

**Bogdan SAPIŃSKI, Maciej ROSÓŁ, Łukasz JASTRZĘBSKI**

AKADAMIA GÓRNICZO-HUTNICZA,  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

## Charakterystyki semiaktywnego układu redukcji drgań z odzyskiem energii

**Prof. dr hab. inż. Bogdan SAPIŃSKI**

Jest pracownikiem w Katedrze Automatyki i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Działalność naukowa w zakresie automatyki i robotyki. Zainteresowania i obszary badań: sterowanie w układach mechanicznych, semiaktywne i aktywne układy redukcji drgań, odzyskiwanie energii drgań, materiały i konstrukcje inteligentne, zastosowanie cieczonego magneto-reologicznego do tłumienia drgań w układach dyskretnych i ciągłych.



e-mail: deep@agh.edu.pl

**Dr inż. Maciej ROSÓŁ**

Jest pracownikiem w Katedrze Automatyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zainteresowania: sterowanie układami nieliniowymi w czasie rzeczywistym, „inteligentne” algorytmy sterowania, regulacja w otwartych środowiskach sterowania, wykorzystanie mikrokontrolerów jednocukrowych oraz sterowników PLC w pomiarach i sterowaniu, sterowanie rozproszone z wykorzystaniem magistrali CAN, sieci Ethernet i LonWorks.



e-mail: mr@agh.edu.pl

**Mgr inż. Łukasz JASTRZĘBSKI**

Jest doktorantem Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zainteresowania i obszary badań: modelowanie układów elektromechanicznych, techniki pomiarowe, układy redukcji drgań mechanicznych z odzyskiem energii, programowanie mikrokontrolerów.



e-mail: lukasz.jastrzebski83@gmail.com

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań semiaktywnego układu redukcji drgań z odzyskiem energii, w którym elementem wykonawczym jest tłumik magneto-reologiczny (MR). Obiektem chronionym był model pierwszej kondygnacji budowli pełniącej rolę kondygnacji izolującej od drgań pozostałą część budowli. Badania przeprowadzono dla trzech przypadków zasilania cewki sterującej tłumika: napięciem bezpośrednio z generatora, napięciem wyprostowanym przez mostek Graetz'a oraz prądem o natężeniu sterowanym przez klucz analogowy znajdujący się na wyjściu mostka Graetz'a. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono charakterystyki układu. Charakterystyki te porównano z charakterystykami konwencjonalnego semiaktywnego układu redukcji z zewnętrznym źródłem zasilania.

**Słowa kluczowe:** redukcja drgań, odzyskiwanie energii, tłumik MR.

### Characteristics of semi-active vibration reduction system with energy recovery

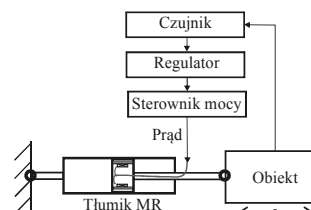
#### Abstract

The paper summarizes the results of testing done on a semiactive vibration reduction system with energy recovery. The system uses a magnetorheological (MR) damper as an actuating element. The operating principle of the system involves the recovery of energy of the vibrating plant and converting it into electric energy (the velocity of the vibrating plant is converted into the electromotive force of induction, which generates the current flow in the control coil of the MR damper). Hence, the force generated by the MR damper is changed. Tests were done in the laboratory facility constructed for the purpose of the experimental program, incorporating a plant to be vibro-isolated, i.e. a mobile platform. The platform represents a model of the first floor in a building, which vibro-isolates the remaining part of the building. The vibration reduction system with energy recovery was tested in several configurations: when the control coil of the damper was voltage-supplied directly from the generator or voltage-supplied via the Graetz bridge, or supplied with current controlled by an analogue switch, at the output from the Graetz bridge. The current-control system uses two feedback loops. A sky-hook control algorithm is used in the external loop, whilst the internal loop uses the algorithm switching the analogue switch. The determined characteristics are compared with those obtained for a conventional semi-active vibration reduction system based on MR damper using an external power source.

**Keywords:** vibration reduction, energy recovering, MR damper.

## 1. Wstęp

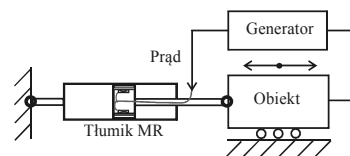
Klasyczny semiaktywny układ redukcji drgań obiektu, w którym elementem wykonawczym jest tłumik MR wymaga zewnętrznego źródła zasilania (rys. 1). Elementami takiego układu są: czujnik (pomiar sygnału drganiowego obiektu), regulator (przetwarzanie sygnału drganiowego według przyjętego prawa sterowania na sygnał napięciowy), sterownik mocy (wzmocnienie sygnału napięciowego) i tłumik MR (generowanie siły tłumienia).



Rys. 1. Konwencjonalny semiaktywny układ redukcji drgań z tłumikiem MR

Fig. 1. Conventional semi-active vibration reduction system based on MR damper

Obiektem badań był semiaktywny układ redukcji drgań wykorzystujący sprzężenie ruchu obiektu z siłą generowaną przez tłumik MR. Układ składał się z tłumika MR typu RD-1005-3 firmy Lord Corporation [5] i doświadczalnego generatora elektromagnetycznego [4]. Działanie takiego układu redukcji drgań polega na odzyskiwaniu energii drgań obiektu i jej przetworzeniu na energię elektryczną – prędkość obiektu jest „przetwarzana” na siłę elektromotoryczną indukcji (prawo Faradaya), która wywołuje przepływ prądu w cewce sterującej tłumika MR, co powoduje zmianę siły generowanej przez tłumik [1].



Rys. 2. Semiaktywny układ redukcji drgań z tłumikiem MR z odzyskiem energii

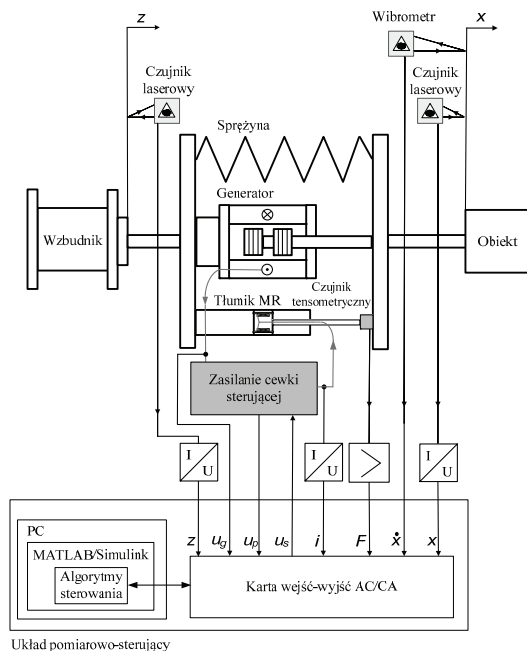
Fig. 2. Semi-active vibration reduction system with energy recovering based on MR damper

Celem badań było wyznaczenie charakterystyk układu redukcji drgań z odzyskiem energii i porównanie ich z charakterystykami konwencjonalnego układu semiaktywnego z zewnętrznym źródłem zasilania. Badania przeprowadzono na specjalnie zbudowanym stanowisku. Obiektem chronionym był model pierwszej kondygnacji budowli pełniącej rolę kondygnacji izolującej pozostałą jej część od drgań. Drgania przenoszone są na obiekt (platformę) przez sprężynę reprezentującą własności sprężyste kondygnacji budowli. Platforma i sprężyna tworzą obiekt o jednym stopniu swobody. Układ redukcji drgań z odzyskiem energii zbadano dla trzech przypadków zasilania cewki sterującej tłumika

MR: napięciem bezpośrednio z generatora, napięciem wyprostowanym przez mostek Graetz'a oraz prądem o natężeniu sterowanym przez klucz analogowy znajdujący się na wyjściu mostka Graetz'a [3].

## 2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze, na którym prowadzono badania (rys. 3) składało się z: układu wytwarzającego drgania (wzбудnika elektromagnetycznego), układu redukcji drgań z dołączoną równolegle sprężyną, ruchomej platformy, dwóch laserowych czujników przemieszczeń, wibrometru laserowego, tensometrycznego czujnika siły oraz układu pomiarowo-sterującego. Układ ten stanowił komputer PC z kartą wejść-wyjść AC/CA typu RT-DAC4 [6], pracujący pod kontrolą systemu Windows XP, z oprogramowaniem MATLAB/Simulink (wersja 2009b).



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego semiaktywnego układu redukcji drgań z odzyskiem energii

Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup for testing of semi-active vibration reduction system with energy recovery

Układ redukcji drgań stanowił tłumik RD-1005-3 połączony równolegle z generatorem. Rezystancja i indukcyjność cewki sterującej tłumika wynosiły:  $R_f=5,5 \Omega$ ,  $L_f=125 \text{ mH}$ , a rezystancja i indukcyjność cewki generatora:  $R_g=0,25 \Omega$  i  $L_g=4,78 \text{ mH}$ . Masa platformy wynosiła 103 kg, natomiast sztywność sprężyny  $10^5 \text{ N/m}$ .

Układ pomiarowo-sterujący umożliwiał rejestrację: przemieszczenia rdzenia wzбудnika (wymuszenie)  $z$ , przemieszczenia platformy  $x$  i prędkości platformy  $\dot{x}$ , siły tłumika  $F$ , napięcia wyjściowego generatora (siły elektromotorycznej)  $u(e)$  oraz natężenia prądu w cewce sterującej  $i$ . Mierzone wielkości były przetwarzane na sygnały napięciowe z zakresu  $\pm 10 \text{ V}$  i próbkowane z częstotliwością 1 kHz.

## 3. Wyniki badań

Badania przeprowadzono dla wymuszeń sinusoidalnych o amplitudzie 3,5 mm i częstotliwości w zakresie (2, 10) Hz w dwóch etapach. W pierwszym etapie zbadano układ redukcji z odzyskiem energii dla następujących przypadków zasilania cewki sterującej:

1. napięciem  $u_g$  wytwarzanym przez generator,
2. napięciem  $u_p$  wyprostowanym przez mostek Graetz'a zbudowany na diodach Schotky'ego (rys. 4a),
3. prądem o natężeniu sterowanym przez klucz analogowy umieszczony na wyjściu mostka Graetz'a (rys. 4b).

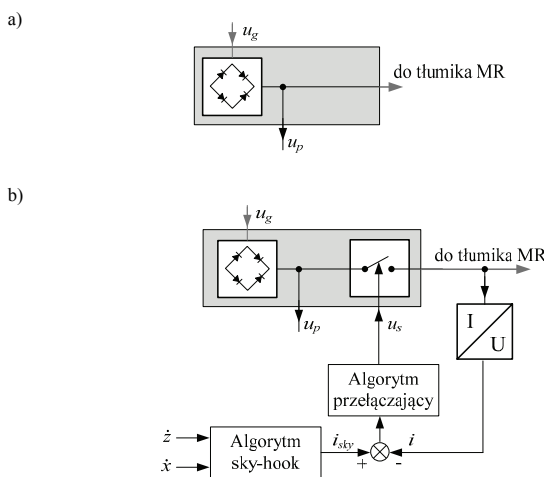
W przypadku 3 do sterowania natężeniem prądu w cewce sterującej wykorzystano algorytm sky-hook [2]:

$$i_{sky} = \begin{cases} b_i \cdot |\dot{x}|, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{z}) \geq 0 \\ 0, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{z}) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Zgodnie z algorytmem sky-hook wartość siły  $F$  tłumika MR jest proporcjonalna do prędkości modułu bezwzględnej platformy  $\dot{x}$ . Wartość współczynnika proporcjonalności  $b_i=0,002 \text{ A}\cdot\text{s/mm}$  dobrano empirycznie.

W układzie sterowania natężeniem prądu występują dwie pętle sprzężenia zwrotnego (rys. 4b). W pętli zewnętrznej zrealizowano algorytm sky-hook. W pętli wewnętrznej natomiast zrealizowano algorytm przełączający klucz analogowy, którego zadaniem jest utrzymywanie wyznaczonej przez algorytm sky-hook wartości natężenia prądu  $i_{sky}$ . Algorytm ten, na podstawie sygnału uchybu  $(i_{sky} - i)$ , wyznacza napięciowy sygnał sterujący  $u_s$ , przyjmujący dwie wartości  $u_{sw}=3,3 \text{ V}$  (załączenie klucza) lub  $u_{sn}=0 \text{ V}$  (wyłączenie klucza):

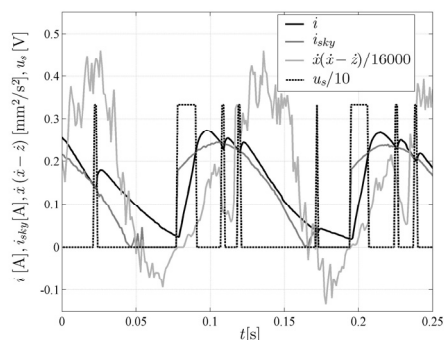
$$u_s = \begin{cases} u_{sw} & \text{dla } i < i_{sky} \\ u_{sn} & \text{dla } i \geq i_{sky} \end{cases} \quad (2)$$



Rys. 4. Zasilanie cewki sterującej przez: a) mostek Graetz'a, b) mostek Graetz'a i klucz analogowy

Fig. 4. Power supply of the control coil by: a) Graetz bridge and analog switch

Działanie algorytmu sky-hook i algorytmu przełączającego wyjaśniano na rys. 5. Przedstawiono na nim przebiegi czasowe natężenia prądu  $i$  oraz  $i_{sky}$ , iloczynu prędkości  $\dot{x}(\dot{x} - \dot{z})$  oraz napięcia sterującego kluczem  $u_s$  dla częstotliwości 4,5 Hz.



Rys. 5. Przebieg czasowy natężenia prądu w cewce sterującej  $i$  dla układu UG-K-sh-c

Fig. 5. Time pattern of current in the control coil  $i$  for the system UG-K-sh-c

Z wykresów wynika, że dla  $\dot{x}(\dot{x}-\dot{z}) \geq 0$  jest generowany prąd o natężeniu  $i_{sky}$ , którego wartość jest proporcjonalna do prędkości  $\dot{x}$ . Na podstawie uchybu ( $i_{sky} - i$ ), algorytm przełączający wytwarza sygnał  $u_s$ , który utrzymuje natężenie prądu  $i$  w cewce sterującej na zadanej wartości. W przypadku, gdy  $i_{sky}=0$  A, natężenie prądu w cewce sterującej nie osiąga wartości  $i=0$  A ze względu na ładunek elektryczny zgromadzony w kondensatorze znajdującym się na wyjściu klucza analogowego.

W celu ułatwienia analizy wyników eksperymentów wprowadzono następujące oznaczenia dla przypadków zasilania cewki sterującej tłumika: UG (przypadek 1), UG-K (przypadek 2), UG-K-sh-c (przypadek 3). Dla pasywnego układu redukcji drgań (zasilanie cewki sterującej prądem o natężeniu  $I=0$  A i  $I=0,2$  A) przyjęto oznaczenia UP1 i UP2.

Wartości średnio-półokresowe mierzonych wielkości  $Y$  obliczono z wzoru:

$$Y = \frac{1}{T} \int_0^{T+T} |y(\tau)| d\tau \quad (3)$$

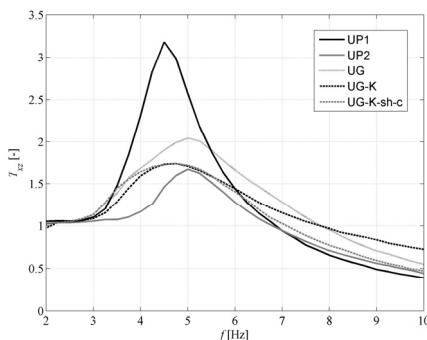
gdzie:  $y(\tau)$  – przebieg czasowy mierzonej wielkości,  $T$  – okres mierzonej wielkości.

Współczynnik przenoszenia drgań wyznaczono na podstawie wzoru:

$$T_{xz}(f) = \frac{\dot{X}(f)}{\dot{Z}(f)} \quad (4)$$

gdzie:  $\dot{Z}(f)$  – wartość średnio-półokresowa prędkości rdzenia wzbudnika,  $\dot{X}(f)$  – wartość średnio-półokresowa prędkości platformy.

Wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki układów UG, UG-K, UG-K-sh-c, UP1 i UP2 przedstawiono na rys. 6–8. Rys. 6 pokazuje współczynnik przenoszenia drgań  $T_{xz}$ . Z wykresów widać, że częstotliwość rezonansowa układu UP1 wynosi 4,5 Hz, natomiast układu UP2, 5 Hz. Dla częstotliwości  $f > 7$  Hz obserwuje się nieznaczne zwiększenie wartości współczynnika  $T_{xz}$  układu UP2 w porównaniu z układem UP1. Dla tej częstotliwości zarówno układ UG jak i UG-K wykazują wyraźne zmniejszenie wartości współczynnika  $T_{xz}$ . Niekorzystnym zjawiskiem w przypadku układu UG jest zwiększenie się w porównaniu z układami UP1 i UP2 wartości współczynnika  $T_{xz}$  dla częstotliwości  $f > 5,5$  Hz. Podobnie dotyczy to układu UG-K dla częstotliwości  $f > 6$  Hz. Znacznie korzystniejsze właściwości tłumiące wykazuje w tym względzie układ UG-K-sh-c.



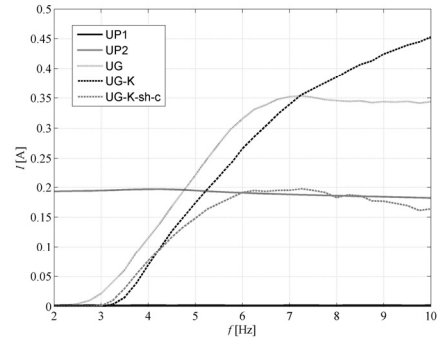
Rys. 6. Współczynnik przenoszenia drgań  $T_{xz}$  dla układów: UG, UG-K, UG-K-sh-c, UP1, UP2

Fig. 6. Transmissibility coefficient  $T_{xz}$  vs. frequency  $f$  for the systems: UG, UG-K, UG-K-sh-c, UP1, UP2

Na rys. 7 pokazano wykresy wartości średnio-półokresowej natężenia prądu  $I$  w cewce sterującej. Z wykresów wynika, że dla układów UG i UG-K natężenie prądu  $I$  wzrasta z częstotliwością wymuszenia  $f$ , co powoduje zwiększenie siły tłumika  $F$  (rys. 8).

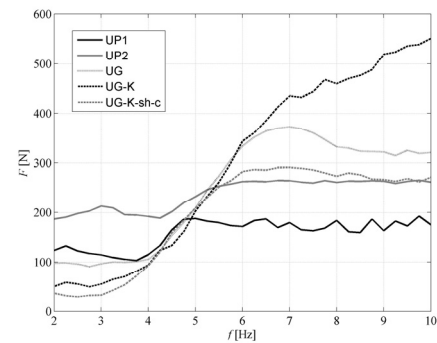
Wzrost współczynnika  $T_{xz}$  w układach UG i UG-K dla częstotliwości  $f > 6$  Hz wynika z wartości natężenia prądu w cewce sterującej.

W przypadku układu UG-K-sh-c, to zjawisko nie występuje, gdyż wartość natężenia prądu w cewce sterującej jest utrzymywana na poziomie  $I=0,2$  A, niezależnie od częstotliwości. Układy UG, UG-K i UG-K-sh-c w zakresie częstotliwości (3; 5) Hz wykazują istotne zwiększenie wartości współczynnika  $T_{xz}$  w porównaniu z układem UP2 (rys. 6). Takie zachowanie układu redukcji drgań jest wynikiem zbyt małych napięć uzyskiwanych z generatora dla częstotliwości  $f < 5$  Hz a więc i natężenia prądu  $I$  w cewce sterującej (rys. 7).



Rys. 7. Natężenie prądu w cewce sterującej  $I$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla układów: UG, UG-K, UG-K-sh-c, UP1, UP2

Fig. 7. Current  $I$  in the control coil vs. frequency  $f$  for the systems: UG, UG-K, UG-K-sh-c, UP1, UP2



Rys. 8. Siła tłumika  $F$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla układów: UG, UG-K, UG-K-sh-c, UP1, UP2

Fig. 8. Damper force  $F$  vs. frequency  $f$  for the systems: UG, UG-K, UG-K-sh-c, UP1, UP2

Działanie układu redukcji drgań z algorytmem sky-hook (UG-K-sh-c) zależy w istotny sposób od jakości odtwarzania sygnałów prędkości  $\dot{x}$  i  $\dot{z}$  na podstawie mierzonych sygnałów przemieszczeń  $x$  i  $z$  (lub przyspieszeń  $\ddot{x}$ ,  $\ddot{z}$ ). W przypadku zakłóceń odtworzonych sygnałów prędkości pojawiają się problemy z określeniem momentu przełączania oraz wartości sygnału sterującego  $u_s$ . W związku z tym, że jedną z mierzonych wielkości była siła elektromotoryczna  $e$  (napięcie  $u_g$ ) generatora, postanowiono ją wykorzystać do odtwarzania prędkości względnej  $v = \dot{x} - \dot{z}$ . Zależność  $e(v)$  opisano wielomianem pierwszego rzędu:

$$e = \kappa \cdot v + o \quad (5)$$

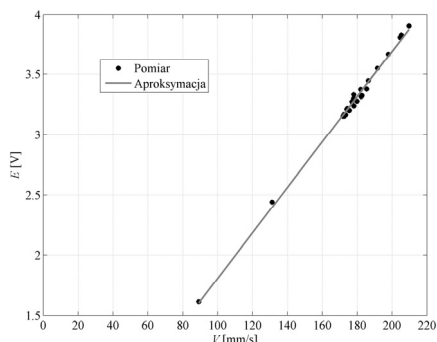
gdzie:  $\kappa$  [Vs/mm] – współczynnik kierunkowy,  $o$  [V] – przesunięcie wartości napięcia.

Identyfikację parametrów  $\kappa$  i  $o$  przeprowadzono dla dwóch zestawów danych:

1. wartości średnio-półokresowych siły elektromotorycznej  $E$  i prędkości względnej  $V$  wyznaczonych zgodnie z wzorem (3) dla zakresu częstotliwości (2; 10) Hz.
2. wartości chwilowych siły elektromotorycznej  $e$  i prędkości względnej  $v$ .

Na rys. 9 przedstawiono zależność  $E(V)$ . Punkty oznaczone symbolem „\*” reprezentują wartości obliczone na podstawie

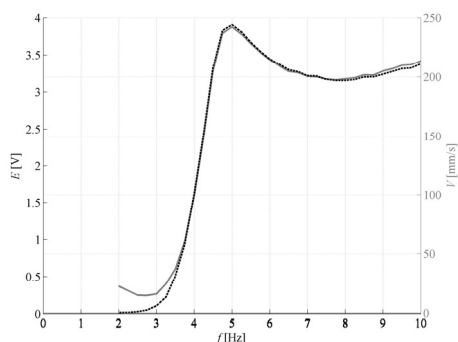
danych pomiarowych, natomiast linia ciągła stanowi aproksymację tych danych. Do aproksymacji wykorzystano funkcję *polyfit.m* programu MATLAB. Uzyskano następujące wartości współczynników:  $\kappa = 0,0189 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{mm}$ ,  $\sigma = -0,0833 \text{ V}$ .



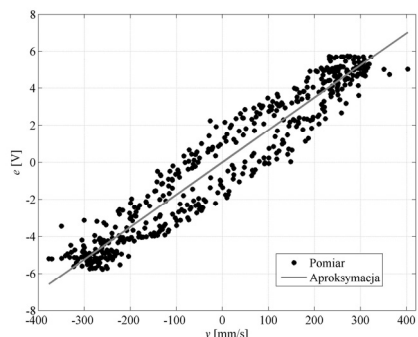
Rys. 9. Siła elektromotoryczna  $E$  w funkcji prędkości względnej  $V$  dla układu UP1  
Fig. 9. Electromotive force  $E$  vs. relative velocity  $V$  for the system UP1

Na rys. 10 porównano wartości średnio-półokresowe  $E$  i  $V$  uzyskane dla zakresu częstotliwości (2; 10) Hz. Można zauważyć, że wykorzystanie wartości  $E$  do obliczenia prędkości względnej  $V$  dla częstotliwości w zakresie (2; 3,5) Hz obciążone jest znacznym błędem. Wynika to z niewielkich wartości prędkości  $V$  (20; 30) mm/s i w efekcie wartości siły elektromotorycznej  $E \leq 0,51 \text{ V}$ .

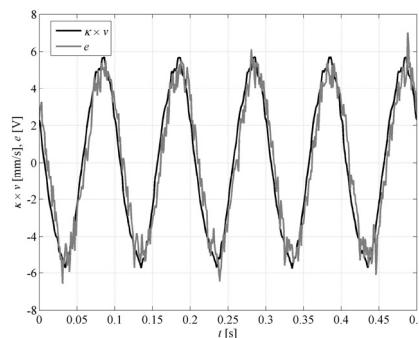
Identyfikację parametrów wielomianu (5) przy wykorzystaniu charakterystyk czasowych  $e$  oraz  $v$  przeprowadzono przy użyciu sygnału wymuszającego  $z$  o częstotliwości  $f=10 \text{ Hz}$ . W celu zwiększenia dokładności w obliczeniach uwzględniono czas równy 10 okresom sygnału wymuszającego  $z$  (co odpowiada 1 s). Uzyskano następujące wartości współczynników:  $\kappa=0,017448 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{mm}$ ,  $\sigma = 0,000166 \text{ V}$ .



Rys. 10. Siła elektromotoryczna generatora  $E$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla układu UP1  
Fig. 10. Electromotive force  $E$  vs. frequency for the system UP1



Rys. 11. Siła elektromotoryczna  $e$  w funkcji prędkości względnej  $v$  dla układu UP1  
Fig. 11. Electromotive force  $e$  vs. relative velocity  $v$  for the system UP1



Rys. 12. Siła elektromotoryczna  $e(t)$  oraz iloczyn współczynnika  $k$  i prędkości względnej  $v(t)$  dla układu UP1

Fig. 12. Time patterns of electromotive force  $e(t)$  and product of relative velocity frequency  $v(t)$  and coefficient  $k$  for the system UP1

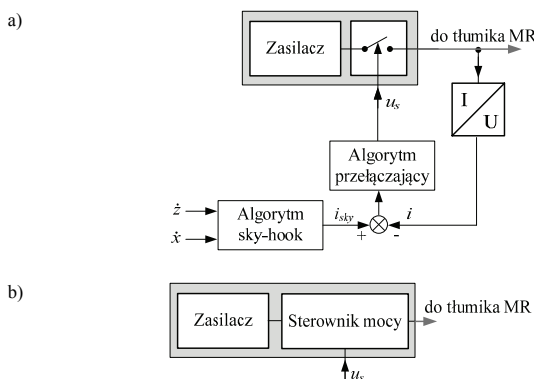
Na rys. 11 pokazano zależność siły elektromotorycznej  $e$  od prędkości względnej  $v$ . Punkty oznaczone symbolem „•” reprezentują dane pomiarowe, natomiast linia ciągła jest aproksymacją tych danych.

Weryfikację uzyskanych parametrów  $\kappa$  oraz  $\sigma$  przeprowadzono porównując przebiegi czasowe siły elektromotorycznej  $e$  z przeskalowaną prędkością względną  $v$  (rys. 12).

Do dalszych badań wybrano współczynniki  $\kappa$  i  $\sigma$  wyznaczone na podstawie wartości chwilowych. Uwzględniają one większy zakres prędkości względnej oraz dokładniej odzwierciedlają zachowanie obiektu w zakresie prędkości  $v$  (0; 50) mm/s w porównaniu do tych parametrów wyznaczonych na podstawie wartości średnio-półokresowych.

W drugim etapie badań porównano przedstawione wcześniej charakterystyki układu redukcji drgań z odzyskiem energii z charakterystykami wyznaczonymi dla układu redukcji drgań z zewnętrznym źródłem zasilania. Eksperymenty przeprowadzono dla następujących przypadków zasilania cewki sterującej:

1. prądem o natężeniu sterowanym przez klucz analogowy (rys. 13a)
2. napięciem wytwarzanym przez analogowy sterownik mocy (rys. 13b).



Rys. 13. Zasilanie cewki sterującej z zewnętrznego źródła energii z użyciem:  
a) klucza analogowego, b) analogowego sterownika mocy  
Fig. 13. Power supply of the control coil from the external source by the use of:  
a) analogue switch, b) analogue power controller

Aby ułatwić porównanie charakterystyk układów, dla układu redukcji drgań z zewnętrznym źródłem zasilania (zasilacza) przyjęto następujące oznaczenia: UZ-sh-c (przypadek 1) oraz UZ-sh-a (przypadek 2). W pierwszym przypadku, podobnie jak dla układu UG-K-sh-c (rys. 4b), zastosowano dwie pętle sprzężenia zwrotnego. Różnica w budowie układów UG-K-sh-c i UZ-sh-c wynika jedynie z innego sposobu zasilania wejścia klucza analogowego. Dla układu UZ-sh-c jest to zasilacz prądu stałego. W układzie UZ-sh-a analogowy sterownik mocy wytwarza sygnał napięciowy zależny od sygnału sterującego  $u_s$ . Sygnał ten jest generowany przez algorytm sky-hook uruchamiany na komputerze klasy PC z zainstalowaną kartą I/O. Dla obydwu przypadków cewka gene-

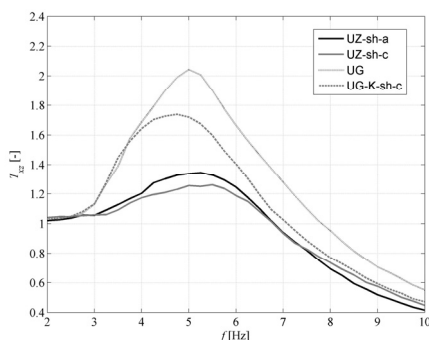
ratora podłączona była jedynie do układu pomiarowego (brak obciążenia). Siłę elektromotoryczną  $e$  wykorzystano do obserwacji prędkości względnej. Należy zauważyć, że dla UZ-sh-c sygnał sterujący  $u_s$  jest sygnałem typu załącz/wyłącz, natomiast dla UZ-sh-a jest to napięciowy sygnał analogowy z zakresu (0; 10)V.

W drugim przypadku (układ 0=UZ-sh-a) wykorzystano analogowy sterownik mocy. Sterownik ten wytwarza napięcie sterujące  $u_s$  cewką sterującą zgodnie z wzorem:

$$u_s = \begin{cases} b_u \cdot |\dot{x}| & \text{dla } \dot{x}(\dot{x} - \dot{z}) \geq 0 \\ 0 & \text{dla } \dot{x}(\dot{x} - \dot{z}) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

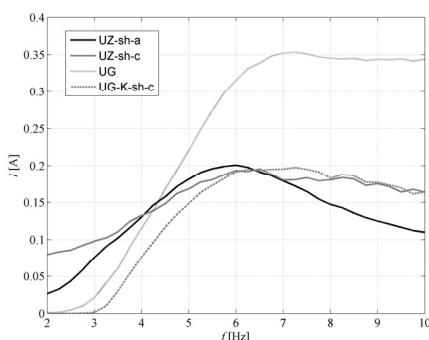
Wartość współczynnika  $b_u=0,01$  V·s/mm dobrano na podstawie współczynnika  $b_f$  (równanie 1) oraz rezystancji cewki sterującej tłumika  $R_f$ .

Charakterystyki układów redukcji drgań UG, UG-K-sh-c, UZ-sh-c oraz UZ-sh-a pokazano na rys. 14–16.



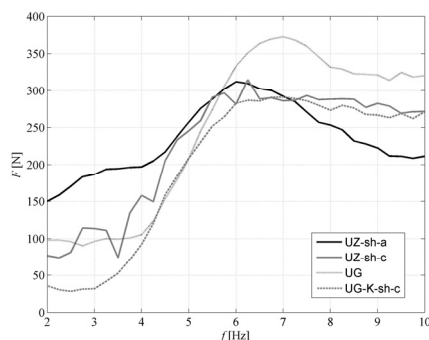
Rys. 14. Współczynnik przenoszenia drgań  $T_{z}$  dla układów: UZ-sh-a, UZ-sh-c, UG, UG-K-sh-c

Fig. 14. Transmissibility coefficient  $T_{z}$  vs. frequency  $f$  for the systems: UZ-sh-a, UZ-sh-c, UG, UG-K-sh-c



Rys. 15. Natężenie prądu w cewce sterującej  $I$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla układów: UZ-sh-a, UZ-sh-c, UG, UG-K-sh-c

Fig. 15. Current in the control coil  $I$  vs. frequency  $f$  for the systems: UZ-sh-a, UZ-sh-c, UG, UG-K-sh-c



Rys. 16. Siła tłumika  $F$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla układów: UZ-sh-a, UZ-sh-c, UG, UG-K-sh-c

Fig. 16. Damper force  $F$  vs. frequency  $f$  for the systems: UZ-sh-a, UZ-sh-c, UG, UG-K-sh-c

Z rys. 14 wynika, że układy UZ-sh-c i UZ-sh-a wykazują najkorzystniejsze właściwości w zakresie częstotliwości (2; 10) Hz. Współczynnik  $T_{z}$  tych układów przyjmuje najmniejsze wartości zarówno dla częstotliwości okołorezonansowych jak i nadrezonansowych. Najlepsze właściwości tłumiące drgania w zakresie częstotliwości (3; 7) Hz wykazuje układ UZ-sh-c, natomiast dla częstotliwości  $f > 7$  Hz układ UZ-sh-a.

Charakterystyki natężenia prądu  $I$  oraz siły tłumienia  $F$  (rys. 15 i 16) potwierdzają, że najlepsze tłumienie drgań uzyskuje się dla układów sterowanych z algorytmami sky-hook. Nadto, dla układów UZ-sh-c i UZ-sh-a, można zauważyć korelację pomiędzy natężeniem prądu  $I$  i współczynnikiem  $T_{z}$ . Zachowanie układów UZ-K-sh-c i UZ-sh-c dla częstotliwości  $f > 7$  Hz jest zbliżone (energia dostarczana przez generator jest wystarczająca do utrzymania zadanej wartości natężenia prądu).

#### 4. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań semiaktywnego układu redukcji drgań obiektu z odzyskiem energii, w którym elementem wykonawczym był tłumik MR. Obiektem chronionym była platforma, reprezentująca model pierwszej kondygnacji budowli pełniącej rolę kondygnacji izolującej pozostałą część budowli przed drganiami. Układ redukcji drgań z odzyskiem energii zbadano dla trzech przypadków zasilania cewki sterującej tłumika. Wyznaczono charakterystyki układu i porównano z charakterystykami klasycznego semiaktywnego układu redukcji z zewnętrznym źródłem zasilania.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- układy (UG, UG-K, UG-K-sh-c) redukcji drgań z odzyskiem energii skutecznie redukują amplitudę drgań dla częstotliwości okołorezonansowych,
- układy redukcji drgań bez regulatora sky-hook (UG, UG-K) zwiększają współczynnik przenoszenia drgań dla częstotliwości wyższych od częstotliwości rezonansowej,
- zastosowanie algorytmu sky-hook powoduje poprawę działania tych układów (UG-K-sh-c),
- dla częstotliwości (3; 5) Hz generator nie dostarcza energii elektrycznej wymaganej do utrzymania siły tłumika wyznaczonej przez algorytm sky-hook,
- wykorzystanie siły elektromotorycznej  $e$  (napięcia  $u_g$ ) wytwarzanej przez generator umożliwiło obliczenie sprawdzanego w algorytmie sky-hook warunku  $\dot{x}(\dot{x} - \dot{z})$  przy użyciu wyłącznie jednego czujnika przemieszczenia.

W kolejnych etapach prac planuje się badania przedstawionego układu redukcji drgań z algorytmem „sterowania optymalnego z przycięciem” (ang. *clipped optimal control*) oraz opracowanie takiego układu przetwarzania i zarządzania energią odzyskaną, który nie będzie wymagał zewnętrznego źródła zasilania.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr N501 366964.

#### 5. Literatura

- [1] Cho S. W., Jung H. J., Lee I. W.: Feasibility Study of Smart Passive Control System Equipped with Electromagnetic Induction Device. *Smart Materials and Structures* 16, 2323–2329, 2007.
- [2] Braun S., Ewins D., Rao S.S.: *Encyclopedia of Vibration*. Academic Press, Vol. 1 (Active Control of Vehicle Vibration: Ahmadian M.), 37–45, 2002.
- [3] Rosół M., Sapiński B., Jastrzębski Ł.: Badania laboratoryjne układów kondycjonowania sygnału generatora elektromagnetycznego do zasilania tłumika magnetoreologicznego. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, Vol. 56, Nr 10/2010, 1228–1233.
- [4] Sapiński B.: Vibration power generator for a linear MR damper. *Smart Materials and Structures*, 19, 1050–1062, 2010.
- [5] <http://www.lord.com>
- [6] <http://www.inteco.com.pl>