qualsiasi metallo conduttivo vicino al suo lato sensibile assorbe un po' di questa energia RF come se fosse una corrente parassita a radio frequenza. Questo assorbimento di energia è visto come una variazione della tensione di eccitazione, che è demodulata ed usata come segnale di errore. Poiché il lossier ad alta frequenza è usato come un indicatore senza contatto di posizione di zero, la linearità non è importante. Il maggiore vantaggio di questo sensore ad alta frequenza rispetto ad un trasduttore di prossimità a riluttanza variabile è che l'oggetto che deve essere sentito può essere fatto con qualsiasi materiale, non espressamente di materiale ferromagnetico. Allora, la massa del pendolo può essere fatta di un materiale a bassa densità e basso peso che permette una massa ridotta.

Caratteristiche di un servo accelerometro

La linearità tipica di un servo accelerometro è 0,05% FS. Cioè 20 volte migliore di quella della maggior parte dei modelli ad anello aperto. La risoluzione è circa 0,0001% FS e la ripetibilità supera lo 0,01% FS. La sensibilità trasversale è inferiore a 0,005g/g. I campi dinamici di un servo accelerometro sono insoliti alla frequenza naturale e per il rapporto di smorzamento inevitabilmente sono in relazione con il campo di misura dell'accelerometro; in questo assomigliano ai tipi ad anello aperto. Lo smorzamento dell'asse sensibile è realizzato elettricamente con una rete passiva. La frequenza naturale di un servo accelerometro è una funzione del guadagno moltiplicato per il momento d'inerzia del pendolo. Allora, la frequenza naturale può anche essere determinata elettricamente, entro limiti accettabili. E' possibile, quindi, stabilire una frequenza naturale alta per accelerometri con basso campo di misura senza sacrificare la sensibilità o influenzare il fattore di scala. Tuttavia, piccole accelerazioni sono generalmente relative a movimenti lenti di masse relativamente grandi;

viceversa le accelerazioni più elevate sono relative a movimenti veloci di corpi piccoli. In pratica, un'alta risposta in frequenza non è generalmente richiesta per gli accelerometri con basso campo di misura.

Calibrazione di un servo accelerometro

Due metodi relativamente semplici possono essere sviluppati per calibrare gli accelerometri lineari o gli inclinometri: il primo usa il campo gravitazionale terrestre; il secondo usa una centrifuga ovvero un sistema rotante di generazione di una accelerazione orizzontale.

Accelerazione gravitazionale

L'accelerazione d'ingresso può essere cambiata da 0 ad 1 g inclinando di 90° l'asse sensibile dell'accelerometro. La precisa determinazione della accelerazione applicata all'asse sensibile dell'accelerometro dipende dalla precisa determinazione dell'angolo di inclinazione e dal valore di g. L'accelerometro può essere montato su una struttura rotante che permetta l'inclinazione del suo asse sensibile. Una testa goniometrica precisa, Fig.7, può essere applicata alla struttura rotante per determinare l'angolo di inclinazione. La tabella d contiene i valori della gravità terrestre g per varie località. La componente $g \sin\theta$ è applicata nella direzione dell'asse sensibile dell'accelerometro. La componente normale, $g \cos\theta$, non può essere ignorata poiché l'accelerometro ha una sua sensibilità trasversale. Quindi se non è applicata nessuna accelerazione lungo l'asse sensibile, qualunque segnale d'uscita è determinato dalla sensibilità trasversale (cross-axis sensitivity). La sensibilità trasversale è espressa come una frazione di g per ogni g applicato trasversalmente all'accelerometro.



Fig.7 – Tipica tavola rotante per la calibrazione di accelerometri

Il riferimento di zero dell'angolo di inclinazione è quello del vero orizzonte e può essere stabilito per mezzo di un inclinometro separato, un accelerometro con basso campo di misura con l'asse di sensibilità parallelo alla sua base di montaggio. La base dell'inclinometro è posta sulla superficie su cui deve essere bloccato e lo zero è determinato dalla minima uscita elettrica dello stesso, letta su un millivoltmetro. L'alta sensibilità di questo accelerometro con campo di misura molto basso produce un'ampia variazione di segnale per variazioni molto piccole di inclinazione. Ora l'inclinometro è ruotato sulla sua superficie. Questa è livellata quando l'uscita dell'inclinometro è costante per qualsiasi orientamento azimutale. Con questo metodo per stabilire il piano della superficie non è necessario che l'asse sensibile dell'accelerometro sia esattamente parallelo alla sua base o alla superficie stessa.

Centrifughe ed acceleratori rotanti

Il secondo metodo per applicare una accelerazione lineare costante è utilizzare una centrifuga o un acceleratore rotante lineare. L'accelerazione applicata, A (in g), per il raggio R (pollici) e la velocità di rotazione N (giri/min), è:

$$A = 8,8363 \times 10^{-7} g RN^2$$

La precisione dell'accelerazione applicata è una funzione della precisione di rotazione e della distanza dal centro della massa sismica. L'errore nella determinazione della velocità può essere sia una quantità discreta (come $\pm 0,1$ rpm) per un lettore digitale, o una percentuale della velocità letta per un lettore analogico. Allora, l'errore di velocità è in giri/min (rpm) quando la stessa viene letta con un contatore digitale, ma è una percentuale della lettura quando si utilizza uno stroboscopio. Uno svantaggio serio di un lettore digitale è che visualizza la velocità media durante l'intervallo di conteggio, invece della velocità istantanea. Poiché in pratica un acceleratore deve essere un dispositivo a velocità variabile, una velocità costante non è sempre facile da ottenere. Tuttavia, una velocità assolutamente costante di un acceleratore non è essenziale se la velocità istantanea può essere determinata con precisione nel momento che la risposta dell'accelerometro è misurata. Questo è possibile con un lettore analogico. Di solito l'errore di misura della lunghezza del raggio determinante la posizione dell'accelerometro è una quantità discreta (ad es. $\pm 0,001$ in), piuttosto che una percentuale della lunghezza. Quando l'errore di velocità è una percentuale della lettura, la migliore precisione per l'accelerazione è ottenuta quando l'accelerometro è al massimo raggio che la centrifuga può permettere. Per esempio, se 10" di raggio è preciso entro

$\pm 0,001$ ", e la velocità è misurata con uno stroboscopio con precisione $\pm 0,05\%$, la precisione totale sarà $\pm 0,11\%$. Per 20" di raggio, sempre $\pm 0,001$ ", la precisione totale sarà $\pm 0,105\%$. Per piccole imprecisioni, la precisione dell'accelerazione è uguale alla precisione del raggio più due volte la precisione della velocità. L'accelerazione applicata dipende anche da quanto in maniera precisa l'asse di sensibilità dell'accelerometro coincide con la linea radiale al centro di rotazione della centrifuga.

Il centro a zero g della massa sismica può essere trovato muovendo l'accelerometro lungo l'asse del raggio della piattaforma dell'acceleratore rotante finché la sua uscita sia zero. Il centro della massa sismica ora coincide con il centro della piattaforma rotante, anche se l'asse sensibile non è esattamente in linea con il raggio. Il centro della massa sismica può essere determinato entro $\pm 0,001$ " nella seguente maniera. A 1000 giri una accelerazione di 0,028g agisce sulla massa sismica quando il suo centro è spostato di 0,001" dal centro di rotazione. La massa sismica di un accelerometro ad anello aperto può subire uno spostamento apprezzabile quando è accelerato da una centrifuga. Questo significa che la distanza radiale al centro della massa sismica aumenta. Per produrre la stessa accelerazione calcolata, è necessario ridurre la velocità della centrifuga. Questo fattore di correzione può essere determinato come segue. Assumendo che una determinata accelerazione A deve essere generata e che D è lo spostamento della massa in inc/g ed R_o è la distanza radiale al centro della massa sismica relativa alla velocità zero, allora K_a il fattore di riduzione della velocità è:

$$K_a = \sqrt{R_o / (R_o + DA)}$$

La velocità calcolata è moltiplicata per questo fattore K_a per ottenere l'esatta velocità per produrre l'accelerazione desiderata. D in generale non è un parametro dato nelle specifiche dell'accelerometro, ma la frequenza naturale F_n sì. La seguente espressione permette di ottenere il valore di D in termini di F_n per un accelerometro ad anello aperto:

$$D = 9,8 / F_n^2$$

Un'accelerazione precisa può essere generata se è disponibile una sorgente con una unica velocità costante, come una centrifuga comandata da un motore a velocità costante. Il raggio per una specifica accelerazione A , può essere trovato da:

$$R_o = A(1 - KDN^2) / KN^2$$

dove $K = 8,8363 \times 10^{-7} g$



Fig.8 – Vibratore elettrodinamico per la calibrazione di un accelerometro

Accelerazione rettilinea con periodo sinusoidale

Una accelerazione sinusoidale può essere prodotta da un vibratore elettromagnetico (shaker). Il metodo più semplice per calibrare un accelerometro dinamicamente è di fissare l'unità in prova ed un accelerometro calibrato di riferimento con lo stesso fattore di smorzamento e frequenza naturale alla tavola di un vibratore, lungo l'asse desiderato come mostrato in Fig.8. L'uscita dello strumento in prova può così essere comparata allo strumento di riferimento. Un metodo di base ancora più completo vorrebbe l'introduzione di una misura accurata dello spostamento (non facilmente strumentabile) ed una misura precisa della frequenza. Un altro metodo conveniente di misura dell'accelerazione usa un trasduttore di velocità per la misura della velocità della tavola del vibratore. Lo spostamento d della tavola del vibratore è:

$$d = K \sin \omega t$$

dove K è l'ampiezza di picco.

La velocità di picco V del vibratore è:

$$V = \omega K$$

e l'accelerazione di picco A del vibratore è:

$$A = \omega^2 K = \omega V = 2\pi f V$$

Allora, per un'accelerazione costante A , la velocità V deve variare inversamente con la frequenza applicata f . Per una data frequenza, l'accelerazione è direttamente proporzionale alla velocità. In questo metodo sia l'accelerometro di riferimento che una precisa misura di spostamento sono necessari, ad una frequenza fissa, per stabilire un riferimento di calibrazione di base.

Accelerazione angolare con periodo sinusoidale

Un'accelerazione angolare costante non è così facile da generare per scopi di calibrazione. Tuttavia, un'accelerazione angolare periodica a bassa frequenza può essere prodotta da un pendolo. Questo metodo può essere usato per una precisa calibrazione del fattore di scala cautelandosi che la frequenza d'ingresso sia inferiore almeno del 10% della frequenza naturale dell'accelerometro angolare. Se m ed I_o sono rispettivamente la massa ed il momento d'inerzia di un sistema a pendolo su cui è montato l'accelerometro (Fig.9) ed r è la distanza dal centro di rotazione al centro di gravità del sistema, il periodo T di un tale pendolo per piccole ampiezze di oscillazione è dato dalla seguente espressione:

$$T = 2\pi \sqrt{I_o / mgr}$$

La coppia Q e quindi l'accelerazione angolare α è una funzione di θ .

$$Q = mgr \sin \theta = I_o \alpha$$

Per sostituzione:

$$\alpha = 4\pi^2 [\sin \theta] / T^2 = 4\pi^2 f^2 \sin \theta$$

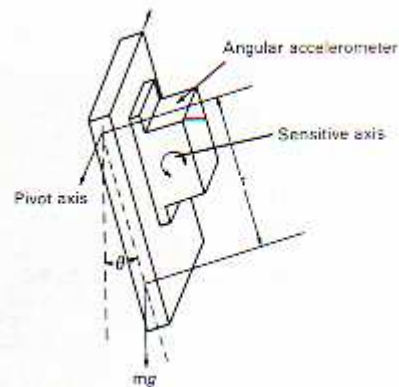


Fig.9 – Diagramma di un accelerometro montato su un pendolo torsionale

La frequenza del pendolo f è il reciproco del periodo T . Il periodo è determinato dalla partenza del pendolo (che include l'accelerometro) e conteggiando l'oscillazione per un periodo di uno o due minuti. Un metodo migliorato per generare un'accelerazione angolare periodica consiste nell'aggiungere un braccio basculante al vibratore lineare, come mostrato in Fig.10.

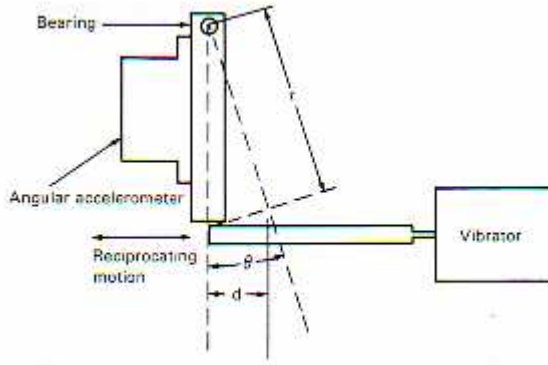


Fig.12 – Tavola per la valutazione di sensori di velocità angolare ed accelerometri angolari

Dott. Edward E. Herceg
Handbook of Measurement and Control

Fig.10 – Diagramma di meccanismo con braccio basculante

E' importante che non ci sia gioco nel supporto. Questo può essere soddisfatto usando un cuscinetto a flessione piuttosto che meccanico. Per questo sistema, l'accelerazione angolare è:

$$\alpha = 4 \pi^2 f^2 \text{sen } \theta$$

Per piccoli angoli: $\text{sen} \theta = \theta = d / r$

Da qui: $\alpha = 4 \pi^2 f^2 d$

Poiché r è, per un dato sistema, costante, l'accelerazione angolare è proporzionale alla f^2 ed a d , proprio come per l'accelerazione lineare. Di conseguenza, la procedura precedentemente descritta per la misura di una vibrazione lineare usando un trasduttore di velocità può essere adottata per questo metodo atto a sviluppare una accelerazione angolare con una frequenza variabile. Una tipica struttura di braccio basculante è mostrata in Fig.11.



Fig.11 – Braccio basculante collegato ad un vibratore

