

Gli smorzatori a massa accordata forniscono agli encoder FORTiS™ una straordinaria resistenza alle vibrazioni

Nel 1907, l'ingegnere americano Frederick Winslow Taylor descrisse le vibrazioni delle macchine in questo modo: "il problema più incomprensibile e delicato di tutti quelli che un fresatore si trova ad affrontare". L'esperienza maturata in quasi mezzo secolo di attività e di collaborazioni strette con clienti di tutto il mondo ci porta a concordare con questa affermazione. Nonostante i progressi compiuti in questi 100 anni e lo sviluppo delle moderne macchine utensili CNC, veloci e affidabili, le vibrazioni sono all'ordine del giorno. Alcune delle cause più comuni sono i tagli di sgrossatura e intermittenti, i componenti con pareti sottili e la lavorazione di materiali insoliti e particolarmente duri. La scelta dell'utensile corretto e l'ottimizzazione di passate e avanzamenti sono misure essenziali per ridurre o smorzare le vibrazioni. Per ottenere prestazioni ottimali dal sistema di controllo del movimento della macchina e, di conseguenza, dal suo output, è indispensabile bilanciare il tempo ciclo con l'accuratezza e la qualità delle finiture.

Paul Maxted – Direttore di Industrial Metrology applications – Renishaw plc.

Problema

Durante il funzionamento, le macchine utensili possono generare un livello significativo di vibrazioni che rischia di incidere negativamente sugli encoder incapsulati installati al loro interno producendo misure non accurate. La qualità delle misure di posizionamento degli assi può avere un impatto diretto su diversi aspetti del processo, ad esempio l'accuratezza degli elementi e la finitura delle superfici. Tutte le soluzioni volte a migliorare le misure di posizione e a ridurre l'impatto delle vibrazioni aumentano drasticamente la qualità della produzione. Le cause principali delle vibrazioni all'interno di una macchina utensile sono:

- i. Movimento dell'utensile: può verificarsi, in certe condizioni, durante il processo di taglio. Ad esempio, durante la fresatura di materiali duri, il pezzo o l'utensile potrebbero subire deflessioni provocate da forze di taglio eccessive.
- ii. Mancanza di omogeneità nei materiali lavorati e presenza di residui sui bordi degli utensili da taglio. Un improvviso incremento della difficoltà di lavorazione può generare forze impulsive che causano vibrazioni.
- iii. Tagli intermittenti: sono comuni durante le fresature e possono generare forze impulsive che causano vibrazioni.
- iv. Disturbi dovuti alla rotazione di masse non bilanciate: variazioni negli elementi di smorzamento (ad esempio usura dei cuscinetti) oppure pezzi di lavoro fissati in modo non adeguato.
- v. Macchine utensili usurate o con scarsa manutenzione e scelta di utensili da taglio inadatti, avanzamento e rotazione del mandrino non ottimali.

Soluzione

La profonda esperienza nel campo delle macchine utensili ci ha aiutato a stabilire relazioni di partnership con i più importanti costruttori di macchine utensili e con tantissimi utenti finali. L'encoder incapsulato FORTiS™ è stato sviluppato per risolvere i problemi più comuni legati alle vibrazioni delle macchine utensili e al loro effetto sulle misure di posizione. Il design di FORTiS combina tre elementi che migliorano la resistenza alle vibrazioni meccaniche e la capacità dell'encoder di impedire che i disturbi ad alta ampiezza entrino nel ciclo di controllo della posizione:

1 Gli encoder ottici incapsulati tradizionali presentano un carrello con ruote e molle che supportano il lettore durante lo spostamento lungo la riga, come mostrato nella figura 2a. Per ogni frequenza di sollecitazione, l'ampiezza e la fase della vibrazione della guida della macchina (V_g) che sostiene il lettore saranno diversi rispetto a quelle della riga e dell'alloggiamento dell'encoder (V_m), che sono fisse sulla superficie di montaggio della macchina. Questa differenza nella risposta di ampiezza e fase deve essere assorbita dai giunti e dai componenti flessibili del carrello, come mostrato nella figura 1. Gli encoder FORTiS adottano un design senza contatto che isola con grande efficacia il corpo del lettore dall'alloggiamento, come mostrato nella figura 2b.

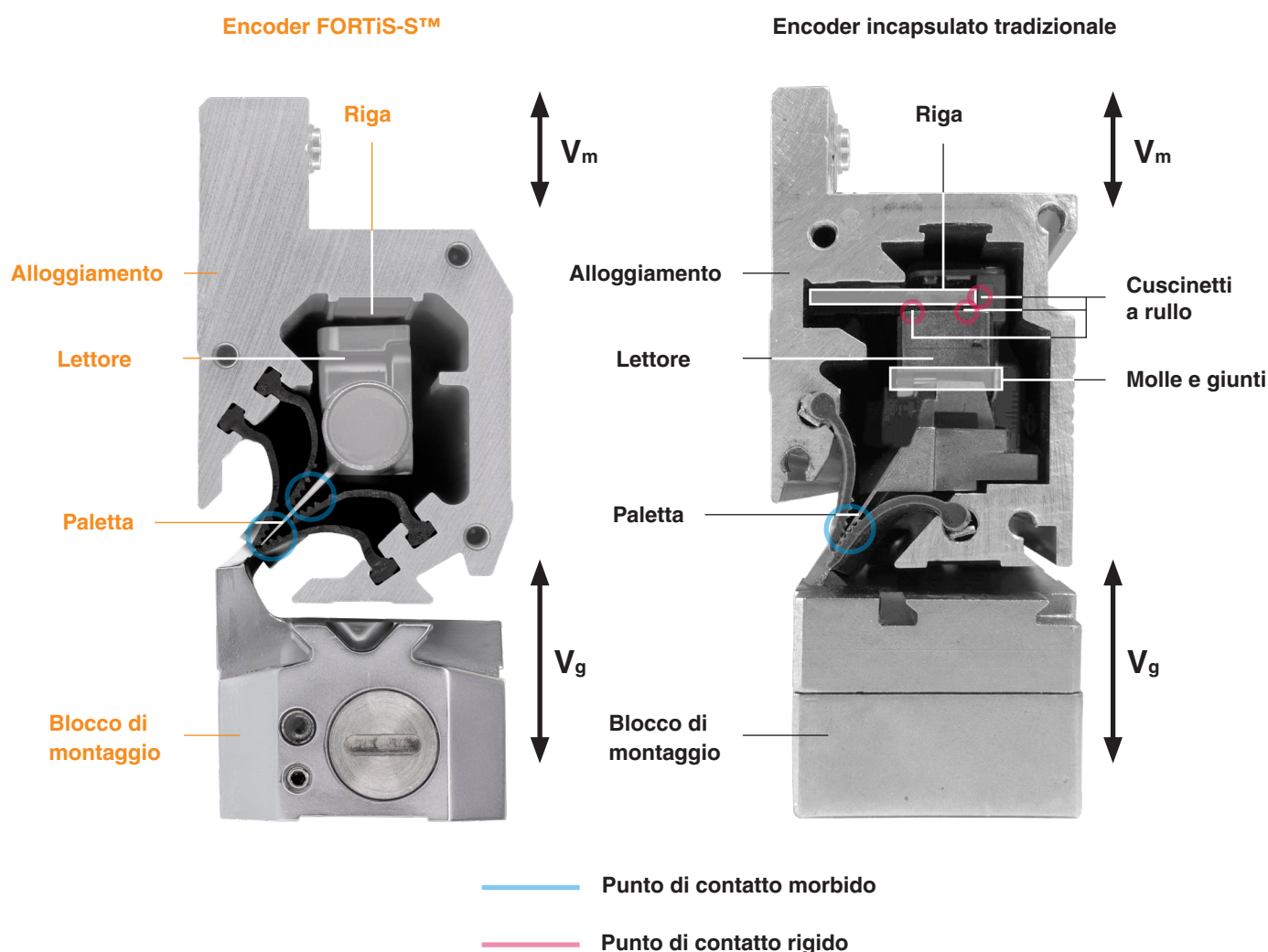


Figura 1: sezioni verticali di un encoder FORTiS-S e di un encoder incapsulato tradizionale.

2 Gli encoder ottici e incapsulati di tipo tradizionale utilizzano una riga di vetro con massa relativamente alta, sospesa su un lato dell'alloggiamento. Per evitare oscillazioni indesiderate nell'alloggiamento, causate dalle vibrazioni della riga a sbalzo, l'encoder FORTiS utilizza una riga leggera in acciaio che viene fissata sull'intera lunghezza all'interno del corpo dell'alloggiamento.

3 Il terzo elemento che contribuisce a ridurre le vibrazioni dell'encoder FORTiS è lo smorzamento a massa accordata. Uno smorzatore a massa accordata (SMA) è un dispositivo meccanico che viene montato in una posizione specifica di una struttura, per assorbire le vibrazioni di risonanza. Vengono impiegati due SMA che contrastano le vibrazioni intorno all'asse verticale e orizzontale.

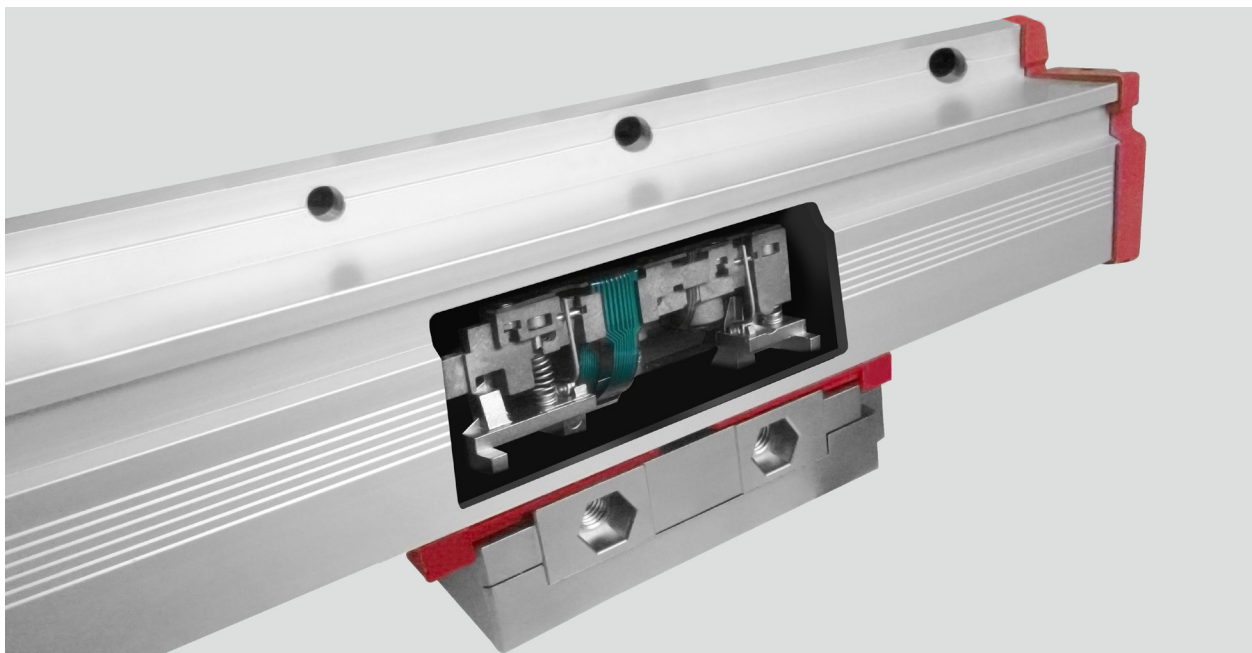


Figura 2a: encoder incapsulato di tipo tradizionale con apertura per mostrare il corpo del lettore e il carrello di supporto all'interno dell'alloggiamento. Il meccanismo del lettore rimane completamente esposto ai contaminanti che penetrano nell'alloggiamento.

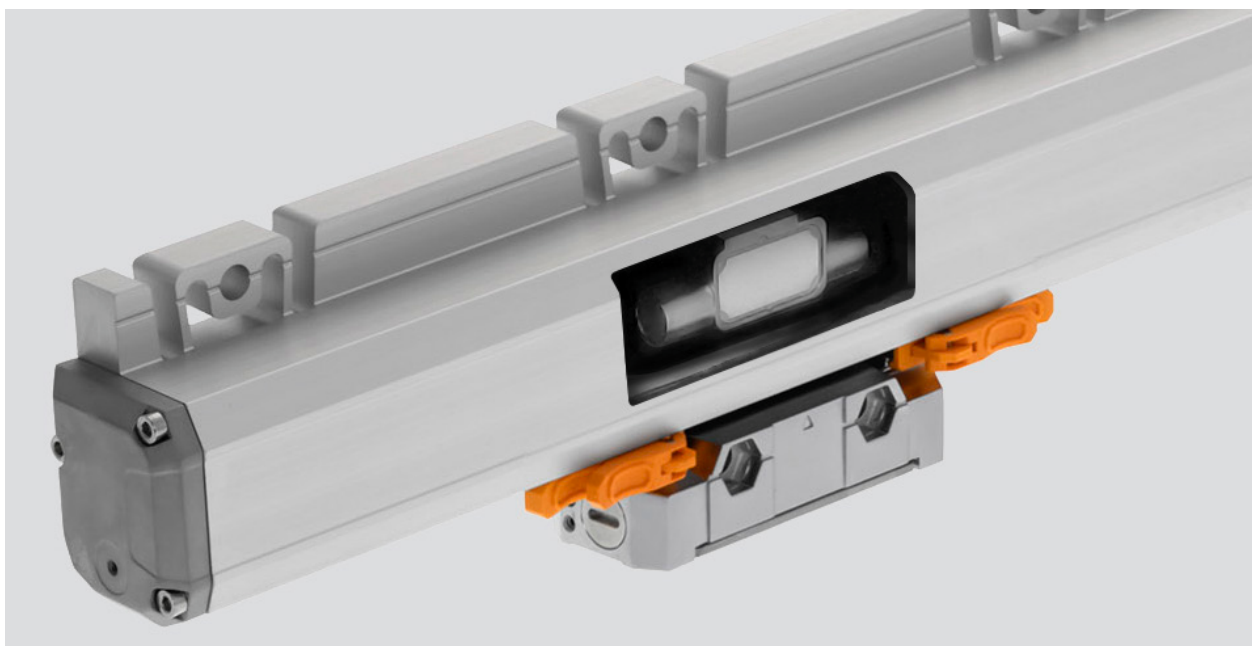


Figura 2b: encoder incapsulato FORTiS-S con apertura per mostrare il corpo del lettore, sigillato e senza contatto, all'interno dell'alloggiamento.

Introduzione allo smorzamento a massa accordata

Gli smorzatori a massa accordata vengono impiegati in molte applicazioni tecniche per assorbire le vibrazioni meccaniche in un oggetto con una frequenza di risonanza ben definita. L'utilizzo più noto degli SMA è nella costruzione di grattacieli, come ad esempio il famoso Taipei 101, in cui un enorme smorzatore a massa accordata viene utilizzato per ridurre le vibrazioni a cui l'edificio è sottoposto a causa di venti o terremoti, come mostrato nella figura 3. Gli SMA sono installati anche su linee di trasmissione elettrica, ali di velivoli, alberi a gomito delle automobili, ponti e sull'encoder FORTiS.

Lo smorzamento a massa accordata viene utilizzato negli assi verticali (asse Z) e orizzontali (asse Y) dei lettori degli encoder FORTiS. Il design base dello SMA di FORTiS si compone di due O-ring applicati a perni posti all'estremità di una massa di smorzamento, installata all'interno di una tasca rastremata per controllare la compressione degli O-ring, come mostrato nella figura 4.

Il lavoro di sviluppo degli SMA di FORTiS permette di ottenere una riduzione di 5,3 volte dell'accelerazione di picco all'estremità del lettore (alloggiamento delle ottiche) più distante dai punti di montaggio.



Figura 3: Il sistema SMA installato nel grattacielo Taipei 101.

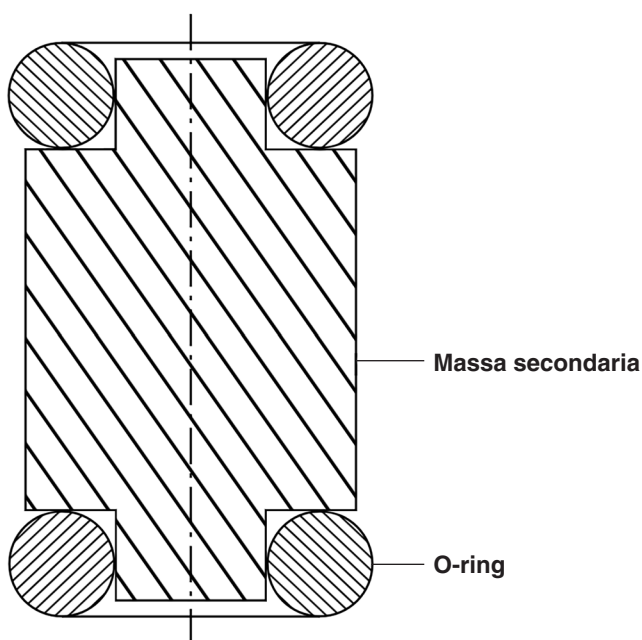


Figura 4: Sezione verticale del SMA sviluppato per l'encoder FORTiS, con gli O-ring visibili alle estremità.

Funzionamento dello smorzatore a massa accordata

In questa sezione viene descritta la teoria degli smorzatori a massa accordata per un sistema con un grado di libertà (DoF). Un problema che gli ingegneri meccanici e civili riscontrano comunemente è la risonanza, che si verifica quando un sistema produce oscillazioni molto ampie in risposta a un'eccitazione in ingresso.

I sistemi risonanti possono essere descritti nei termini di un oscillatore armonico semplice come una massa (m) su una molla con rigidità (k), come mostrato nella figura 5. In questo caso, si applica la classica equazione del moto armonico semplice, in cui x rappresenta lo scostamento lineare dall'equilibrio statico.

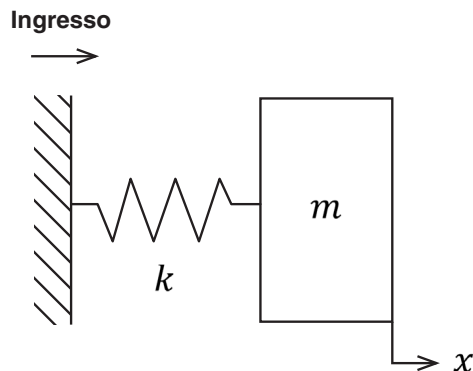


Figura 5: Sistema massa-molla con 1 gradi di libertà.

Equazione 1: $m\ddot{x} + kx = \text{input}$

L'equazione 1 implica che una massa posta su una molla abbia una frequenza naturale di risposta sinusoidale, come espresso dall'equazione 2:

$$\text{Equazione 2: } \text{frequency (Hz)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$$

se la frequenza di ingresso (una forza o uno scostamento) si avvicina alla frequenza di risonanza dell'equazione 2, il risultato sarà una risposta di risonanza ampia con conseguenze potenzialmente distruttive, come mostrato nella figura 6.

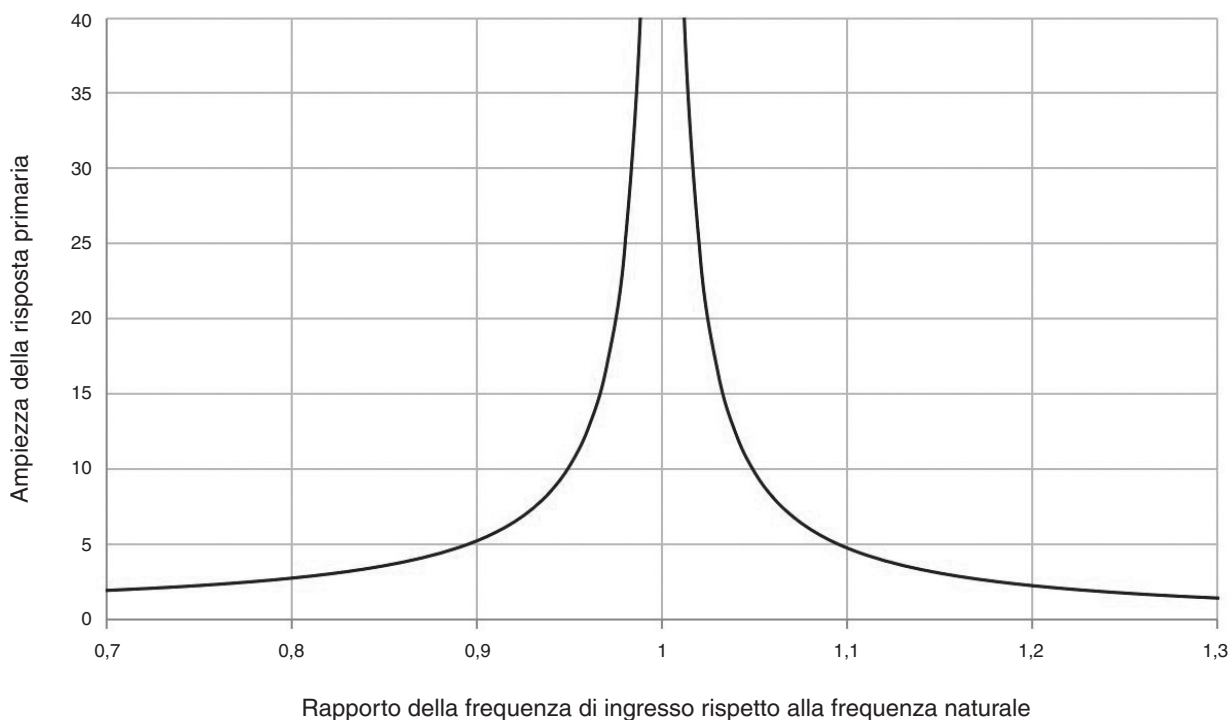


Figura 6: Risposta di risonanza di una massa su una molla.

Una strategia comune e applicabile a molti casi consiste nell'aggiungere uno smorzatore meccanico e allontanare la frequenza naturale del sistema dalla frequenza di eccitazione.

Tuttavia, questo approccio non è sempre possibile. Un grattacielo con struttura in acciaio ondeggia con la sua frequenza naturale e nulla nelle sue vicinanze può essere utilizzato come ancora per stabilizzarlo o per operare lo smorzamento. In casi come questo una delle possibili soluzioni è il ricorso a uno smorzatore di massa accordata.

La massa del lettore dell'encoder FORTiS è supportata dalla paletta che agisce come una molla, perché è molto sottile, allo scopo di agevolare l'integrità della chiusura ermetica. Le vibrazioni esterne possono generare risonanze indesiderate, a meno che non siano controllate tramite SMA installati all'interno del lettore.

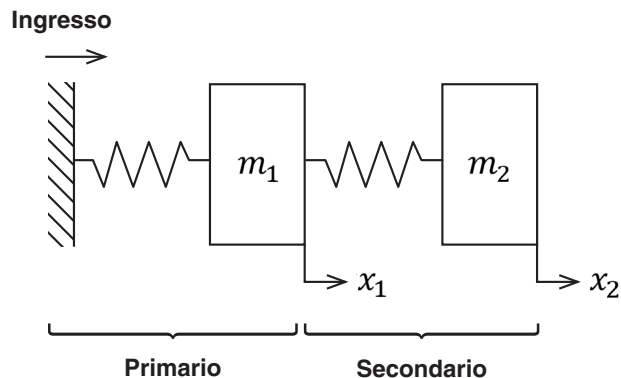


Figura 7: Sistema massa-molla con 2 gradi di libertà.

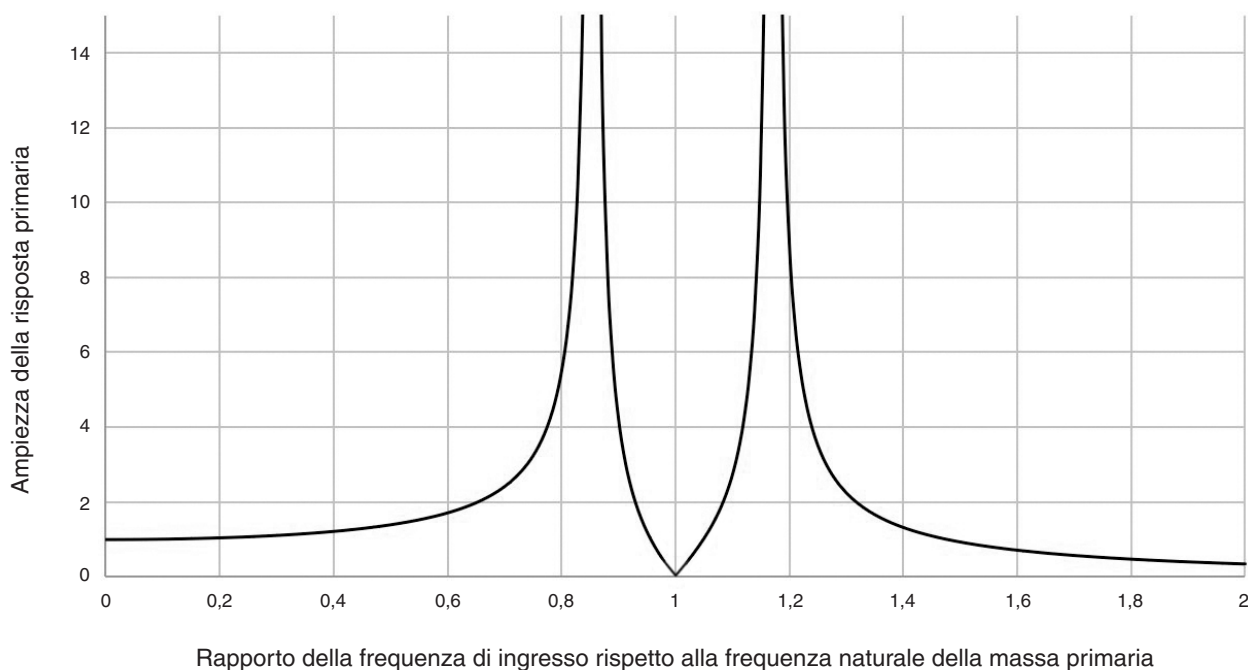


Figura 8: Risposta di risonanza di un sistema massa-molla senza smorzamento, con 2 gradi di libertà.

Il design degli SMA richiede una costruzione accurata, ma il concetto di base può essere visualizzato partendo dal sistema massa/molla e dal problema della risonanza alla sua frequenza naturale.

Si immagini che una massa secondaria (m_2), relativamente piccola, venga affiancata alla massa primaria (originale) (m_1) tramite una molla che fornisce alla massa secondaria la stessa frequenza naturale. A questo punto, il sistema complessivo (visibile nella figura 7) avrà "due gradi di libertà" e fa sì che il picco di risonanza originale venga diviso in due. Nella prima frequenza naturale (più bassa), le due masse si spostano in fase e nella stessa direzione, mentre nella seconda si muovono in direzioni opposte.

Inoltre, la massa primaria, mossa con la frequenza naturale originale, ha un'ampiezza pari a zero, mentre la massa secondaria oscilla con un'ampiezza finita. Quindi, la risonanza della massa primaria viene soppressa a spese delle due nuove risonanze illimitate, con frequenze diverse, come si può vedere nella figura 8.

Se vengono lasciate incontrollate, tali risonanze possono risultare distruttive, ma grazie allo SMA possono essere controllate localmente da uno smorzatore posto lungo la molla che supporta la massa secondaria, come mostrato nella figura 9.

Per riepilogare, lo SMA ha tre parametri progettuali fondamentali e regolabili: il rapporto fra massa secondaria e primaria (m_2/m_1), il rapporto di frequenza naturale delle masse secondarie e primarie (frequenza di accordamento) e il fattore di attenuazione dello smorzatore.

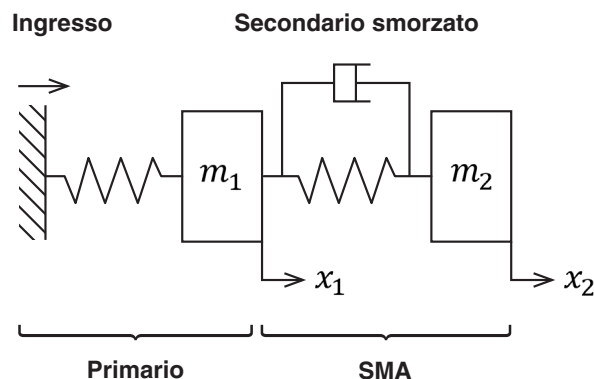
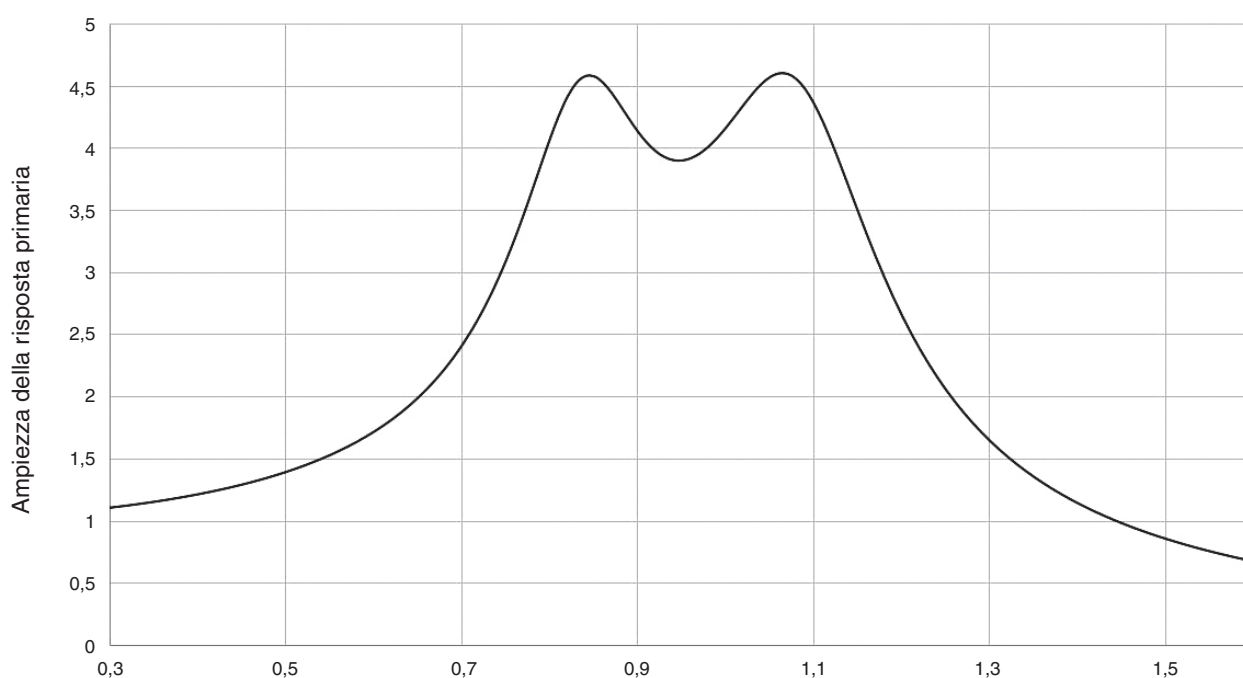


Figura 9: Sistema con smorzatore a massa accordata con 2 gradi di libertà.



Rapporto della frequenza di ingresso rispetto alla frequenza naturale della massa primaria

Figura 10: Mostra il risultato, ipotizzando un rapporto di massa del 10%, dopo l'accordatura ottimale del secondario a 91% rispetto alla frequenza originale e con uno smorzamento corretto. La risposta primaria rimane ora sempre al di sotto di 4,6 volte rispetto alla statica, in contrasto con le risposte illimitate visibili nelle figure 6 e 8.

Esistono limiti pratici riguardo la massa secondaria, ma si possono ottenere buoni risultati anche con una massa secondaria pari ad appena il 10% della primaria. La frequenza di accordamento ottimale risulta essere inferiore rispetto alla frequenza di risonanza primaria (la differenza dipende solo dal rapporto fra le masse). Infine, viene selezionato lo smorzamento secondario, in modo da minimizzare le due risposte di picco e controllare la risposta dell'ampiezza in tutte le altre frequenze.

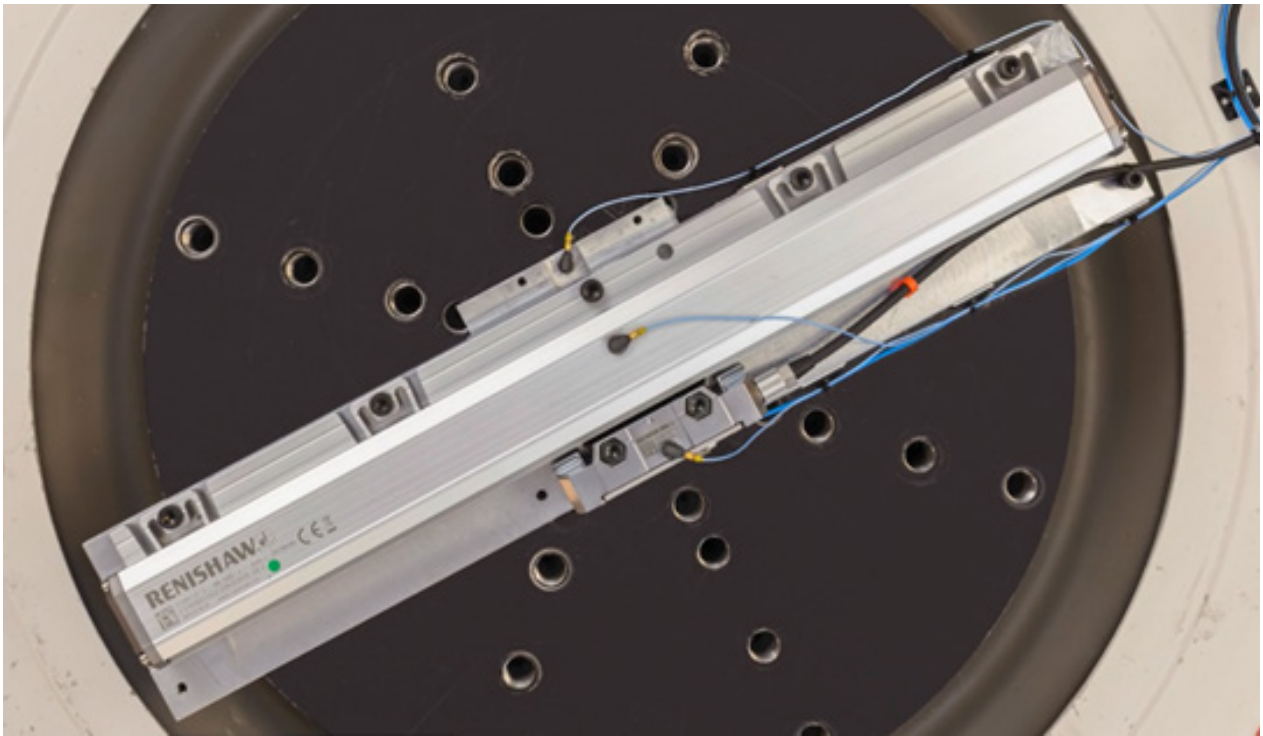
Una delle prime sfide importanti che abbiamo dovuto affrontare durante la progettazione degli SMA è stata la difficoltà di fare previsioni sui materiali da utilizzare per gli O-ring in condizioni dinamiche. Avevo bisogno di questi dati per i test e le simulazioni, in modo da selezionare il livello ottimale di durezza della gomma per diffondere la risposta di frequenza e rendere il sistema meno suscettibile alle variazioni dimensionali dei diversi componenti.

Un altro problema di difficile risoluzione è stata la definizione delle proprietà del materiale selezionato per consentire l'analisi agli elementi finiti. Infine, dovevamo ottimizzare e mettere a punto il sistema convalidandolo con i dati dei test. Il design finale ci ha fornito la migliore forma modale sull'intervallo di frequenze di risonanza del lettore. Le restanti risposte armoniche dello smorzatore di massa accordata risultano utili anche con altri livelli di vibrazioni.

Krys Jurczyk – Senior Mechanical Design Engineer di FORTiS

Test delle vibrazioni: test di vibrazione seno

Gli encoder FORTiS sono stati testati sulla deviazione nella lettura della posizione assoluta, rispetto al valore iniziale, mentre sottoposti a vibrazioni sinusoidali su un intervallo di frequenza da 50 a 2000 Hz. Il test è stato ripetuto con le seguenti ampiezze di vibrazione: 1 g, 3 g, 5 g, 10 g, 15 g, 20 g e 25 g. In altri test, non riportati in questo white paper, il test è stato ripetuto in modo da coprire un intervallo compreso fra 30 e 75 g. Inoltre, si sono svolti test aggiuntivi con livelli elevati di vibrazioni casuali.



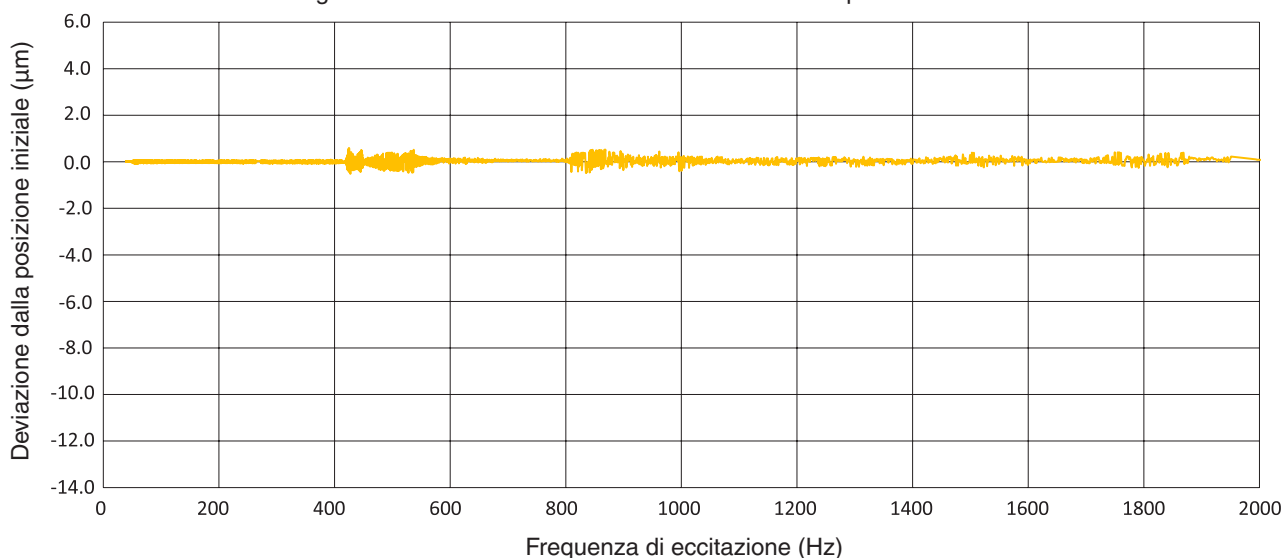
I test sono stati eseguiti utilizzando encoder FORTiS-S e FORTiS-N™ montati direttamente su un substrato e con FORTiS-N fissato a una barra di montaggio. L'encoder FORTiS-N sfrutta la stessa tecnologia di FORTiS-S, ma presenta una sezione più stretta, per applicazioni in spazi limitati.

Per ottenere dei termini di paragone, sono stati eseguiti dei test con encoder incapsulati di tipo tradizionale, equivalenti come dimensioni, forma e funzionalità e prodotti da un'azienda concorrente.

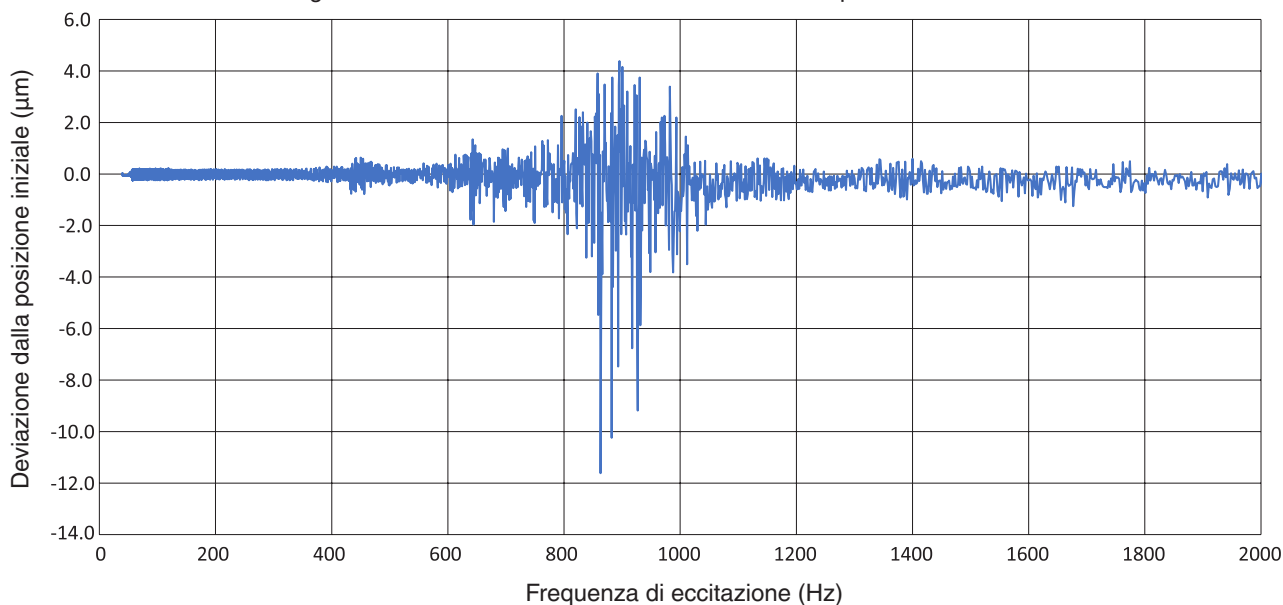
Encoder FORTiS-N rispetto al prodotto concorrente (montaggio su riga rigida)

I grafici riportati di seguito mostrano la deviazione dalla posizione originale di un encoder FORTIS-N rispetto a un encoder incapsulato tradizionale della concorrenza. Entrambi gli encoder sono stati montati su barra. L'ampiezza del profilo del test di vibrazione sinusoidale è 15 g nella direzione dell'asse Z (nella riga dell'encoder).

Deviazione di posizione dell'encoder FORTiS-N (su barra) con un'ampiezza di vibrazione di 15 g sulla direzione dell'asse Z su un intervallo di frequenza di 50 - 2000 Hz

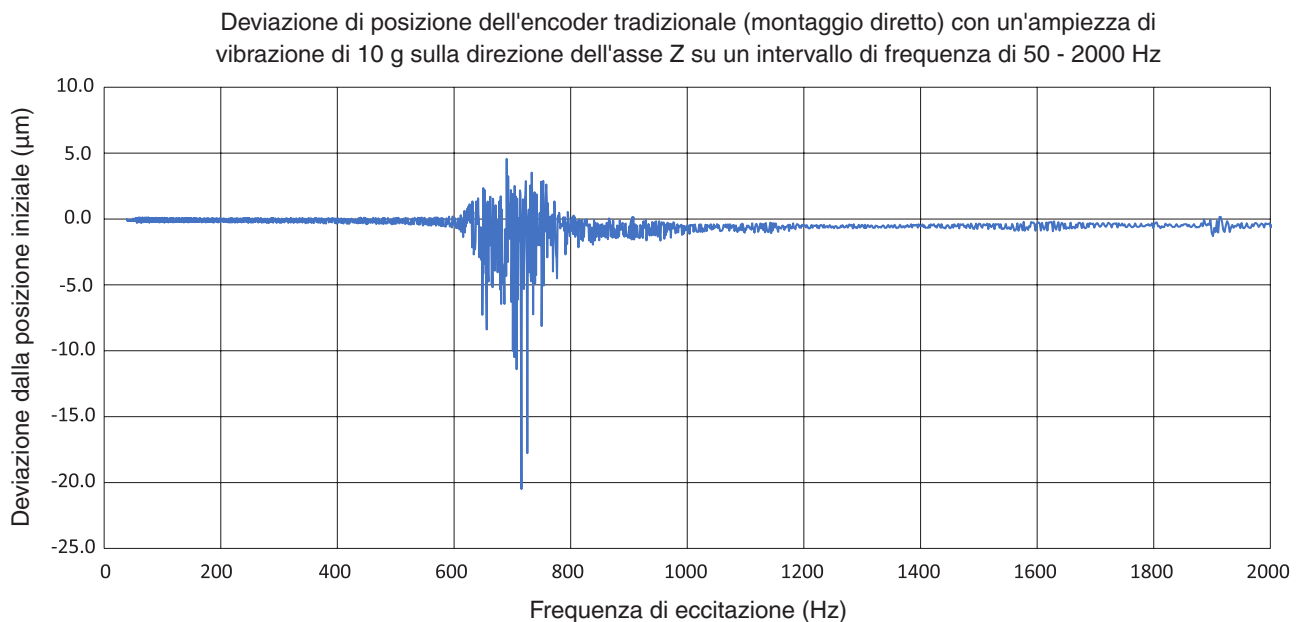
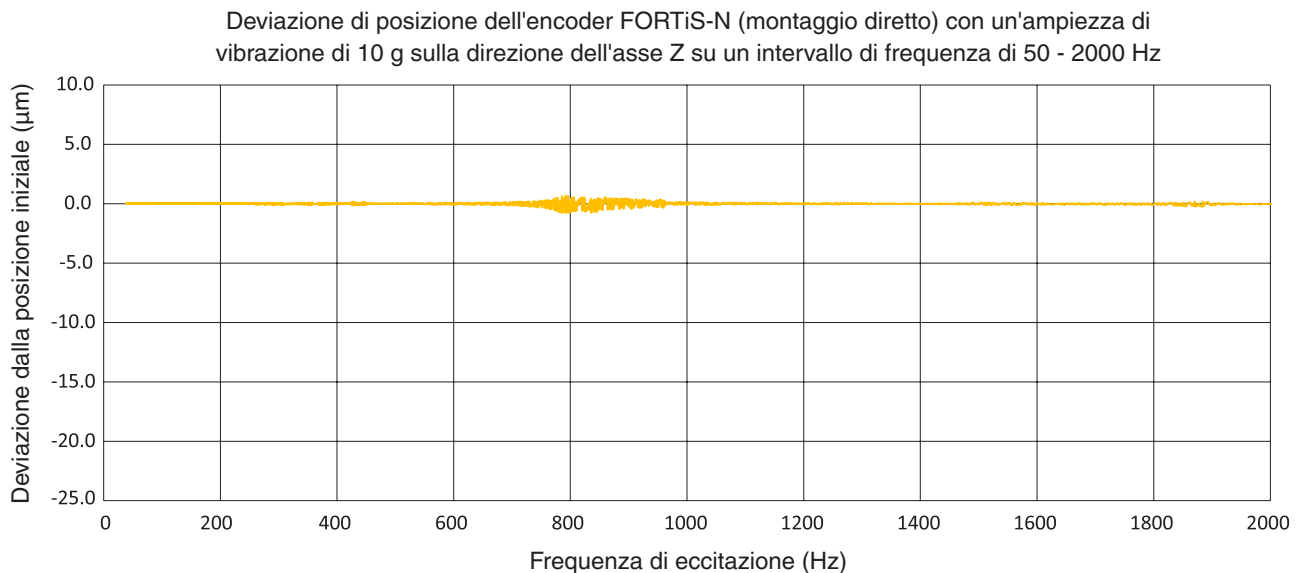


Deviazione di posizione dell'encoder tradizionale (su barra) con un'ampiezza di vibrazione di 15 g sulla direzione dell'asse Z su un intervallo di frequenza di 50 - 2000 Hz



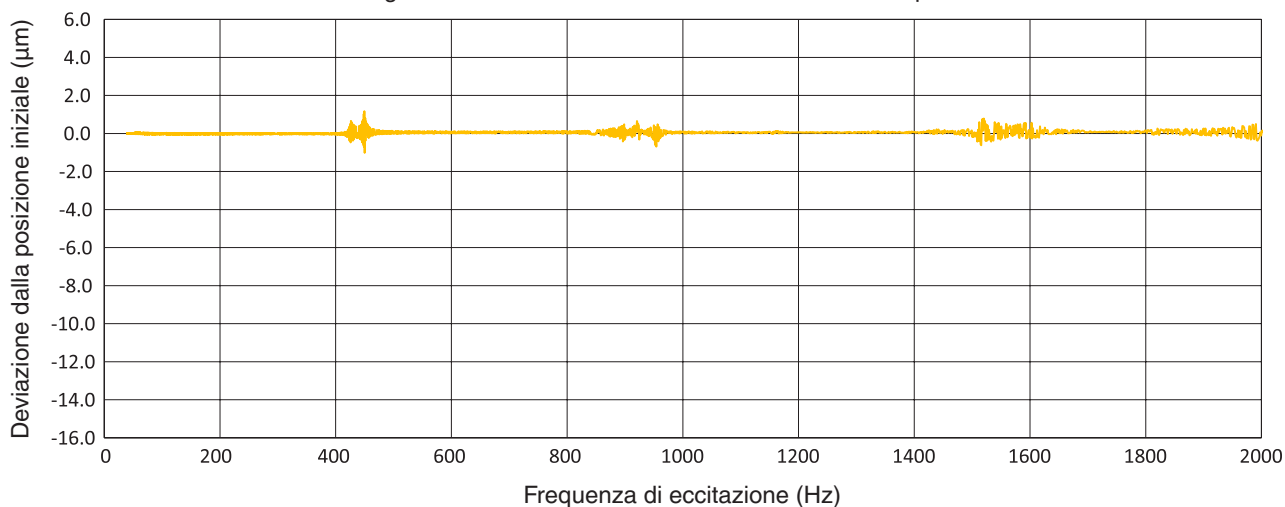
Encoder FORTiS-N rispetto al prodotto concorrente (montaggio diretto)

La seconda serie di grafici illustra la deviazione di posizione di un encoder FORTIS-N rispetto a un encoder incapsulato tradizionale della concorrenza, montato direttamente sul substrato (fissaggio di prova). In questo test, l'ampiezza della vibrazione è 10 g (applicata sulla direzione dell'asse Z).

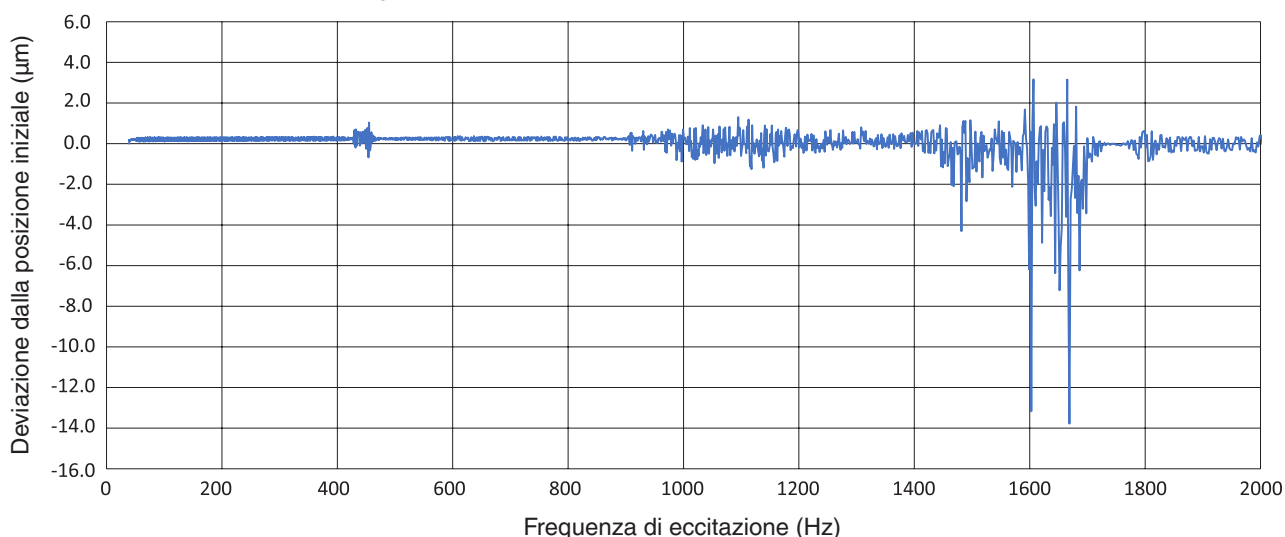


La terza serie di grafici mostra la deviazione dalla posizione di un encoder FORTiS- S rispetto un encoder incapsulato tradizionale. Entrambi gli encoder di dimensioni standard sono montati direttamente sul substrato (fissaggio di prova). In questo test, l'ampiezza della vibrazione è 25 g (applicata sulla direzione dell'asse Z).

Deviazione di posizione dell'encoder FORTiS-S (montaggio diretto) con un'ampiezza di vibrazione di 25 g sulla direzione dell'asse Z su un intervallo di frequenza di 50 - 2000 Hz



Deviazione di posizione dell'encoder tradizionale (montaggio diretto) con un'ampiezza di vibrazione di 25 g sulla direzione dell'asse Z su un intervallo di frequenza di 50 - 2000 Hz



Conclusione

Questo documento dimostra che gli encoder FORTiS forniscono una buona stabilità di posizione e assicurano un funzionamento affidabile anche quando esposti a un intervallo ampio di vibrazioni sull'intero spettro di frequenze compreso fra 50 e 2000 Hz. Inoltre, gli encoder FORTiS garantiscono un buon funzionamento per lungo tempo, anche in ambienti soggetti a vibrazioni elevate.

Il confronto con gli encoder incapsulati di tipo tradizionale, privi di smorzatori di massa accordata, conferma che FORTiS fornisce una migliore resistenza alle vibrazioni. Pertanto, gli encoder FORTiS assicurano una maggiore stabilità di posizione e un migliore controllo dei processi nelle applicazioni per macchine utensili.

www.renishaw.it/fortis



#renishaw

+39 011 9666700

italy@renishaw.com

© 2023 Renishaw plc. Tutti i diritti riservati. RENISHAW® e il simbolo della sonda sono marchi registrati di Renishaw plc. I nomi dei prodotti Renishaw, le denominazioni e il marchio "apply innovation" sono marchi di Renishaw plc o delle sue società controllate. Altri nomi di marchi, prodotti o società sono marchi dei rispettivi proprietari. Renishaw plc. Registrata in Inghilterra e Galles. Numero di registro dell'azienda: 1106260.

Sede legale: New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, Regno Unito.

SEBBENE SIANO STATI COMPIUTI SFORZI NOTEVOLI PER VERIFICARE L'ACCURATEZZA DEL PRESENTE DOCUMENTO AL MOMENTO DELLA PUBBLICAZIONE, TUTTE LE GARANZIE, LE CONDIZIONI, LE DESCRIZIONI E LE RESPONSABILITÀ, COMUNQUE DERIVANTI, SONO ESCLUSE NELLA MISURA CONSENTITA DALLA LEGGE.

Codice: PD-6517-9066-01-A