

## DAMPING OF VIBRATIONS WITH USING MAGNETORHEOLOGICAL FLUID DEVICES

### Summary

*In the last decade, much attention has been given to the reduction of machine vibrations. As a result, many innovative ideas have been proposed, and new devices have been designed. Among those, magnetoreological (MR) fluid devices are the most promising devices for structural control of engineering structures. MR dampers have the capability to provide large controllable forces damping and dynamically change their properties to accommodate varying loading conditions. MRF dampers are among the most promising devices for active seat suspension vibrations control.*

## TŁUMIENIE DRGAŃ Z WYKORZYSTANIEM UKŁADÓW Z CIECZĄ MAGNETOREOLOGICZNĄ

### Streszczenie

*W ostatniej dekadzie podejmowane są prace nad redukcją drgań w układach mechanicznych. W rezultacie tych działań rozwijane są innowacyjne idee i nowe urządzenia. Urządzenia zawierające ciecze magnetoreologiczne są jednymi z najbardziej nowoczesnych urządzeń dla sterowania drganiami w układach mechanicznych. Tłumiki magnetoreologiczne pozwalają na wytworzenie zmiennych sił tłumienia poprzez zmianę swoich własności w zależności od stanu obciążenia. Tłumiki MR są jednymi z najbardziej innowacyjnych rozwiązań wśród urządzeń dla aktywnego sterowania drganiami układu zawieszania siedziska.*

### 1. Wprowadzenie

Obecnie obserwuje się coraz większe zastosowanie praktyczne cieczy inteligentnych (ang.: Smart Materials; SM) w budowie konstrukcji inżynierskich. Ciecze inteligentne zmieniają swoje właściwości pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego (ciecze elektoreologiczne) lub magnetycznego (ciecze typu ferro lub magnetoreologiczne). Przy braku pola zachowują się one jak zwykła ciecz newtonowska, natomiast w obecności pola następuje zmiana ich lepkości i granicy plastyczności. Podstawowe różnice pomiędzy omawianymi rodzajami cieczy wynikają z konieczności stosowania różnych pól zewnętrznych dla każdej z nich. Ciecze elektoreologiczne wymagają stosowania pól elektrostatycznych o dużych natężeniach (do 5 kV/mm). Ciecze magnetoreologiczne pozwalają uzyskiwać granice plastyczności od 50 do 150 kPa, podczas gdy ciecze elektoreologiczne od 2 do 5 kPa.

### 2. Ciecze magnetoreologiczne

Wyróżnia się dwa rodzaje cieczy magnetycznych: ferromagnetyczne (ang. Ferrofluids) oraz magnetoreologiczne (ang. MagnetoRheological Fluids - MRF). Ciecze magnetyczne są zawiesiną cząstek ferromagnetycznych w oleju syntetycznym lub w lekkim oleju mineralnym. Średnice cząsteczek występujących w cieczy ferromagnetycznej wynoszą ok. 10 nm. Cząstki ferromagnetyczne wykonane są najczęściej z tlenku żelaza  $Fe_3O_4$ . Każda z nich jest pojedynczą domeną posiadającą stałe pole magnetyczne. Kropla cieczy ferromagnetycznej może zawierać ok.  $10^{15}$  takich mikromagnesów, a ich procentowa zawartość w cieczy wynosi do ok. 20%. Ciecz magnetoreologiczna jest natomiast koloidalną zawiesiną podatnych magnetycznie spolaryzowanych cząstek o średnicach od 0,5 do 10  $\mu m$  w cieczy nośnej, którą najczęściej jest olej syntetyczny o niskiej zdolności parowania (ciecz magnetycznie obojętna). Może zawie-

rać ona w swojej objętości od 20 do 60% cząstek ferromagnetycznych. Niewielkie wymiary cząstek zapewniają możliwość zmiany własności MRF takich jak np. lepkość lub tłumienie, w bardzo krótkich czasach rzędu milisekund, przez stymulację zewnętrznym polem magnetycznym. Ze względu na swoje unikalne właściwości (zależność naprężenia stycznego od szybkości ścinania jest nieliniowa) zaliczane są one do cieczy nienewtonowskich.

Ciecze magnetoreologiczne zostały opatentowane w roku 1951 w Stanach Zjednoczonych (US Patent 2575360) przez Jakoba Rabinowa pracującego w amerykańskim Narodowym Biurze Standardów (National Bureau of Standards, obecnie National Institute of Standards and Technology). Obecnie znanych jest wiele odmian tych cieczy, różniących się przede wszystkim rodzajem cieczy nośnej.

### 3. Zastosowanie cieczy magnetoreologicznych

Ciecze magnetoreologiczne najczęściej stosowane są do tłumienia drgań w następujących dziedzinach:

- budownictwo,
- transport (lotnictwo, samochody, rowery),
- robotyka, biocybernetyka (np. protezy z elementami magnetoreologicznymi),
- urządzenia gospodarstwa domowego (np. pralki),
- innego rodzaju urządzenia np. urządzenia do ćwiczeń fizycznych.

Ciecze magnetoreologiczne stosowane są najczęściej w tłumikach drgań, sprzęgłach, hamulcach oraz w zaworach w układach hydraulicznych. W budownictwie tłumiki magnetoreologiczne stosowane są do minimalizacji drgań mechanicznych i przemieszczeń konstrukcji budowlanych wywołanych skutkiem trzęsienia ziemi (budynki) lub wiatru (głównie mosty). Na rys. 1 zamieszczono zdjęcie mostu zawierającego elementy z materiałów reologicznych.

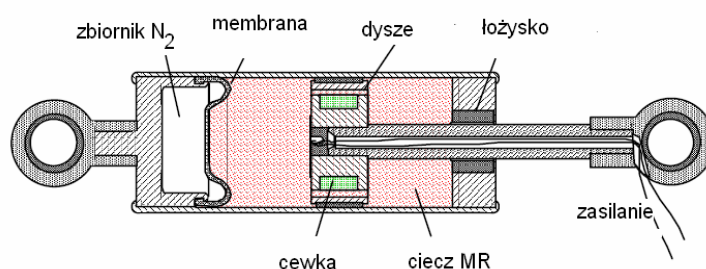
Tab. 1. Komercyjne ciecze MR (przykład)  
 Table 1. Commercial MR fluids (an example)

Nazwa	Procent żelaza w objętości	Ciecz nośna	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Zakres temperatur
MRX-126PD	26	olej węglowodorowy	2,66	-40°C do 150°C
MRX-140ND	40	olej węglowodorowy	3,64	-40°C do 150°C
MRX-242AS	42	woda	3,88	5°C do 90°C
MRX-336AG	36	olej silikonowy	3,47	-50°C do 200°C



Rys. 1. Most Dong Ting Lake (Chiny) zawierający magnetoreologiczne tłumiki minimalizujące wpływ wiatru na przemieszczenia mostu [3]

Fig. 1. The Dong Ting Lake Bridge in China is equipped with magnetorheological motion dampers to counteract gusts of wind [3]



Rys. 2. Schemat budowy tłumika magnetoreologicznego [1]

Fig. 2. MR fluid-based damper [1]

W środkach transportu materiały magnetoreologiczne stosowane są do tłumienia udarów oraz w układach zawieszenia siedziska.

Urządzenia z cieciami magnetoreologicznymi wykorzystują trzy podstawowe modele:

- model sprzęgłowy. Ciecz magnetoreologiczna znajduje się pomiędzy dwoma przemieszczającymi się względem siebie biegunami rdzenia. Regulując natężenie pola magnetycznego steruje się lepkością cieczy, a co za tym idzie, zmienia się wartość siły przeciwdziałającej przemieszczaniu się biegunów. Taki model wykorzystuje się do opisu między innymi niektórych typów sprzęgieł, tłumików drgań i hamulców.

- model zaworowy. W tym wypadku bieguny rdzenia są nieruchome względem siebie a ciecz przepływa przez wąską szczelinę. Taki model opisuje działanie układów hydraulicznych oraz niektórych typów amortyzatorów.

- model ściskający. Wzrost lepkości cieczy przeciwdziała ruchom pionowym elementów rdzenia. Według tego modelu konstruuje się niektóre tłumiki drgań.

Najczęściej obecnie spotykanymi konstrukcjami tłumików drgań są tłumiki tłokowe. Pozwalają one uzyskiwać stosunkowo wysokie siły tłumienia, jednak wykorzystują znaczne ilości cieczy MR przez co są bardzo kosztowne. Konstrukcje oparte na kompozytach magnetoreologicznych pozwalają osiągać mniejsze siły tłumienia oraz mają większe gabaryty jednak do ich prawidłowego działania ko-

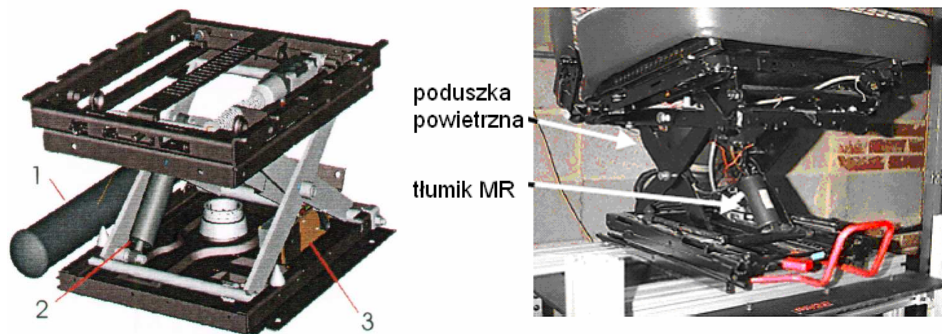
nieczne są znikome ilości cieczy. Jako przykład posłużyć może tu tłokowy tłumik firmy Lord - Corporation typ RD-1005-3 (Fmax = 2000N; ok 300 ml cieczy), podczas gdy kompozytowy tłumik RD-1097-01 (Fmax = 100N; ok 5 ml cieczy).

Na rys. 2 zamieszczono schemat magnetoreologicznego tłumika drgań.



Rys. 3. Magnetoreologiczny układ sterowania siedziskiem firmy Lord Corporation[3]

Fig. 3. The System Motion Master Ride Management System (Lord Corporation)[3]



Rys. 4. Układ tłumika magnetoreologicznego umieszczony na zawieszeniu siedziska [7]

Fig. 4. VRS package mounted to suspension body [7]

Podczas ruchu tłoka ciecz magnetoreologiczna przedostaje się z jednej komory amortyzatora do drugiej przez niewielkie otwory w tłoku, przy których znajdują się cewki elektromagnesu. Regulując natężenie prądu płynącego w cewce, zmienia się wartość natężenia pola magnetycznego, czego skutkiem jest zmiana lepkości cieczy, co powoduje zmianę siły tłumienia. Dodatkowo w tłumiku drgań umieszczony jest akumulator gazowy, który kompensuje zmianę objętości cieczy, spowodowanej obecnością ciągu poruszającego tłokiem.

Siła generowana  $F_d$  przez tłumik magnetoreologiczny może być wyznaczona z zależności:

$$F_d(t) = \{F_{st} + \frac{b_H}{T_m} H(t)\} \text{sign}[y(t)] + b_v [y(t)]$$

gdzie:

$F_{st}$  – statyczna siła tarcia,

$b_v$  – współczynnik tłumienia wiskotycznego,

$b_H$  – współczynnik wzmocnienia siły generowanej przez pole magnetyczne,

$H$  – natężenie pola magnetycznego,

$T_m$  – stała czasowa opisującą dynamikę zmian lepkości tłumika,

$y$  – współczynnik położenia.

Podstawowymi zaletami tłumików magnetoreologicznych są:

- stopień redukcji drgań podobny jak w przypadku aktywnych eliminatorów drgań,
- małe zapotrzebowanie na energię (rzędu 20 W); możliwe jest zasilanie układu regulacji z baterii,
- generowanie dużych sił tłumienia (do 200 kN).

### 3. Zastosowanie cieczy magnetoreologicznych w siedziakach

Siedzisko posiada układ aktywnej izolacji drgań mechanicznych (VRS Semi-active suspension seat) zawierający tłumik magnetoreologiczny. To nowatorskie rozwiązanie zostało także uhonorowane przez Amerykańskie Towarzystwo Inżynierów Rolnictwa (American Society of Agricultural Engineers - ASAE) i zaliczone do jednego z 50 najbardziej innowacyjnych rozwiązań w technice rolniczej (nagroda AE50).

Siedzisko zawiera magnetoreologiczny układ sterowania siedziskiem firmy Lord Corporation.

Magnetoreologiczny układ sterowania siedziskiem firmy Lord Corporation (System Motion Master Ride Management System) (rys. 3) zawiera:

- tłumik z cieczą magnetoreologiczną (1),
- czujnik pomiaru pozycji siedziska (4),
- układ sterujący (3),
- przełącznik rodzaju drogi (2).

Układ wyznacza pozycje siedziska i reguluje siłę tłumienia tłumika magnetoreologicznego. Pomiar pozycji siedziska i zmiana tłumienia wykonywana jest 500 razy w ciągu sekundy.

Na rys. 4. zamieszczono położenie magnetoreologicznego układu sterowania siedziskiem w układzie zawieszenia siedziska.

Siedziska z tłumikiem magnetoreologicznym obecnie są stosowane w siedziakach firmy Sears Seating (model D5090 VRS). Zastosowanie tłumika magnetoreologicznego w układzie zawieszenia siedziska pozwala na zmniejszenie o około 40% dawki drgań mechanicznych (VDV – Vibration Dose Value), przenoszonych na operatora [3].

### Literatura

- [1] Jolly M. R., Bender J. W., Carlson J. D., Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, Thomas Lord Research Center, Materiały firmy Lord Corporation.
- [2] Ławniczak, A. Milecki, Ciecze elektro i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice, WPP 1999.
- [3] Materiały firmy Lord Corporation [www.lordcorp.com](http://www.lordcorp.com)
- [4] Poyner J., Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers, Advanced Vehicle Dynamics Laboratory, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [5] Sapiński B., Rosół M., Real-time controllers for MR seat damper, AMAS Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03 Jadwisin 2003.
- [6] United States Patent 5816372 Magnetorheological fluid devices and process of controlling force in exercise equipment utilizing same.
- [7] VRS Operational Explanation 2005, Materiały Firmy Sears Seating 2005.
- [8] Xubin Song, Mehdi Ahmadian, Study of Semiactive Adaptive Control Algorithms with Magneto-Rheological Seat Suspension, 2004 SAE International, 2004-01-1648.
- [9] Zajac P., Identyfikacja tłumienia układu adaptacyjnego z cieczą magnetoreologiczną, PWt., 2003.