

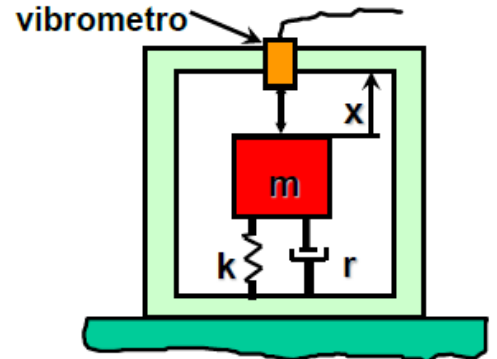
MISURE DI ACCELERAZIONE

Introduzione

Pensiamo di installare un sistema del secondo ordine ad un grado di libertà a bordo di un corpo di cui vogliamo misurare le vibrazioni. Analizziamo poi la dinamica del sistema complessivo per capire se è possibile utilizzare il sistema ad un grado di libertà per misurare il moto del corpo. Grazie a tale analisi è possibile comprendere che si può misurare solo il moto relativo X fra la massa e l'involucro e risalire da questo al moto assoluto dell'involucro. Per questo occorre tenere conto della funzione di trasferimento della massa m rispetto all'involucro. In alternativa è possibile misurare la deformazione delle mensole di supporto, sempre al fine di risalire al moto dell'involucro. Il Vibrometro rileva lo spostamento della massa sospesa. Si può quindi misurare la variazione del moto interno. Se come uscita considero il moto relativo tra vincolo e massa vado a 1 perché la massa è ferma. Cambia il grafico della funzione perché si sta analizzando una massa differente da quella fino ad ora analizzata.

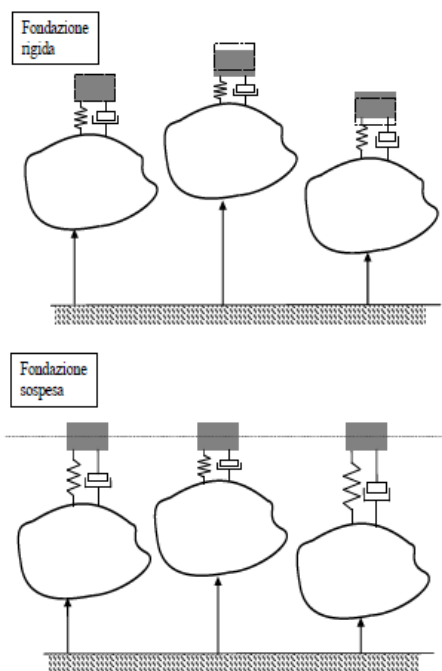
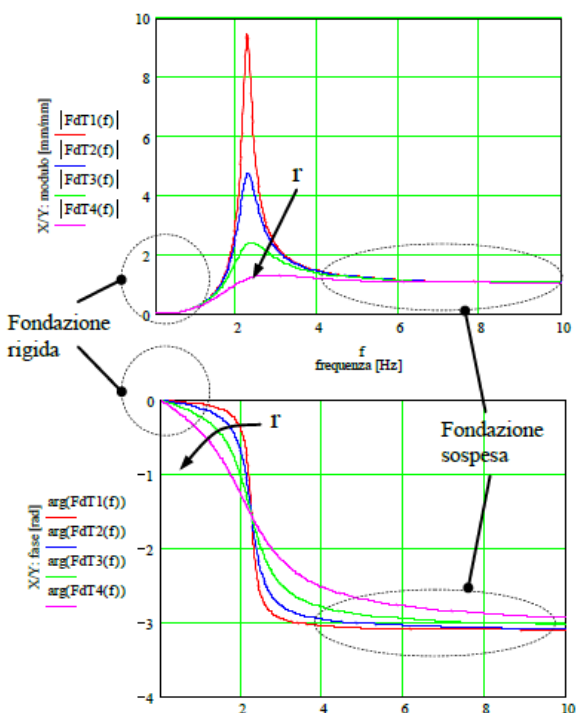
Gli accelerometri si basano su una struttura costituita da:

- Oggetto della nostra indagine che vibra
- Misuratore costituito da una massa, una molla e uno smorzatore



Sismometro

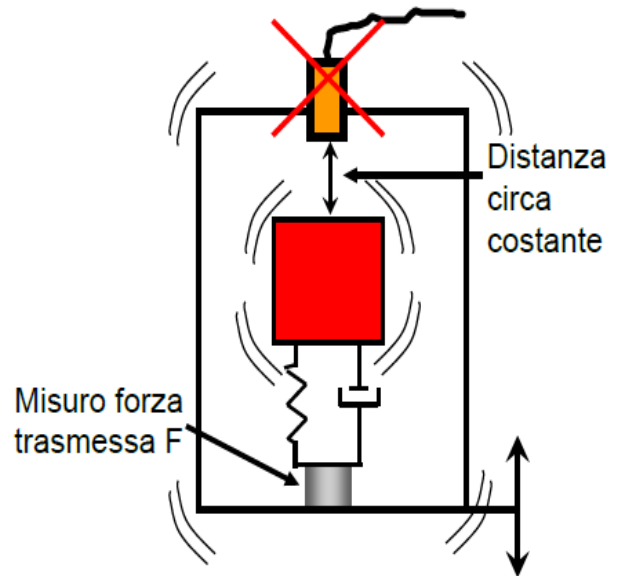
Si definisce sismometro un qualunque strumento che misura la dipendenza temporale dello spostamento, della velocità o dell'accelerazione del terreno. La quantità in studio viene misurata facendo ricorso ad una massa che fornisce una sufficiente inerzia. Se lo spostamento del terreno su cui poggia lo strumento è sufficientemente veloce, la massa sospesa rimarrà immobile e fornirà un punto fisso nello spazio, rispetto al quale misurare il moto del terreno. Il sismometro produce un sismogramma, ovvero un grafico rappresentante la dipendenza della quantità in oggetto dal tempo. Nel sismometro dunque la massa è ferma se la frequenza di vibrazione della scatola è molto maggiore della frequenza propria che risulta essere bassa. Il sistema ha una frequenza propria bassa così che il corpo rimanga fermo quando tutta la zona circostante è in moto. In questo modo si genera un punto fisso. Il sismometro è un misuratore di spostamento assoluto, nel senso che non richiede un punto di riferimento fisso esterno: il riferimento come detto è dato dalla massa sospesa che, essendo in condizioni di massa sismica, è ferma. Il moto relativo massa-corpo è quindi rappresentativo del moto del corpo.



Accelerometro: introduzione

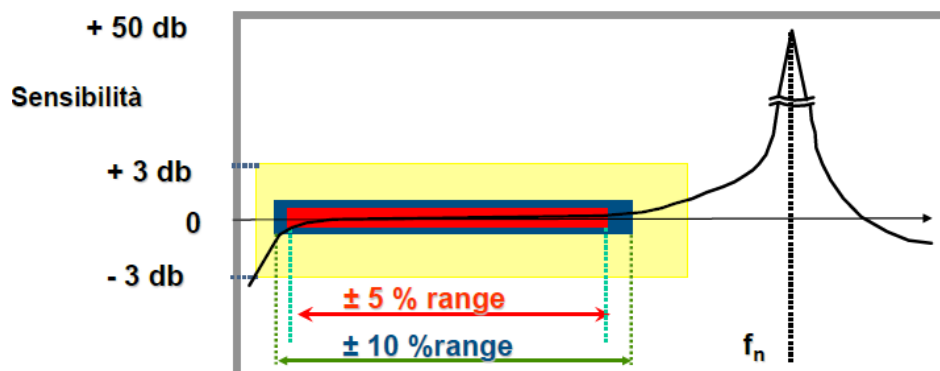
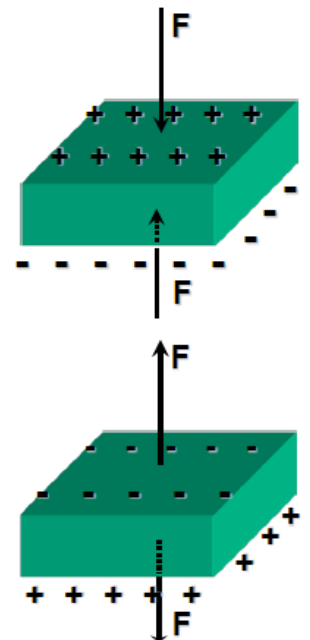
Un accelerometro è uno strumento di misura in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione, effettuando il calcolo della forza rilevata rispetto alla massa dell'oggetto (forza per unità di massa). Il sistema dinamico di questo traduttore è formalmente il medesimo del sismometro; in questo caso però si è interessati non tanto al moto del corpo quanto piuttosto alla misura dell'accelerazione del corpo stesso. Importante sottolineare che la molla e lo smorzatore nel disegno rappresentano le caratteristiche dinamiche e meccaniche del misuratore di forza, non sono dunque presenti effettivamente ma sono intrinseche nel misuratore di forza. Si ha un vincolo il più possibile rigido e una massa piccola così da avere una risposta dinamica costante fino a una certa frequenza; si avrà poi il picco di risonanza, ad alte frequenze. Il moto della scatola e quello della massa all'interno risulta essere il moto di un corpo rigido. Se si utilizzasse un misuratore di spostamento si avrebbe una misura sempre nulla; ecco perché si utilizza un misuratore di forza che misura la forza trasmessa dal corpo rosso all'involucro. Si misura la forza di inerzia generata dalla massa rossa. La forza d'inerzia diviso la massa interna permette di ricavare l'accelerazione a cui la massa interna è sottoposta. L'accelerazione della massa interna è al medesimo del corpo. Esistono diversi tipi di accelerometro:

- Con vibrometro relativo
- Piezoaccelerometro
- ICP
- Servoaccelerometro



Piezoaccelerometro

Tali accelerometri sfruttano la proprietà del cristallo di quarzo tale per cui se lo si carica meccanicamente genererà uno spostamento di cariche elettriche al suo interno. Se lo si comprime sposta le cariche elettriche su un lato, se lo si trae le sposta dall'altro. Lo spostamento di cariche genera a sua volta una differenza di potenziale cioè una tensione o forza elettromotrice che risulta essere molto ridotta. Nonostante il valore sia estremamente ridotto a partire dalla tensione si può stimare la forza applicata cioè la forza d'inerzia della massa. Si può ora stimare l'accelerazione. I quarzi sono spesso artificiale e possono avere risposte differenti alla compressione o al taglio, come già accennato. La rigidità del quarzo e il valore della massa sospesa pilotano il valore della frequenza propria. Il Piezoaccelerometro è pronto per frequenze molto minori della risonanza. Vi è però un limite inferiore alla prontezza: tale limite è dovuto alla risposta del quarzo. Infatti, se sollecitato staticamente, il quarzo genera uno sbilanciamento di cariche, tuttavia per poter misurare tale sbilanciamento si deve inserire un circuito di misura. Il circuito di misura ha una impedenza in ingresso elevata ma non infinita, quindi il quarzo si scarica gradualmente, a causa del circuito di misura. In sintesi quindi, il quarzo non permette di

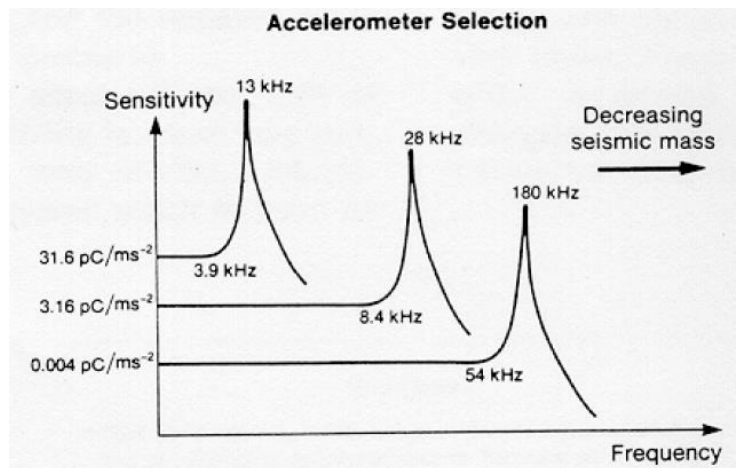


fare misure statiche, perché il quarzo stesso si scarica. A frequenze troppo basse dunque non si riesce ad effettuare correttamente la misura perché il quarzo si scarica prima. Il limite superiore alla prontezza dipende invece dalla risonanza meccanica.

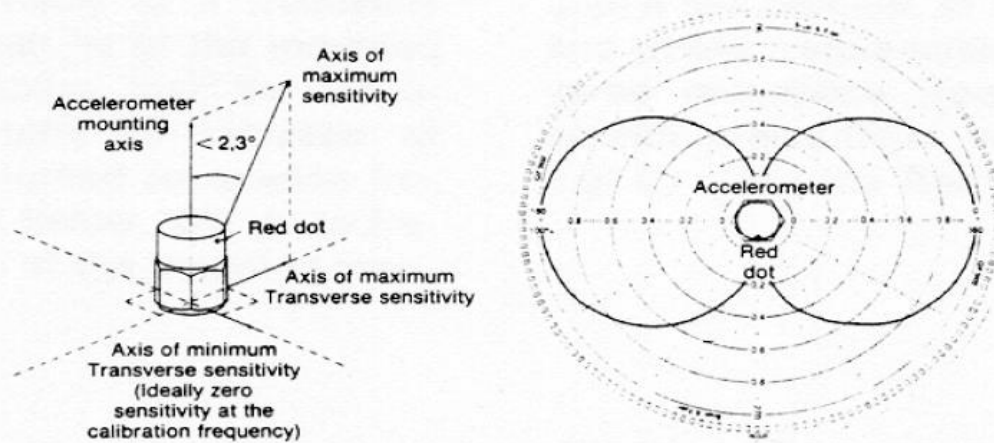
È possibile modificare la sensibilità di tali accelerometri:

- Inserendo un amplificatore ottimizzato per avere un ingresso molto piccolo
- Modificando le caratteristiche e dunque progettando con sensibilità adeguata.
- Variando la massa = la sensibilità dipende infatti anche dalla massa. Diminuendo la massa sospesa, si ha un aumento della frequenza propria con una conseguente riduzione della sensibilità poiché minor massa implica minor forza di inerzia e quindi forza minore sul quarzo. Per avere sensibilità elevata occorrerà invece una massa elevata. Il principale motivo per cui si creano strumenti con masse basse è il fatto che la frequenza di risonanza si sposta molto in alto a frequenze molto elevate. Massa piccola comporta quindi sensibilità bassa ma risonanza alta.

Ricordiamo che l'accelerometro è un sistema del secondo ordine e abbiamo detto che ha un solo grado di libertà e quindi misura solo oscillazioni verticali; in realtà può misurare anche delle oscillazioni orizzontali. Dunque la sensibilità trasversale dipende dal tipo di accelerometro e comunque è inferiore del 1%. Sono di un'infinità di geometrie diverse. Si montano con incollaggio o delle piccole guide. Il segnale in uscita è piccolo e quindi si preferisce collegarlo a un amplificatore tramite un cavo. Lungo il cavo possono essere presenti disturbi magnetici e quindi si preferisce creare degli strumenti con amplificatore già al loro interno, detti ICP, oppure usare dei cavi corti e controllare che non passano accanto a dei trasformatori.

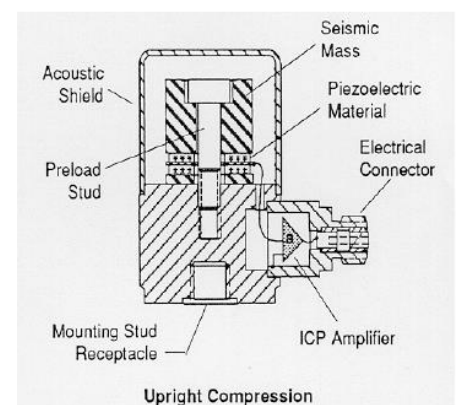


Transverse Sensitivity

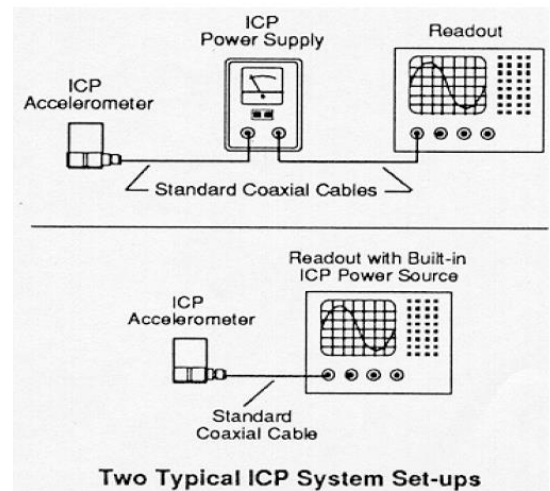
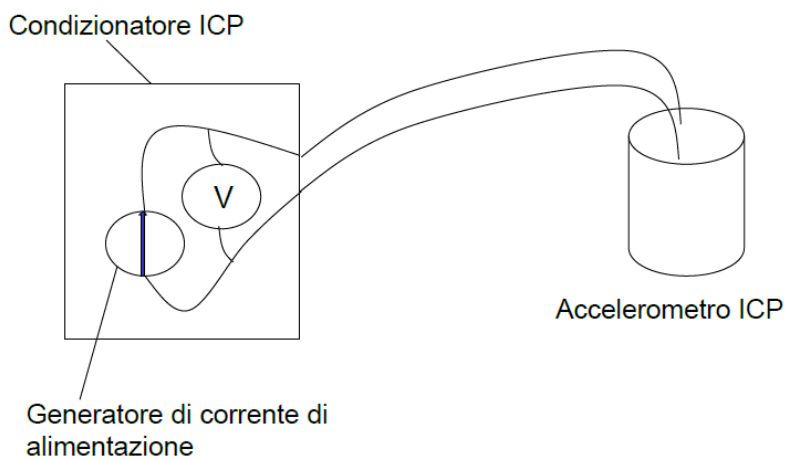


ICP

Gli accelerometri ICP cioè Integrated Circuit Piezotronic, anche identificati con un'altra sigla commerciale: IEPE, sono piezoaccelerometri, con l'unica differenza di avere un amplificatore integrato al loro interno. Lo scopo dell'amplificatore è amplificare il segnale di sbilanciamento di carica, che è molto basso come tensione, in modo da dare in uscita dall'accelerometro un segnale molto più elevato, comunque dell'ordine dei millivolt, ma molto maggiore di quello in uscita dal quarzo. Lo scopo di amplificare il segnale già all'interno del sensore è quello di trasferire lungo il cavo di collegamento un segnale di ampiezza maggiore; in questo modo l'effetto dei disturbi elettromagnetici è molto inferiore rispetto a quelli del cavo che collegherebbe lo strumento ad un amplificatore esterno.



Gli accelerometri ICP, avendo un amplificatore all'interno, necessitano di alimentazione. Tale alimentazione può essere data da una centralina apposita posta fra sensore e sistema di acquisizione, oppure può essere data dal sistema di acquisizione direttamente. L'alimentazione dei sistemi ICP viene fatta imponendo una corrente circolante costante sui cavi di collegamento (normalmente 2mA o 4mA). L'elettronica interna all'accelerometro è fatta in modo da modulare l'impedenza ai capi dell'accelerometro stesso, in modo proporzionale all'accelerazione istantanea. In questo modo la tensione che si genera sui cavi di collegamento è anch'essa proporzionale all'accelerazione. Questa soluzione permette di alimentare il sistema con gli stessi cavi con cui si estrae l'uscita. Questo permette di avere un solo cavo bipolare per alimentazione e misura, senza la necessità di più poli. Il vantaggio di questa soluzione è che si riduce la massa e la dimensione del cavo di collegamento, minimizzando l'effetto di carico. La funzione di trasferimento di questo strumento è uguale a quello precedente. Dunque i sensori ICP sono sensori piezoelettrici con elettronica incorporata. Sono alimentati da condizionatori a corrente costante che dunque consentono l'impiego di cavi a due fili a bassa impedenza.



I vantaggi di questi strumenti rispetto ai precedenti sono:

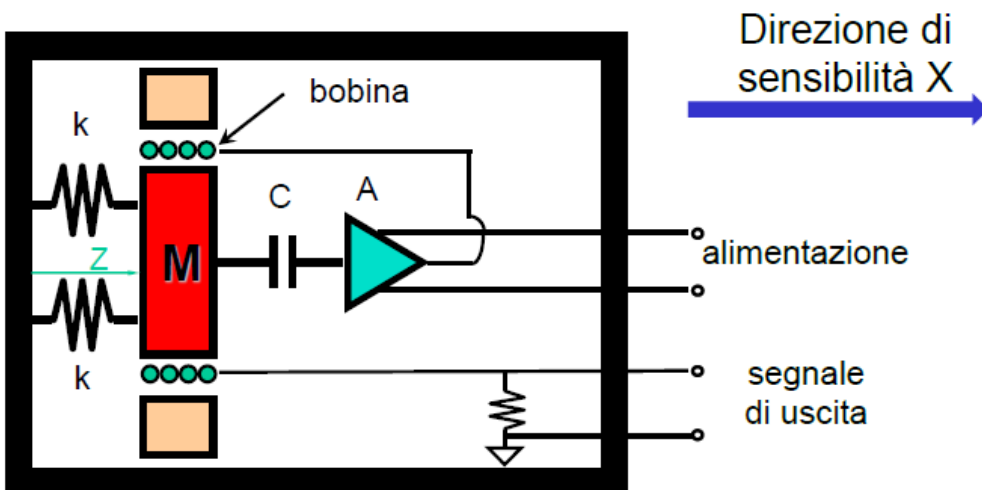
- Sensibilità in tensione costante
- Bassa impedenza di uscita
- Costi limitati

Ricordiamo che dal momento in cui inizia l'alimentazione e il momento in cui si può effettuare la misura passa un certo tempo che dipende dal tipo di sensore stesso. Gli accelerometri piezoelettrici possono essere realizzati in modo da essere triassiali: si hanno di fatto 3 accelerometri monocassiali integrati nello stesso sensore.

Servoaccelerometro

Il servoaccelerometro è un sensore che misura l'accelerazione utilizzando un principio diverso dal piezoaccelerometro. Nel servoaccelerometro, si ha una massa M che è supportata da molle molto poco rigide che servono solo quando il sensore è spento, per non far muovere in modo eccessivo la massa. Quando il sensore è acceso, le molle di fatto non lavorano. Quando il sensore è acceso, un sistema di servo retroazione elettronico mantiene la massa M nella posizione di equilibrio. Nel momento in cui l'accelerometro subisce una accelerazione lungo l'asse di sensibilità la massa tenderebbe per inerzia a rimanere ferma. Quindi se l'accelerazione è verso destra, si avrebbe una riduzione della distanza Z fra massa M e involucro dell'accelerometro. A questo punto, il sensore di spostamento capacitivo C rileva una variazione della posizione fra la massa M e l'involucro e quindi identifica che la massa non è più nella posizione di equilibrio. L'uscita elettrica del sensore C viene opportunamente elaborata ed amplificata, generando un segnale di tensione che viene usato per alimentare la bobina. La bobina, così alimentata, tende a riportare la massa M verso la posizione di equilibrio. Questo sistema di retroazione (sensore C , amplificatore A e bobina) lavora quindi in anello di retroazione chiuso, in modo da mantenere sempre la massa M centrata rispetto alla bobina lungo la direzione di sensibilità. La tensione di

alimentazione della bobina è proporzionale alla forza necessaria per mantenere la massa M in posizione di equilibrio, ed è quindi proporzionale anche all'inerzia della massa M . L'inerzia della massa M è proporzionale all'accelerazione subita dall'accelerometro lungo la direzione di sensibilità X . In sintesi quindi, la tensione di alimentazione della bobina è proporzionale all'accelerazione subita dalla massa M , che è quella subita dall'accelerometro. È uno strumento molto sensibile. Permette di misurare anche accelerazioni a basse frequenze. È uno strumento molto delicato quando non è alimentato

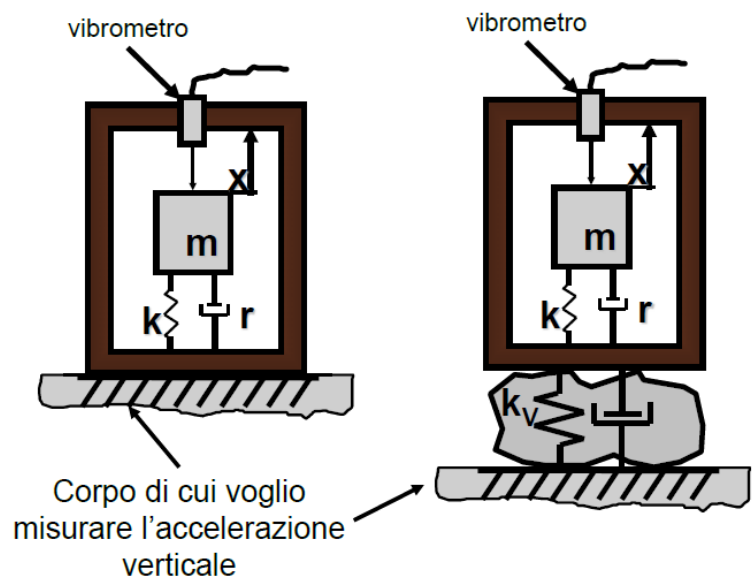


Fissaggio accelerometri

L'accelerometro misura l'accelerazione di un oggetto grazie al fatto che vibra nella stessa maniera con cui vibra l'oggetto da misurare. Occorre dunque montare lo strumento in modo rigido sull'oggetto così che i due possano vibrare contemporaneamente. L'accelerometro può essere collegato dunque all'elemento vibrante mediante:

- Perno filettato
- Cera d'api
- Colla
- Magnete permanente
- Sona tenuta manualmente
- Nastro biadesivo

Il sistema di montaggio funziona da filtro meccanico limitando la massima frequenza misurabile. Importante sottolineare che la molla e lo smorzatore nel disegno rappresentano le caratteristiche dinamiche e meccaniche del misuratore di forza, non sono dunque presenti effettivamente ma sono intrinseche nel misuratore di forza. L'accelerometro idealmente è vincolato al corpo mentre praticamente tra lo strumento e il corpo è presente una rigidità che genera un ulteriore sistema vibrante che è accelerometro del sistema rispetto al corpo. Per misurare correttamente occorre che la risonanza del sistema vibrante con corpo sia molto più alta. Occorre sapere a che frequenze può risuonare. L'accoppiamento accelerometro-corpo oggetto della misura ha quindi in generale una frequenza di risonanza e la misura è attendibile solo nettamente al di sotto di tale frequenza. Diverse tecniche di montaggio portano a



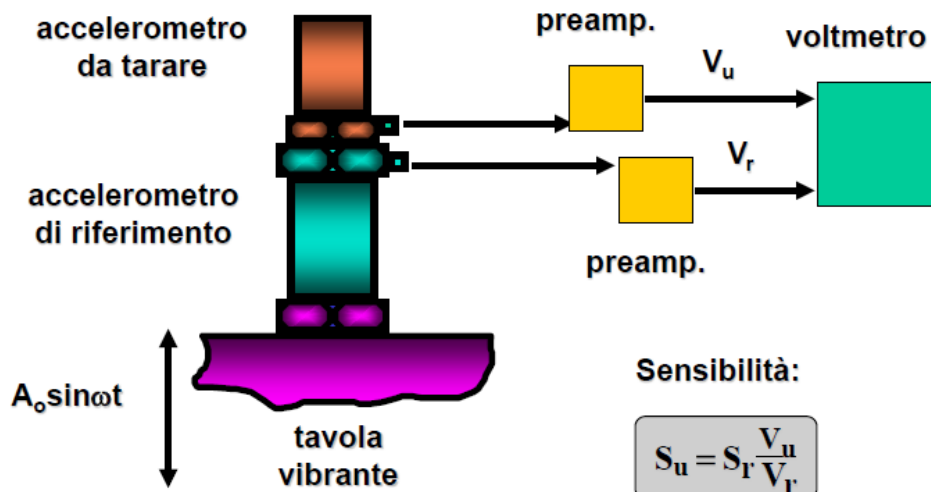
diverse frequenze di risonanza e quindi a diversi campi di prontezza. Montare l'accelerometro può quindi modificare la dinamica a causa dell'effetto di carico. La massa aggiunta dall'accelerometro può quindi generare effetto di carico, ovvero le vibrazioni locali del corpo oggetto della misura sono in generale influenzate dalla massa aggiunta (oltre che dallo smorzamento dovuto ai cavi). L'effetto più evidente della massa aggiunta è la riduzione della frequenza propria (o delle frequenze proprie). Ovviamente l'effetto è proporzionale alla massa dell'accelerometro e inversamente proporzionale alla massa modale del corpo oggetto della misura. Su lamiere sottili, travi esili e corpi comunque con masse modali ridotte l'effetto è ovviamente più marcato. La variazione dipende da rapporto tra la massa modale dell'oggetto che voglio misurare e la massa dell'accelerometro.

Taratura accelerometri: assoluta

Per tarare uno strumento, come sappiamo, occorre dare un ingresso noto e misurare l'uscita. L'ingresso in questo caso non può però essere costante perché altrimenti l'uscita sarebbe nulla. Inoltre sappiamo che di solito la quantità in ingresso deve essere nota mentre in questo caso non esiste un campione di accelerazione. Per ovviare a questo problema normalmente la taratura viene effettuata prendendo un sistema vibrante che genera delle vibrazioni, un moto di solito armonico che produce un'oscillazione a una certa frequenza e con una certa ampiezza. L'ampiezza viene misurata con un interferometro, per la precisione l'interferometro misura lo spostamento picco-picco. Conoscendo frequenza e ampiezza si può ricavare l'accelerazione e si può quindi fare una taratura. La sensibilità dell'accelerometro viene ricavata dividendo l'uscita per l'accelerazione misurata con il metodo interferometrico:

$$S = \frac{V}{a} \left[\frac{V}{ms^{-2}} \right]$$

La curva di taratura viene fornita come scostamento della sensibilità rispetto al valore misurato. Questo tipo di accelerazione prende il nome di metodo back to back. Facendo la taratura si ottiene sempre una funzione di trasferimento. La taratura è dunque dinamica e non statica.



Verifica della sensibilità

È possibile anche verificare la sensibilità dello strumento. Non è una taratura perché non sono fornite vibrazioni estremamente accurate, possiedo infatti un'incertezza più elevata. Per effettuare tale verifica occorre utilizzare gli eccitatori calibrati portatili. Gli eccitatori calibrati portatili sono dei generatori di vibrazione di ampiezza nota. Non permettono di fare una taratura (non hanno le incertezze sufficientemente contenute) ma permettono di verificare se vi siano scostamenti apprezzabili dal comportamento atteso. Sui servoaccelerometro è anche possibile effettuare un altro tipo di verifica sfruttando l'accelerazione di gravità. Nel caso dei

servoaccelerometri, visto che sono in grado di misurare anche le accelerazioni costanti, la verifica di sensibilità può essere fatta semplicemente ribaltando il sensore: la differenza di misura deve essere pari a 2g. Anche in questo caso, non si tratta di taratura, ma piuttosto di una verifica di corretto funzionamento e una verifica che la catena di misura è stata realizzata correttamente.

$$\text{sensibilità} = \frac{\Delta i}{2g}$$

