CZASOPISMO TECHNICZNE M
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 1-M/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6328

MARCIN MAŚLANKA, BOGDAN SAPIŃSKI*, JACEK SNAMINA**

ANALIZA EKSPERYMENTALNA WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH UKŁADU REDUKCJI DRGAŃ LINY Z TŁUMIKIEM MAGNETOREOLOGICZNYM

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A VIBRATION REDUCTION SYSTEM OF A CABLE WITH A MR DAMPER

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki eksperymentów dotyczących drgań własnych poziomo zamocowanej liny, do której dołączono tłumik magnetoreologiczny. Tłumienie drgań zostało zbadane w przypadku zastosowania odpowiedniego sterowania tłumikiem oraz w przypadku, gdy tłumik nie był sterowany. Podstawowym celem badań była doświadczalna weryfikacja zastosowanego algorytmu sterowania. Wyniki pomiarów wskazują na poprawę skuteczności tłumienia oraz poprawę jakości współpracy tłumika z liną.

Słowa kluczowe: *tłumienie drgań, tłumiki magnetoreologiczne*

Abstract

The paper presents results of experiments conducted for free vibrations of a horizontally suspended cable with an MR damper attached transversally to the cable near the support. Vibration damping of the cable was investigated for passive and controlled mode of the damper. It is revealed that the control algorithms applied for the damper improve damping of the cable.

Keywords: *damping of vibration, magnetorheological dampers*

* Mgr inż. Marcin Maślanka, dr hab. inż. Bogdan Sapiński, prof. AGH, Katedra Automatyzacji Procesów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

** Dr inż. Jacek Snamina, Instytut Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

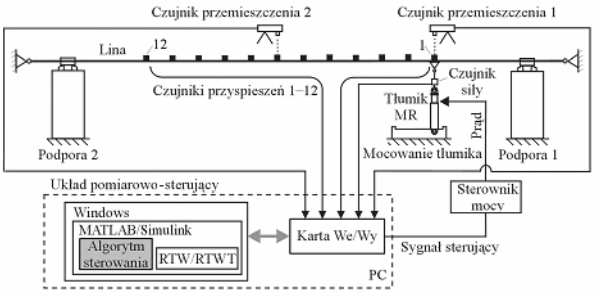
Tłumienie odgrywa zasadniczą rolę przy ograniczaniu szkodliwych zjawisk falowych w linach. W zależności od lokalizacji procesów dyssypacji energii rozróżniamy tłumienie wewnętrzne i zewnętrzne. O tłumieniu wewnętrznym mówimy wówczas, gdy energia ruchu jest rozpraszana na skutek działania sił dyssypatywnych wewnątrz liny, a o tłumieniu zewnętrznym, jeśli energia jest rozpraszana w wyniku działania zewnętrznego ośrodka oraz dołączonych do liny układów tłumiących.

Szczególnie dobre rezultaty eliminacji drgań lin można otrzymać, stosując układy sterowania, w których rolę elementów wykonawczych pełnią tłumiki magnetoreologiczne (MR). W prostszych układach eliminacji drgań tłumiki MR pracują bez układów sterujących – są wówczas zasilane prądem o stałym natężeniu. Tłumiki MR są często stosowane do zabezpieczenia lin w konstrukcjach mostów. Po raz pierwszy wykorzystano je przy konstrukcji mostu Dongting Bridge w Chinach. Znane są również instalacje tłumików na mostach w Europie – Brotonne, Elorn, Iroise (Francja), Erasmus (Holandia) oraz w USA – Sunshine Skyway, Cochrane, Veterans Memorial.

Celem przeprowadzonych badań była analiza właściwości dynamicznych układu redukcji drgań liny z tłumikiem MR. Badano skuteczność układu redukcji z tłumikiem MR w trybach pasywnym oraz aktywnym.

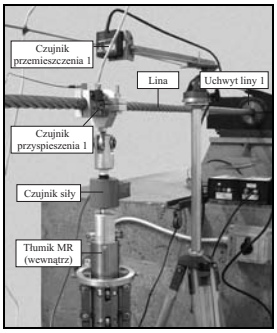
2. Stanowisko badawcze

Schemat ogólny stanowiska do badań lin oraz fotografię zainstalowanego tłumika MR pokazano na rysunkach 1 i 2. Szczegółowy opis przedstawiono w [7]. Stanowisko obejmuje zawieszoną poziomo, napiętą i utwierdzoną na końcach linę stalową. Długość odcinka pomiarowego liny wynosi $L = 30$ m, a masa na jednostkę długości – $m = 1{,}8$ kg/m. Naciąg liny jest realizowany za pomocą mechanizmu dźwigniowego. Maksymalna siła naciągu – ok. 35 kN. W pobliżu jednej z podpór do liny dołączono tłumik MR. Przesuwny układ mocowania tłumika umożliwia zmianę odległości tłumika MR w zakresie od 1 m do 2,5 m od podpory.



Rys. 1. Schemat stanowiska z układem pomiarowo-sterującym

Fig. 1. Diagram of the experimental setup



Rys. 2. Instalacja tłumika MR

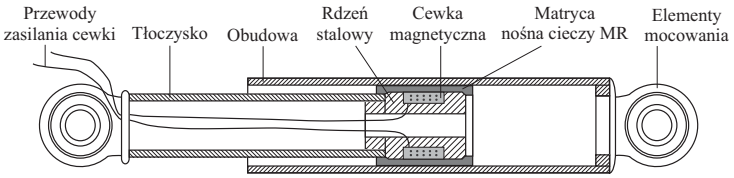
Fig. 2. MR damper installation

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W układzie pomiarowo-sterującym wykorzystano komputer PC, kartę we/wy RT-DAC4 z oprogramowaniem MATLAB/Simulink. Do pomiaru przyspieszeń liny zastosowano czujniki piezoelektryczne, do pomiaru przemieszczeń czujniki laserowe, a do pomiaru siły w osi tłumika czujnik tensometryczny. Do sterowania tłumikiem MR użyto sterownika mocy [5].

Zastosowany do tłumienia drgań tłumik MR jest semiaktywnym elementem wykonawczym, którego działanie opiera się na wykorzystaniu cieczy MR [2, 1, 6]. Własności cieczy MR pozwalają na odwracalną zmianę jej stanu od płynnego do semistałego, w sposób bezstopniowy, pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego.

W badaniach posłużono się tłumikiem MR serii RD-1097-01 [3]. Schemat budowy tłumika przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Budowa tłumika RD-1097-01

Fig. 3. Structure of RD-1097-01 damper

Najważniejszymi parametrami tłumika RD-1097-01 są: siła maksymalna ok. 100 N (dla prądu 1 A i prędkości tłoka 51 mm/s), skok ±25 mm oraz czas reakcji < 25 ms (czas potrzebny do uzyskania 90% wartości ustalonej siły przy zmianie skokowej prądu od 0 do 1 A, dla 51 mm/s). Tłumik wykazuje małą wartość siły w przypadku braku zasilania (mniejsza od 9 N dla prędkości tłoka 200 mm/s).

Po raz pierwszy tłumik RD-1097-01 zastosowano w badaniach układu tłumienia drgań liny o długości ok. 7,2 m [13].

3. Eksperymenty

Opisane w artykule eksperymenty dotyczą drgań własnych liny. Drgania swobodne badano po wstępnym wprawieniu liny w stan ruchu przez ręczne przemieszczanie punktu położonego w połowie długości liny, zgodnie z naturalnym ruchem liny.

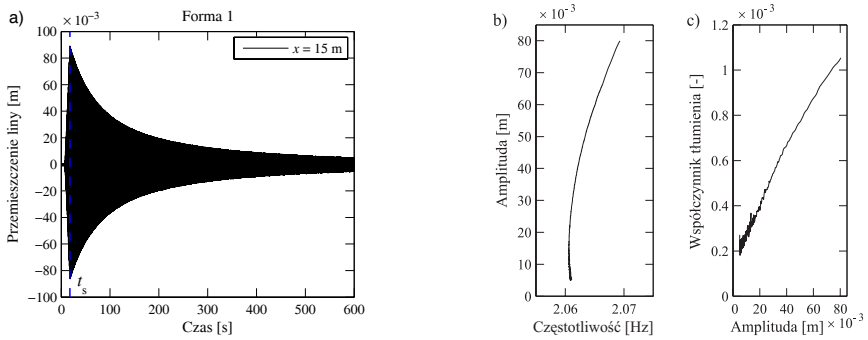
3.1. Badanie drgań własnych liny bez tłumika

Wynik pomiaru zaniku pierwszej formy drgań swobodnych liny bez tłumika przedstawiono na rys. 4a). Wielkością mierzoną było przemieszczenie w punkcie środkowym liny (x_s = 15 m). Chwilę rozpoczęcia drgań swobodnych oznaczono przez t_s.

Na podstawie analizy obwiedni przemieszczenia dokonano identyfikacji modalnego współczynnika tłumienia pierwszej formy drgań swobodnych liny. Uzyskane zależności pomiędzy amplitudą, częstotliwością drgań i modalnym współczynnikiem tłumienia przedstawiono na rys. 4b) i c). Wraz ze wzrostem amplitudy drgań zwiększa się składowa dynamiczna siły naciągu liny, co objawia się nieznacznym zwiększeniem częstotliwości drgań swobodnych. Współczynnik tłumienia pierwszej formy drgań zmienia się od wartości $0{,}2 \times 10^{-3}$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

dla amplitudy 5×10^{-3} m, do $1{,}05 \times 10^{-3}$ dla amplitudy 80×10^{-3} m. Otrzymana zależność współczynnika tłumienia od amplitudy drgań ma w badanym zakresie charakter liniowy. Podobny wynik uzyskano w [8].



Rys. 4. Swobodne drgania liny bez tłumika (forma 1): a) przemieszczenie w punkcie x_s = 15 m, b) częstość w funkcji amplitudy, c) modalny współczynnik tłumienia w funkcji amplitudy

Fig. 4. Free vibration of cable with no damper (mode 1): a) displacement decay at the point x_s = 15 m, b) free vibration frequency as a function of amplitude, c) damping ratio vs. amplitude

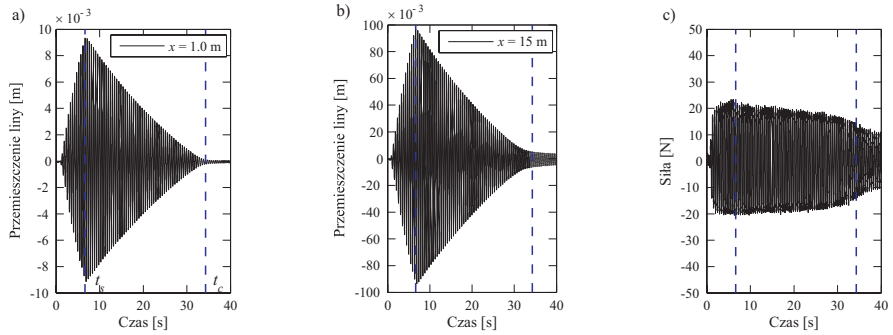
3.2. Badanie drgań własnych liny z tłumikiem pracującym w trybie pasywnym

Wybrane wyniki pomiarów zaniku pierwszej formy drgań swobodnych liny z tłumikiem MR pracującym w trybie pasywnym przedstawiono na rys. 5. Punkt zamocowania tłumika do liny określa współrzędna x_d = 1 m, natężenie prądu tłumika wynosiło 0,25 A. Wielkościami mierzonymi były: przemieszczenie i przyspieszenie liny w punkcie mocowania tłumika, przemieszczenie liny w punkcie środkowym oraz siła w osi tłumika.

Drgania swobodne liny z dołączonym tłumikiem MR zanikają znacznie szybciej niż w przypadku liny bez tłumika. Zauważmy jednak, że zanikowi drgań liny towarzyszy jedynie niewielka zmiana amplitudy siły tłumika MR (rys. 5c)). Taki charakter siły tłumika MR prowadzi w końcu do niekorzystnego efektu jego blokowania.

Szybki zanik drgań liny (tym szybszy, im większe jest natężenie prądu tłumika MR) obserwujemy od chwili rozpoczęcia drgań swobodnych do chwili całkowitego zablokowania tłumika MR (oznaczono przez t_c). Zablokowanie tłumika MR następuje, gdy chwilowa wartość siły oddziaływania liny na tłumik jest w całym okresie drgań mniejsza od siły wymaganej do zmiany położenia jego tłoka. Wraz z zanikiem amplitudy drgań zmniejsza się siła oddziaływania liny na tłumik, podczas gdy zależna od natężenia prądu sterującego składowa siły oporu tłumika pozostaje bez zmian. Porównanie obu tych sił pozwala na sformułowanie teoretycznego warunku blokowania tłumika MR [9–12, 4]. Z rysunków 5a) i b) wynika, że po zablokowaniu pracy tłumika drgania pozostałej części liny nadal zachodzą i są bardzo słabo tłumione. Punkt mocowania tłumika stanowi w tych warunkach węzeł nowej, nietłumionej przez tłumik formy drgań, o nieco wyższej częstotliwości.

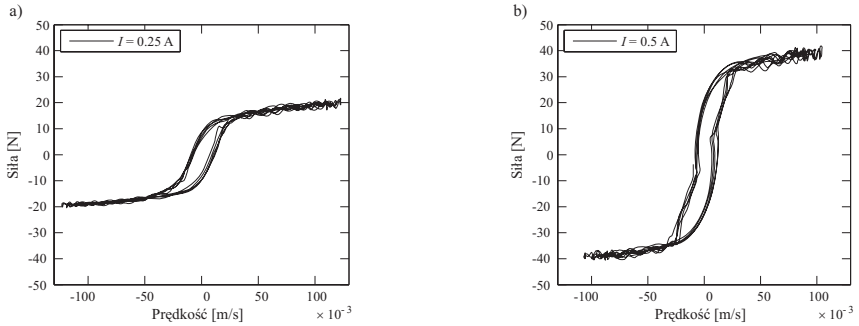
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 5. Drgania swobodne liny dla I = 0,25 A: a) przemieszczenie w punkcie zamocowania tłumika, b) przemieszczenie punktu środkowego liny, c) siła w osi tłumika

Fig. 5. Free vibration of a cable with MR damper for I = 0,25 A: a) cable displacement at damper position, b) cable displacement at midpoint, c) force in damper axis

Zależność siły oporu tłumika MR od prędkości tłoka dla rozpatrywanych natężeń prądów przedstawiono na rys. 6. Siłę oporu tłumika wyznaczono jako różnicę siły mierzonej w osi tłumika (rys. 5c)) i siły bezwładności związanej z masą elementów mocowania tłumika MR. Zależności wyznaczono w przedziale czasowym od 5. do 10. okresu zarejestrowanych drgań.



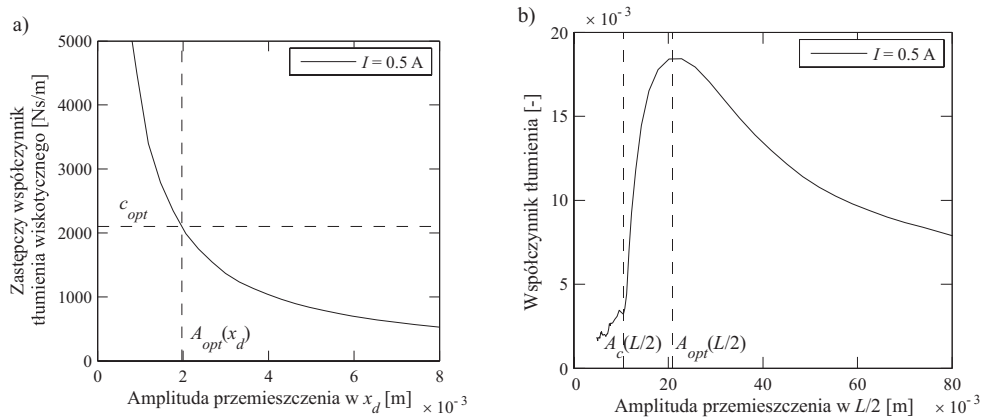
Rys. 6. Zależność siły oporu tłumika od prędkości dla: a) I = 0,25 A, b) I = 0,5 A

Fig. 6. Damper force as a function of velocity for: a) I = 0,25 A, b) I = 0,5 A

W analizie tłumienia drgań liny z użyciem tłumika MR pracującego w trybie pasywnym wykorzystano pojęcie zastępczego współczynnika tłumienia wiskotycznego. Na rysunku 8a) przedstawiono wynik obliczeń zastępczego współczynnika tłumienia wiskotycznego c_{eq} uzyskany na podstawie pomiarów zaniku drgań liny z tłumikiem MR dla prądu o natężeniu 0,5 A. Otrzymany wynik obarczony jest nieznacznym błędem metody wynikającym z faktu, że sygnał prędkości odbiega w niewielkim stopniu od sygnału sinusoidalnego. Ten błąd jest tym większy, im mniejsza jest amplituda drgań. Ze względu na to, że różnym wartościom amplitudy przemieszczenia tłoka odpowiada podobna wartość maksymalna siły (rys. 5a) i c)) otrzymany współczynnik c_{eq} silnie zależy od amplitudy. Im mniejsza amplituda, tym wartość c_{eq} jest większa. Wartość optymalnego współczynnika tłumienia wisko-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

tycznego dla pierwszej formy drgań oznaczono na rys. 7a) przez c_{opt}. Można ją wyznaczyć, obliczając zespolone wartości własne dla liny z tłumikiem wiskotycznym. Porównanie wartości c_{opt} i c_{eq} wskazuje, że dla określonej amplitudy przemieszczenia tłoka (punkt przecięcia na rys. 7a)) uzyskuje się dla założonego natężenia prądu optymalną wartość c_{eq}. Gdy amplituda jest większa od $A_{\text{opt}}(x_d)$, wartość c_{eq} maleje, nie zapewniając optymalnego tłumienia. Gdy amplituda drgań jest mniejsza od $A_{\text{opt}}(x_d)$, wartość c_{eq} szybko wzrasta i ostatecznie dochodzi do utwierdzenia liny w punkcie mocowania tłumika.



Rys. 7. Zależność tłumienia od amplitudy w przypadku braku sterowania: a) zastępczy współczynnik tłumienia wiskotycznego, b) bezwymiarowy współczynnik tłumienia

Fig. 7. Amplitude-dependent damping analysis of cable with MR damper in passive mode: a) equivalent viscous damping coefficient, b) damping ratio

Rysunek 7b) pozwala na interpretację właściwości tłumienia drgań liny za pomocą tłumika MR pracującego w trybie pasywnym. Wykres ten sporządzono na podstawie zarejestrowanego sygnału przemieszczenia w środkowym punkcie liny. Wartości bezwymiarowego współczynnika tłumienia wyznaczano w wąskim oknie czasowym przesuwanym wzdłuż osi czasu. Krzywa tłumienia z rys. 7b) ma maksimum dla amplitudy oznaczonej symbolem $A_{\text{opt}}(L/2)$. Amplituda ta odpowiada sytuacji, gdy wartość c_{eq} jest równa c_{opt} (rys. 8a)). Jeżeli amplituda drgań liny jest większa od amplitudy A_{opt}, tłumienie drgań liny jest słabsze. Tej sytuacji odpowiada zmniejszanie wartości c_{eq} na rys. 7a). Jeżeli amplituda drgań jest mniejsza od amplitudy A_{opt}, bezwymiarowy współczynnik tłumienia drgań liny przyjmuje zdecydowanie mniejsze wartości. Stanowi to konsekwencję zbliżania się do stanu, w którym tłumik zostaje zablokowany. W tym stanie układu zastępczy współczynnik tłumienia wiskotycznego przyjmuje duże wartości (rys. 7a)).

Całkowitemu zablokowaniu tłumika MR odpowiada amplituda A_c (rys. 7b)). Zablokowany tłumik MR nie rozprasza energii drgań liny. Dla drgań o amplitudzie mniejszej od A_c obserwuje się minimalne tłumienie odpowiadające w przybliżeniu tłumieniu wewnętrznemu (rys. 4c)). Należy zauważyć, że z praktycznego punktu widzenia właściwości układu zobrazowane na rys. 7b) są niekorzystne. Stąd wynika potrzeba sterowania tłumikiem MR.

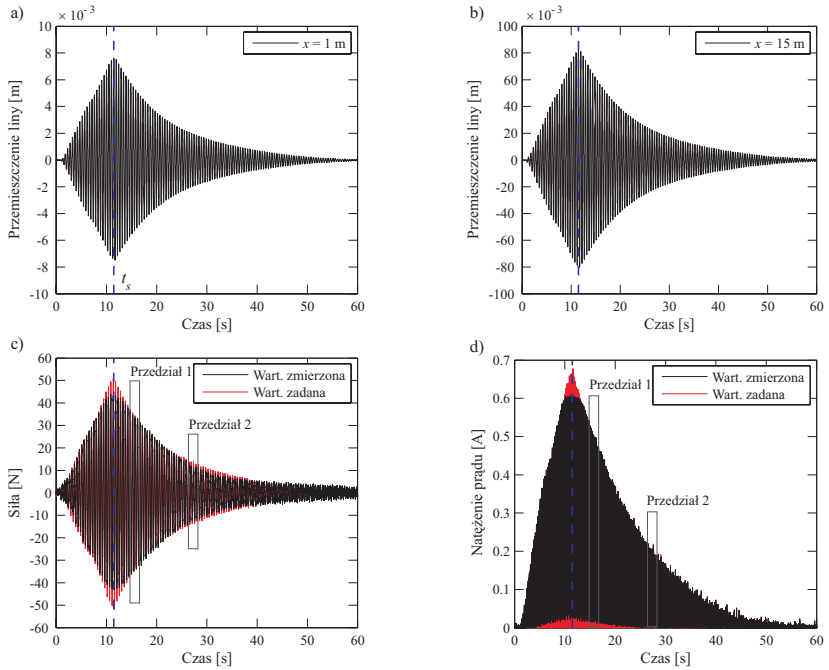
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3.3. Badanie drgań własnych liny z tłumikiem pracującym w trybie aktywnym

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki pomiarów pierwszej formy drgań swobodnych liny z tłumikiem MR sterowanym tak, aby realizowany był zadany współczynnik tłumienia c_{des} = 500 Ns/m. Tłumik był zamocowany do liny w odległości x_d = 1 m od podpory.

Przebiegi czasowe zaniku drgań znacznie różnią się od przebiegów zaniku drgań liny z tłumikiem pracującym w trybie pasywnym. Obserwowana obwiednia zaniku drgań przyjmuje w przybliżeniu postać krzywej wykładniczej. Dodatkowo, zanik przemieszczenia w punkcie mocowania tłumika (rys. 8a)) oraz w punkcie środkowym liny (rys. 8b)) ma identyczny charakter w całym obserwowanym zakresie amplitudy. Zastosowanie algorytmu sterowania tłumikiem MR pozwoliło na prawie całkowite wyeliminowanie efektu blokowania tłumika MR.

Na rysunku 8c) przedstawiono wyniki pomiaru siły w osi tłumika MR oraz siły zadanej, proporcjonalnej do prędkości tłoka tłumika. Siła tłumika MR jest sterowana poprzez wytworzenie odpowiedniego prądu zasilającego. Zależność natężenia prądu od czasu przedstawiono na rys. 8d). Przy największych wychyleniach liny siła wyznaczona przez algorytm sterowania była nieznacznie większa od maksymalnej siły możliwej do wygenerowania przez tłumik MR. Dlatego obserwuje się różnicę obu sił w tym przedziale oraz odpowiednią różnicę prądów – wymaganego do uzyskania zadanej siły oraz mierzonego.



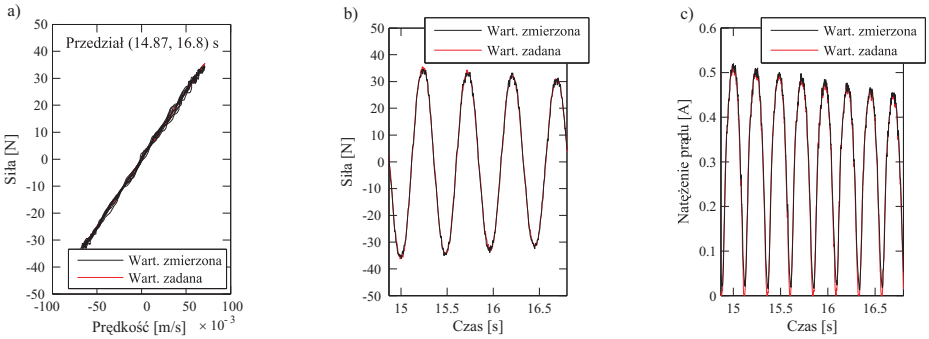
Rys. 8. Drgania liny z tłumikiem sterowanym, c_{des} = 500 Ns/m: a) przemieszczenie punktu zamocowania tłumika, b) przemieszczenie w punkcie x_s = 15 m, c) siła w osi tłumika, d) prąd sterujący

Fig. 8. Cable vibration control with algorithm 1, c_{des} = 500 Ns/m: a) cable displacement at damper position, b) cable displacement point x_s = 15 m, c) force in damper axis, d) current

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Uzyskane własności nadążne układu sterowania siłą tłumika MR zilustrowano szczegółowo dla dwóch wybranych przedziałów czasowych zaniku drgań. Przedział pierwszy (rys. 9) obejmuje kolejne okresy drgań swobodnych (od 8 do 12) oznaczone na rys. 8 jako „Przedział 1". W przedziale tym uzyskano minimalny błąd odwzorowania siły zadanej.

Dla rozpatrywanego przedziału czasowego przedstawiono zależności siły od prędkości (odtwarzanej *on-line* na podstawie sygnału przemieszczenia) oraz przebiegi czasowe siły i prądu tłumika. Na wykresach porównano wartości zmierzone rozpatrywanych wielkości z ich wartościami zadanymi, wygenerowanymi w układzie sterowania. Analiza zamieszczonych wykresów (rys. 9) wskazuje na poprawną realizację algorytmu. Odpowiednio sterowany tłumik MR emuluje działanie liniowego tłumika wiskotycznego o określonej charakterystyce. Wynikowa zależność siły w funkcji prędkości odpowiada w przybliżeniu charakterystyce zadanej i nie wykazuje histerezy typowej dla pasywnego trybu pracy tłumika MR (por. rys. 6). Błąd sterowania siłą tłumika widoczny na rys. 9a) i b) jest nieznaczny i stanowi efekt przyjęcia liniowej aproksymacji zależności parametrów tłumika od prądu przy budowie algorytmu sterowania. W przedziale, dla którego błąd aproksymacji był największy (0,1; 0,2A), obserwowano największy błąd sterowania siłą tłumika MR.



Rys. 9. Ilustracja dokładności śledzenia siły, c_{des} = 500 Ns/m: a) siła jako funkcja prędkości, b) siła tłumika (Przedział 1 na rys. 9c)), c) prąd sterujący (Przedział 1 na rys. 9d))

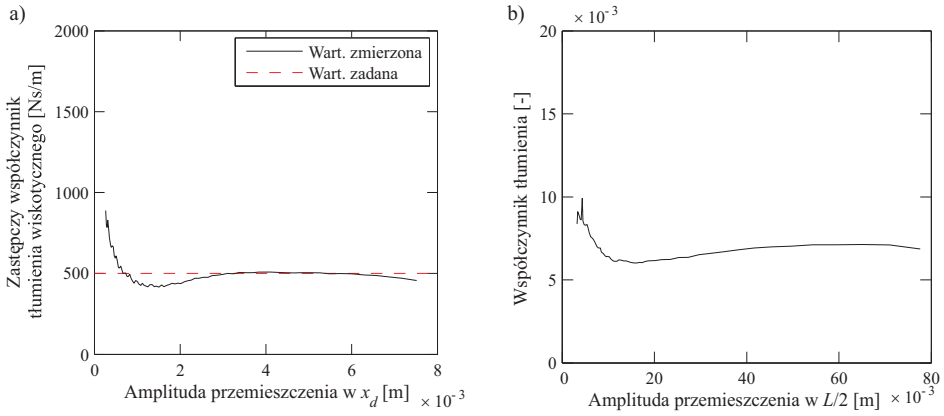
Fig. 9. Illustration of force tracking control accuracy, c_{des} = 500 Ns/m: a) force vs. velocity, b) force acting in damper axis (zoomed section 1 of Fig. 9c)), c) current (zoomed section 1 of Fig. 9d))

Na rysunku 10a) przedstawiono wynik analizy zastępczego współczynnika tłumienia wiskotycznego (c_{eq}). W idealnym przypadku wartość c_{eq} niezależnie od amplitudy drgań powinna być równa zadanej wartości c_{des}. Obserwowana różnica wynika z opisanych błędów realizacji zadanej siły przez tłumik MR. Dla amplitudy poniżej 10^{-3} m prąd tłumika ustala się na wartości 0 A, dalszemu zanikowi amplitudy nie towarzyszy wobec tego wymagane zmniejszenie siły tłumika (rys. 8), co odpowiada wzrostowi wartości c_{eq} w tym przedziale.

Na rysunku 10b) zaprezentowano wykres bezwymiarowego współczynnika tłumienia drgań liny określonego na podstawie sygnału przemieszczenia w punkcie środkowym liny. Otrzymana charakterystyka jest ściśle związana z charakterystyką z rys. 10a) i w szerokim zakresie amplitudy przyjmuje w przybliżeniu wartość stałą $6 \times 10^{-3} - 8 \times 10^{-3}$. Uzyskano wobec tego pożądany efekt sterowania odpowiadający sytuacji, w której wzrostowi am-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

plitudy drgań nie towarzyszy degradacja własności tłumienia drgań liny (por. rys. 7b)). Otrzymany poziom tłumienia odpowiada zadanej wartości c_{des}.



Rys. 10. Tłumienia drgań liny z zastosowaniem układu sterowania z wykorzystaniem tłumika MR, c_{des} = 500 Ns/m: a) zastępczy współczynnik tłumienia wiskotycznego, b) współczynnik tłumienia

Fig. 10. Damping for cable with feedback controlled MR damper, c_{des} = 500 Ns/m: a) equivalent viscous damping, b) damping ratio

4. Wnioski

Przedstawione wyniki badań pokazały możliwości zastosowania tłumików MR do tłumienia drgań lin. Odpowiednie układy sterowania wykorzystujące tłumiki MR stwarzają możliwość wyjątkowo efektywnej eliminacji drgań. Mogą one być dostosowywane do różnych typów drgań występujących w konkretnych konstrukcjach wykorzystujących liny. Analizując wyniki przeprowadzonych eksperymentów, należy również zwrócić uwagę na poprawę jakości współpracy tłumika z liną w przypadku zastosowania sterowania.

Wykorzystanie tłumików MR jako elementów wykonawczych w sterowanych układach eliminacji drgań daje duże możliwości stworzenia systemów eliminacji dostosowanych do różnych typów drgań lin w zależności od ich funkcji użytkowych i warunków pracy.

Praca ta została wykonana w ramach projektu badawczego nr 4-T07C-016-30.

Literatura

[1] Goncalves F.D., Koo J.H., Ahmadian M., *A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies, part I: MR fluid and MR fluid models*, The Shock and Vibration Digest **38**, 2006, 203-219.

[2] Jolly M.R., Bender J.W., Carlson J.D., *Properties and applications of commercial magnetorheological fluids*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures **10**(1), 1999, 5-13.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[3] Lord Co., *RD-1097-01 Product Bulletin*, http://www.lord.com, 2002.
[4] Maślanka M., *About camping phenomenon of a taut cable with an attached MR damper*, Materiały XXII Symposium Vibration in Physical Systems, Poznań–Będlewo 2006.
[5] Rosół M., Sapiński B., *Dynamics of a Magnetorheological Damper Driven by a Current Driver*, 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2006, (to be published).
[6] Sapiński B., *Linear Magnetorheological Fluid Dampers for Vibration Mitigation Modeling, Control and Experimental Testing*, Rozprawy Monografie nr 128, UczelnianeWydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
[7] Sapiński B., Snamina J. Maślanka M., Rosół M., *Facility for testing of magnetorheological damping systems for cable vibrations*, Mechanics, Vol. 25, No. 3, 2006, 135-142.
[8] Snamina J., *Mechaniczne zjawiska falowe w przewodach elektroenergetycznych linii napowietrznych*, Monografia 287, seria Mechanika, Wydawnictwo PK, Kraków 2003.
[9] Weber F., Feltrin G., Motavalli M., *Passive damping of cables with MR dampers*, Materials and Structures **38**, 2005a, 568-577.
[10] Weber F., Feltrin G., Motavalli M., *Measured linear–quadratic–Gaussian controlled damping*, Smart Materials and Structures **14**, 2005b, 1172-1183.
[11] Weber F., Distl H., Nützel O., *Versuchsweiser Einbau eines adaptiven Seildämpfers in eine Schrägseilbrücke*, Beton- und Stahlbetonbau, 100, Heft 7, 2005c, 582-589.
[12] Weber F., Distl H., Feltrin G., Motavalli M., *Simplified approach of velocity feedback for MR dampers on real cable-stayed bridges*, Proceedings of the 6th International Symposium on Cable Dynamics, Charleston, USA 2005d (on CD).
[13] Wu W.J., Cai C.S., *Experimental study of magnetorheological dampers and application to cable vibration control*, Journal of Vibration and Control **12**(1), 2006, 67-82.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ