

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000025130
Data Deposito	30/09/2021
Data Pubblicazione	30/03/2023

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
E	04	H	9	02

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	60	R	19	34

Titolo

Dissipatore isteretico multidirezionale a rigidezza negativa
--

Dissipatore isteretico multidirezionale a rigidezza
negativa

A nome: Università degli Studi La Sapienza

Inventori: Andrea Salvatore, Biagio Carboni, Walter
Lacarbonara

La presente invenzione riguarda un dissipatore
isteretico multidirezionale a rigidezza negativa.

Stato della tecnica

I riferimenti [1]-[8] descrivono dei dissipatori a rigidezza negativa costituiti da meccanismi piani in grado di esercitare una forza di controllo solo in una direzione specifica. In gran parte delle applicazioni di controllo delle vibrazioni, la direzione della sollecitazione può essere arbitraria nel piano orizzontale, e quindi la tecnica nota non può adattarsi bene alle situazioni reali.

I riferimenti [9]-[11] studiano comportamenti meccanici non lineari caratterizzati da rigidezza negativa e isteresi, la cui risposta dinamica risulta efficace nell'ambito del controllo delle vibrazioni strutturali. Tuttavia, le soluzioni proposte presentano sostanziali limitazioni in ordine alla monodirezionalità della capacità smorzante e della limitata accordabilità in campo non-lineare. Nella realtà, infatti, gli agenti sollecitanti, quali sismi o vento, sono per loro natura stocastica multidirezionali.

Rimane la necessità di un dissipatore isteretico

multidirezionale a rigidezza negativa che sia in grado di rispondere a sollecitazioni lungo qualsiasi direzione del piano orizzontale e sia adattabile alle varie applicazioni di smorzamento di strutture sottoposte ad azioni dinamiche reali, fornendo elevate prestazioni a fronte di costi di costruzione ed installazione contenuti.

Scopo e oggetto dell'invenzione

Scopo della presente invenzione è quello di fornire un dissipatore isteretico multidirezionale a rigidezza negativa che risolva in tutto o in parte i problemi e superi gli inconvenienti della tecnica anteriore.

È oggetto della presente invenzione un dissipatore isteretico multidirezionale a rigidezza negativa secondo le allegate rivendicazioni.

Descrizione dettagliata di esempi di realizzazione dell'invenzione

Lista delle figure

L'invenzione verrà ora descritta a titolo illustrativo ma non limitativo, con particolare riferimento ai disegni delle figure allegate, in cui:

- la figura 1 mostra: (a) vista tridimensionale nella configurazione non deformata (a riposo), (b) spaccato tridimensionale nella configurazione deformata e (c) sezione schematica del dispositivo, secondo una forma di realizzazione del dispositivo secondo l'invenzione;

- la figura 2 mostra: (a) cicli forza-spostamento del dissipatore nelle diverse configurazioni C1, C2 e C3 (vi sono due curve continue perché si tratta di un ciclo di isteresi); (b) cicli forza-spostamento globali ottenuti tramite l'introduzione in parallelo del dissipatore ad una struttura da controllare (US), e (c) curve di smorzamento equivalente vs. spostamento per la struttura non controllata (US) e per la struttura controllata mediante le tre configurazioni secondo l'invenzione;
- la figura 3 mostra per la configurazione C3 della figura 2: (a) cicli forza-spostamento globali e (b) profili dell'energia potenziale per una configurazione mono-stabile (MS), tri-stabile (TS) e bi-stabile (BS);
- la figura 4 mostra: (a) sezione schematica di una forma realizzativa del dispositivo dell'invenzione a riposo, (b) sezione schematica del dispositivo in (a) in configurazione deformata e (c) vista dall'alto del gruppo di fili obliqui (190); sono indicate tramite quote (linee tratteggiate con frecce) le misure associate ai parametri geometrici;
- la figura 5 mostra: (a) una vista tridimensionale del modello numerico del dissipatore delle figure precedenti implementato nel codice di calcolo strutturale non lineare ABAQUS e (b) confronto tra i cicli forza-spostamento analitici (grigio) e numerici (nero);

- la figura 6 mostra una rappresentazione schematica dell'applicazione del dispositivo secondo l'invenzione in parallelo a isolatori convenzionali;
- la figura 7 mostra delle curve di risposta in frequenza in termini di spostamenti (a) e accelerazioni (b) per la struttura non controllata (US) e per la struttura con un dispositivo secondo l'invenzione (CS) nella configurazione C3;
- la figura 8 mostra lo spostamento residuo (a), spostamento massimo (b) e accelerazione massima (c) del sistema non controllato (US) e controllato dal dispositivo secondo l'invenzione in configurazione C3-mono-stabile (C3-MS) e C3-tri-stabile (C3-TS) al variare della rapidità dell'impulso (γ);
- la figura 9 mostra un esempio di applicazione (non in scala per necessità illustrative) del dispositivo come assorbitore delle vibrazioni per una struttura deformabile con risposta di tipo "hardening" (a) e "softening" (b);
- la figura 10 mostra le risposte costitutive associate ai casi della Fig. 8; e
- la figura 11 mostra degli esempi di applicazione (non in scala per necessità illustrative) del dispositivo come controvento dissipativo per una struttura deformabile in (a) e come assorbitore d'urti per un autoveicolo in (b).

Si specifica qui che elementi di forme di realizzazione differenti possono essere combinati insieme per fornire ulteriori forme di realizzazione

senza limiti rispettando il concetto tecnico dell'invenzione, come il tecnico medio del ramo intende senza problemi da quanto descritto.

La presente descrizione inoltre fa riferimento alla tecnica nota per la sua implementazione, riguardo alle caratteristiche di dettaglio non descritte, come ad esempio elementi di minore importanza usualmente utilizzati nella tecnica nota in soluzioni dello stesso tipo.

Quando si introduce un elemento si intende sempre che può essere "almeno uno" o "uno o più".

Quando si elenca una lista di elementi o di caratteristiche in questa descrizione si intende che il trovato secondo l'invenzione "comprende" oppure alternativamente "è composto di" tali elementi.

Forme di realizzazione

Si descrivono nel seguito delle forme realizzative dell'invenzione. Due o più tra le parti (elementi, dispositivi, sistemi) sopra descritte possono essere associate liberamente e considerate come kit di parti secondo l'invenzione.

Descrizione generale

In Figura 1 viene riportata una vista tridimensionale del prototipo, uno spaccato tridimensionale nella configurazione deformata e una sezione schematica per supportarne la descrizione. Il dispositivo è formato da due calotte d'acciaio, una superiore 110 ed una inferiore 120, le quali sono predisposte rispettivamente per la

connessione del dispositivo ad una struttura terza e al suolo (non mostrati). Il collegamento con la struttura terza si concretizza in una connessione maschio (dispositivo) - femmina (struttura) realizzata tramite barre verticali 130 che possono scorrere all'interno di boccole in teflon (o cuscinetti lineari di altro tipo) in modo tale da consentire un mutuo scambio di forze solamente nel piano orizzontale.

Le due estremità 110 e 120 del dispositivo sono collegate tra loro tramite una biella verticale 140 con un corpo principale 141 e cerniere (o "teste") sferiche 145 e 146 a basso attrito alle estremità del corpo principale 141. Le teste sferiche sono ruotabili in corrispondenti, adeguate sedi 125 e 116 nel corpo delle o rigidamente connesse alle rispettive basi 120, 110 affacciate. Nel caso della base inferiore 120, secondo una forma di realizzazione opzionale, la sede 125 si trova al di sopra di una molla 170. La molla infatti può comprendere una prima ed una seconda estremità opposte fissate rispettivamente a detta prima base 120 e ad una parete verticalmente mobile 175 (vi sono vantaggiosamente dei cuscinetti lineari verticali lungo i quali scorre), nella quale è formata detta prima sede 125. La molla 170 è ad esempio poliuretanica.

La molla 170 può anche essere disposta all'estremità opposta della biella 140, ovvero connessa tra la base 110 e la sede 116. In pratica, vi può essere una parete mobile geometricamente e funzionalmente simile alla parete 175 ma all'estremità opposta della biella.

L'insieme descritto viene precompresso tramite un gruppo di funi pretese 180 disposte esternamente alla biella verticale 140 (solo opzionalmente in maniera circonferenziale assial-simmetrica oppure con qualsiasi altra distribuzione geometrica). Le funi pre-tese possono essere in polimeri fibro-rinforzati per garantire elevata deformabilità e resistenza. Infine, l'estremità 110 è connessa con il piatto di connessione biella-molla mediante un gruppo di fili 190 disposti attorno alla biella, opzionalmente in configurazione circonferenziale ed assial-simmetrica, interni alle funi pretese 180 e preferibilmente in acciaio o in lega a memoria di forma. I fili 190 sono opzionali e preferibilmente disposti in maniera obliqua, ovvero con un angolo di apertura verso l'estremità inferiore 120. Per "funi" si intendono sia barre rigide che funi di varia natura, opzionalmente tensionate.

La precompressione iniziale del dispositivo mediante pretensione delle funi esterne 180 determina l'instabilità della biella verticale 140 nella posizione di equilibrio iniziale e quindi la presenza di un ramo di risposta a rigidità negativa. Di conseguenza, il dispositivo, se sollecitato in una direzione qualsiasi nel piano orizzontale (piano perpendicolare alla direzione di estensione della biella 140 in posizione di riposo, indicata dalla freccia Z in figura), esplicherà, per un certo intervallo regolabile di spostamenti, una forza nello stesso verso dello spostamento (i.e., rigidità negativa). In presenza di uno spostamento relativo tra i due estremi del dispositivo nella

direzione orizzontale (nel piano X-Y), la biella 140 ruota rigidamente attorno alla cerniera inferiore 145, spazzando, in virtù di una lunghezza minore rispetto alle funi pretese, un angolo maggiore rispetto a quest'ultime. Questa differenza di angolo descritto dalle funi 180 e dalla biella 140 determina che la componente orizzontale della forza di contrasto esercitata dalla biella 140 sulla calotta superiore 110 è maggiore della componente orizzontale della forza di trazione esercitata dalle funi 180, producendo in tal modo una risultante orientata nel verso dello spostamento. Al crescere dello spostamento relativo tra gli estremi 110 e 120 del dispositivo, il tiro delle funi 180 e quindi il livello di precompressione della biella si riduce fino ad uno spostamento limite raggiunto il quale si ha la decompressione del dispositivo. Tale progressiva decompressione produce nella risposta reologica del dispositivo un termine di rigidità cubica. La molla poliuretanic 170 alla base della biella risulta anch'essa precompressa e, durante l'atto di moto rigido della biella 140, si espande, provocando così una traslazione verso l'alto della cerniera inferiore 145 della biella. Tale traslazione verticale opzionale si traduce in un maggiore angolo spazzato dalla biella 140 e quindi nell'utile amplificazione della rigidità negativa e in un ritardo nella decompressione del dispositivo, ovvero, in spostamenti ultimi maggiori.

I vantaggi che si ottengono introducendo un contributo di rigidità negativa nella forza di richiamo totale del sistema sono la possibilità di ottenere una

forte riduzione della rigidezza e quindi delle accelerazioni e delle forze entranti nel sistema, unitamente al raggiungimento di una drastica amplificazione dello smorzamento equivalente a parità di organo dissipante 190 (nel caso in cui sia presente).

L'inserimento (opzionale) del gruppo di fili obliqui 190 permette di riconferire stabilità alla posizione di equilibrio iniziale ritardando l'entrata in gioco della rigidezza negativa e, al tempo stesso, di introdurre alti livelli di smorzamento isteretico senza perdite di performance dovute all'incremento di rigidezza riconducibile all'introduzione dei fili, poiché tale incremento viene annullato dalla rigidezza negativa opportunamente calibrata.

Ad esempio, ipotizzando una rigidezza elastica dei fili 190 uguale a quella negativa, si otterrebbe, per livelli di spostamento inferiori allo spostamento corrispondente alla plasticizzazione (fili d'acciaio) o alla trasformazione di fase (fili in lega a memoria di forma) dei fili 190, una forza nulla esplicata dal dispositivo e quindi la forza di richiamo totale del sistema coinciderebbe con quella della struttura. Per spostamenti maggiori, invece, la rigidezza negativa non è più equilibrata dalla rigidezza elastica dei fili 190, determinando così una riduzione della forza totale e della rigidezza globale (accelerazioni). Per grandi spostamenti, in prossimità dello spostamento massimo consentito, il termine di rigidezza cubico prodotto dalle non linearità geometriche tende ad annullare

quello negativo, e la risposta totale tenderà nuovamente a quella originale del sistema.

Quindi l'inserimento dei fili 190 ha tra l'altro l'obiettivo di conferire una opportuna rigidezza (high static stiffness) per piccoli spostamenti necessaria a contrastare azioni quasi statiche come quella del vento, ed una rigidezza fortemente minore (grazie alla rigidezza negativa, low dynamic stiffness) per più grandi spostamenti. Per spostamenti ancora più grandi, si ha il vantaggio di una sostanziale crescita di rigidezza positiva necessaria a limitare gli spostamenti (al di sotto di una certa soglia dipendente dal dispositivo e dalla struttura specifici).

Configurazioni e applicazioni

A seconda della presenza o meno del gruppo di fili obliqui 190, i quali sono opzionali, e del materiale costituente tali fili, si possono identificare 3 distinte configurazioni preferite del dispositivo secondo l'invenzione:

- C1) configurazione senza fili;
- C2) configurazione con fili in acciaio;
- C3) configurazione con fili in lega a memoria di forma, ovvero a base di Nickel e Titanio (NiTiNOL), con comportamento super-elastico.

In figura 2 è possibile osservare la risposta forza-spostamento (teorica) del dissipatore (a), del sistema composto da struttura più dissipatore (b) e le curve di smorzamento equivalente globale in funzione dello spostamento (c). Per smorzamento equivalente globale (ξ)

si intende il rapporto tra l'energia dissipata in un ciclo di carico-scarico e la massima energia elastica immagazzinata moltiplicata per la costante 4π . Si può osservare come tutte e tre le configurazioni producano nella risposta globale una forte riduzione della rigidità e quindi delle accelerazioni entranti e un sensibile incremento dello smorzamento equivalente. Inoltre, si nota l'effetto di irrigidimento per grandi spostamenti prodotto dal termine di rigidità cubica.

L'utilizzo delle diverse configurazioni permette di raggiungere diversi requisiti prestazionali a seconda dell'ambito di applicazione del dispositivo. Nella configurazione C1 la rigidità negativa prodotta dalla biella non è equilibrata dalla rigidità elastica dei fili, pertanto la risposta globale risulta con rigidità nulla in zero (va a zero nei cicli successivi a quello di primo carico, cfr. Figura 2 (b)) e successivo incremento della rigidità. Tale configurazione permette quindi di tagliare le forze entranti nel sistema per piccoli e grandi livelli di eccitazione (Low Static, Low Dynamic stiffness) e inoltre, di rallentare la struttura in prossimità dello spostamento ultimo tramite la calibrazione del termine cubico della rigidità (High End Run stiffness). Con le configurazioni C2 e C3 è possibile ottenere un'ulteriore modulazione della rigidità globale grazie alla rigidità elastica iniziale dei fili. Difatti, la rigidità globale può essere in tal modo modulata al fine di ottenere piccoli spostamenti per piccoli livelli di sollecitazione e piccole forze per grandi livelli di sollecitazione (High

Static, Low Dynamic stiffness). Inoltre, il gruppo di fili costituisce un'ulteriore fonte di smorzamento isteretico. La configurazione C3 si distingue dalla C2 per l'utilizzo di fili in NiTiNOL piuttosto che in acciaio, il che consente di ottenere un tipo di risposta globale auto-ricentrante (Self-Recentering capacity) grazie all'isteresi superelastica prodotta dalla trasformazione di fase austenitica-martensitica e viceversa dei fili. In tabella vengono riportate sinteticamente i requisiti prestazionali raggiungibili con le tre configurazioni assieme a potenziali applicazioni nell'ambito della mitigazione delle vibrazioni meccaniche.

CONFIGURAZIONE	REQUISITI	APPLICAZIONI
C1: senza fili	LSs, LDs, HERs	NO VINCOLO PER PICCOLE SOLLECITAZIONI: Isolamento di telescopi, macchinari e attrezzature ospedaliere; assorbimento delle vibrazioni di strutture deformabili.
C2: fili in acciaio	HSs, LDs, HERs	VINCOLO PER PICCOLE SOLLECITAZIONI: Dissipazione d'energia; Isolamento sismico di edifici di diversa destinazione d'uso.
C3: fili in NiTiNOL	HSs, LDs, HERs, SRc	VINCOLO PER PICCOLE SOLLECITAZIONI: Dissipazione d'energia; Isolamento sismico con capacità ricentrante di edifici, in particolare, di edifici strategici.

Nella Tabella, "LSs" sta per Low Static stiffness, "LDs" per Low Dynamic stiffness, "HERs" per High End Run stiffness, "SRc" per Self-Recentering capacity.

In particolare, la configurazione C3 permette di ottenere, in funzione del livello di pretensione delle funi esterne e quindi della rigidezza negativa, tre diversi tipi di risposta globale (vedi Fig. 3). Per valori della rigidezza negativa minori o uguali della rigidezza della struttura da controllare si ottiene un tipo di risposta mono-stabile ricentrante (MS in Fig. 3(b)). Per valori maggiori di rigidezza negativa la risposta diventa di tipo tri-stabile e, successivamente, bi-stabile. Mentre il primo tipo di risposta si rivela molto promettente nell'ambito dell'isolamento delle vibrazioni di edifici, gli ultimi due tipi di risposta trovano potenziale applicazione nell'ambito dell'assorbimento degli urti e dello sviluppo di attuatori di qualsiasi scala e tipologia.

Imponendo l'equilibrio delle forze nella configurazione deformata del dispositivo secondo l'invenzione (cfr. Fig. 4 b), sono state ottenute delle equazioni analitiche governanti la risposta forza-spostamento in funzione dei parametri geometrici e meccanici delle diverse parti costituenti il dissipatore. L'equazione analitica che descrive la legge forza-spostamento nel piano orizzontale del dispositivo proposto può essere espressa in funzione dei parametri geometrici e meccanici dello stesso e dell'angolo di ribaltamento α della biella 140 come:

$$F_x = k_s \frac{\left(\sqrt{(l_b \cos(\alpha) + d_s + h_m)^2 + (l_b \sin(\alpha))^2} - l_{s0} \right) (l_b \sin(\alpha))}{\sqrt{(l_b \cos(\alpha) + d_s + h_m)^2 + (l_b \sin(\alpha))^2}} - k_m (h_{m0} - h_m) \frac{(\sin(\alpha) - \mu \cos(\alpha))}{\mu \sin(\alpha) + \cos(\alpha)} + F_{xDW}$$

dove:

α è l'inclinazione rispetto all'asse R che corre perpendicolare tra le basi 120 e 110 del dispositivo a riposo (i.e. perpendicolarmente ad un piano orizzontale parallelamente al quale si estendono le due basi, cfr. Fig. 1)

k_s è la sommatoria delle rigidezze assiali delle funi esterne di precompressione 180;

k_m è la rigidezza assiale della molla 170;

μ è il coefficiente d'attrito tra le superfici di scorrimento delle due cerniere sferiche 145 e 146;

l_b è la lunghezza della biella rigida 140;

d_s è la distanza verticale misurata dal centro della cerniera sferica (testa) inferiore 145 alla faccia superiore della molla 170;

l_{s0} è la lunghezza delle funi esterne di precompressione 180 in condizione indeformata;

h_{m0} è l'altezza della molla 170 in condizione indeformata;

h_m è la altezza della molla 170 in esercizio;

F_{xDW} è la forza esercitata sul piano orizzontale dal gruppo di fili obliqui 190.

L'altezza della molla in esercizio h_m può essere espressa in funzione dell'angolo α tramite la soluzione positiva del seguente polinomio di quarto ordine:

$$a_p h_m^4 + b_p h_m^3 + c_p h_m^2 + d_p h_m + e_p = 0$$

con coefficienti:

$$\begin{aligned}
 a_p &= -(k_m + k_s)^2; \\
 b_p &= -2(k_m + k_s)(l_b \cos(\alpha)(k_m + 2k_s) + d_s(k_m + 2k_s) - h_{m0}k_m); \\
 c_p &= -2l_b \cos(\alpha)(d_s(6k_mk_s + k_m^2 + 6k_s^2) - h_{m0}k_m(2k_m + 3k_s)) - k_m^2(l_b^2 + h_{m0}^2) \\
 &\quad - \frac{1}{2}l_b^2 \cos(2\alpha)k_s(4k_m + 5k_s)4l_b^2 k_mk_s - \frac{7}{2}l_b^2 k_s^2 + 2d_s h_{m0}k_m(2k_m + 3k_s) - d_s^2(6k_mk_s + k_m^2 + 6k_s^2) + k_s^2 l_{s0}^2; \\
 d_p &= \frac{1}{2}(l_b^2 k_s(-l_b \cos(3\alpha)k_s - 2\cos(2\alpha)(2d_s k_m + 5d_s k_s - 2h_{m0}k_m)) \\
 &\quad - l_b \cos(\alpha)(4l_b^2 k_mk_s + k_s^2(7l_b^2 - 4l_{s0}^2) - 8d_s h_{m0}k_m(k_m + 3k_s) + 12d_s^2 k_s(k_m + 2k_s) + 4h_{m0}^2 k_m^2) \\
 &\quad - 2d_s(4l_b^2 k_mk_s + k_s^2(7l_b^2 - 2l_{s0}^2) + 2h_{m0}^2 k_m^2) + 4l_b^2 h_{m0}k_mk_s(k_m + 2k_s) + 4d_s^2 h_{m0}k_m(k_m + 3k_s) - 4d_s^2 k_s(k_m + 2k_s)); \\
 e_p &= \frac{1}{2}(l_b^2 k_s(\cos(2\alpha)(-l_b^2 k_s + 4d_s h_{m0}k_m - 5d_s^2 k_s + k_s l_{s0}^2) - l_b \cos(3\alpha)d_s k_s) \\
 &\quad + l_b \cos(\alpha)(d_s k_s^2(4l_{s0}^2 - 7l_b^2) + 4l_b^2 h_{m0}k_mk_s + 12d_s^2 h_{m0}k_mk_s - 4d_s h_{m0}^2 k_m^2 - 8d_s^3 k_s^2) \\
 &\quad + d_s^2(k_s^2(2l_{s0}^2 - 7l_b^2) - 2h_{m0}^2 k_m^2) + 8l_b^2 d_s h_{m0}k_mk_s + l_b^2(k_s^2(l_{s0}^2 - l_b^2) - 2h_{m0}^2 k_m^2) + 4d_s^3 h_{m0}k_mk_s - 2d_s^4 k_s^2);
 \end{aligned}$$

La forza esercitata sul piano orizzontale F_{xDW} (piano della vista dall'alto (c) della Fig. 4, ovvero piano parallelo alle basi 120 e 110, in cui è definita la direzione x) dal gruppo di fili obliqui 190 è data dalla sommatoria delle forze orizzontali degli n fili obliqui tesi (n_{dw}):

$$F_{xDW} = \sum_{i=1}^{n_{dw}} F_{xDWi}.$$

Il contributo di ognuno dei fili obliqui 190 tesi si calcola con la formula:

$$F_{xDWi} = \sigma_i(\epsilon_i, \epsilon_i) A_{dw} \frac{(l_b \cos(\alpha) + r \cos(\delta_{0i}) - \sqrt{l_b \cos(\alpha) + d_{dw}} \frac{|\sin(\alpha) - \mu \cos(\alpha)|}{\cos(\alpha) + \mu \sin(\alpha)})}{\sqrt{((l_b \cos(\alpha) + d_{dw})^2 + (l_b \cos(\alpha) + r \cos(\delta_{0i}))^2 + (r \sin(\delta_{0i}))^2)}}$$

dove:

A_{dw} è l'area della sezione di un filo obliquo;

r è la distanza misurata sul piano orizzontale tra i due estremi di un filo obliquo;

d_{dw} è la distanza verticale misurata dal centro della cerniera sferica inferiore 145 all'estremo inferiore del filo obliquo;

δ_{0i} è l'angolo descritto dalla giacitura del filo sul piano orizzontale e la direzione dello spostamento della calotta superiore;

$\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ indica il legame costitutivo del materiale costituente il gruppo di fili obliqui (acciaio per la configurazione C2 e NiTiNOL per la C3) ovvero la legge analitica che lega la tensione σ_i alla elongazione ε_i dell' i -esimo filo ed alla sua velocità di variazione $\dot{\varepsilon}_i$.

La elongazione ε_i dell' i -esimo filo è espressa da:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{((l_b \cos(\alpha) + d_{dw})^2 + (l_b \cos(\alpha) + r \cos(\delta_{0i}))^2 + (r \sin(\delta_{0i}))^2) \dots l_{DW0}}}{l_{DW0}}$$

dove l_{DW0} denota la lunghezza del filo obliquo a riposo (i.e., nella configurazione indeformata).

Tali equazioni analitiche sono state validate tramite comparazione con la risposta numerica fornita da un accurato modello tridimensionale non lineare del dispositivo implementato nel codice agli elementi finiti ABAQUS. In figura 5 vengono riportate una vista tridimensionale del modello numerico nella configurazione deformata (a) e la risposta forza-spostamento ottenuta mediante l'applicazione di una storia di spostamento ciclico (U) nel piano orizzontale (b). Il confronto tra risposta analitica e numerica conferma l'accuratezza delle equazioni ottenute (nella figura 5 (b) sono riportate due curve rappresentative,

rispettivamente, della risposta fornita dalle equazioni analitiche in linea continua e di quella ottenuta con il modello in ABAQUS in linea tratteggiata).

Data la complessità della formulazione analitica esatta, il ciclo forza-spostamento fornito da quest'ultima è stato identificato mediante una legge analitica più semplice al fine di condurre un'indagine numerica sulla risposta dinamica di una massa ad un grado di libertà rappresentativa della struttura e connessa al suolo mediante un convenzionale sistema di isolamento in parallelo al dispositivo, i cui risultati verranno esposti nei paragrafi seguenti. La legge forza-spostamento semplificata del dissipatore è composta da due termini:

$$F_x = F_M + F_{DW}.$$

Il primo contributo (F_M) rappresenta la forza a rigidezza negativa esibita dal meccanismo instabile e può essere descritta da un termine di rigidezza lineare negativa più un termine di rigidezza cubica positiva:

$$F_M = -k_n x + k_3 x^3.$$

Il secondo contributo (F_{DW}) rappresenta la forza fornita dal gruppo di fili obliqui mediante un legame costitutivo idoneo a descrivere l'isteresi (ad esempio, il modello di "Bouc-Wen"[12-13]) o il comportamento superelastico (ad esempio, il modello di "Charalampakis"[14]) del materiale costituente i fili obliqui.

Applicazione nell'isolamento delle vibrazioni e degli shock

La configurazione C3 risulta essere ottimale per la realizzazione di un sistema di isolamento dalle vibrazioni ad elevate prestazioni. L'isolamento delle vibrazioni è una strategia di mitigazione delle vibrazioni meccaniche che consiste nell'interposizione tra la struttura da isolare e la fonte delle vibrazioni di un layer deformabile che consenta il moto relativo limitando la trasmissione di accelerazioni e quindi di forze alla struttura.

Facendo riferimento alla schema di Fig. 6, installando il dissipatore 100 in parallelo ai dispositivi di isolamento 300 (ad esempio appoggi elastomerici) tra le fondamenta 200 e il primo solaio 400 (altri piani sono possibili sostenuti dalle colonne 500), si riesce ad ottenere un sistema complessivo 1000 in cui si ha contemporaneamente: (i) una rigidezza tale da evitare spostamenti dovuti all'azione del vento, (ii) un taglio delle forze entranti, (iii) un rallentamento di fine corsa e una capacità di auto-ricentrimento. L'impiego come dissipatore nell'ambito di una struttura civile è puramente indicativo, poiché il dispositivo reologico può essere adoperato per una qualsivoglia struttura principale che si vuole proteggere dalle vibrazioni quale ad esempio: apparecchiature biomedicali, nucleari, meccaniche di precisione, grandi rack di servers, grandi macchinari industriali (ad es., lavatrici), torri, silos, vasche di raccolta. Per analizzare i benefici apportati dal dissipatore al

sistema di isolamento sono state condotte analisi numeriche sulla risposta dinamica di un modello semplificato ad un grado di libertà sotto forzante armonica e impulsiva.

In figura 7 vengono riportate a titolo d'esempio le curve di risposta in frequenza della struttura non controllata (US) e controllata (CS), ovvero la risposta stazionaria del sistema sotto forzante armonica al variare della frequenza di quest'ultima. Si noti come il sistema controllato mediante il dispositivo secondo l'invenzione esibisca, in risonanza, una riduzione dello spostamento e della accelerazione di picco di circa 75% e 80%, rispettivamente.

Anche sotto forzante impulsiva, il dissipatore secondo l'invenzione riesce a produrre una forte riduzione delle accelerazioni massime e, quindi, delle forze entranti nel sistema. In figura 8 vengono riportate a titolo d'esempio le risposte massime del sistema in termini di spostamento ($\tilde{X}$) e accelerazione ($\tilde{A}$) per un moto del suolo di tipo impulsivo "a gradino" al variare della rapidità del moto. In particolare, vengono descritte le risposte relative alla struttura non controllata (US), quelle relative alla struttura controllata dal dissipatore in configurazione C3-monostabile (C3-MS), e infine le risposte relative al sistema con C3-tri-stabile (C3-TS). Si può notare che la configurazione C3-monostabile produce una riduzione delle forze di circa il 70%, spostamenti massimi uguali a quelli esibiti dalla struttura non controllata e al contempo capacità di ricentrimento, ovvero spostamenti

residui nulli. La configurazione C3-tristabile, a fronte della perdita della capacità ricentrante, esibisce un ulteriore taglio delle accelerazioni (fino a 90%).

Applicazione all'assorbimento delle vibrazioni di strutture deformabili

L'assorbimento delle vibrazioni è una strategia di mitigazione delle vibrazioni meccaniche che si basa sull'utilizzo di un oscillatore secondario connesso alla struttura da proteggere. Accordando la frequenza di risonanza di quest'ultimo con quella della struttura principale è possibile ottenere una riduzione delle vibrazioni in virtù di due fenomeni principali: l'oscillazione "contro-fase" della massa secondaria rispetto alla massa principale e la dissipazione di energia prodotta da un eventuale organo smorzante all'interno della struttura secondaria. Strutture deformabili, quali ad esempio ponti, grattacieli, torri, etc., mostrano un comportamento costitutivo (forza-spostamento) con forti non linearità di matrice prevalentemente geometrica, esibendo una risposta di tipo "softening", ovvero caratterizzata da rigidità decrescente, o di tipo "hardening", ovvero a rigidità crescente. L'utilizzo di assorbitori con comportamento costitutivo lineare risulta non ottimale per il controllo delle vibrazioni di una struttura deformabile, poiché, data la non linearità e quindi la variabilità della rigidità della struttura principale, non è possibile accordare efficacemente la rigidità dell'assorbitore e quindi la sua frequenza. Viceversa,

l'utilizzo del dispositivo secondo l'invenzione in parallelo alla struttura secondaria permette un'ampia modulazione della rigidezza, consentendo di ottenere un comportamento costitutivo dell'assorbitore sia "softening" che "hardening" a seconda della natura della struttura da proteggere.

Facendo riferimento alla figura 9, viene mostrato un esempio di applicazione 2000 del dispositivo secondo l'invenzione come assorbitore delle vibrazioni per una struttura deformabile 600 con risposta di tipo "hardening" (a) e 900 "softening" (b). Nel caso hardening, il dispositivo 100 è posto, ad esempio, all'interno di un impalcato di una struttura sospesa 600, con la base superiore 110 connessa preferibilmente ad una massa secondaria 800, la quale è appoggiata a degli appoggi elastomerici 700, ma non è in contatto con la struttura deformabile 600.

La configurazione 3000 è simile nel caso della struttura prevalentemente softening 900 (a seconda del modo eccitato la risposta può essere o softening o hardening), dove la massa secondaria 800 è collegata tramite i dispositivi 700 e 100 alla testa della struttura 900.

La figura 10 mostra le risposte costitutive associate ai casi della Fig. 9. In particolare, i due grafici in alto mostrano la risposta costitutiva della struttura 600 e dell'insieme 700-800-100, mentre quelli in basso sono associati alla risposta della struttura 900 e dell'insieme 700-800-100.

Facendo riferimento alla figura 11 (a), viene

mostrato un esempio di applicazione 4000 del dispositivo 100 secondo l'invenzione come controvento dissipativo per una struttura deformabile 4100, in cui uno o più dispositivi 100 sono inseriti tra due elementi 4200 interni alla struttura. Nella figura 11 (b) viene invece mostrato un esempio di applicazione 5000 del dispositivo 100 secondo l'invenzione come assorbitore d'urti per un veicolo 5100 che impatta contro un ostacolo 5200. In quest'ultimo caso, il dispositivo 100 è convenientemente posizionato anteriormente al veicolo appena dietro al paraurti, ma può anche essere posto nella regione posteriore o lateralmente.

Vantaggi dell'invenzione

I principali vantaggi del dispositivo secondo l'invenzione comprendono:

- a) COMPATTEZZA DEL DISPOSITIVO: i dissipatori a rigidezza negativa presenti in letteratura sono meccanismi bistabili dove la precompressione viene affidata a elementi deformabili precompressi e inseriti nel telaio di contrasto. Tali elementi, soggetti a compressione e quindi a possibili fenomeni di instabilità, sono solitamente realizzati tramite molle elicoidali in acciaio ed assumono dimensioni importanti in proporzione alla forza di controllo esplicata. Con il dispositivo proposto, invece, si riescono ad ottenere elevate forze di controllo contemporaneamente a dimensioni contenute del dissipatore grazie alla sinergia di due fattori:

- la precompressione viene raggiunta tramite la pretensione delle funi esterne e gli elementi compressi, ovvero la biella rigida e la molla poliuretana, non sono suscettibili a fenomeni di instabilità per la morfologia degli elementi e la natura dei vincoli applicati.
- L'utilizzo di materiali ad alte prestazioni quali Fiber Reinforced Polymer (FRP) per le funi pretese e poliuretano per la molla di espansione permette di ottenere elevati livelli di pretensione iniziale.

La compattezza del dissipatore è un aspetto di fondamentale importanza in chiave progettuale e in termini di facilità di installazione in strutture esistenti e di nuova progettazione.

- b) MULTIDIREZIONALITÀ DELLA RISPOSTA: la maggior parte dei dissipatori a rigidità negativa presenti in letteratura sono meccanismi piani in grado di esercitare la forza di controllo solo in una direzione specifica. In gran parte delle applicazioni di controllo delle vibrazioni la direzione della sollecitazione può essere una qualsiasi nel piano orizzontale, per questo si rende necessario un tipo di risposta del dissipatore di tipo "isotropo".
- c) VERSATILITÀ DELLA RISPOSTA: Modulando il tiro e il numero delle funi esterne, le dimensioni relative tra la biella e le funi, e la disposizione e il materiale delle funi inclinate del gruppo smorzante si possono ottenere differenti comportamenti reologici in funzione dell'ambito di applicazione del dissipatore.

Si elencano nel seguito le principali applicazioni del dispositivo:

- Dispositivi di isolamento delle vibrazioni;
- Dispositivi di assorbimento degli urti;
- Dispositivi di smorzamento a masse accordate;
- Controventi dissipativi di strutture e infrastrutture;
- Attuatori meccanici non lineari.

Bibliografia

- [1] Platus, D. L. (1993). Vibration isolation system. US5310157A
- [2] Avshalom Suissa (2013). Method and apparatus for suspension damping including negative stiffness. US9370982B2
- [3] Zhou Peng (2017). The adjustable passive negative stiffness damper of series mechanism. China CN106836543A.
- [4] Ma Yuhong (2020). Shape memory alloy negative stiffness damping device. China CN111119366A
- [5] Michael Constantinou (2012). Negative stiffness device and method. United States US8857110B2
- [6] Hanoi Sanxiu (2006). Negative rigid device and vibration isolation structure having the negative rigid device. China CN101351601B.
- [7] Hirozaki Iemura (2013). Negative rigidity damper. Japan JP6304933B2.
- [8] Cao Sa Sa (2019). A kind of SMA negative stiffness damping device. China CN110397175A

- [9] Salvatore, A., Carboni, B. and Lacarbonara, W. (2020) "Nonlinear dynamic response of an isolation system with negative stiffness and Shape Memory-based damping." ASME, IDETC-CIE 2020 Volume 2: 16th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC). DOI: 10.1115/DETC2020-22541
- [10] Salvatore, A., Carboni, B. and Lacarbonara, W. (2021) "Nonlinear dynamic response of a Negative Stiffness-Shape Memory Alloy isolation system." Nonlinear Dynamics, DOI: 10.21203/rs.3.rs-186071/v1
- [11] Salvatore, A. and Lacarbonara, W. (2021) "On the shock performance of a tri-stable isolator." NODYCON 2021 Virtual, Feb. 16-19, 2021, presentation only.
- [12] Bouc R, Forced vibration of mechanical systems with hysteresis, Materials Science 1967.
- [13] Wen Y, Method for random vibration of hysteretic Systems, Journal of the Engineering Mechanics Division (102), 249-263, 1976
- [14] Charalampakis AE, Tsiatas GC, A Simple Rate-Independent Uniaxial Shape Memory Alloy (SMA) Model, Frontiers in Built Environment (4), 2018.

In quel che precede sono state descritte le preferite forme di realizzazione e sono state suggerite delle varianti della presente invenzione, ma è da intendersi che gli esperti del ramo potranno apportare modificazioni e cambiamenti senza con ciò uscire dal relativo ambito di protezione, come definito dalle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Dissipatore (100) isteretico multidirezionale a rigidezza negativa, comprendente:

- Una prima base (120) fissabile ad una prima struttura (200) ed affacciata ad
- Una seconda base (110) fissabile ad una seconda struttura (400);

in cui dette prima (120) e seconda (110) base si estendono parallelamente ad un piano orizzontale, il dissipatore (100) essendo caratterizzato dal fatto di comprendere ulteriormente:

- Una biella (140) con un corpo allungato (141) in una direzione di estensione principale e alle cui estremità opposte sono fissate una prima (145) ed una seconda (146) testa sferica;
- Una prima sede (125) in o connessa a detta prima base (120), la prima sede essendo configurata per accogliere parzialmente detta prima (145) testa sferica in modo che detta biella possa ruotare in tutte le direzioni di detto piano orizzontale;
- Una seconda sede (116) in o rigidamente connessa a detta seconda base (110), la seconda sede essendo configurata per accogliere parzialmente detta seconda (146) testa sferica in modo che detta biella possa ruotare in tutte le direzioni di detto piano orizzontale;
- Una pluralità di funi (180) connesse tra detta prima (120) e detta seconda (110) base, disposte parallelamente attorno a detta biella (140) quando

il dissipatore è a riposo;
in cui la pluralità di funi (180) è pre-tensionata in modo da mantenere la biella (140), con il dissipatore (100) a riposo, in configurazione perpendicolare a detto piano orizzontale.

2. Dissipatore secondo la rivendicazione 1, in cui è ulteriormente compresa una molla (170) con una prima ed una seconda estremità opposte fissate rispettivamente a detta prima (120) o a detta seconda base (110) e ad una parete mobile (175) lungo una direzione perpendicolare a detto piano orizzontale, nella parete mobile essendo formata detta prima (125) o detta seconda sede (116) rispettivamente.

3. Dissipatore secondo la rivendicazione 2, in cui è compresa una molteplicità di fili (190) connessi tra detta parete mobile (175) e detta seconda (110) o prima base (120) rispettivamente, i fili della molteplicità di fili (190) essendo disposti circonferenzialmente e in modo assial-simmetrico rispetto a detta biella (140).

4. Dissipatore secondo la rivendicazione 3, in cui i fili di detta molteplicità di fili (190) sono disposti convergenti a partire dalla parete mobile (175) rispetto alla direzione perpendicolare a detto piano orizzontale.

5. Dissipatore secondo la rivendicazione 3 o 4, in cui la molteplicità di fili (190) è realizzata in acciaio o in lega a memoria di forma, in particolare NiTiNOL, o

altre leghe metalliche o miscele polimeriche fibro-rinforzate ad effetto superelastico.

6. Dissipatore secondo uno o più delle rivendicazioni da 1 a 5, in cui la molteplicità di funi (180) è realizzata in polimeri fibro-rinforzati.

7. Dissipatore secondo uno o più delle rivendicazioni da 1 a 6, in cui la seconda base (110) è provvista di mezzi di fissaggio alla seconda struttura, in cui i mezzi di fissaggio comprendono barre verticali (130) perpendicolari a detto piano orizzontale.

8. Dissipatore secondo la rivendicazione 7, in cui dette barre verticali (130) sono inserite all'interno di boccole in teflon o altri tipi di cuscinetti lineari.

9. Sistema smorzato (1000), comprendente una prima struttura (200), una seconda struttura (400) ed uno o più dissipatori (100) secondo una o più delle rivendicazioni da 1 a 8, in cui in ciascun dissipatore (100) la prima base (120) è fissata alla prima struttura che è un riferimento fisso (200) e la seconda base (110) è fissata alla seconda struttura (400) che è una struttura da smorzare.

10. Sistema smorzato secondo la rivendicazione 9, in cui detti uno o più dissipatori (100) sono disposti in parallelo a uno o più dispositivi di isolamento (300) interposti lungo detto piano orizzontale tra il

riferimento fisso (200) e la struttura da smorzare (400).

11. Sistema smorzato (2000, 3000), comprendente una prima struttura (600, 900) ed uno o più dissipatori (100) secondo una o più delle rivendicazioni da 1 a 8, in cui in ciascun dissipatore (100) la prima base (120) è fissata alla prima struttura (600, 900) e la seconda base (110) è fissata ad una massa (800) non collegata a nessuna struttura.

12. Sistema smorzato (4000), comprendente una struttura (4100) con uno o più insiemi di elementi strutturali interni (4200), ciascun insieme comprendendo almeno due elementi (4200), nonché uno o più corrispondenti dissipatori (100) secondo una o più delle rivendicazioni da 1 a 8, in cui ciascuno di detti uno o più dissipatori (100) è interposto tra e connette ognuno di detti almeno due elementi.

13. Sistema smorzato (5000), comprendente uno o più dissipatori secondo una o più delle rivendicazioni da 1 a 8 inseriti all'interno di un autoveicolo (5100), al fine di assorbire un impatto di detto veicolo contro un ostacolo (5200).

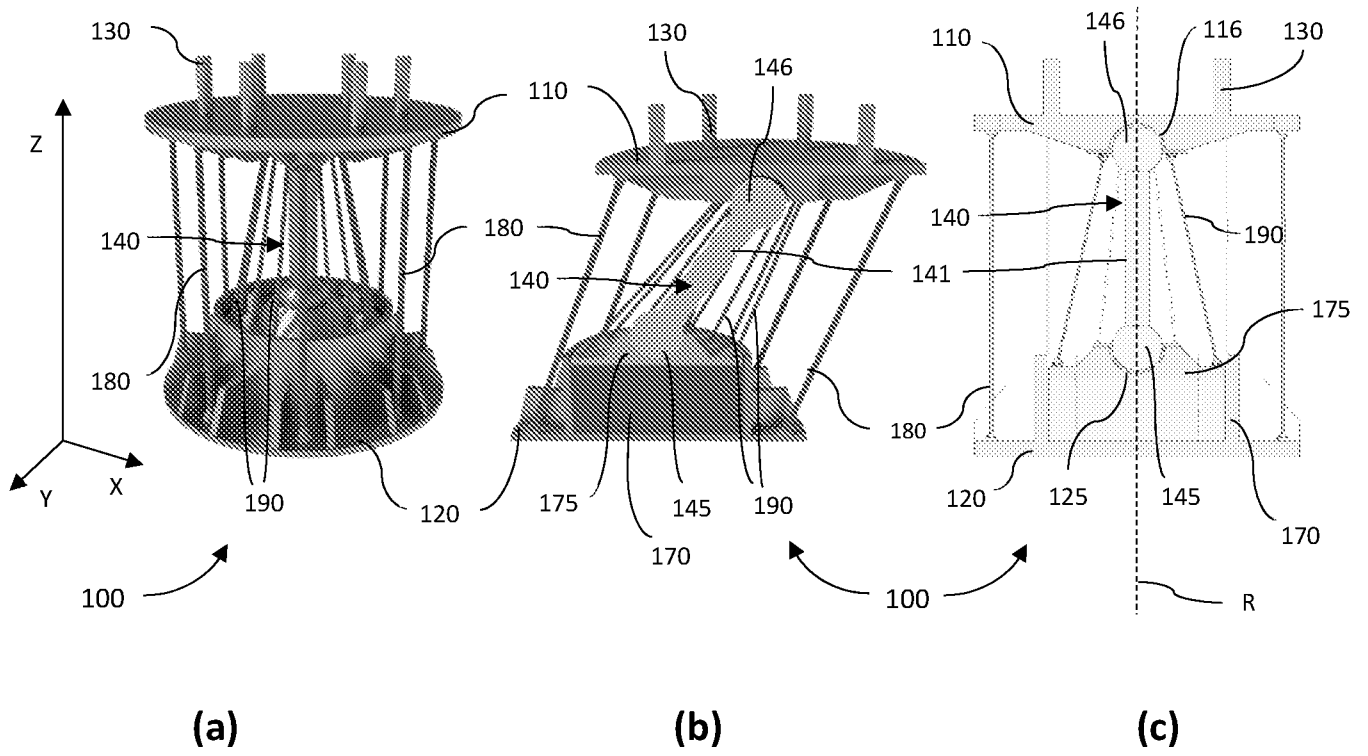


Fig. 1

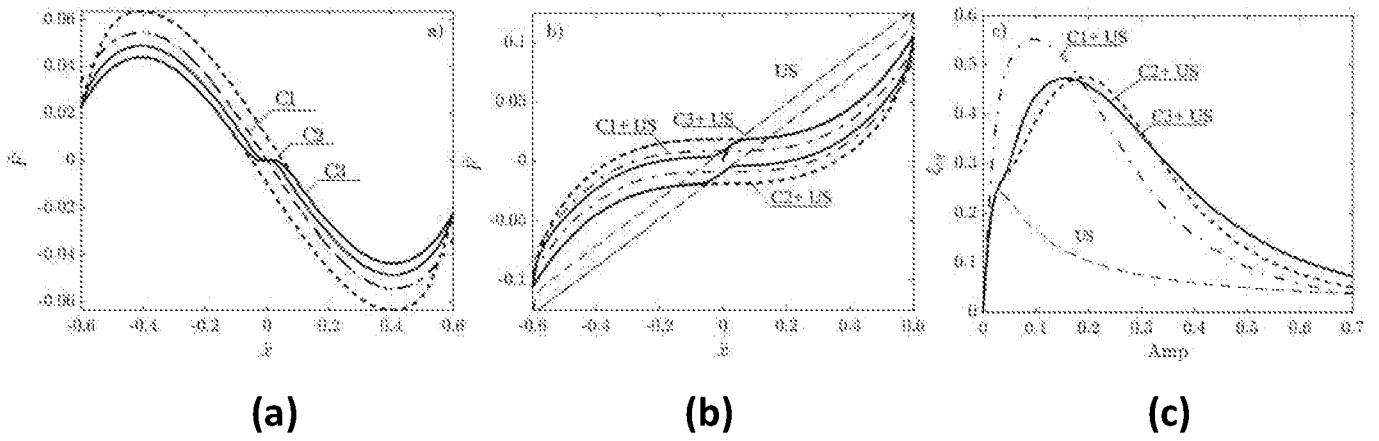


Fig. 2

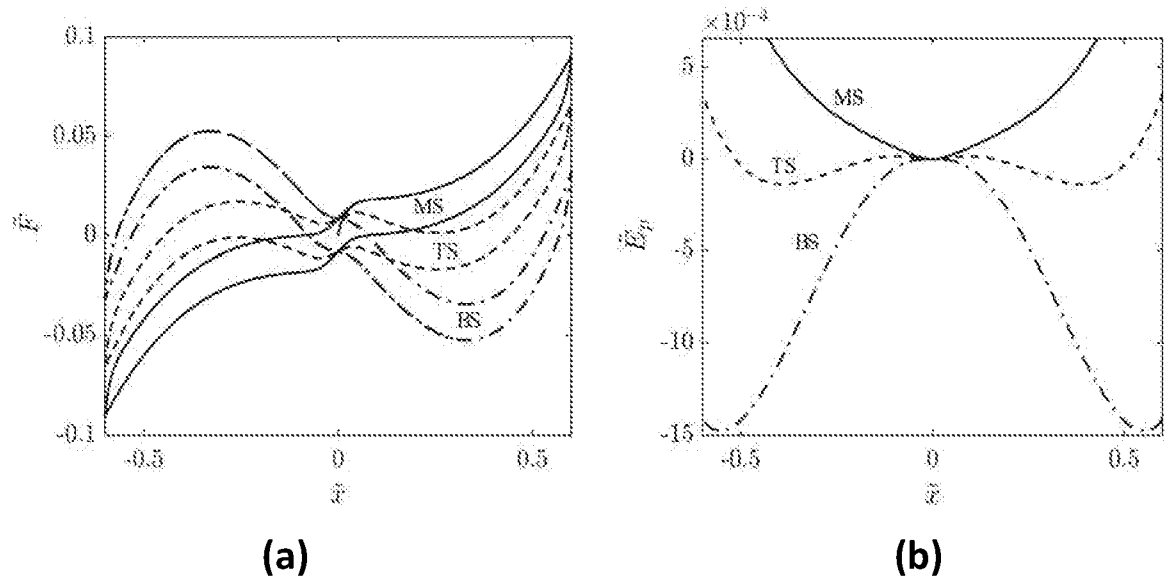


Fig. 3

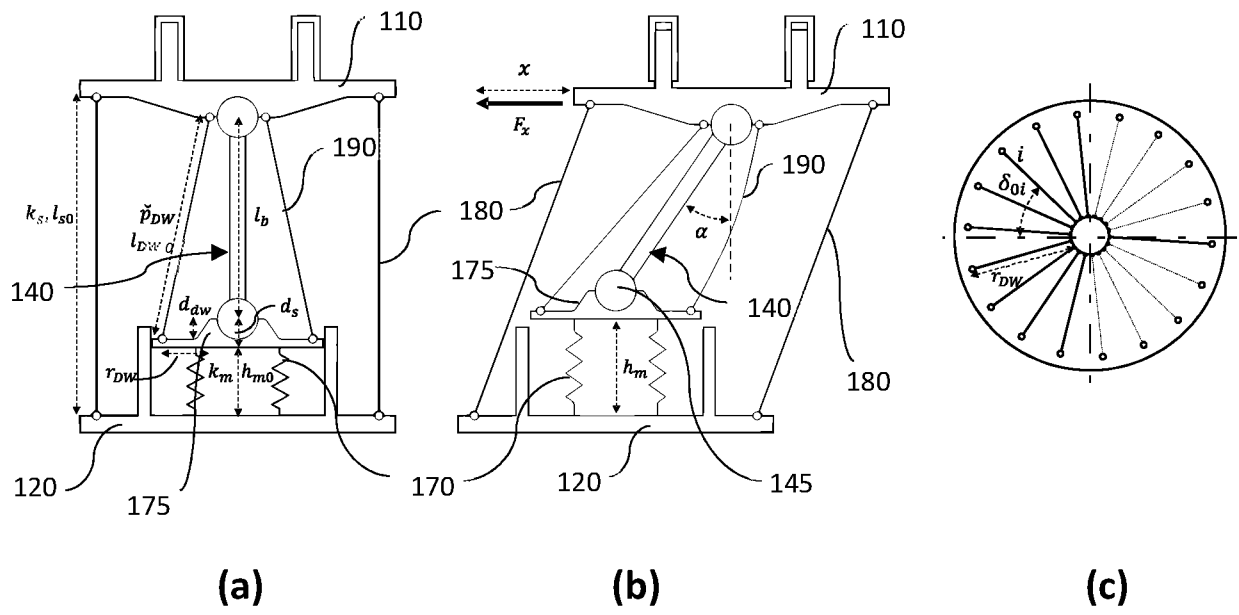


Fig. 4

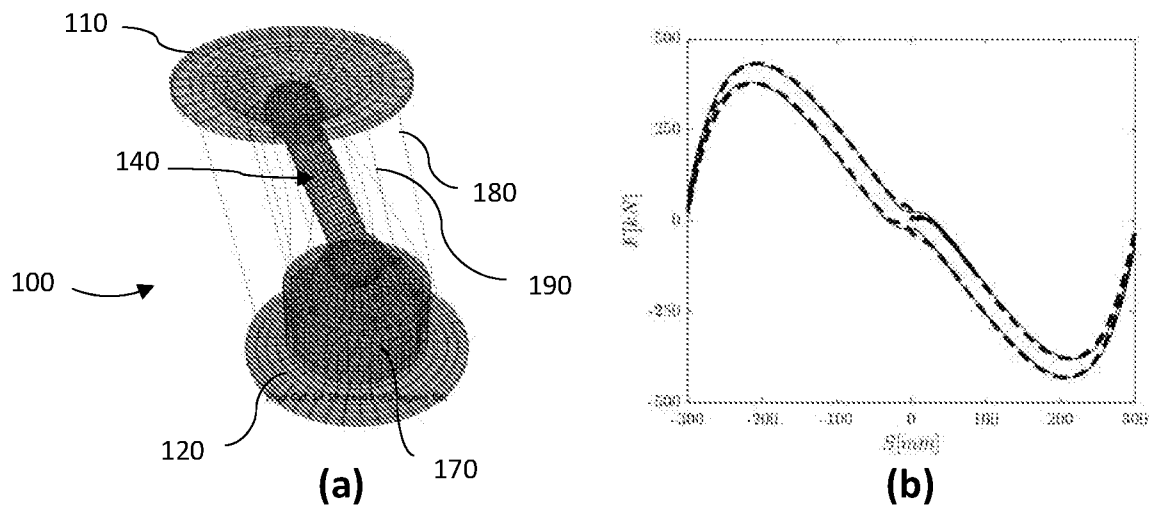


Fig. 5

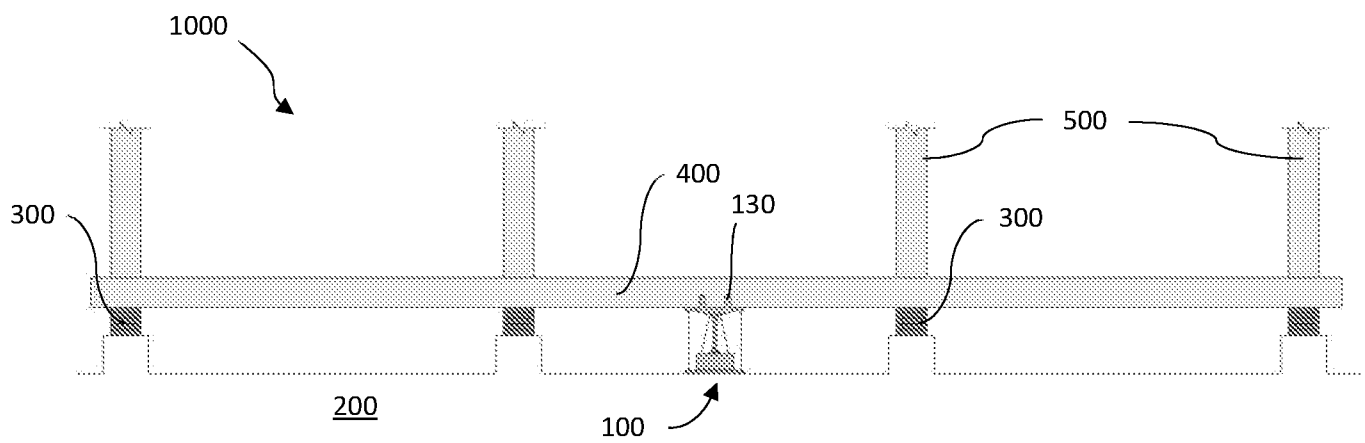


Fig. 6

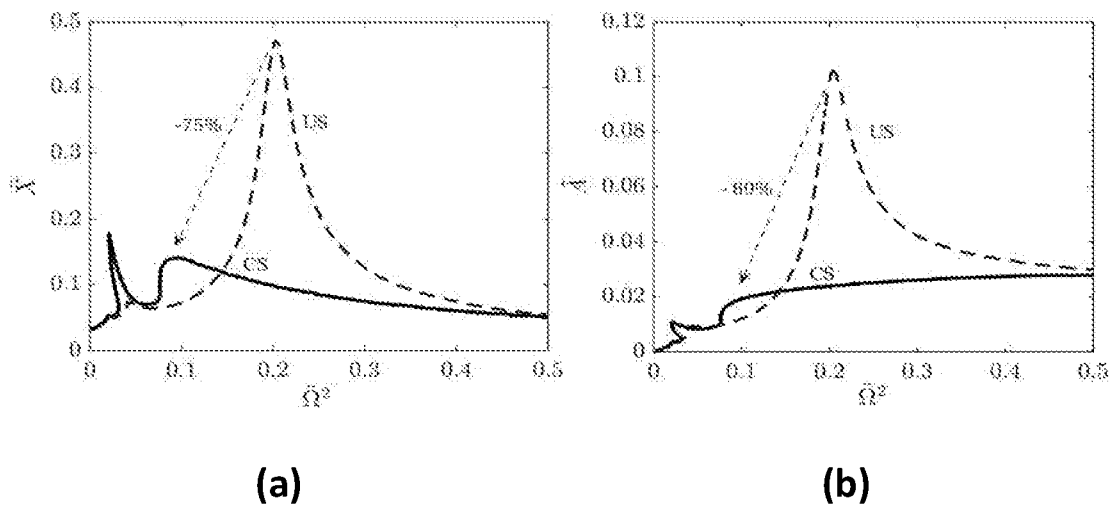


Fig. 7

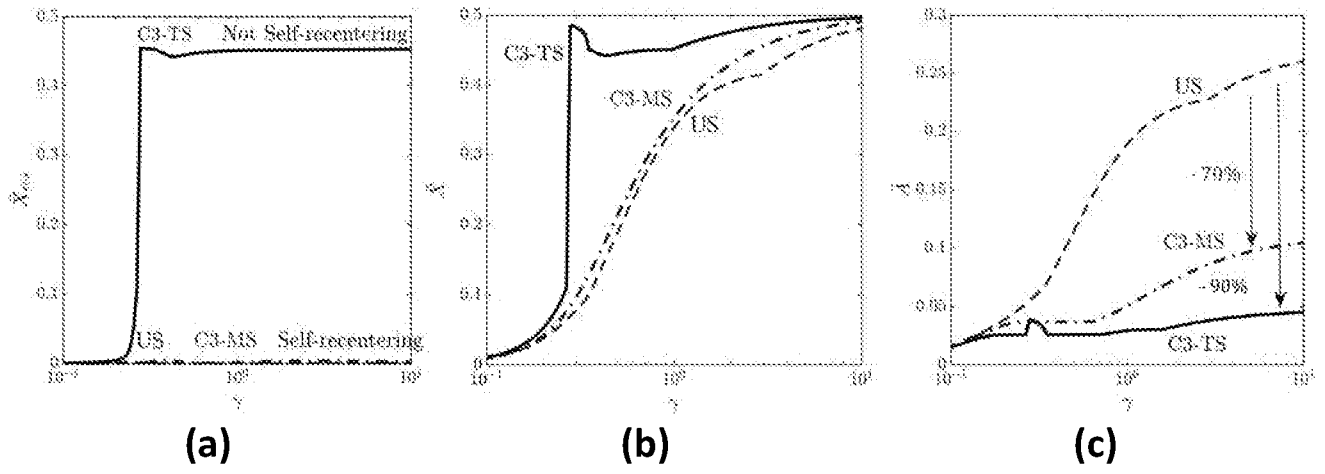


Fig. 8

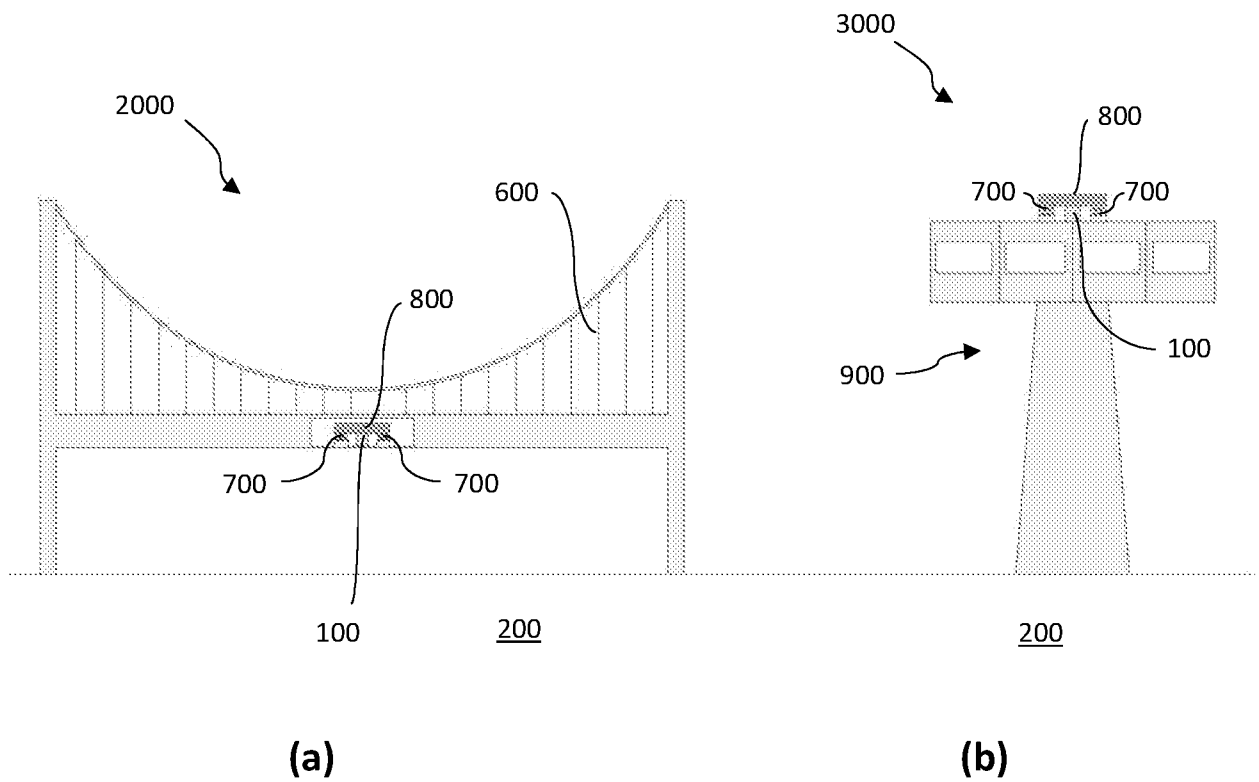


Fig. 9

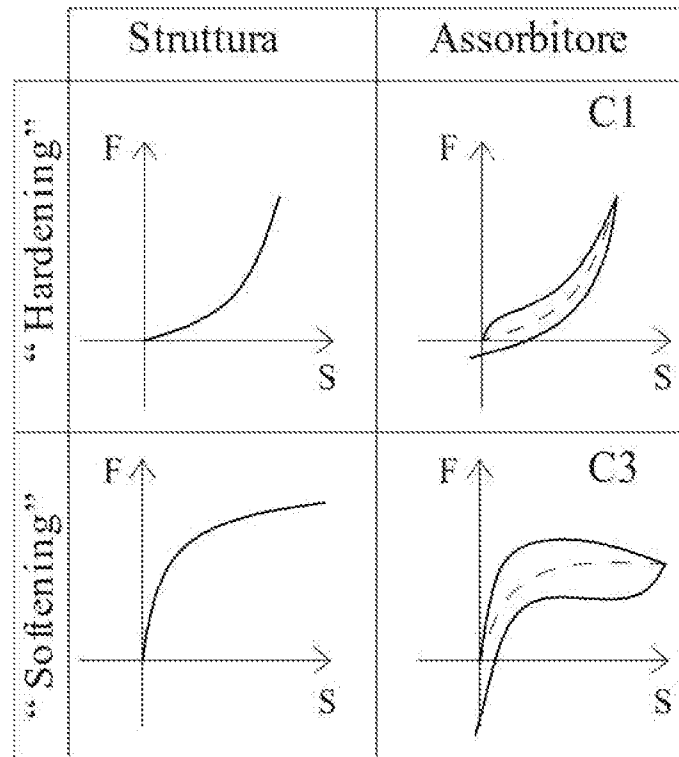
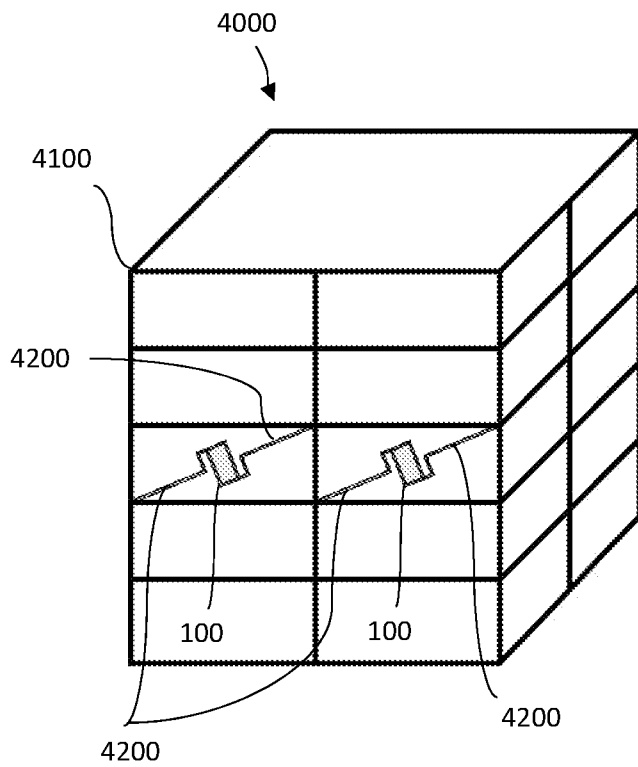
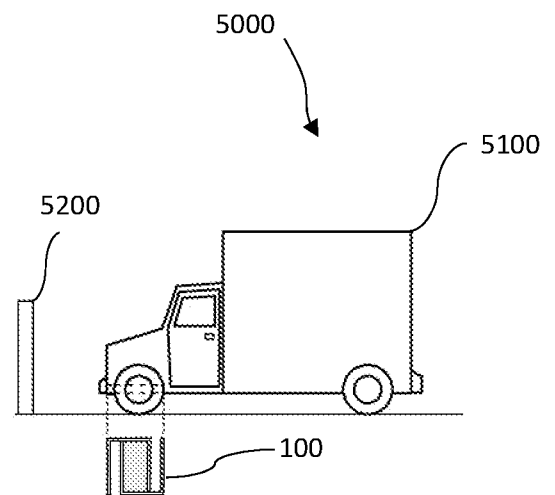


Fig. 10



(a)



(b)

Fig. 11