

MAKOWSKI Michał, KNAP Lech

BADANIA STEROWANYCH TŁUMIKÓW ELEKTROREOLOGICZNYCH STOSOWANYCH DO REDUKCJI DRGAŃ UKŁADÓW MECHANICZNYCH

Streszczenie

Praca jest poświęcona tematyce tłumienia drgań w strukturach budynków poddawanych wymuszeniom zewnętrznym. W szczególności przedstawione zostały wyniki badań tłumików z cieczą elektroreologiczną (ERD), które mają służyć badaniom aktywnych i półaktywnych systemów wibroizolacji jak i algorytmów sterowania tymi systemami. Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku badawczym z wykorzystaniem pulsatora i układu mechanicznego wyposażonego w tłumik ERD. W przyszłości w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych zostaną zidentyfikowane podstawowe parametry opracowanego modelu reologicznego tłumika. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych tłumika ERD przedstawiono w formie charakterystyk tłumienia.

WSTĘP

Problematyka przedstawiona w pracy jest związana z systemami wibroizolacji konstrukcjach budowlanych oraz maszynach narażonych na zewnętrzne oddziaływania drgań. Redukcja drgań w tych obiektach ma na celu zmniejszenie powstających w konstrukcji wewnętrznych obciążeń mechanicznych mogących prowadzić w skrajnym przypadku do zniszczenia konstrukcji. Tematyka ta jest także o tyle ważna, że odpowiednio skuteczne systemy wibroizolacji mogą być wykorzystywane nie tylko do ochrony konstrukcji budynków, ale także do ochrony konstrukcji maszyn jak i środowiska przez wpływem drgań powodowanych przez pracujące maszyny. Dzięki badaniom w zakresie opracowania skutecznych i efektywnych systemów wibroizolacji możliwe będzie zwiększenie niezawodności, trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji budowlanych oraz maszyn. Skuteczny i efektywny system wibroizolacji może wpływać poprzez bezpieczeństwo konstrukcji i maszyn na bezpieczeństwo osób korzystających z danych konstrukcji lub maszyn.

Wiele konstrukcji budowlanych oraz maszyn jest narażona na obciążenia spowodowane ruchem podłoża wywołanego trzęsieniami ziemi, tąpnięciami, wibracjami wzbudzonymi przez ciężkie środki transportu lub wywołane poprzez czynniki środowiskowe np. na smukłe konstrukcje, na które działają podmuchy wiatru. W rezultacie tych obciążeń w konstrukcjach budowlanych lub maszynach są wzbudzane drgania, które mogą prowadzić do zniszczeń wewnątrz konstrukcji na skutek np. przekroczenia naprężeń dopuszczalnych w elementach konstrukcji budowlanych lub maszyn. Z tego powodu w wielu konstrukcjach wprowadza się urządzenia lub całe systemy wibroizolacji służące do ograniczenia propagacji drgań lub rozpraszania energii drgań. Stosowne systemy wibroizolacyjne mogą być podzielone na systemy pasywne oraz systemy półaktywne oraz aktywne. Systemy wibroizolacyjne pasywne [1], [2] i [6] oparte są na podobnych podzespołach jak systemy półaktywne i aktywne [6], [7]

z tą różnicą, że elementy tłumiące są niesterowane. Jednym z najważniejszych elementów tych systemów są odpowiednio wydajne i szybko sterowalne urządzenia pełniące rolę tłumików drgań (ang. activators) lub bezpieczników konstrukcyjnych (ang. structural fuses).

Przez długi okres zastosowanie urządzeń pozwalających na półaktywną lub kontrolę drgań było niemożliwe ze względów technicznych. Działo się tak głównie, dlatego że nie było możliwe sterowanie właściwościami systemu wibroizolacji w czasie rzeczywistym lub w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój technik informatycznych oraz inżynierii materiałowej stworzył warunki dla budowy nowego typu urządzeń, których własności dyssypacyjne mogą być odpowiednio kontrolowane w czasie w zależności od potrzeb. Dzięki temu powstała możliwość zwiększenia efektywności tłumienia drgań poprzez stosowania nowej generacji półaktywnych bądź aktywnych systemów wibroizolacji.

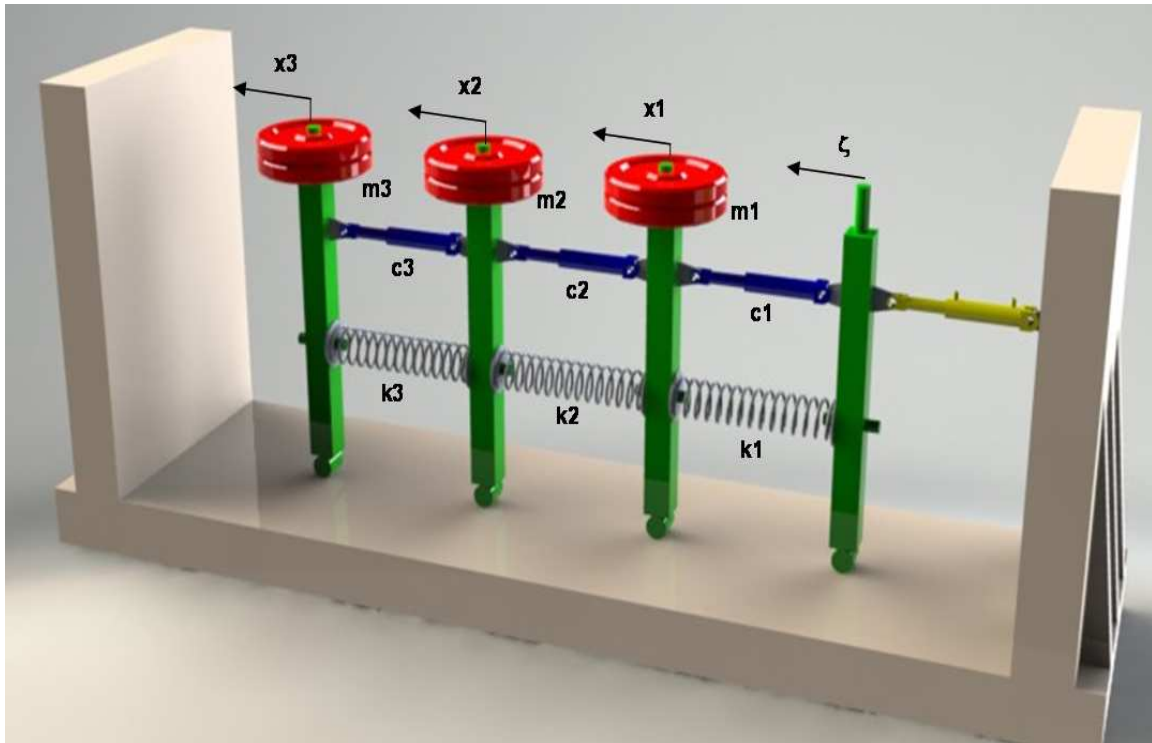
W wielu Polskich ośrodkach badawczych są także prowadzone prace związane z zastosowaniem sterowanych tłumików w budowie maszyn i konstrukcji budowlanych. Prace te są związane z badaniem wpływu drgań na zachowanie się budynków mieszkalnych na wymuszenia parasejsmiczne [3]. W rozwiązaniach tych wykorzystywane są głównie starowane tłumiki magneto-reologiczne (MRD).

Innym rodzajem tłumików o sterowanych w czasie właściwościach, które mogą być zastosowane w systemach wibroizolacji są tłumiki z cieczą elektreologiczną (tzw. tłumiki ERD). Tłumiki tego rodzaju do tej pory posiadały w miarę ograniczone zastosowanie wynikające głównie z problemów technicznych i technologicznych. Jednak rozwój nowych technologii materiałowych umożliwił w ostatnich latach powstanie pierwszych rozwiązań komercyjnych tego typu tłumików. W ramach niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań tłumika z cieczą elektreologiczną z rodziny EasyERF firmy Bansbach [8].

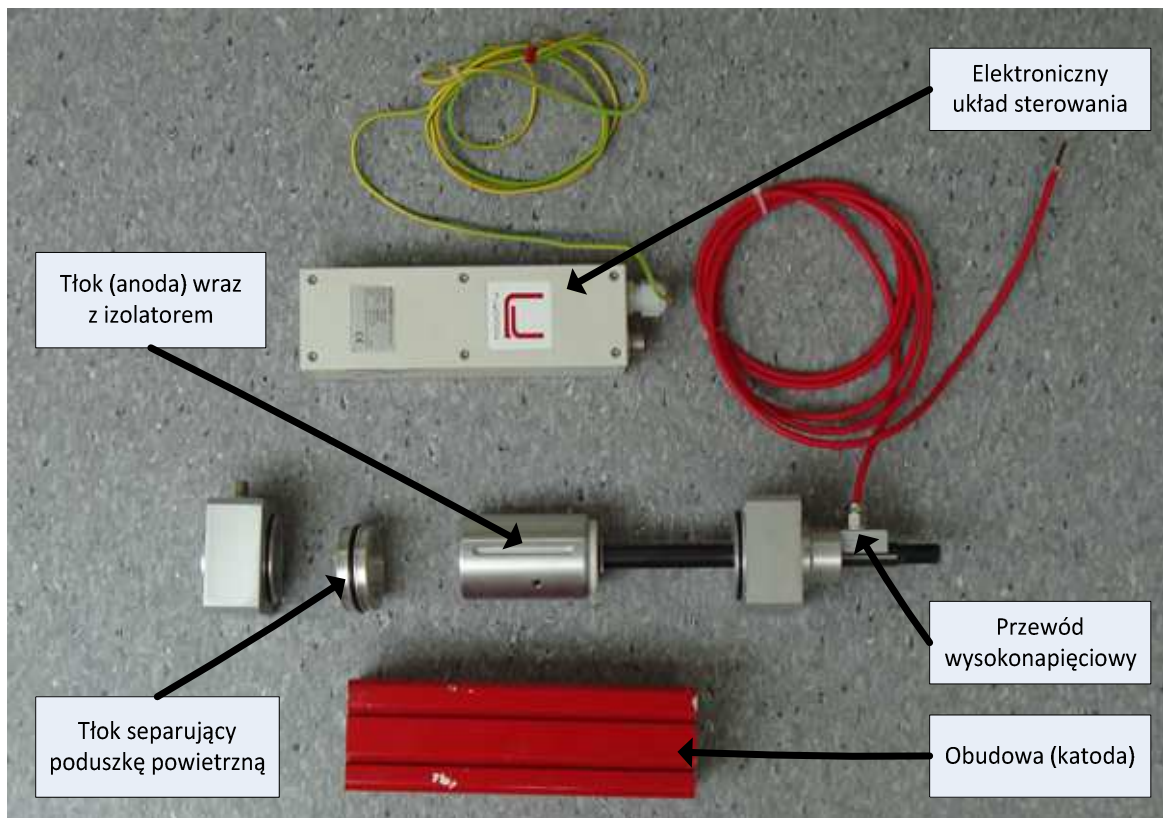
W dalszej części pracy zaprezentowane zostały wyniki badań eksperymentalnych, na podstawie których zostanie opracowany model numeryczny tłumika ERD. W oparciu o uzyskane wyniki badań eksperymentalnych zostaną wyznaczone i zidentyfikowane parametry modelu numerycznego.

1. UKŁAD MECHANICZNY

Redukcja drgań prowadzona jest w oparciu o układ mechaniczny będący modelem budynku o trzech stopniach swobody. Na rysunku 1 przedstawiono układ mechaniczny będący trzypiętrowym budynkiem. Największe przemieszczenia pomiędzy kolejnymi kondygnacjami odbywają się w kierunku poziomym, poprzez odkształcenie elementów podporowych stropów poszczególnych kondygnacji. W pracy przedstawiono układ mechaniczny, gdzie przemieszczenia odbywają się w kierunku pionowym, ale zmieniono usytuowanie w stosunku do siebie kondygnacji. Rozpatrując równania ruchu drgań konstrukcji budowlanej w układzie pionowym, czy też poziomym, zmiana ta nie będzie miała wpływu na algorytm sterowania służący do redukcji drgań. W modelu przedstawiono: ciała m_1 , m_2 , m_3 będące kondygnacjami budynku, elementy sprężyste k_1 , k_2 , k_3 oraz tłumiące przy stałym współczynniku tłumienia c_1 , c_2 , c_3 , wymuszenie kinematyczne ζ . Założono, że wymuszenie drgań układu będzie harmoniczne lub losowe. Przemieszczenia kolejnych kondygnacji oznaczono przez współrzędne x_1 , x_2 , x_3 . W przypadku sterowania sił tarcia w tłumikach wartości te wyznaczone są na podstawie algorytmu wyznaczania sił z uwzględnieniem założonego kryterium optymalizacji. Opis matematyczny modelu budynku oraz algorytm sterowania redukcji drgań opisano szerzej w pracy [4]. Przedstawiono tam matematyczny model budynku opisanego we współrzędnych x_1 , x_2 , x_3 z uwzględnieniem macierzy bezwładności, sztywności i tłumienia. Przedstawiono zostało również kryterium minimalizacji sił w podporach poszczególnych kondygnacji.



Rys. 1. Stanowisko do badań redukcji drgań



Rys. 2. Widok ogólny podzespołów tłumika elektro-reologicznego.

2. BUDOWA TŁUMIKA ERD

Badane tłumiki były wypełnione cieczą elektro-reologiczną (ER), która jest zawiesiną złożoną z cieczy (oleju syntetycznego lub mineralnego) i niewielkich polimerowych cząstek stałych (o rozmiarach do 50 μm i zawartości w mieszaninie do ok. 50%) oraz niewielkiej ilości różnych dodatków poprawiających właściwości mieszaniny. Pod wpływem pola elektrycznego cząstki stałe ustawiają się w identycznej pozycji i przyciągają się nawzajem, tworząc uporządkowaną przestrzenną strukturę, która utrudnia przepływ cieczy. Uzyskiwany efekt ten jest proporcjonalny do natężenia pola elektrycznego, w którym znajduje się ciecz. Uporządkowanie struktury z cząstek stałych a w konsekwencji zmiana właściwości sprężysto-lepkich cieczy odbywa się w ciągu kilka milisekund.

Dzięki zachodzącym w cieczy zmianom powodującym zmianę jej właściwości można wykorzystać ją do zmiany cech dyssypacyjnych tłumików ERD. Schematy i widok ogólny budowy badanego tłumika drgań ERD przedstawiono na rysunku 2. Odpowiednio, względny ruch tłoka względem obudowy tłumika wywołuje przepływ cieczy w szczelnie pomiędzy tłokiem a obudową. Przepływowi cieczy przez szczelinę towarzyszy rozpraszanie energii, które może być dzięki właściwościom cieczy ER kontrolowane.

Pole elektryczne w szczelinie jest wytwarzane pomiędzy elektrodami w postaci obudowy (anoda) oraz tłoka (katoda). Poprzez zmianę natężenia pola elektrycznego w szczelnie i jej otoczeniu wpływa się na zmianę dyssypacyjnych właściwości tłumika ERD. Dzięki temu powstaje możliwość wykorzystania tych urządzeń, jako tłumików drgań w ruchu liniowym.

Do zmiany właściwości cieczy elektro-reologicznej wymagana jest stosunkowo wysoka wartość natężenia pola elektrycznego (ogólnie wartości nawet od 3kV/mm), która jest uzyskiwana poprzez odpowiedni układ transformatorowy zabudowany na obudowie tłumika. W efekcie układ tłumika zasilany jest napięciem do 24 V a sygnał sterowania tłumikiem może być zmieniany w zakresie 0-3 V (co odpowiada napięciu w układzie wysokiego napięcia na poziomie od 0-3 kV). W zależności od wartości sygnału sterowana generowana jest różne natężenie pola elektrycznego, które powoduje zmiany właściwości tłumika. Według danych producenta moc wykorzystywana do działania tłumika w zależności od sygnału sterowania waha się od 2 do 20 W.

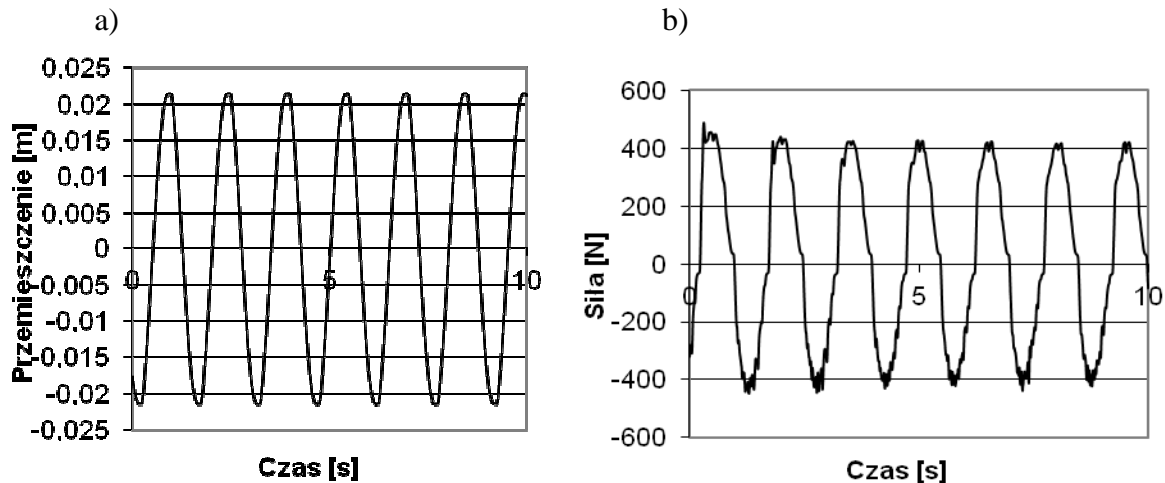
3. BADANIA DOŚWIADCZALNE TŁUMIKA DRGAŃ ERD

Celem badań eksperymentalnych tłumika ERD było wyznaczenie dyssypacyjnych charakterystyk tego urządzenia jako całości. Wyznaczenie charakterystyk tłumika pozwala na opracowanie modelu numerycznego, który następnie może być wykorzystywany w badaniach systemów wibroizolacji konstrukcji budowlanych i maszyn.

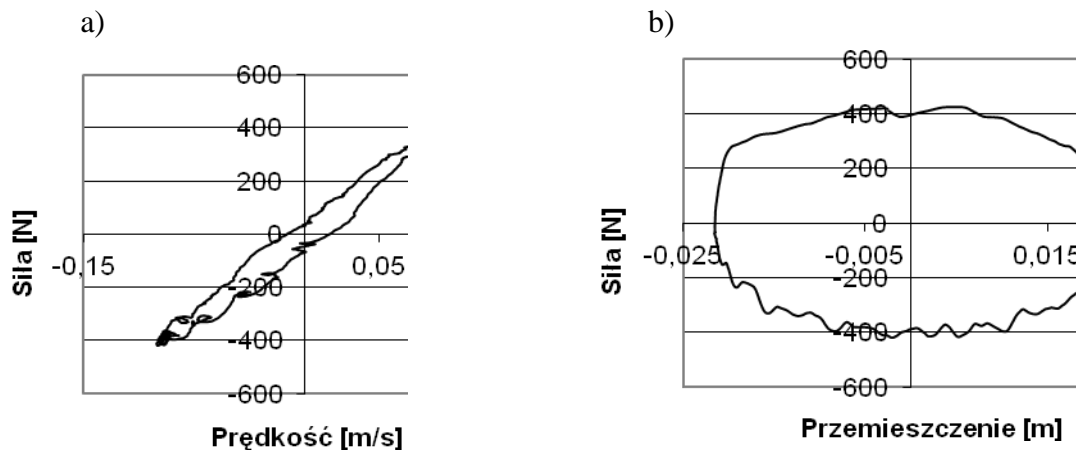
Badania eksperymentalne prowadzono przy użyciu dedykowanego stanowiska z pulsatorem hydraulicznym, gdzie tłumik ERD był harmonicznie odkształcany i poddawany obciążeniu kinematycznemu o różnych częstotliwościach i amplitudach.

Na podstawie tych pomiarów ustalono dyssypacyjne charakterystyki w postaci wykresów na dwóch płaszczyznach: przemieszczenie-siła oraz prędkość-siła. Pierwszy wykres określa tak zwaną pętlę histerezy, a drugi charakterystykę tłumienia. Przykładowe rezultaty tych badań dla różnych częstotliwości wymuszenia oraz amplitud pokazano na kolejnych rysunkach.

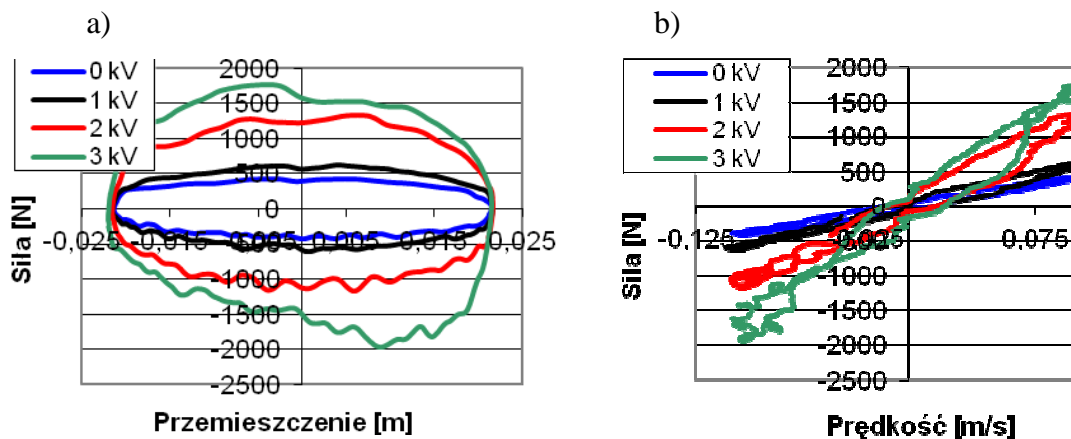
Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy przebieg w czasie wymuszenia kinematycznego o częstotliwości 0,65 Hz i amplitudzie 0,022 m oraz odpowiadający mu przebieg siły zarejestrowanej na tłumiku ERD. Na rysunku 4 przedstawiona odpowiadające temu wymuszeniu charakterystyki tłumika ERD w formie wykresów siła-przemieszczenie oraz siła prędkość.



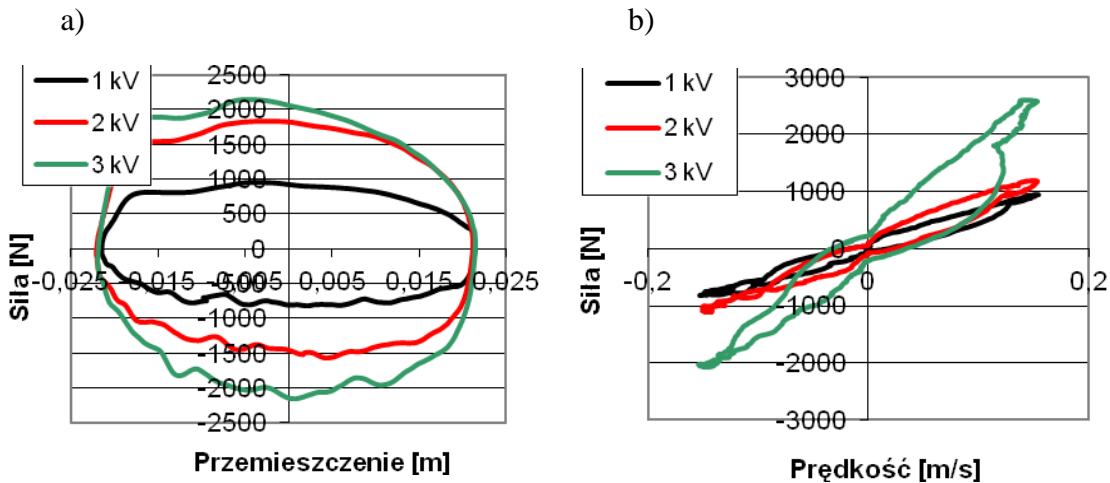
Rys. 3. Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych tłumika ER bez zasilania: a) przebieg przemieszczenia tłoka, b) przebieg siły



Rys. 4. Przykładowe wyniki badań eksperymentalnych tłumika ER bez zasilania: a) charakterystyka tłumika, b) pętla histerezy tłumika



Rys. 5. Wyniki badań eksperymentalnych tłumika ER z sygnałem sterującym 0-3 V, przy wymuszeniu z częstotliwością 0,65 Hz i amplitudzie 0,022 m, a) siła-przemieszczenie, b) siła-prędkość



Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych tłumika ER z sygnałem sterującym 0-3 V, przy wymuszeniu z częstotliwością 1 Hz i amplitudzie 0,022 m, a) siła-przemieszczenie, b) siła-prędkość

Rysunek 5 przedstawia wyniki badań tłumika ERD, które zostały uzyskane w trakcie wymuszenia z częstotliwością 0,65 Hz i amplitudzie 0,022 m przy różnych wartościach sygnału sterowania tłumikiem ERD w zakresie od 0 V do 3 V (co odpowiada napięciu w układzie wysokiego napięcia 0-3 kV).

Podobnie na rysunku 6 przedstawione zostały wyniki badań tłumika ERD, które uzyskano w trakcie wymuszenia z częstotliwością 1 Hz i amplitudzie 0,022 m przy różnych wartościach sygnału sterowania tłumikiem ERD w zakresie od 1 V do 3 V.

Na przedstawionych wykresach widoczny jest wzrost sił tłumienia w układzie z sygnałem sterowania o wartości napięcia 3 V (3 kV) w stosunku do 0 V (0 kV). W widoczny sposób ulega zmianie pętla histerezy i charakterystyka tłumika elektoreologicznego. Największą pętlę histerezy uzyskano przy zasilaniu układu elektronicznego napięciem o maksymalnej wartości 3 V (3 kV). W podobny sposób także i charakterystyki dyssypacyjne tłumika ERD wykazują zależność od wartości napięcia sterowania układem elektronicznym zabudowanym na tłumiku. Porównanie sił przy wartościach sygnału sterowania 0 V i 3 V wskazuje na prawie sześciokrotną zmienność wartości siły tłumienia. Pole sterowania więc siłą tłumienia w tłumiku ERD można uznać za stosunkowo szerokie.

Podsumowując wyniki uzyskanych badań eksperymentalnych należy stwierdzić, że zastosowanie sterowanych tłumików elektoreologicznych umożliwia realizację założonego celu badań tj. wykorzystanie tłumika ERD w systemach wibroizolacji konstrukcji budowlanych i maszyn. Dzięki zastosowaniu tłumików MRD w takich systemach możliwa będzie zmiana sił tłumienia w układzie mechanicznym a tym samym organicznie drgań zgodnie z założonym kryterium sterowania.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono kolejny etap prac związanych z opracowaniem sterowanego systemu wibroizolacji układu mechanicznego mogącego służyć do ograniczenia drgań w konstrukcjach budowlanych jak i maszynach.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych umożliwiły wyznaczenie dyssypacyjnych charakterystyk tłumika ERD. Dzięki temu oraz dalszym pracom będzie możliwa numeryczna ocena wpływu sterowania na wartość sił tarcia w tłumikach i efektywność wykorzystywania tego typu tłumików w systemach wibroizolacji. Badania te w szczególności w kolejnym

etapie prac badawczych będą wykorzystywane w zadaniach związanych z modelowaniem numerycznym wpływu sterowania tłumikami ERD na ograniczenie drgań struktur budowlanych i maszyn poddawanych wymuszeniom zewnętrznym. Badania numeryczne w tym zakresie będą weryfikowane w oparciu eksperymentalne stanowisko badawcze, którego uproszczony model przedstawiono w ramach pracy.

Opracowany model tłumika ERD obok modeli innego rodzaju tłumików przedstawionych w innych pracach autorów niniejszego artykułu (np. tłumików magneto reologicznych, tłumików sterowanych zaworem piezoelektrycznym) może być w szczególności wykorzystywana do uogólnionych badań numerycznych systemów wibroizolacji ze sterowanymi tłumikami. Przykładowo możliwe jest prowadzenie badań nad wykorzystaniem sterowanych tłumików ERD w zawieszeniu pojazdów w celu zapewnienia komfortu jazdy lub bezpieczeństwa jazdy. Skuteczny i efektywny system wibroizolacji musi posiadać zaimplementowane odpowiednie algorytmy sterowania zabudowanymi w systemie sterowanymi tłumikami. Opracowywany system wibroizolacji oraz zbudowane stanowisko badawcze pozwalać będzie na prowadzenie badań w zakresie opracowania i weryfikacji skuteczności oraz efektywności algorytmów sterowania.

Kolejnym etapem prac, nie przedstawionym w ramach opracowania, jest przeprowadzenie badań doświadczalnych systemu wibroizolacji na zbudowanym stanowisku będącym modelem struktury budowlanej. Na takim stanowisku możliwe będzie weryfikowanie skuteczności opracowanych algorytmów sterowania wartością sił tarcia w tłumikach tak aby na przykład zminimalizować przyspieszenia poszczególnych kondygnacji budynku – a tym samym chronić konstrukcję przed zniszczeniem.

Realizacja prac przedstawionych w ramach niniejszego artykułu była możliwa dzięki otrzymaniu finansowania projektu N N 502 1492 39 „Redukcja drgań maszyn i konstrukcji budowlanych za pomocą sterowanych dyssypatorów”.

BIBLIOGRAFIA

1. Buckle, I., Nagarajaiah, S., Ferrell, K. (2002). "Stability of elastomeric isolation bearings: Experimental study." *Journal of Structural Engineering*, 128(1), 3-11.
2. Kelly, J. M. (1999). "The role of damping in seismic isolation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 3-20.
3. Korentz J., Marcinowski J.: Analiza numeryczna drgań parasejsmicznych budynku mieszkalnego z uwzględnieniem właściwości sprężystych podłoża. *Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, z.-2B/2007, ISSN 1897-628X
4. Makowski M.: Numeryczne badania drgań konstrukcji budowlanych ze sterowanymi tłumikami. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, (2013) w przygotowaniu.
5. Makowski M., Grzesikiewicz W., Knap L.: Koncepcja stanowiska do badań wpływu sterowania tłumikami na drgania układu mechanicznego. *Technika Transportu Szybowego* 9/2012, s. 3335-3342. ISSN 1232-3829.
6. Ramallo, J. C., Johnson, E. A., Spencer, B. F., Jr. (2002). "Smart base isolation systems." *Journal of Engineering Mechanics*, 128(10), 1088-1099.
7. Spencer, B. F., Jr., Johnson, E. A., Ramallo, J. C. (2000). ""Smart" isolation for seismic control." *JSME, Int. J., Der. C*, 43(3), 704-711.
8. *The intelligent damper: easyERF* - www.bansbach.de
9. Wongprasert, N., Symans, M. D. (2005). "Experimental evaluation of adaptive elastomeric baseisolated structures using variable-orifice fluid dampers." *Journal of Structural Engineering*, 131(6), 867-877.

INVESTIGATION OF ELECTORHEOLOGICAL DAMPERS USED TO REDUCE VIBRATIONS IN MECHANICAL STRUCTURES

Abstract

We presented the results of experimental investigations of a damper with electro-rheological fluid (ERD). Experimental studies were carried out to propose fast and efficient algorithm allowing improvements to active and semi-active vibroisolation systems in mechanical and building structures. The goal of the first part of our experimental studies was to determine the dissipation characteristics of the ERD damper treated as a whole device (black-box). In the future those characteristics can be used to identify parameters of device rheological model. The experimental studies were carried out on a dedicated stand with kinematic excitation induced by a hydraulic actuator. Some results of experimental studies of the damper dissipation characteristics were obtained and are presented.

Autorzy:

dr inż. Michał MAKOWSKI – Instytut Pojazdów, Politechnika Warszawska

dr inż. Lech KNAP – Instytut Pojazdów, Politechnika Warszawska