

APPLICATION OF MAGNETORHEOLOGICAL MATERIALS TO THE REDUCTION OF MECHANICAL VIBRATION AMPLITUDES

Summary

This article presents the properties of MR materials and the possibilities of their application for passive or active reduction of mechanical vibrations. Magnetorheological damper inserted into vibration isolation system absorbs an energy of aggregate's resonance vibrations. Vibration reduction system is formed in the way to obtain the dynamic structure of aggregate: tractor – vibration isolation system – driver's seat which is optimum considering the state of vibrations on the driver's seat.

MATERIAŁY MAGNETOREOLOGICZNE W ZASTOSOWANIU DO REDUKCJI AMPLITUD DRGAŃ MECHANICZNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono właściwości materiałów magnetoreologicznych (MR) i możliwości ich zastosowania do pasywnej lub aktywnej redukcji drgań mechanicznych w układach mechanicznych. Możliwość zastosowania cieczy MR do tłumienia drgań wynika stąd, iż w bardzo krótkim czasie (kilku milisekund), pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego zmieniają one swoją lepkość. Ciecz reologiczna, po wprowadzeniu do układu izolacji drgań, pochłania energię drgań rezonansowych, np. agregatu: ciągnik – układ izolacji drgań – kierowca.

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono właściwości materiałów (MR) i możliwości ich zastosowania do pasywnej lub aktywnej redukcji drgań mechanicznych. Tłumik z cieczą reologiczną, po wprowadzeniu do układu izolacji drgań, pochłania energię drgań rezonansowych agregatu. Układ redukcji drgań kształtowany jest tak, aby uzyskać strukturę dynamiczną agregatu: ciągnik – układ izolacji drgań – siedzisko kierowcy optymalną ze względu na stan drgań na siedzisku kierowcy [8].

2. Materiały o zmiennych własnościach mechanicznych

Rozwój techniki i poszukiwanie coraz nowszych materiałów konstrukcyjnych o odpowiednich właściwościach tłumiących przyczynił się do odkrycia tzw. konstrukcji inteligentnych (z j. ang. smart structures), takich jak: folie piezoelektryczne oraz stopy z pamięcią kształtu [14]. Zaliczamy do nich konstrukcje takie jak: płyty, pręty, powłoki zawierające oprócz części nośnej, rozłożone na powierzchni lub wewnątrz czujniki i elementy układu regulacji, elementy wykonawcze, a także układ zasilania.

Prowadzone są badania nad zastosowaniem folii do sterowania właściwościami łopat wirnika w śmigłowcach. Celem ich jest eliminacja i stabilizacja drgań, obniżenie hałasu pracy wirnika oraz poprawa osiągnięć.

SMA's (smart memory alloys), czyli stopy z pamięcią kształtu, wykorzystywane są do tłumienia drgań poprzez zmianę sił membranowych umożliwiającą modyfikację częstotliwości własnych elementów.

Do aktywnego tłumienia drgań stosuje się cieczy magnetoreologiczne i elektoreologiczne [6]. Odkrycie i rozwój cieczy magnetoreologicznych zawdzięcza się J. Robinowi (1948, 1951) z US National Bureau of Standards na początku lat 40. Praktyczne zastosowanie cieczy MR rozwinęło się w ostatnich latach. Opracowano technologię ich wytwarzania. Intensywny rozwój w zakresie MR nastąpił po roku 1968, gdy NASA sprzedała pierwszą licencję na

cywilne wykorzystanie opracowanych przez siebie cieczy ferromagnetycznych.

Za odkrywcę cieczy elektoreologicznych uważa się W. Winslowa w 1939 r. Ciecze elektoreologiczne stosowane są do redukcji drgań w zawieszeniach i sprzęgłach. Światowym liderem w zakresie technologii reologicznych i urządzeń jest od ponad 80 lat firma Lord Corporation, która ma na swym koncie szereg patentów.

Ciecze MR znajdują także zastosowanie w hydraulice i pneumatyce [10]. Istnieją trzy typowe modele pracy urządzeń z cieczami MR. Jeden z nich – model przepływowy pozwala budować zawory hydrauliczne pozbawione części ruchomych, co upraszcza konstrukcje zaworów, tłumików hydraulicznych i ich sterowanie.

Nowym materiałem wykorzystywanym w aktywnej redukcji drgań jest płyn o nazwie nasion, stosowany do rozpraszania energii mechanicznej.

Magnetorheological fluids (MR) – cieczy magnetoreologiczne są koloidalną zawiesiną cieczy nośnej magnetycznie spolaryzowanych cząstek o średnicy od 0,5 do 0,8 μm . Ich procentowa zawartość w cieczy wynosi od 20 do 80%. Jako cieczy nośne stosuje się np. perfluoropolyeter, phyphenylegher albo multialkiewany cyklopentan. Właściwości magnetyczne cieczy są zależne od liczby i wielkości występujących cząstek.

Główną ich cechą są duże zmiany lepkości przy przyłożeniu stosunkowo niewielkiego pola magnetycznego. Przy braku pola magnetycznego nie wykazują namagnesowania, a pod wpływem działania pola magnetycznego cząstki układają się wzdłuż linii sił pola magnetycznego, tworząc charakterystyczne łańcuchy. Wykorzystanie cieczy magnetoreologicznych pozwala na zbudowanie szybkiego i bezgłośnego przetwornika zamieniającego sygnały elektryczne na mechaniczne.

Ciecze elektoreologiczne są zawiesiną składającą się z cieczy nośnej oraz zawieszonych w niej polaryzowalnych miniatury cząstek wykonanych z polimerów lub związków poliuretanowych o średnicy 1÷7 μm . W celu zabezpieczenia cząstek przed ich zlepianiem się, powlekane

są one warstwą ochronną o grubości od 2 do 25 μm . Jako ciecz nośną stosuje się olej silikonowy, wodę, chlorowane parafiny, oleje węglowodorowe. W zależności od rodzaju cieczy może w niej występować do 60% polaryzowalnych cząstek. Podczas działania pola elektrostatycznego ciecz zmienia swoją lepkość od stanu (fazy) cieczy lepkiej do masy (fazy) plastycznej, która ma prawie charakter ciała stałego. Przejście z jednej fazy w drugą odbywa się w sposób ciągły i trwa kilka milisekund. Gdy ciecz nie znajduje się w polu elektrostatycznym, cząstki cieczy są rozproszone, a ładunki elektrostatyczne rozłożone przypadkowo. Przy działaniu pola elektrostatycznego następuje polaryzacja cząstek i tworzą się dipole elektryczne, które są zgodne z kierunkiem działania linii sił pola elektrostatycznego. Następnie tworzą się łańcuchy przebiegające wzdłuż linii sił pola elektrostatycznego.

Urządzenia z cieczą magnetoreologiczną są sterowane napięciowo lub prądowo i wymagają stosowania układów sterujących, mogących dostarczyć sygnał o napięciu do 24 V i prądzie ok. 2 A. Są znacznie „silniejsze”, łatwiejsze w użyciu i stabilniejsze. Mogą uzyskiwać maksymalne naprężenia styczne od 20 do 50 razy większych niż ciecz elektoreologiczne (przy natężeniu pola magnetycznego wynoszącym 250 kA/m sięga 80 kPa). Są także mniej wrażliwe na zanieczyszczenia. Typowa wartość indukcji nasycenia cieczy magnetoreologicznych sięga około 1,0 T. Wartość ta pozostaje praktycznie niezmienna w zakresie temperatur od -50 do 200°C. Pozwalają na uzyskanie dużych zmian lepkości pod wpływem pola magnetycznego, co przy jednoczesnej łatwości sterowania nimi, pozwala na wykonywanie urządzeń mogących mieć częściej zastosowanie praktyczne niż urządzenia z cieczami elektoreologicznymi. Właściwości cieczy reologicznych powodują, iż mogą mieć duże zastosowanie przy eliminacji drgań. W czasie milisekund, pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego zmieniają swoją lepkość, dzięki czemu można je zastosować w tłumikach hydraulicznych. Lepszym rozwiązaniem jest stosowanie cieczy magnetoreologicznej, gdyż wymaga ona stosunkowo niewielkiego pola magnetycznego do zmiany lepkości. Ciecze elektoreologiczne wymagają za to stosowania pól elektrostatycznych o dużym natężeniu (do 5 kV/mm) przy przepływie bardzo małego prądu. Wadą ich jest fakt, iż wymagają utworzenia zamkniętego obwodu magnetycznego, a co za tym idzie zwiększeniu przez to ich wymiarów i wagi.

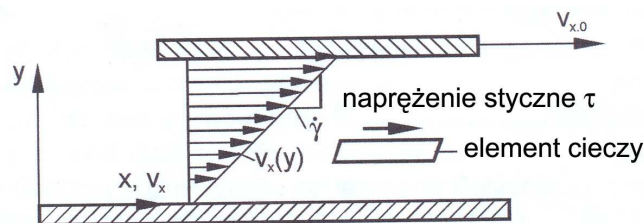
Tłumiki z cieczami magnetoreologicznymi mogą pracować w trzech trybach: ściskania, ścinania oraz przepływowym. Działanie pierwszego opiera się na efekcie ściskania warstewki cieczy. Znalazł on szczególnie zastosowanie w budowie elastycznych poduszek tłumiących o zmiennej podatności. Drugi model wykorzystuje opór występujący przy wzajemnym przemieszczeniu elementów oddzielonych warstwą cieczy magnetoreologicznej. Stosuje się je np. w sprzęgłach, hamulcach oraz tłumikach o niewielkich siłach oporu. Najlepszym rozwiązaniem w przypadku wibroizolacji procesów uderowych jest model przepływowy, zapewniający największe tłumienie. Jego działanie polega na przepływie cieczy i powstałym oporze pomiędzy dwiema komorami tłumika. Istnieją dwie koncepcje budowy tłumików: z jednostronnym i dwustronnym tłoczyskiem.

3. Charakterystyki materiałów reologicznych

Oprócz konstrukcyjnych możliwości dławienia oporu, decydujące dla kształtowania siły tłumienia są reologiczne własności fluidów.

Chociaż nie można zwykle rozstrzygnąć, z jakim stanem przepływu (laminarnym, czy turbulentnym) w dławieniu oporu mamy do czynienia, w poniższym opracowaniu przyjęto przepływy laminarne, aby uprościć zależności.

Stosowane oleje mineralne w obcych amortyzatorach zalicza się do fluidów niutonowskich. Ciecze te odznaczają się tym, że odpowiadają niutonowskiemu prawu występowaniu naprężenia stycznego. To zastosowanie opisuje stan naprężenia stycznego we fluidzie, jeśli on znajduje się między dwiema równoległymi płytkami, poruszającymi się względem siebie ze stałą prędkością v (rys. 1).



Rys. 1. Przepływ cieczy niutonowskiej między dwiema płytkami równoległymi

Fig. 1. Newton's fluid flux between the two parallel plates

Przebieg naprężenia stycznego dla współrzędnej pionowej ruchu płytek powiązany jest poprzez dynamiczną lepkość liniowo z gradientami prędkości. Gradient prędkości określany jest często także jako prędkość ścinania:

$$\tau(y) = \eta \frac{dv_x}{dy}$$

Jeśli płynie fluid niutonowski przez rurę o przekroju kołowym, tworzy się wewnątrz specyficzny profil prędkości i naprężenia stycznego. Przepływ objętości opisany jest przez prawo Hagen-Poiseuille'a:

$$Q = \frac{\pi r_o^4 (p_1 - p_2)}{8\eta l}$$

Mówi ono, że przepływ objętości Q jest proporcjonalny do różnicy ciśnienia $p_1 - p_2$ między początkiem a końcem rury i do 4 potęgi promienia rury i odwrotnie proporcjonalny do długości rury l i dynamicznej lepkości η przepływającej cieczy. Profil prędkości nad współrzędną cylindra wynika z prawa Stoksa, które opisane jest funkcją kwadratową (profil prędkości mający kształt paraboli):

$$v_x(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} \cdot (r_o^2 - r^2)$$

Cieczą bingamiczną [12] nazywany jest fluid Bingham, który różni się od fluidu Newtona tym, że płynięcie rozpoczyna się dopiero przy przekroczeniu granicy płynięcia. Poniżej tej granicy ciecz zachowuje się jak ciało elastyczne, czyli tak samo jak ciecz niutonowska. Prędkość przepływu i naprężenie styczne opisuje prawo Bingham.

$$\tau = \tau_F + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau > \tau_F$$

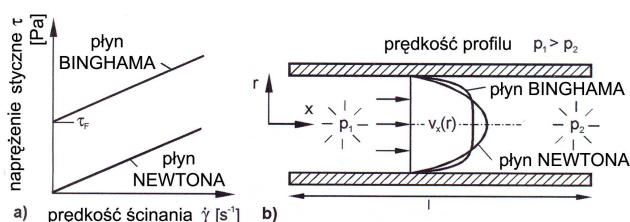
Jeśli naprężenie styczne przekracza granicę przepływu fluid charakteryzują zachowania elastyczne:

$$\tau = G\gamma, \quad \tau < \tau_F$$

przy czym G oznacza moduł styczny cieczy Bingham.

Jeśli we fluidzie Newtona naprężenie styczne między ruchomymi płytkami wzrasta liniowo, to w cieczy Bingham tworzą się płynne i mocne warstwy i nie ma mowy

o parabolicznym profilu przepływu. Na rys. 2 przedstawiono krzywe płynięcia fluidu Newtona i Binghama, jak też profile prędkości przy przepływie uwarstwionym (laminarnym):



Rys. 2. Charakterystyki cieczy niutonowskich i cieczy Binghama
Fig. 2. Characteristics of the Newton fluids and Bingham fluid

Na obrzeżach przekroju rury, w których panujące naprężenia styczne we fluidzie jest większe niż granica przepływu, fluid Binghama zachowuje się tak jak fluid Newtona. W środku rury natomiast naprężenie styczne jest poniżej tak, że tworzą się czopy. Oprócz ziarnistych zawiesin, takich jak nieczystości po zmywaniu, keczup, pasta do zębów do fluidów Binghama zalicza się dające się sterować ciecze elektro- i magnetoreologiczne.

4. Charakterystyka fluidów elektoreologicznych i fluidów magnetoreologicznych

Fluidami dającymi się sterować nazywane są materiały, które reagują zmianami parametrów strukturalnych na pole elektryczne lub magnetyczne, stosownie do swoich reologicznych właściwości. Efekt ten pojawia się, gdy fluidy poddane są naprężeniom tnącym. Wynika z tego, że siła reakcji fluidu wzrasta proporcjonalnie do natężenia pola. Właściwości fluidu opisuje się za pomocą modelu Binghama, według którego granica płynięcia zależy od natężenia pola magnetycznego lub pola elektrycznego.

$$\tau = \tau_F(H, E) + \eta\dot{\gamma}$$

Fluidy dające się sterować znane są jako fluidy elektoreologiczne (ER) i magnetoreologiczne (MR). Zainteresowanie tymi cieczami powstaje głównie ze względu na to, by tworzyć proste, szybko reagujące i tanie człony połączeń między elektronicznymi regulatorami i systemami mechanicznymi.

Fluidy ER od czasu ich odkrycia około 1940 roku badano w licznych eksperymentach, fluidy MR są dużo mniej znane. Składają się tak jak fluidy ER z niekoloidalnej zawiesiny polaryzujących cząsteczek, których wielkość wynosi kilka mikrometrów.

Fluidy MR różnią się od tzw. koloidalnych ferrofluidów tym, że ich wielkość cząsteczek jest mniejsza o czynnik 1000 i dlatego pod wpływem pola magnetycznego wykazują tylko bardzo niewielki wzrost oporu przepływu.

Fluidy MR składają się głównie z trzech komponentów:

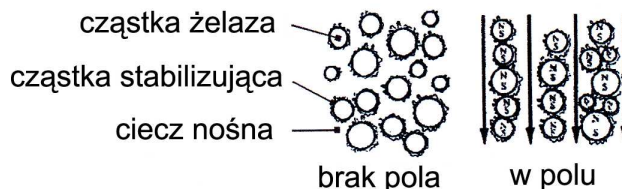
- drobnych ferromagnetycznych cząstek,
- fluidu nośnego,
- stabilizatora.

Cząstki są uformowane sferycznie i posiadają przekrój między 1 a 10 μm. Wytworzone są z żelaza karbonylowego, które odznacza się wysoką przenikalnością.

Koncentracja pojemnościowa podzielonych cząstek może wynosić aż do 50% całkowitej pojemności fluidu. Pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego cząstki polaryzują się i tworzą łańcuchy równoległe do magnetycznego

kierunku przepływu. Łańcuchy cząstek powodują, że mierzalna lepkość lub opór płynięcia fluidu wzrasta. Jeśli odłączy się pole magnetyczne, cząstki rozdzielają się we fluidzie nośnym, a ich lepkość znowu zmniejsza się. Na rys. 3 pokazano proces tworzenia łańcuchów cząstek.

Drugi składnik fluidu MR to ciecz nośna, w której cząstki są zatopione. W praktyce stosuje się niskowiskotyczne fluidy, takie jak oleje silikonowe lub oleje syntetyczne.



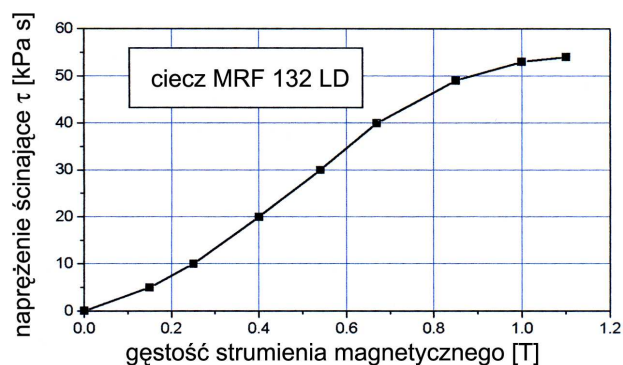
Rys. 3. Rozkład cząstek żelaza w cieczy MR
Fig. 3. Distribution of iron particles in MR fluid

Aby utrzymać we fluidzie nośnym cząstki delikatnie rozdzielone, konieczny jest stabilizator. Musi on zahamować zarówno skupianie się cząstek między sobą, jak również nie może dopuścić, by cząstki osadzały się w cieczy nośnej. Stosuje się tutaj różne żele silikonowe lub kwas oleinowy, który tworzy strukturę wokół cząstki ferrytowej.

Stosowane fluidy ER wykazują zwykle oporność na naprężenia tnące przy dynamicznych obciążeniach w granicach od 3 do 5 kPa w polu elektrycznym ok. 4 kV/mm. Dynamiczna lepkość wynosi między 0,2 a 0,3 Pa/s przy 25°C, jeśli nie ma pola elektrycznego.

Oporność fluidów ER jest w zasadzie ograniczona ze względu na pole elektryczne. Maksymalna temperatura robocza zależy od będącego jej podstawą mechanizmu polaryzacyjnego. Zasilane prądem stałym fluidy mogą być stosowane w temperaturze od 10 do 90°C. Takie fluidy posiadają w temperaturze pokojowej opór elektryczny, który wymaga gęstości prądu ok. 5mA/cm2 przy względnie dużym polu elektrycznym 3kV/mm.

Stosowane fluidy MR wykazują natomiast oporność na naprężenie tnące przy dynamicznym obciążeniu w granicach od 50 do 100 kPa w polu magnetycznym ok. 200kA/m i lepkość pola zerowego między 0,2 a 0,3 Pa/s przy 25°C. Tak samo jak fluidy ER wykazują efekt nasycenia. Na rys. 4 przedstawiono zależność naprężenia stycznego we fluidzie przy wzrastającej magnetycznej indukcji B.



Rys. 4. Naprężenie ścinające w funkcji gęstości strumienia magnetycznego [6]

Fig. 4. Tangential stress in the function of magnetic flux density [6]

Powyżej 1T gęstości strumienia naprężenia styczne nie wzrastają, ponieważ całkowicie rozprzestrzeniły się magnetyczne dipole cząstek. Osiągnięto polaryzację nasycenia fluidu, która ogranicza maksymalną oporność fluidu MR.

Zakres temperatur fluidów MR nie zależy od mechanizmu polaryzacji łańcuchów cząstek, jak w przypadku fluidów ER, lecz o wiele bardziej od właściwości cieczy nośnej. Dlatego można je stosować w temperaturze od -40 do 150°C.

Rozproszone przepływy i strata energii jest tak mała, że nie musi być uwzględniana przy budowie elementu.

Poza względnie niskim przenoszonym naprężeniem stycznym fluidy ER odznaczają się innymi wadami, które ograniczają ich zastosowanie:

- czułość na temperaturę; wymagane natężenie pola, uzyskanie wymaganego naprężenia stycznego jest dla fluidów ER mocno zależne od temperatury fluidu,
- czułość na zabrudzenia, ponieważ efekt ER opiera się na przesunięciach ładunku.

By wprowadzić pole magnetyczne wystarczy elektromagnes, który już przy niskim napięciu zasilającym (napięcie polekowe) i względnie małym natężeniu prądu uzyskuje indukcję magnetyczną.

Wysokie elektryczne natężenia pola, które są konieczne dla efektu ER, wymagają wysokich napięć. Te dodatkowe środki powodują zdecydowanie wyższe koszty.

5. Algorytmy regulacji

Uzyskanie regulowanego tłumienia zależy decydująco od wybranej struktury regulatora [2].

Rozróżnia się dwa rodzaje struktur regulatorów dla systemów semi-aktywnych:

- tłumienie modulowane częstotliwością (wybór zakresu częstotliwości); wielkość tłumienia jest zależna od stosunku istniejących częstotliwości w sygnale pomiarowym,
- regulowanie według amplitudy drgań (decyzje w zakresie czasowym); tłumik regulowany jest zależnie od bezpośrednio obserwowanych i mierzonych wielkości amplitudowych systemu drgań w czasie rzeczywistym.

Według analizy amplitudowej funkcji przekazu biernego układu drgającego optymalnym jest duży stopień tłumienia przy drganiach w obszarze rezonansowym i niewielkie tłumienie w obszarze izolacyjnym. Stąd, aby przeprowadzić sterowanie tłumika w zależności od częstotliwości drgań musi być sprawdzany doprowadzony do regulatora sygnał pomiarowy odpowiednio do zakresu częstotliwości. Są tu następujące możliwości techniczne:

- transformacja sygnału czasowego w zakresie częstotliwości na podstawie analizy Fourier'a,
- zastosowanie filtrów.

Procedura poprzez analizę Fourier'a FFT w systemie kontrolnym nie nadaje się jednak do bezpośredniego sterowania tłumika ze względu na małe wielkości zaznaczanej częstotliwości rezonansowej. By transformować sygnał cyfrowo w zakres częstotliwości, musi być on najpierw wczytany w pamięć kalkulatora. Z pomocą systemu FFT uzyskuje się potrzebne wyniki, jeśli długość odczytu wynosi co najmniej pół okresu drgania. Jedynie dla szybszych procesów np. detekcji częstotliwości osiowej samochodu osobowego proces ten może być wykorzystany.

6. Idea układu izolacji drgań z tłumikiem z cieczą magnetoreologiczną (MR)

Ciecze magnetoreologiczne należą do grupy materiałów określanej jako „smart”. Cechą charakterystyczną tych sub-

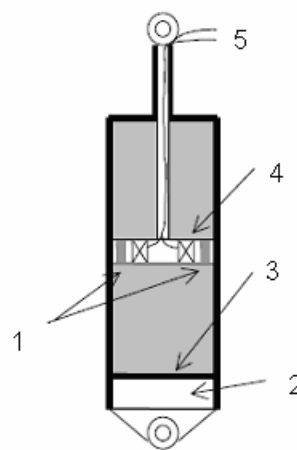
stancji jest zdolność do zmiany lepkości oraz granicy plastyczności pod wpływem pola magnetycznego.

Budowa tych cieczy opiera się na tworzących koloidalną zawiesinę cząstkach ferromagnetycznych umieszczonych w cieczy nośnej. Możliwość sterowania ich lepkością pozwala na budowę aplikacji o bardzo szerokiej zastosowaniach. Do podstawowych należą: sterowane tłumiki drgań, sprzęgła, hamulce, zawory w układach hydraulicznych.

Znane są odmiany tych cieczy, różniące się przede wszystkim rodzajem cieczy nośnej. Ze względu na swoje unikalne właściwości zaliczane są do grupy cieczy nie-newtonowskich, w których zależność naprężenia stycznego od szybkości ścinania jest nieliniowa. Możliwość zastosowania cieczy MR do tłumienia drgań wynika stąd, iż w czasie milisekund, pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego zmieniają swoją lepkość. Rozróżnić można następujące rodzaje pracy w tłumikach z cieczą MR:

- ściskanie (np. elastyczne poduszki tłumiące o zmiennej podatności),
- ścinanie (sprzęgła, hamulce),
- przepływ (tłumiki).

Przykładowo magnetoreologiczny tłumik drgań firmy Lord Corporation, za pomocą którego uzyskuje się wysoki stopień redukcji drgań [16], podobny jest do aktywnych eliminatorów drgań i służy do generowania dużych sił tłumienia (do 200 kN), Charakteryzuje się małym zapotrzebowaniem na energię (rzędu 20 W); możliwe jest zasilanie układu regulacji z baterii. Podczas ruchu tłoka (rys. 5) 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 ciężkiego poruszającego tłoka. Najczęściej obecnie spotykanymi konstrukcjami tłumików drgań są tłumiki tłokowe. Pozwalają one uzyskiwać stosunkowo wysokie siły tłumienia, jednak wykorzystują znaczne ilości cieczy MR i stąd są bardzo kosztowne.



Rys. 5. Idea budowy tłumika z cieczą MR [8]: 1 - kanały przepływu cieczy magnetoreologicznej, 2 - zbiornik powietrza, 3 - elastyczna przepona, 4 - cewka elektromagnesu, 5 - przewody zasilające elektromagnes

Fig. 5. Idea of MR damper construction [8]: 1 - channels of magnetorheological fluid flux, 2 - air reservoir, 3 - resilient diaphragm, 4 - electromagnet coil, 5 - wires to feed the electromagnet

Konstrukcje oparte na kompozytach magnetoreologicznych pozwalają osiągać mniejsze siły tłumienia oraz mają większe gabaryty, jednak do ich prawidłowego działania konieczne są znikome ilości cieczy.

Jako przykład posłużyć może tłokowy tłumik firmy Lord Corporation (rys. 6) typ RD-1005-3 ($F_{max} = 2000N$; ok 300 ml cieczy), podczas gdy kompozytowy tłumik RD-1097-01 ($F_{max} = 100N$; około 5 ml cieczy).

Stosowane są trzy podstawowe modele urządzeń z cieczami magnetoreologicznymi:

Model sprężelowy. 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 zastosowania między innymi w niektórych typach sprzęgieł, tłumików drgań czy hamulców.

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

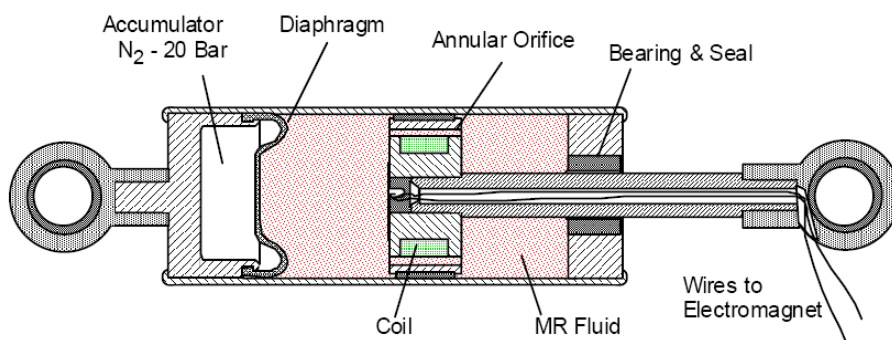
Model ściskający. Wzrost lepkości cieczy MR przeciwdziała ruchom pionowym elementów rdzenia. Według tego modelu konstruuje się niektóre tłumiki drgań.

Aktywna redukcja drgań znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, takich jak: medycyna, budownictwo, motoryzacja, hydraulika i pneumatyka oraz w przemyśle zbroje-

niowym. Przykładowo, jednym ze sposobów stabilizacji drgań pralek podczas wirowania jest zastosowanie układu aktywnego tłumienia. Regulacja tłumika następuje, gdy pralka przechodzi w rezonans. Jest to rozwiązanie bardzo „elastyczne”, które w zależności od prędkości obrotowej drgań bębna, dostosowuje swoje własności tłumienia, tak by jak najbardziej zminimalizować niepożądane zjawisko.

Innym przykładem użycia tłumików MR jest konstrukcja Museum of Emerging Science and Engineering w Tokio w Japonii. Zadaniem ich jest ochrona budynku podczas trzęsienia ziemi. W tym celu tłumiki MR umieszczono na każdej kondygnacji budynku.

Z uwagi na szczególne cechy konstrukcyjne oraz szeroki zakres regulacji zastosowanie tłumików MR jest bardzo uniwersalne. Intensywny rozwój konstrukcji oraz urządzeń wykorzystujących w działaniu cieczy magnetoreologiczne w przemyśle doprowadził do sytuacji, w której obserwuje się tendencję do adoptowania już istniejących rozwiązań celem implementacji w nowych dziedzinach techniki. W Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych opracowano koncepcję nowego układu wibroizolacji siedziska fotela operatora ciągnika rolniczego z zastosowaniem tłumika z cieczą MR, cechującą się lepszymi parametrami. Wykorzystanie tłumika z cieczą MR w układzie siedziska fotela operatora ciągnika rolniczego jest przykładem modyfikacji konstrukcji poprzez dodanie urządzenia działającego w układzie sprzężenia zwrotnego, umożliwiającą płynną modyfikację parametrów pracy zespołu wibroizolacji.



Rys. 6. Magnetoreologiczny tłumik drgań firmy Lord Corporation [6]

Fig. 6. Lord Corporation's magnetorheological vibration damper

7. Literatura

- [1] Bishop R.E.D., Johnson D.C.: The mechanics of Vibration, Cambridge University Press, 1960.
- [2] Engel Zb., Kowal J.: Sterowanie procesami wibroakustycznymi, Wydawnictwa AGH Kraków 1995.
- [3] Göhlich H., Hoppe U.: Fahrdynamik – Fahrsicherheit – Fahrerplatz, Jahrbuch Agrartechnik, VDMA Landtechnik, VDI-MEG, KTBL, 2003.
- [4] Göhlich H., Hoppe U., Meyer J.: Fahrdynamik – Fahrsicherheit – Fahrerplatz, Jahrbuch Agrartechnik, VDMA Landtechnik, VDI-MEG, KTBL, 2004.
- [5] Hauck M.: Geregelte Dämpfung für Traktor-Fahrersitze, Technische Universität Berlin, D 83, Berlin 2001.
- [6] Jolly M. R., Bender J. W., Carlson J. D.: Properties and Applications of Commercial Magneto-rheological Fluids, Thomas Lord Research Center, Materiały firmy Lord Corporation.
- [7] Kaźmierczak H.: Uproszczona synteza złożonych układów izolacji drgań metodą podatności dynamicznej. Rozprawa doktorska, Wydział Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, Poznań 1977.
- [8] Kaźmierczak H.: Seat Driver Vibration Isolation System, XXI Symposium – Vibrations in Physical System.
- [9] Książek M.A.: Modelowanie i optymalizacja układu Człowiek – wibroizolator – maszyna, Politechnika Krakowska, Kraków 1999.
- [10] Ławniczak, A. Milecki, Ciecze elektro i magneto-reologiczne oraz ich zastosowania w technice, WPP 1999.
- [11] Osiński Zb.: Tłumienie drgań, PWN Warszawa 1997.
- [12] Poynor J.: Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers, Advanced Vehicle Dynamics Laboratory, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [13] Xubin Song, Mehdi Ahmadian: Study of Semiactive Adaptive Control Algorithms with Magneto-Rheological Seat Suspension, 2004 SAE International, 2004-01-16.
- [14] Sapiński B., Rosół M.: Real-time controllers for MR seat damper, AMAS Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03 Jadwisin, 2003.
- [15] Sapiński B.: Real-time control for a magnetorheological shock absorber in a driver seat — Sterowanie w czasie rzeczywistym amortyzatora magnetoreologicznego w fotelu kierowcy // Journal of the Theoretical and Applied Mechanics (Warszawa), 2005 vol. 43 no. 3 s. 631–653.
- [16] Sapiński B.: Magnetorheological dampers W: Real-time control of magnetorheological dampers in mechanical systems, Cracow: AGH University of Science a. Technology Press, 2008, S. 26–42.