

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **226397**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **400096**

(22) Data zgłoszenia: **23.07.2012**

(51) Int.Cl.

F16F 15/00 (2006.01)

F16F 15/02 (2006.01)

F16F 15/04 (2006.01)

E01D 11/00 (2006.01)

G01M 1/00 (2006.01)

(54)

**Sposób redukcji rezonansowych drgań cięgien
w obiektach mostowych podwieszonych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

15.04.2013 BUP 08/13

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

31.07.2017 WUP 07/17

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, Wrocław, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

WOJCIECH PAKOS, Lubin, PL

ZBIGNIEW WÓJCICKI, Wrocław, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Kinga Więckowska

PL 226397 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób redukcji rezonansowych drgań cięgien w obiektach mostowych podwieszonych w postaci kładek dla pieszych lub mostach podwieszonych.

Występowanie drgań rezonansowych może uniemożliwiać prawidłową eksploatację całego obiektu mostowego, a nawet może prowadzić do jego awarii. Drgania rezonansowe cięgien najczęściej są wywoływane wieloma czynnikami wymuszającymi, na przykład obciążeniem komunikacyjnym, siłami aerodynamicznymi, które wynikają z opływu powietrza wokół konstrukcji, obciążeniami sejsmicznymi czy parasejsmicznymi. Pojawiają się one również w wyniku wymuszenia związanego ze specyficznym sposobem użytkowania np. celowym, rytmicznym ruchem ludzi na kładkach. Drgania rezonansowe o dużych amplitudach przemieszczeń powstają w chwili zrównania się częstości drgań wymuszających z częstością własną cięgna podwieszającego.

Dotychczasowo do redukcji drgań cięgien w kładkach dla pieszych i mostach podwieszonych stosowane są różnego rodzaju tłumiki pasywne instalowane w rurach osłonowych prowadzących cięgno do zakotwienia np. tłumiki elastomerowe, cieczowe – z tarcie wiskotycznym, radialne – z tarcie suchym lub dodatkowe amortyzatory instalowane na pomoście. Amortyzatory te podtrzymują wtedy cięgno w sposób podatny. Sposób działania takich urządzeń polega na stworzeniu oporów tarcia i pochłanianiu bądź rozpraszaniu energii mechanicznej układu drgającego. Taki sposób redukcji drgań jest opisany m.in. w publikacji „Mosty podwieszone, projektowanie i realizacja” (Biliszczyk, 2005 r.).

Z tej samej publikacji znany jest również sposób redukcji drgań poprzez zastosowanie na osłonie cięgna odpowiednio wyprofilowanych rur osłonowych takich jak żeberka (spiralne lub równoległe) lub profilowane osłony cięgna, które redukują powstawanie wzbudzeń wirowych w przepływie powietrza wokół cięgna.

Również z publikacji „Mosty podwieszone, projektowanie i realizacja” znane są proste oraz często stosowane sposoby redukcji drgań cięgien podwieszających, w których redukcja odbywa się poprzez spinanie cięgien za pomocą lin lub innych sztywniejszych elementów.

Z kolei z publikacji „Cable Vibration in Cable-Stayed Bridges” (Caetano, 2007 r.) znany jest sposób redukcji drgań przy wykorzystaniu urządzeń półaktywnych, których parametry działania (wywołujące siły regulacji) zmieniają się dostosowując do wymuszenia, co pozwala na dostrajanie pracy urządzeń półaktywnych do kilku postaci drgań. Znanym urządzeniem półaktywnym stosowanym w tym sposobie jest tłumik magnetoreologiczny, w którym zmieniana jest lepkość cieczy. Sposób redukcji drgań poprzez półaktywne systemy regulacji nie destabilizuje konstrukcji, ponieważ nie doprowadzają energii do układu, ale ją rozpraszają.

W publikacji „Active Tendon Control of Cable Stayed Bridges” (Achkire, 1997) jest również opisany sposób redukcji drgań wykorzystujący urządzenia aktywne tzw. „kontrolowane aktywne cięgna”, którego działanie odbywa się poprzez przyłożenie dodatkowej poprzecznej siły do cięgna lub poprzez poprzeczny ruch podpory w odniesieniu do osi cięgna albo osiowy ruch podpory. Sposób redukcji drgań poprzez tzw. „aktywne cięgna” dotyczy redukcji drgań cięgna lub drgań pomostu. W sposobie tym odbywa się ciągła zmiana przykładanej siły poprzecznej do osi cięgna lub ciągła zmiana ruchu podpory, co ma miejsce w czasie rzeczywistym ze sprzężeniem zwrotnym tzn. zaraz po zmianie sił aktywnej regulacji następuje kolejny pomiar drgań układu, po czym czynności te powtarza się, aż do momentu osiągnięcia poziomu redukcji drgań zapewniającego stan graniczny nośności lub/i stan graniczny użytkowania.

W artykule W. Pakos, Z. Wójcicki, J. Grosel *Wpływ zmiany naciągu want na zagadnienie własne kładek*, Seminarium „Kładki dla pieszych. Architektura, projektowanie, realizacja, badania.” Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne (2007), s. 199–205 oraz w artykule W. Pakos, Z. Wójcicki, J. Grosel, *Vibration elimination in cable-stayed footbridges and bridges*, PAMM, Proc. Appl. Math. Mech. 7, 4130009–4130010 (2007) / DOI 10.1002 / pamm 200700237 rozważa się problem eliminacji drgań pomostu i pylonu w kładce lub moście podwieszonym. Założono, że eliminację drgań rezonansowych pomostu i pylonu można uzyskać przez zmianę naciągu cięgien podwieszających. Badanie możliwości eliminacji drgań pomostu i pylonu kładki przeprowadzono w kontekście oceny wpływu zmiany naciągu cięgna podwieszającego na zmianę częstości własnych odpowiadających formom własnym pomostu i pylonu, i realizowano na podstawie badania wartości logarytmicznej funkcji wrażliwości zagadnienia własnego układu opisanego zgodnie z teorią II rzędu. Badania te wykazały, że wpływ zmiany sił naciągu cięgien na zmianę częstości własnych odpowiadających formom własnym pomostu i pylonu jest za mały, aby skutecznie redukować rezonansowe drgania pomostu i pylonu.

Natomiast duży wpływ zmiany naciągu cięgien na zmianę częstości własnych układu dla częstości zbliżonych do częstości własnych cięgien podwieszających wykazano w artykule W. Pakos, Z. Wójcicki, J. Grosel, *Elimination of resonant vibration in cable stayed bridges and footbridges by active steering of tension in cables*. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanic, 2008, vol. 8, nr 1, s. 10901–10902.

Sposób redukcji rezonansowych drgań cięgien w obiektach mostowych podwieszonych, w którym dokonuje się zmiany wartości częstości własnej cięgna podwieszającego, poprzez zmianę siły statycznego naciągu w cięgnach podwieszających według wynalazku charakteryzuje się tym, iż zmiany wartości rezonansowej częstości własnej cięgna podwieszającego realizuje się urządzeniem zmieniającym siłę statyczną naciągu, które skraca lub wydłuża długość co najmniej jednego cięgna podwieszającego, korzystnie cięgna podwieszającego, w którym dochodzi do rezonansu, przy czym urządzenie zmieniające siłę statyczną naciągu uruchomiane jest sterownikiem komputerowym w momencie przekroczenia dopuszczalnego poziomu drgań w cięgnię podwieszającym, na podstawie wskazań czujników drgań. Jako czujniki drgań stosuje się czujniki amplitud prędkości i/lub przyspieszeń.

Zalety sposobu redukcji rezonansowych drgań cięgien są widoczne szczególnie w przypadku cięgien długich, kiedy pasywne i półaktywne eliminatory drgań mocowane w pobliżu zakotwienia stają się nieskuteczne. Sposób według wynalazku znajduje również zastosowanie bez względu na źródło pochodzenia drgań rezonansowych, co pozwala na zastosowanie jednego typu tłumików drgań, a nie tak jak w znanych wcześniej sposobach różnorodnego rodzaju zabezpieczeń, dla różnego rodzaju pochodzenia drgań. Sposób według wynalazku pozwala również na zamontowanie urządzeń zmieniających siłę statycznego naciągu tylko na wytypowanych cięgnach podwieszających zgodnie z analizą wrażliwości.

Przedmiot wynalazku uwiidoczniono na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat stanowiska badawczego modelu kładki dla pieszych/mostu podwieszonego obrazujący sposób redukcji rezonansowych drgań cięgien podwieszających.

P r z y k ł a d

Model kładki, którego schemat przedstawiono na rysunku fig. 1, przedstawia układ do badania i analizy redukcji rezonansowych drgań cięgien podwieszających. Na każdym z cięgien podwieszających 1 obiektu mostowego montuje się czujniki drgań 2 w postaci czujników amplitud prędkości lub/i przyspieszeń, które przesyłają odbierane z cięgien podwieszających 1 dane o drganiach do sterownika komputerowego 3. Sterownik komputerowy 3 analizuje pomierzone dane o drganiach a w przypadku przekroczenia ustalonego, dopuszczalnego poziomu drgań przesyła sygnał do jednego lub kilku urządzeń 4 zmieniających siłę statycznego naciągu cięgna podwieszającego 1, które są zamontowane na odpowiednio wytypowanych cięgnach podwieszających 1. Cięgna podwieszające, na których ma być zamocowane urządzenie 4 zmieniające siłę statycznego naciągu, typuje się na etapie projektowania konstrukcji obiektu mostowego na podstawie analizy wrażliwości zagadnienia własnego ze względu na zmianę siły statycznego naciągu cięgien podwieszających 1. Analiza wrażliwości zagadnienia własnego jest to obliczenie pochodnej rozwiązania macierzowego jednorodnego równania różniczkowego ze względu na parametr projektowy p , którym jest siła naciągu w cięgnię N . Formuła na pochodną i -tej częstości własnej ze względu na zmianę parametru projektowego, którym jest siła naciągu w cięgnię N jest następująca:

$$S_i = \frac{N_i}{2\omega_i^2} \mathbf{I}_i^T (\mathbf{B}^{-1} \mathbf{K}_{Ni}) \mathbf{w}_i$$

gdzie: S_i – logarytmiczna funkcja wrażliwości pierwszego rzędu,

ω_i – i -ta częstość własna cięgna podwieszającego w układzie, który stanowi kładka lub most podwieszony odpowiadająca formie własnej układu, przy której dominujące drgania wykonuje cięgno podwieszające numer i ,

$\mathbf{K}_{Ni}$ – macierz sztywności geometrycznej odpowiadająca jednostkowej wartości siły w cięgnię N_i , podczas gdy w pozostałych cięgnach podwieszających wartości sił naciągu są różne od zera,

$\mathbf{B}$ – macierz bezwładności układu w bazie współrzędnych uogólnionych,

$\mathbf{w}_i$ – wektor własny odpowiadający i -tej częstości własnej ω_i ,

$\mathbf{I}_i$ – lewostronny wektor własny układu odpowiadający i -tej częstości własnej.

Na podstawie współczynników logarytmicznej funkcji wrażliwości określa się, które cięgna podwieszające 1 efektywnie zmieniają częstotliwości własne pozostałych cięgien, a więc wskazują, na których cięgnach montuje się urządzenia 4 zmieniające siły statycznego naciągu cięgien, co pozwala na redukcję rezonansowych drgań bez konieczności montowania urządzeń 4 zmieniających siły statycznego naciągu na wszystkich cięgnach podwieszających 1. Urządzenie 4 zmieniające siły statycznego naciągu przez skrócenie lub wydłużenie cięgna podwieszającego 1 wymusza zmianę siły, a tym samym zmianę częstotliwości własnych cięgna 1, na którym jest zamontowane i zmianę częstotliwości własnych innych cięgien. W momencie przekroczenia dopuszczalnych amplitud drgań cięgien podwieszających 1 sterownik komputerowy 3 przesyła sygnał do urządzeń 4 zmieniających siły statycznego naciągu 4 i włącza je, co umożliwi wyprowadzenie każdego cięgna podwieszającego 1 ze strefy rezonansu i zmniejsza jego amplitudy drgań. Czujniki 2, sterownik komputerowy 3, urządzenia 4 zmieniające siły statycznego naciągu są podłączone do zewnętrznego źródła energii i pozostają w ciągłej gotowości do działania. Proces aktywnej regulacji odbywa się w czasie rzeczywistym ze sprzężeniem zwrotnym, to jest zaraz po zmianie sił aktywnej regulacji dokonywany jest kolejny pomiar odpowiedzi układu w celu sprawdzenia zamierzonego efektu redukcji drgań.

Dla modelu obiektu przedstawionego na fig. 1, dla którego przeprowadzono analizę wrażliwości zagadnienia własnego uzyskano wyniki w postaci współczynników logarytmicznej funkcji wrażliwości, które zamieszczono w tabeli. Symbol ω_{iw} oznacza i -tą częstotliwość własną cięgna podwieszającego odpowiadającą formie własnej układu, przy której dominujące drgania wykonuje cięgno podwieszające numer i .

T a b e l a

	Opis formy	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆
ω_{1w}	Cięgna nr 1 – w płaszc.	0,49894	-0,09720	-0,05628	-0,01613	0,09194	0,11733
ω_{2w}	Cięgna nr 2 – w płaszc.	-0,14457	0,49909	-0,18041	-0,03600	0,04273	0,06252
ω_{3w}	Cięgna nr 3 – w płaszc.	-0,07374	-0,19473	0,49838	-0,12215	0,00229	0,01252
ω_{4w}	Cięgna nr 4 – w płaszc.	-0,03217	-0,09321	-0,30867	0,49695	0,01688	0,03092
ω_{5w}	Cięgna nr 5 – w płaszc.	0,05023	0,01281	0,00170	0,00464	0,49776	-0,10860
ω_{6w}	Cięgna nr 6 – w płaszc.	0,09737	0,04361	0,02817	0,01863	-0,16159	0,49807

Na podstawie współczynników logarytmicznej funkcji wrażliwości stwierdzono, że wystarczy zamontować regulatory zmian naciągu cięgien tylko w cięgnach numer 3 oraz numer 6, aby osiągnąć redukcję drgań we wszystkich sześciu parach cięgien podwieszających. Zmiana siły statycznego naciągu cięgien numer 3 w efektywny sposób zmienia częstotliwości własne cięgien o numerach 2, 3, 4, natomiast zmiana siły statycznego naciągu cięgien numer 6, w efektywny sposób zmienia częstotliwości cięgien o numerach 1, 5 i 6. Wystarczy więc zamontować urządzenia zmieniające siły statycznego naciągu i przystosować dwa cięgna lub dwie pary cięgien, aby zredukować drgania wszystkich cięgien podwieszających. Na przykład redukcję o około 96% amplitud rezonansowych drgań cięgna nr 1 uzyskuje się zmieniając naciąg cięgna nr 6 ze wstępnego wyłączenia 16,2% do wyłączenia 54,5%. Wyłączenie rozumiane jest tu jako stosunek siły w cięgnie wyznaczonej w odpowiednim stanie obciążenia do wartości siły krytycznej i podane jest w procentach. Zmianę siły rozpoczęto w około czterdziestej sekundzie, licząc od początku wzbudzenia siłą harmoniczną. Po kolejnych pięciu sekundach uzyskano poziom wyłączenia 54,5%.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób redukcji rezonansowych drgań cięgien w obiektach mostowych podwieszonych, w których dokonuje się zmiany wartości częstotliwości własnej cięgna podwieszającego, poprzez zmianę siły statycznego naciągu w cięgnach podwieszających, **znamienny tym**, że zmianę wartości rezonansowej częstotliwości własnej cięgna podwieszającego (1) realizuje się urządzeniem (4) zmieniającym siłę statyczną naciągu, które skraca lub wydłuża długość

co najmniej jednego cięgna podwieszającego (1), korzystnie cięgna podwieszającego (1), w którym dochodzi do rezonansu, przy czym urządzenie (4) zmieniające siłę statyczną naciągu uruchomiane jest sterownikiem komputerowym (3) w momencie przekroczenia dopuszczalnego poziomu drgań w cięgnie podwieszającym (1), na podstawie wskazań czujników drgań (2).

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że jako czujniki drgań (2) stosuje się czujniki amplitud prędkości i/lub przyspieszeń.

Rysunek

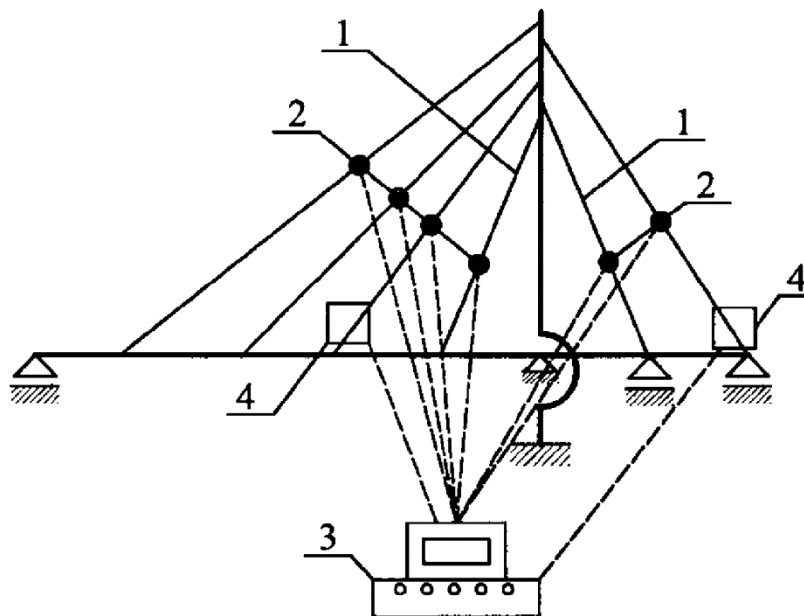


Fig. 1

