

# MODELOWANIE I BADANIA PROCESÓW POCHŁANIANIA I ROZPRASZANIA ENERGII W TŁUMIKACH MAGNETOREOLOGICZNYCH

**Jerzy BAJKOWSKI\***

\*Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska,  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa

[jba@simr.pw.edu.pl](mailto:jba@simr.pw.edu.pl)

**Streszczenie:** W pracy zaprezentowano wybrane problemy badawcze, konstrukcyjne i eksploatacyjne tłumików i amortyzatorów, budowanych na bazie cieczy magnetoreologicznych. Omówiono najważniejsze zagadnienia związane z modelowaniem i opisem matematycznym niektórych zjawisk, jakie są charakterystyczne w rozpatrywanej konstrukcji.

## 1. WPROWADZENIE

W dużej grupie, powszechnie już dzisiaj wykorzystywanych, różnych rodzajów materiałów „inteligentnych”, a więc w grupie materiałów, których właściwości i oddziaływanie można kształtować w sposób zamierzony i sterowany, w zależności od potrzeb, pośród powszechnie stosowanych piezoelektryków, stopów z pamięcią kształtu czy czujników optycznych, bardzo ważną rolę odgrywają ciecze reologiczne: elektroteologiczne (ERF), magnetoreologiczne (MRF) i ferromagnetyczne (FMF). Wspólną cechą wymienionej grupy cieczy jest zasadnicza i całkowicie odwracalna zmiana stanu skupienia pod wpływem działania pola elektrostatycznego lub magnetycznego, w bardzo krótkim czasie.

Aktualnie szczególnie szerokim zainteresowaniem badaczy, naukowców, a także inżynierów, w tym również w Polsce, cieszą się ciecze oraz budowane na ich bazie, urządzenia magnetoreologiczne. Ze względu na swoje unikalne właściwości znajdują one również coraz częstsze zastosowania, w nowych dziedzinach techniki.

W ogólnej klasyfikacji cieczy „inteligentnych”, ciecze magnetoreologiczne należą do grupy cieczy, których właściwości mogą być zmieniane poprzez zmianę wartości pola magnetycznego, najczęściej wytwarzanego przez przepływający w cewce solenoidu, prąd.

Unikalne właściwości cieczy MR plasują je, w grupie cieczy nienewtonowskich, czyli takich, które charakteryzują się nieliniową zależnością naprężenia stycznego, w funkcji prędkości ścinania oraz określoną wartością granicy płynięcia.

Ich główne składniki to: ciecz nośna oraz znajdujące się w niej, powleczone specjalnym środkiem, ferromagnetyczne cząstki o wielkościach od około 0,2 do około 10 $\mu$ m. W cieczy nośnej, którą najczęściej jest olej silikonowy, mineralny lub woda, w zależności od rodzaju i przeznaczenia, może się ich znajdować od około -od 20% do 80% (Milecki, 2001, 2002; Sapiński, 2003).

Jedną z teorii, która pozwala wyjaśnić bardzo interesujące właściwości, jakie posiadają ciecze MR jest teoria powstawania w cieczy łańcuchów, tworzonych, z zawartych w cieczy, cząstek ferromagnetycznych. W tej teorii przyjmuje się, że przy braku pola magnetycznego, ustawienie cząstek ferromagnetycznych w cieczy nośnej jest zupełnie bezładne i przypadkowe. W chwili zadziałania pola magnetycznego, bezładnie ułożone cząstki, przyjmują kierunek linii sił pola magnetycznego tworząc z pojedynczych cząstek ferromagnetycznych, ukierunkowane łańcuchy.

Wspomniane wyżej unikalne pozytywne właściwości cieczy magnetoreologicznych to między innymi:

- liczona w milisekundach, duża prędkość reakcji na działające impulsy prądowe;
- niewielkie zapotrzebowanie mocy do sterowania;
- osiąganie wartości maksymalnego naprężenia stycznego, w czasie nie większym niż 10 milisekund;
- w porównaniu z innymi rodzajami cieczy reologicznych, np. w porównaniu z cieczami ferromagnetycznymi, ich wytwarzanie jest znacząco łatwiejsze i wielokrotnie tańsze.

W warunkach braku oddziaływania na ciecz pola magnetycznego, w temperaturze pokojowej, ciecze magnetoreologiczne charakteryzują się lepkością 0,2-0,3Pa s, ich gęstość wynosi 3-4g/cm<sup>3</sup>. Podawana w katalogach cieczy temperatura pracy obejmuje przedział od -50° do 150°C, a granica plastyczności od 50 do 100kPa. Największe wartości naprężeń stycznych otrzypywane, w przypadku cieczy magnetoreologicznych, przy wartościach natężenia pola magnetycznego od 100 do 250kA/m, wynosi od 50 do 150kPa; czas reakcji cieczy nie przekracza 10-3s. Ograniczeniem wartości prądu zasilającego elektromagnes urządzenia

z cieczą MR jest nasycenie magnetyczne. Dlatego też wartości prądu sterującego nie przekraczają zazwyczaj wartości 2A; przy napięciu zasilania wynoszącym od 2 do 25V, określa to potrzebną moc zasilania urządzenia w przedziale od 4 do 50W. Istotny z punktu widzenia projektanta urządzeń z cieczami MR wskaźnik określający stosunek lepko-

ści dynamicznej do kwadratu granicznego naprężenia stycznego, waha się w przedziale  $10^{-10}$  do  $10^{-11}$  s/Pa.

Aktualnie na rynku światowym dostępnych jest około trzydziestu rodzajów cieczy magnetoreologicznych różnych producentów. Najbardziej znanymi na świecie są ciecze MR, produkowane seryjnie od ponad 25 lat, przez amerykańską firmę LORD; firma ta jest również pionierem w produkcji i dystrybucji uniwersalnych amortyzatorów, których podstawą działania jest ten rodzaj cieczy. Ostatnio korporacja Lord wprowadziła do sprzedaży dwie nowe ciecze węglowodorowe. Będącą standardem przez ostatnie lata, produkowaną na bazie oleju MRF-132AD zastąpiła ciecz MRF 132LD, a następczynią, bazowanej na wodzie, dotychczasowej cieczy MRF-240BS jest ciecz o oznaczeniu MRF-241ES. Obie te ciecze cechuje duża stabilność i wytrzymałość przy zastosowaniach, w wymagających konstrukcjach tłumików magnetoreologicznych. Druga z wymienionych cieczy jest wykorzystywana głównie w urządzeniach, w których konieczne jest zastosowanie uszczelnień z gumy naturalnej. Przeznaczenie, obu wymienionych wyżej i uznanych za nowe, cieczy jest identyczne jak dotychczas stosowanych, a więc głównie w uniwersalnych tłumikach i amortyzatorach, hamulcach, sprzęgłach, połączeniach itd.

Lepek cieczy o oznaczeniu Rheonetic™ Fluid MRF-132AD, której cieczą nośną jest węglowodorowy olej mineralny, wynosi  $0,09 \pm 0,02$  Pa s, a temperatura pracy określona jest przedziałem o wartościach od  $-40^{\circ}$  do  $+130^{\circ}\text{C}$ .

Mimo bardzo intensywnych prac, które dotyczą cieczy reologicznych oraz dobrego opanowania technologii i konstrukcji urządzeń wykorzystujących te ciecze jako podstawę prawidłowego działania, w dalszym ciągu, w zakresie gruntownego poznania właściwości urządzeń MR oraz naukowego opisu, wymagają przede wszystkim, zagadnienia związane z opisem procesów przepływu cieczy przez szczeliny tłoka, zagadnienia formułujące warunki brzegowe cieczy MR występujące na końcach szczelin, w przypadkach zmiennych wartości natężenia prądu, określenie wpływu temperatury cieczy na własności pochłaniania i rozpraszania energii, problemy magnetyzmu szczątkowego pojawiające się w głowicy i poza nią, itd.

## 2. CEL, ZAKRES, METODYKA BADAWCZA ORAZ PRZEDMIOT BADAŃ

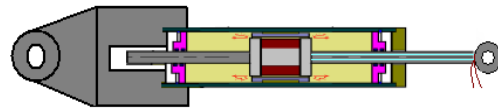
Celem niniejszej pracy jest prezentacja specyficznych właściwości, rezultatów badań oraz problemów konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych, które dotyczą tłumików i amortyzatorów magnetoreologicznych pozwalających, w znaczącym stopniu rozszerzyć, dotychczasowe możliwości oddziaływania tradycyjnych urządzeń tłumiących, w zakresie pochłaniania i rozpraszania energii, w procesach drganiowych i uderzeniowych.

Ze względu na konieczność ograniczenia pracy, niniejsza prezentacja dotyczy rezultatów badań tylko jednej struktury, którą jest liniowy tłumik MR. Zostaną jednak omówione również wybrane, zdaniem autora bardzo ważne, problemy, które pojawiają się w fazie opracowania projektowego i eksploatacji tego typu urządzeń; zapropono-

nowany model reologiczny urządzenia oraz jego opis matematyczny uzupełniają przyjęty zakres prezentacji.

W proponowanej metodyce badawczej, szeroko sformułowany zasadniczy cel pracy, zostanie zrealizowany poprzez wykonanie zadań cząstkowych, które obejmować będą wiele wybranych zagadnień, związanych z konstrukcją, technologią oraz eksploatacją badanego urządzenia. Gdy będzie to uzasadnione technicznie, zostaną one uogólnione na całą grupę będących przedmiotem niniejszej pracy, urządzeń.

Prezentowane rezultaty badań oraz zagadnienia dotyczące projektowania oraz eksploatacji urządzeń MR dotyczą struktury liniowego tłumika magnetoreologicznego, który oznaczony został jako A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM. Został on zaprojektowany i wykonany na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej z przeznaczeniem do zastosowania w obiekcie specjalnym. Jego konstrukcję zilustrowano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat struktury badanego tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM

Jest to jedno z kolejnych opracowań konstrukcyjnych tego typu urządzeń jakie powstały na tym Wydziale Politechniki Warszawskiej.

## 3. WYBRANE PROBLEMY BADAWCZE I EKSPLOATACYJNE TŁUMIKÓW MR

### 3.1. Uwagi ogólne dotyczące zastosowania cieczy MR w urządzeniach tłumiących

Dotychczasowe badania urządzeń wykorzystujących jako podstawę działania cieczy MR, w tym zwłaszcza liniowych tłumików magnetoreologicznych udowadniają, że ich pozorną prostotą konstrukcyjną musi być okupiona koniecznością stosowania najbardziej zaawansowanych rozwiązań technicznych i technologicznych, między innymi, w zakresie kompozycji i własności cieczy, a także w zakresie budowy elementów mechanicznych urządzeń oraz systemów sterujących ich własnościami. W dalszym ciągu, mimo usilnych starań producentów cieczy MR, zasadniczym problemem, pozostaje zagadnienie sedymentacji cząsteczek, starzenie się cieczy (Bajkowski J., 2007) oraz problemy związane ze sterowaniem. W dalszym ciągu również, obowiązujące ceny cieczy MR, powszechnie uznaje się za wysokie.

Obok właściwości cieczy MR, których kompozycją, w niniejszej pracy nie będziemy się zajmować, a które właściwie odgrywają najważniejszą rolę, w uzyskaniu optymalnych rezultatów pracy urządzeń MR, niemniej ważne w ich ocenie są parametry geometryczne tłumików, zastosowane rozwiązania techniczne dotyczące transportu

cieczy i parametry głowicy oraz system sterowania własnościami cieczy.

Odnosząc te ogólne stwierdzenia do konstrukcji tłumika, który zilustrowany został na rysunku 1, skoncentrujemy się na badaniu wpływu, na parametry eksploatacyjne urządzenia, takich wielkości geometrycznych i sterujących, jak: wielkość i kształt szczeliny do przepływu cieczy, zastosowany system uszczelnień tłoczyska, odpowiednie przygotowanie i obróbka tłoczyska, napelnianie urządzenia cieczą MR, rodzaj materiału użytego na rdzeń solenoidu oraz parametry cewki, zadawane wartości natężenia prądu sterującego i wiążące się z tym nasycenia magnetycznego, magnetyzm szczątkowy, prędkość oraz temperatura pracy urządzenia, a także rodzaj wymuszenia ruchu.

### 3.2. Rezultaty badań wpływu wielkości szczeliny oraz natężenia pola magnetycznego na skuteczność tłumienia urządzenia MR przy kinematycznym charakterze wymuszenia ruchu tłoczyska

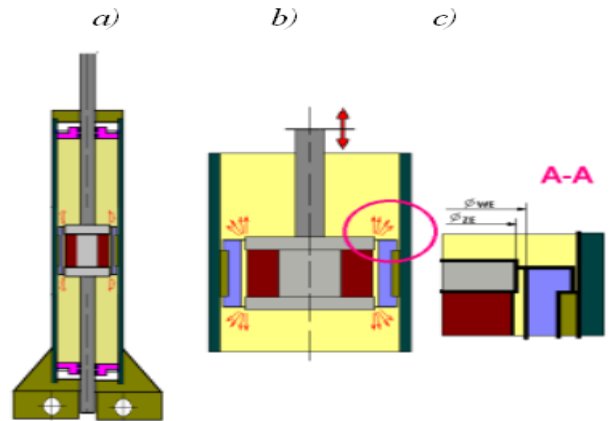
Ogólne uwagi i wnioski dotyczące wpływu wymiarów geometrycznych tłumika oraz kształtu i wielkości szczeliny w głowicy tłumika MR, na wartości pochłanianej i rozpraszanej energii, zostały zamieszczone w pracy (Bajkowski J., 2005b, 2007). Poza wymiarami geometrycznymi najważniejszymi wielkościami, które mają istotny wpływ na wartości pochłanianej i rozpraszanej przez tłumik energii są: wielkość szczeliny przez którą przepływa ciecz MR oraz zależna od wartości natężenia prądu płynącego przez solenoid w głowicy, wartość natężenia wytwarzanego pola magnetycznego (Bajkowski M. i inni, 2002, 2005).

Podstawową trudnością, w szczegółowym opisie wpływu wielkości i kształtu szczeliny na skuteczność działania tłumika jest niepełna znajomość zjawisk zachodzących w szczelinie. W dostępnej literaturze omawiane zagadnienie pojawia się, m.in. w pracach Bajkowski i Sofonea (2004) oraz Bajkowski J. i inni (2005). W ciągu ostatnich dwóch lat, zagadnienia te były przedmiotem intensywnych prac badawczych, które prowadzone były, m.in. na Wydziale SiMR PW; częściowe dokonania prezentowane są w referatach odbywającego się Sympozjonu. W pracach tych przedstawiona została próba matematycznego opisu stanu, znajdującej się w szczelinie głowicy cieczy MR, w warunkach oddziaływania na nie pola magnetycznego (Skalski i inni, 2009b) oraz próba optymalizacji wielkości szczeliny, która ma gwarantować największe możliwości pochłaniania i rozpraszania energii przez tłumik (Dudziak, w opracowaniu).

Kształt szczeliny dla przepływu cieczy, w urządzeniu MR, może być zaprojektowany, w zasadzie w sposób dowolny ale taki, aby zawsze ciecz MR mogła znajdować się w obrębie działania sił pola magnetycznego. Należy przy tym pamiętać, że im bardziej ten kształt będzie skomplikowany, tym większe będą trudności wykonawcze urządzenia, a możliwości kształtowania pola magnetycznego, również bardziej ograniczone.

W skonstruowanym tłumiku badawczym (rysunek 1), dążąc do możliwie najprostszymi rozwiązań konstrukcyjnych, a także mając na myśli perspektywiczną możliwość interpretacji, wpływu wielkości szczeliny na wartości po-

chłaniania i rozpraszania energii w urządzeniu, przyjęto zasadę przepływu cieczy przez szczelinę, w kształcie walca. Została ona utworzona wokół zewnętrznej powierzchni solenoidu głowicy tłumika MR oraz wewnętrznej powierzchni zewnętrznego pierścienia prowadzącego. Schemat przepływu cieczy przez szczelinę zilustrowano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat przepływu cieczy a,b) -w głowicy badanego tłumika, b)-parametry szczeliny (Dudziak, w opracowaniu)

W badaniach wykorzystano trzy wielkości promieni wewnętrznych pierścienia zewnętrznego głowicy dzięki czemu uzyskano trzy wielkości szczelin. Ich wartości wynosiły 0,5; 0,75 oraz 1mm.

Otrzymane rezultaty badań ilustrujące zmiany wartości siły działającej na tłoczysko tłumika w funkcji czasu oraz w funkcji przemieszczenia tłoczyska i jego prędkości, otrzymane przy trzech wartościach natężenia prądu płynącego w cewce solenoidu, zamieszczone zostały na rysunku 3. Wykresy ilustrujące zmiany wartości siły działającej na tłoczysko, sporządzone w funkcji przemieszczenia i prędkości, w sposób bezpośredni określają wartości pochłanianej i rozpraszanej energii przez tłumik.

Wartości natężenia prądu płynącego w cewce solenoidu, przy których sporządzono wykresy zamieszczone na rysunku 3 wynosiły: 0; 0,5 i 1,2A. Największa z przytoczonych wartości natężenia prądu odpowiada pełnemu nasyceniu magnetycznemu urządzenia.

Zamieszczone na rysunku 3 wyniki badań tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM ilustrują w jaki sposób zmieniają się wartości siły działającej na tłoczysko w funkcji czasu (kolumna I), w funkcji przemieszczenia (kolumna II) oraz w funkcji prędkości (kolumna III) przy trzech wartościach wielkości szczeliny ( $s=0,5; 0,7$  oraz 1mm) do przepływu cieczy; ilustruje również wpływ zmiany natężenia prądu płynącego w solenoidzie ( $I=0, I=0,5$  oraz  $I=1,2A$ ), a więc wpływ natężenia pola magnetycznego, na te wielkości.

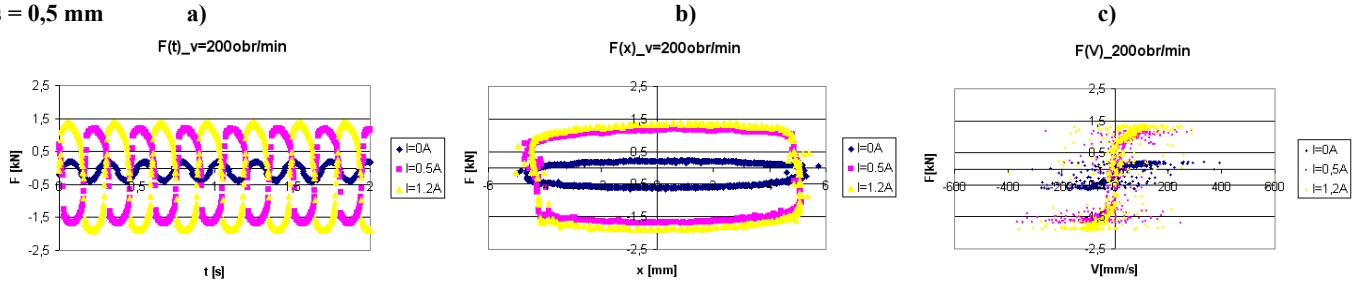
Porównanie otrzymanych przebiegów ilustrujących zmiany wartości sił w funkcji czasu, uzyskiwanych przy różnych wielkościach szczelin, ale przy tych samych wartościach natężenia prądu wskazuje, że wraz ze wzrostem wartości szczeliny, wartość siły tłumienia maleje. Najkorzystniejszą zależność tę obserwujemy na wykresach ilustrujących zmianę wartości siły w funkcji przemieszczenia

i prędkości. Ilustrują one bowiem w jaki sposób zmienia się wartość energii pochłanianej i rozpraszanej przez tłumik. Jednocześnie obserwowany jest również wpływ, zależnego od wartości płynącego w cewce solenoidu prądu, natężenia pola magnetycznego na wartości tych parametrów. Z trzech zamieszczonych na wykresach przypadków najkorzystniej-

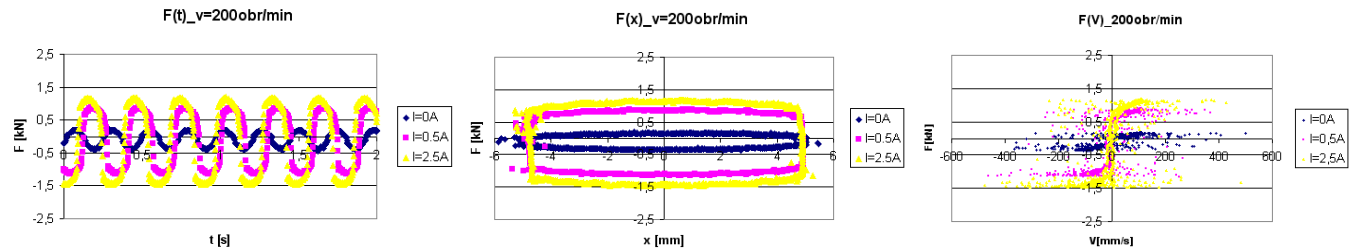
szy jest oczywiście ten przypadek tłumika, w którym szczelina do przepływu cieczy ma wartość  $s=0,5\text{mm}$  oraz gdy w jego głowicy przepływa prąd o wartości  $I=1,2\text{A}$ ; w badanym przypadku była to wartość prądu powodująca pełne nasycenie pola magnetycznego.

Prędkość obrotowa mimośrodowo  $200\text{ obr/min}$

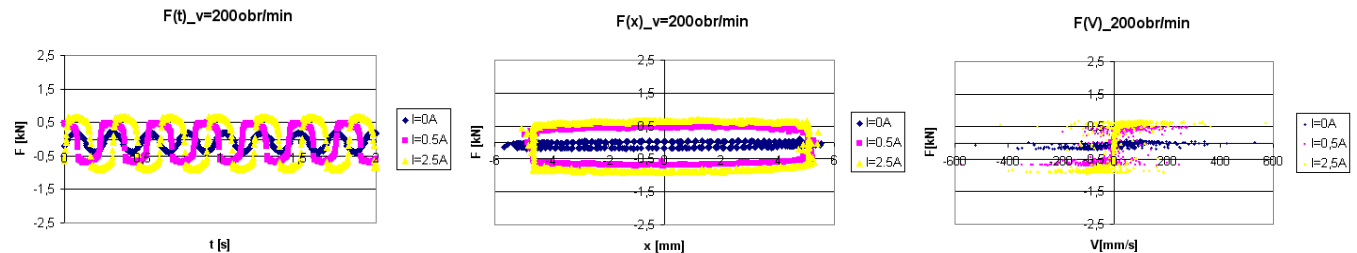
$s = 0,5\text{ mm}$



$s = 0,7\text{ mm}$



$s = 1,0\text{ mm}$



**Rys. 3.** Przebiegi zmian wartości siły działającej na tłoczek tłumika A-SiMR-MR-132AD-1-AKM, wyznaczone w funkcji: a) – czasu, b) – przemieszczenia, c) – prędkości; dla trzech wartości szczelin: 1)  $0,5$ ; 2)  $0,7$ ; 3)  $1,0\text{mm}$  oraz trzech wartości natężenia prądu płynącego w cewce solenoidu:  $I=0\text{A}$  – kolor niebieski,  $I=0,5\text{A}$  – różowy,  $I=1,2\text{A}$  – kolor żółty, przy jednej wartości prędkości przemieszczania tłoczyska  $v_i=200\text{ obr/min}$

### 3.3. Rezultaty badań wpływu prędkości przemieszczenia tłoczyska na skuteczność tłumienia urządzenia MR przy kinematycznym charakterze wymuszenia ruchu tłoczyska

Innym parametrem eksploatacyjnym tłumika MR mającym wpływ na proces pochłaniania i rozpraszania energii jest prędkość przemieszczania tłoczyska co jest związane, wprawdzie w sposób pośredni, z prędkością przepływu cieczy MR w tłumiku. Wykresy ilustrujące ilościowe zmiany wartości rozpraszania i pochłaniania energii przez badany tłumik A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM, w zależności od omawianego parametru prędkości przemieszczania jego tłoczyska, zostały zilustrowane na rys.4. Zostały one sporządzone przy jednej wartości wielkości szczeliny  $s=0,5\text{mm}$  i przy trzech wartościach prędkości obrotowej mimośrodowo wymuszającego przemieszczanie się tłoczyska.

Wykresy zamieszczone na rysunku 4 zostały sporządzone przy jednej wartości prędkości przemieszczania się tłoczyska (przy  $n=200\text{ obr/min}$ ). Okazuje się, że prędkość przemieszczania się cieczy w tłumiku, ma również wpływ na wielkość pochłanianej i rozpraszanej energii tłumienia. Ilustrują to wykresy zamieszczone na rysunku 4. Wprawdzie ten wpływ jest niewielki ale obserwuje się, ogólny trend zmniejszania się wartości siły tłumiącej przy wzroście wartości prędkości przemieszczania się tłoczyska.

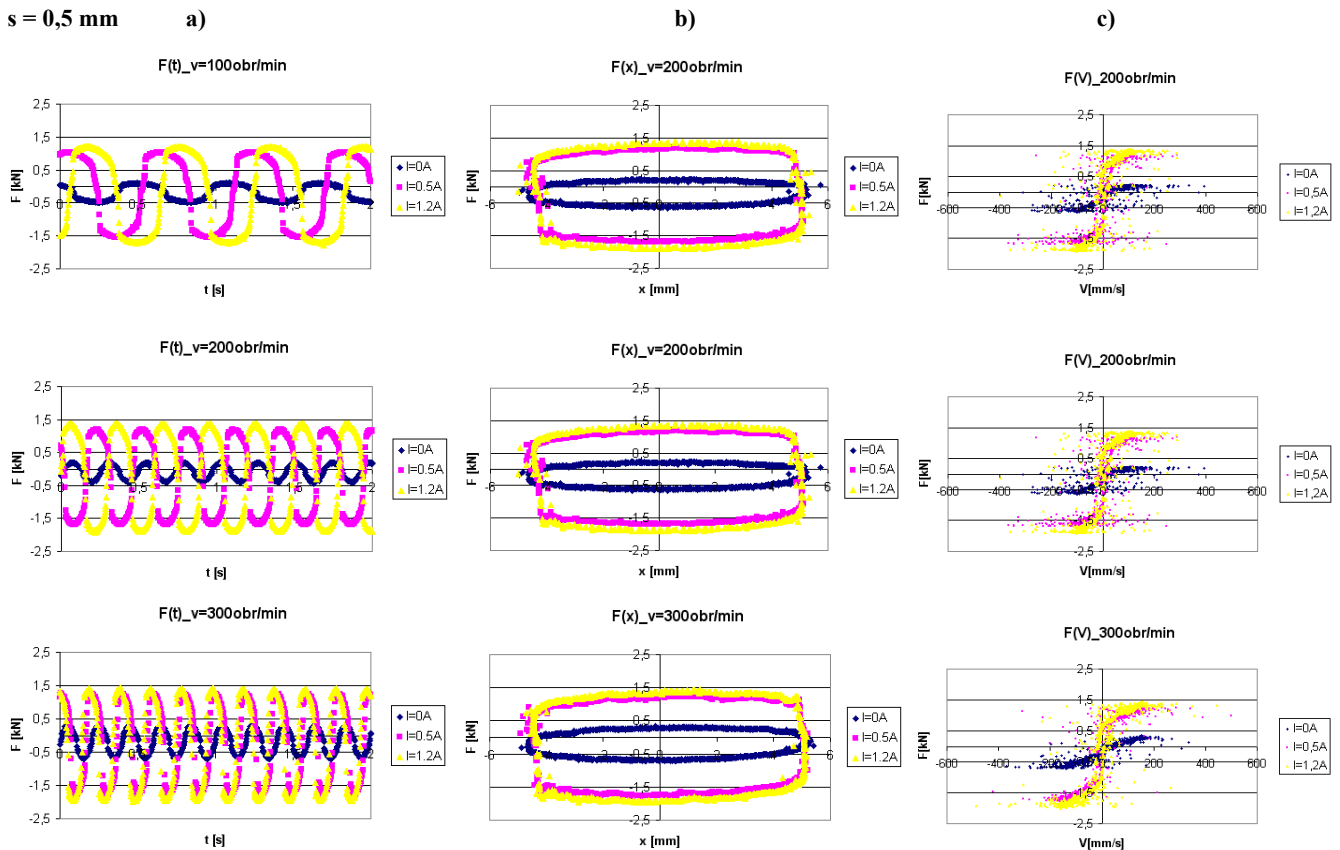
### 3.4. Rezultaty badań wpływu charakterystyki wymuszenia na zmianę wartości siły działającej na tłoczek amortyzatora MR

Zamieszczone na rysunkach 3 i 4 wyniki badań eksperymentalnych dotyczyły przypadku pracy tłumika, gdy wymuszenie ruchu miało charakter wymuszenia kinema-

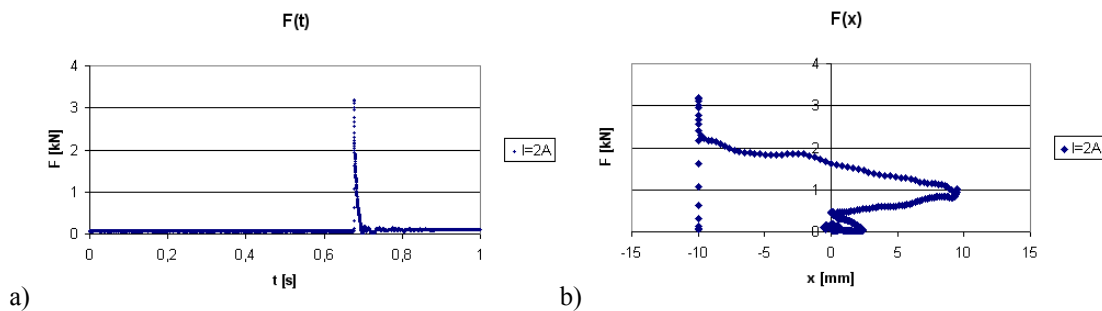
tycznego. Natomiast na rysunku 5, zostały zilustrowane wykresy zmian wartości siły działającej na tłoczek amortyzatora MR, ze szczeliną o wartości  $s=0,5\text{mm}$  i sprężyną o wartości współczynnika sztywności  $k=2,2\text{ kN/m}$ , w przypadku siłowego wymuszenia ruchu. Realizacja procesu uderzenia polegała na zrzucaniu na amortyzator ciężaru o masie  $m=8,62\text{kg}$ , z wysokości  $h=0,75\text{m}$  przy kroku próbkowania  $10^4\text{Hz}$  i czasie pomiaru  $t=3\text{ s}$ .

Obserwowany charakter zmian wartości siły podczas siłowego wymuszenia ruchu jest zupełnie odmienny od przypadku analizowanego wyżej. W niniejszej pracy wymusze-

nie siłowe było realizowane w procesie uderzenia i jak wcześniej wspomniano polegało na zrzucaniu na tłumik ciężaru o masie  $m=8,62\text{kg}$  z wysokości  $h=0,75\text{m}$ . Zilustrowane na rysunku 5 wykresy odwzorowują zmianę wartości siły działającej na tłoczek w czasie oraz przebieg tej siły, w funkcji przemieszczenia. Ponieważ proces realizacji eksperymentu ma zupełnie inny charakter niż w przypadku wymuszenia kinematycznego, w czasie jego wykonywania skorzystano z tłumika, który został uzupełniony o sprężynę o odpowiedniej sztywności.



**Rys. 4.** Przebiegi zmian wartości siły działającej na tłoczek tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM, wyznaczone w funkcji: a) –czasu, b) –przemieszczenia, c) –prędkości; dla jednej wartości szczeliny:  $s=0,5\text{mm}$ , trzech wartości natężenia prądu płynącego w cewce solenoidu:  $I=0\text{A}$  –kolor niebieski,  $I=0,5\text{A}$  – różowy,  $I=1,2\text{A}$  –kolor żółty, oraz trzech różnych wartości prędkości przemieszczenia tłoczyska  $v_{11}=100$ ,  $v_{12}=200$  oraz  $v_{13}=300$  obr/min.



**Rys. 5.** Przebieg zmian wartości siły działającej na tłoczek amortyzatora A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM: a) –w funkcji czasu, b) –w funkcji przemieszczenia, otrzymane przy trzech wartości natężenia prądu w solenoidzie głowicy:  $I=2\text{A}$ ; masa uderzającego ciężaru  $G=8,62\text{kg}$ , wysokość zrzutu  $h=0,75\text{m}$ .

Zamieszczony na rysunku 5 przebieg zmian wartości siły, dobrze odwzorowuje proces uderzenia w funkcji czasu (rysunek 5a). Zmiana wartości siły określona w funkcji przemieszczenia (rysunek 5b), wymaga odpowiedniej interpretacji. Budzić może bowiem pewne zdziwienie nietypowy kształt zapisanego procesu i związanej z nim siły. Jest to zapis ilustrujący zarówno wartość siły pochodzącej od tłumienia jak i od dodatkowej sprężyny; jej istnienie powoduje powrót do pierwotnego położenia tłoczyska. Chcąc określić zatem, na podstawie takiego wykresu własności tłumiące tak działającego amortyzatora należy od zapisanej wartości siły odjąć wartości siły przeznaczone na ugięcie sprężyny.

### 3.5. Główne problemy konstrukcyjne i technologiczne dotyczące tłumików MR

Jak już wcześniej wspomniano, pozorna prostota działania tłumika MR jest okupiona koniecznością stosowania w jego konstrukcji, bardzo zaawansowanych rozwiązań technologicznych, które obok odpowiedniej kompozycji cieczy, dotyczą przede wszystkim, stosowanych materiałów jak również niestandardowych rozwiązań w budowie jego elementów. Niektóre z ważnych zagadnień, którym podczas procesu projektowania oraz wykonania i montażu należy poświęcić szczególną uwagę są między innymi problemy:

–związane z uszczelnieniem tłoczyska, –przyspieszonego zużywania się wewnętrznej powierzchni cylindra, –zapewnienia odpowiedniej szczelności otworu w tłoczysku, przez który przechodzą przewody sterujące prądem płynącym w solenoidzie, –odpowiedniego napełniania tłumika cieczą, –dotyczące konstrukcji elementów oraz eksploatacji głowicy itd.

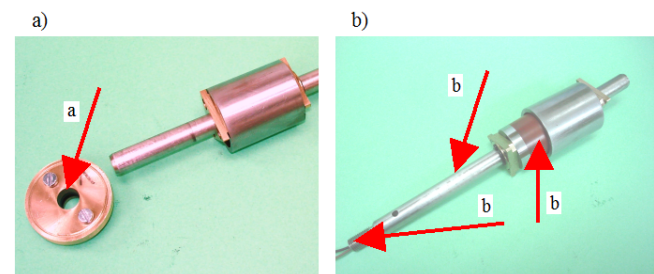
Charakterystyczna, bogata w cząstki ferromagnetyczne, kompozycja cieczy MR, podczas bezpośredniego kontaktu z ruchomymi elementami tłumika, w bezpośredni sposób oddziałuje na nie, spełniając zresztą główne zadanie, do realizacji którego tłumik został skonstruowany, tzn. zadanie pochłaniania i rozpraszania energii. Zadanie realizowane jest za pośrednictwem sił tarcia jakie pojawiają się w urządzeniu podczas pracy i wartościami których, dzięki własnościom omawianych cieczy, możemy sterować.

Zakres możliwości zmian stanu cieczy jaki uzyskiwany jest poprzez odpowiednie kształtowanie pola magnetycznego, w okolicy solenoidu jest znaczący: od cieczy po ciało stałe o własnościach plastycznych. Uzyskiwanie największych wartości sił tarcia na tłoczysku tłumika, jest możliwe przy największym stanie skupienia cieczy MR (Bajkowski J., 2004; Skalski i inni, 2009a, b). Wtedy bowiem występują największe wartości oporu przepływu cieczy, powodowane również bezpośrednim oddziaływaniem pola magnetycznego. Taki mechanizm przekazywania sił tarcia w tłumiku MR, bardzo niekorzystnie oddziałuje na stan powierzchni elementów, bezpośrednio stykających się z cieczą powodując przyspieszone ich zużycie, szczególnie w miejscach znajdujących się w bezpośredniej bliskości działania pola magnetycznego. Dlatego też istotnym z punktu widzenia konstrukcji tłumika, są elementy uszczelnień,

które muszą spełniać między innymi takie wymagania, jak: wysoka odporność na skład chemiczny cieczy MR oraz odpowiednia trwałość na działanie sił tarcia.

W przypadku tłumików MR, które pracują zwłaszcza przy znacznych wartościach przemieszczeń, zwykle uszczelnienia jakie stosowane są w przypadku amortyzatorów olejowych, ze względu na bezpośredni kontakt opiółków żelaza z tłoczyskiem i elementami uszczelniającymi, nie wytrzymują dużej liczby cykli pracy. W związku z tym, należy poszukiwać specjalnych rozwiązań, którymi mogą być, np. dodatkowe uszczelnienia labiryntowe, rowkowe itp., lub też specjalny skład materiałów stosowanych na uszczelnienia.

Takie dodatkowe uszczelnienie, obok bardzo prostych uszczelnień wzorowanych na uszczelkach stosowanych w tłoczkach hamulcowych hamulców bębnowych, chociaż wykonanych z materiału, który charakteryzuje się szczególnymi własnościami, zastosowano w badanym tłumiku (rysunek 6a).



**Rys. 6.** Miejsca elementów tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM, a), b) narażone na przyspieszone zużycie, c) wymagające specjalnego uszczelnienia

Podobny problem przyspieszonego zużywania się wewnętrznej powierzchni tłumika MR może być dosyć łatwo rozwiązany na drodze konstrukcyjnej, np. poprzez separację głównego strumienia cieczy sterującej od wewnętrznej powierzchni cylindra jak to ma miejsce w przypadku głowicy badanego tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM (rysunki 2a, b), a także poprzez wprowadzenie dodatkowego uszczelnienia, np. z tworzywa sztucznego, pomiędzy pierścień zewnętrzny i wewnętrzną powierzchnię cylindra (rysunek 6b).

Innym zagadnieniem konstrukcyjnym jest zapewnienie doskonałej szczelności otworu w tłoczysku, w którym są umieszczone przewody zasilające solenoid (Bajkowski, 2007). Takie warunki mogą być zapewnione poprzez zastosowanie materiału uszczelniającego, który jest odporny na temperaturę przynajmniej do wartości około 200°C (rysunek 6b).

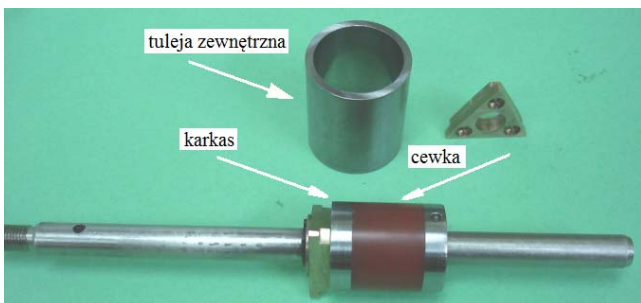
Doskonała szczelność urządzenia MR jest jednym z podstawowych warunków jego prawidłowej pracy. W przeciwieństwie do tradycyjnych amortyzatorów olejowych, w roboczej powierzchni tłumika, a więc w cieczy MR, nie może znajdować się gaz lub powietrze. Takie warunki mogą być zapewnione tylko wówczas, gdy w urządzeniu MR istnieje poprawne uszczelnienie, oraz gdy tłumik jest napełniony, w sposób gwarantujący brak dostępu czynnika gazowego do wnętrza urządzenia. Ostatni z wymienionych problemów, w produkcji seryjnej jest roz-

wiązany, przy zastosowaniu odpowiedniego urządzenia powodującego jednoczesne odsysanie powietrza wraz z napełnianiem wolnej przestrzeni cieczą MR. Rozwiązanie problemu, w działaniach jednostkowych, wymaga dużego doświadczenia, w tym zakresie i jest procesem trudnym.

Zagadnienia konstrukcyjne i technologiczne dotyczące budowy i eksploatacji głowicy tłumika są również bardzo złożone i jest ich wiele.

Głównym elementem głowicy tłumika MR jest: stanowiący zasadniczą część głowicy rdzeń oraz umieszczona na nim cewka. W zależności od założonej koncepcji przepływu cieczy głowica może być uzupełniona dodatkowymi elementami, jak np. dodatkowy pierścień zewnętrzny, gniazda połączeniowe, itd. Najczęściej stosowanym elementem łączącym części głowicy jest tłoczysko połączone z nią złączem gwintowym.

Na rysunku 7 przedstawione zostały części składowe głowicy oraz jej konstrukcja jaką zastosowano, w przypadku badanego tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM, Z eksploatacyjnego punktu widzenia, głównym zadaniem głowicy tłumika jest wytworzenie odpowiedniego pola magnetycznego wokół szczeliny do przepływu cieczy MR przy jednoczesnym zapewnieniu prowadzenia tłoczyska, w cylindrze roboczym. Takie pole wytwarzane jest przez przepływający przez uzwojenie cewki prąd i jest wzmacniane dzięki jej osadzeniu na metalowym rdzeniu (karkasie). Problemy związane z kształtowaniem pola magnetycznego w urządzeniach MR są głównymi zagadnieniami badawczymi. W niniejszym opracowaniu problem nie jest szeroko dyskutowany. Autor pragnie jednak zwrócić uwagę na kilka istotnych zadań jakie powinny być uwzględnione już na etapie projektowania lub konstrukcji urządzenia MR.



Rys. 7. Elementy konstrukcyjne głowicy tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM, wraz z tłoczyskiem

Ważnymi elementami w konstrukcji głowicy tłumika MR jest, wynikający z parametrów elektrycznych urządzenia, dobór odpowiednich parametrów drutu nawojowego cewki, tzn. jego średnicy i długości oraz dobór materiału na rdzeń solenoidu. Przy takim doborze należy pamiętać o ograniczeniach wynikających z faktu nasycania się solenoidu już przy stosunkowo niskich wartościach natężenia prądu. Właściwy dobór materiału na rdzeń solenoidu, obok głównego zadania jakim jest wzmacnianie pola magnetycznego wytwarzanego w uzwojeniu cewki, musi spełniać jeszcze inny ważny warunek jakim jest jego całkowita demagnetyzacja, w chwili zaprzestania dopływu prądu. Zagadnienie to jest bardzo ważne, zarówno ze względu na precyzję sterowania parametrami elektrycznymi jak

również ze względu na wymaganą konieczność powrotu cieczy MR do stanu pierwotnego. Wykonane w PW badania eksperymentalne z wykorzystaniem rdzeni, wykonanych

z różnych gatunków stali, jednoznacznie potwierdziły, iż najkorzystniejszym materiałem jest w tym przypadku, żelazo ARMCO; taki właśnie materiał został wykorzystany do budowy badanego tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM.

### 3.6. Wybrane ważne problemy eksploatacyjne tłumików MR

Zarówno prowadzone badania eksperymentalne omawianej konstrukcji tłumika A-SiMR-MR-132AD=0,5P-1-AKM, jak i wcześniejsze autorskie opracowania związane z analizą urządzeń MR jednoznacznie pokazują, że jednym z istotnych problemów do rozwiązania, w omawianej sferze badawczej, pozostaje problem nagrzewania się cieczy MR podczas pracy urządzenia. Szczególnie wyraźnie zjawisko to jest obserwowane podczas ciągłej pracy tłumika. Omawiane zagadnienie było badane bardzo szczegółowo na Wydziale SiMR Politechniki Warszawskiej i publikowane, np. w pracach: Bajkowski J. (2004, 2005b), Bajkowski i Dudziak (2004), Bajkowski M. (2004, 2009).

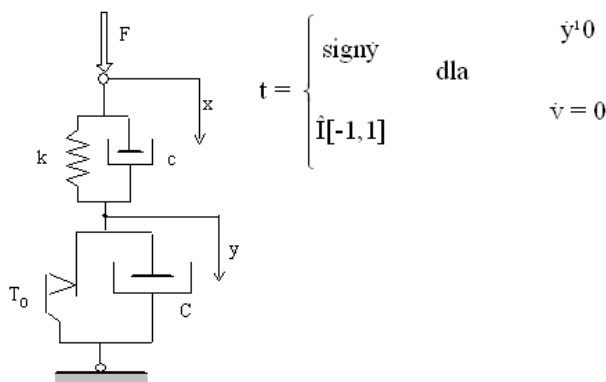
W tłumikach MR, poza warunkami zewnętrznymi określającymi temperaturę otoczenia, istnieją dwa zasadnicze źródła wzrostu ich temperatury. Pierwszym źródłem ciepła opór, płynącego przez cewkę prądu. Powoduje on zamianę energii elektrycznej na ciepło i przekazywanie go, do będących z nią w kontakcie elementów, w tym oczywiście do cieczy MR. Drugim źródłem ciepła są procesy zamiany pracy sił tarcia na energię cieplną.

Przyjmując model reologiczny tłumika MR zaproponowany w pracach: Bajkowski M. (2006), Bajkowski M. i inni (2002, 2005) oraz zamieszczony na tym rysunku 8 przebieg zmian siły tarcia, a także oznaczenia zgodne z rysunkiem 8:  $y(t)$  – przemieszczenie tłoka,  $Q=Q(t)$  – funkcja temperatury,  $Q_0=0$  – warunek początkowy dotyczący temperatury,  $F(t)$  – siła zewnętrzna,  $\tau(t)P_t(Q(t))$  – opór tarcia oraz  $C_p$  – ciepło właściwe cieczy,  $CR(q(t))y^2(t)$  – dyssypacja energii,  $\tau(t)P_{t_0}(q(t))\dot{y}(t)$  – energia cieplna (tarcia),  $k$  – współczynnik przewodności cieplnej, – zmiana energii,  $I$  – natężenie prądu wywołujące pole magnetyczne,  $R$  – elektryczna rezystancja solenoidu, można sformułować następujące równanie ruchu oraz bilansu cieplnego tłumika (Bajkowski M., 2006):

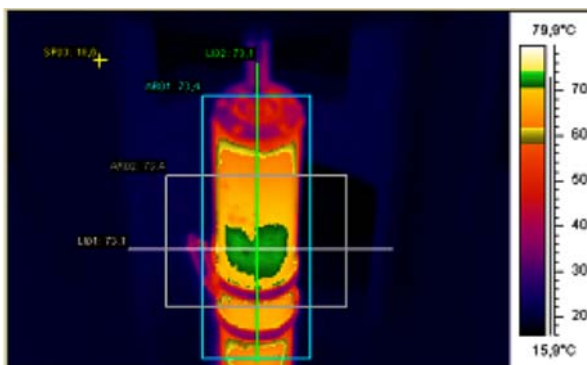
$$\left. \begin{aligned}
 & F(t) = C_R(q(t))\dot{y}(t) + t(t)P_{t_0}(q(t)) \\
 & t = \begin{cases} \text{sgn } \dot{y} & \text{dla } \dot{y} \neq 0 \\ [-1, 1] & \text{dla } \dot{y} = 0 \end{cases} \\
 & C_p\dot{q}(t) = I^2R + C_R(q(t))\dot{y}^2(t) + t(t)P_{t_0}(q(t))\dot{y}(t) - kq(t)
 \end{aligned} \right\}$$

Podczas pracy tłumika MR, naturalną konsekwencją zamiany energii oporów tarcia na energię cieplną jest wzrost temperatury cieczy, co oczywiście powoduje wzrost temperatury jego obudowy.

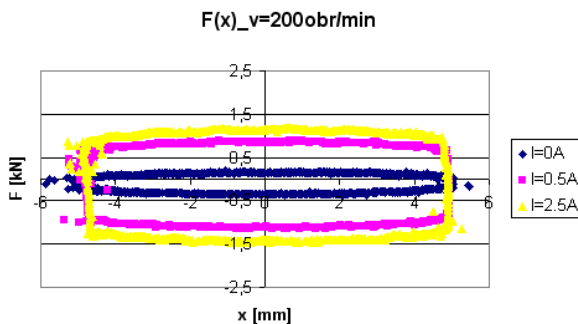
Oporo przepływu cieczy MR przez szczeliny tłumika, a więc także wzrost temperatury cieczy w jego wnętrzu oraz wzrost temperatury obudowy, są wypadkową wielu złożonych i nakładających się na siebie procesów, jakie zachodzą wewnątrz urządzenia podczas jego pracy. Stopień intensywności nagrzewania jest wypadkową wielkości, które określają lub zależą od wielu zjawisk i procesów oraz warunków pracy urządzenia MR; omówiono je m.in. w pracach: Bajkowski i Dudziak (2004), Bajkowski J. (2004), Bajkowski M. (2004). Na rysunku 9 zaprezentowany został rozkład ciepła na powierzchni obudowy badanego tłumika.



Rys. 8. Model reologiczny tłumika i opis siły tarcia (Bajkowski, 2006; Bajkowski i inni, 2005)



Rys. 9. Ilustracja rozkładu temperatury na obudowie badanego tłumika (Bajkowski, 2007)



Rys. 10. Rezultaty badań amortyzatora przy różnych wartościach zasilania solenoidu z uwzględnieniem magnetyzmu

szczątkowego (l. czarna)

Innym ważnym problemem w eksploatacji tłumika jest zagadnienie magnetyzmu szczątkowego. Na rysunku 10 zaprezentowany został przykład rezultatów badań amortyzatora MR, który uwzględnia wpływ zjawiska magnetyzmu szczątkowego. Analiza zamieszczonych przebiegów krzywych wyraźnie pokazuje, iż wpływ oddziaływania magnetyzmu szczątkowego na pracę urządzenia MR jest istotny, a dążenie do jego eliminacji jest jednym z ważnych zadań eksploatatora urządzenia.

Obok takich działań jak właściwy dobór materiału na rdzeń solenoidu sposobem na demagnetyzację głowicy może być również takie sterowanie zasilaniem cewki, aby końcowy fragment przebiegu procesu jej zasilania, powodował to zjawisko poprzez wprowadzenie kilku cykli zmiennych wartości prądu.

#### 4. PODSUMOWANIE

Konieczność ograniczenia pracy nie pozwala na pełną prezentację wszystkich problemów, które wiążą się z prezentowanym jej tematem. Należy zwrócić uwagę jednak na fakt, iż duża prostota konstrukcyjna tłumików MR musi być okupiona koniecznością stosowania bardzo zaawansowanego poziomu technologii zarówno w samej konstrukcji elementów tłumika jak również w kompozycji cieczy MR. W dalszym ciągu wiele problemów zarówno z zakresu badań podstawowych jak i technologicznych pozostaje nierozwiązanych; są one przedmiotem intensywnych prac w wielu ośrodkach naukowych i badawczych. Dotyczą one zarówno zagadnień modelowania i opisu matematycznego zjawisk i właściwości badanych urządzeń jak również wpływu różnych elementów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na wyznaczone charakterystyki pochłaniania i rozpraszania energii. Z naukowego punktu widzenia problemami nieopisanymi pozostają zagadnienia przepływu cieczy przez szczelinę w głowicy tłumika w warunkach zmiennych wartości pola magnetycznego, wpływ temperatury na zmianę własności dyssypacyjnych tłumika, itd.. Sprawą otwartą pozostaje również zagadnienie jakości cieczy MR, nad których udoskonaleniem pracuje wiele ośrodków zwłaszcza w USA oraz w Niemczech.

#### LITERATURA

1. **Bajkowski J.** (2004), Analysis of Influence of Some Magnetorheological Damper Parameters on Energy Dissipation and Absorption Properties, *Machine Dynamics Problems*, Vol. 28.
2. **Bajkowski J.** (2005a), Constructional and Technological Problems in Designing of the Intelligent MR Damper, *XIII Polish-Ukrainian Conference "CAD in Machinery Design" Implementation and Educational Problems*, Ed. Warsaw Univ. of Technology, Jurata oraz Polsko Słowacka Konferencja Rożnow n/Radhostem.
3. **Bajkowski J.** (2005b), Modelowanie i badania wpływu temperatury na rozpraszanie energii w tłumiku magnetoreologicznym, *Mechanika*, z.1-m.



4. **Bajkowski J.** (2007), Wybrane problemy modelowania, konstrukcji, technologii i eksploatacji cieczy, tłumików i amortyzatorów magneto reologicznych, *Mat. XXIII Sympozjonu PKM*, Rzeszów-Przemyśl.
5. **Bajkowski J., Dudziak B.** (2004), Eksperymentalne badania własności dyssypacyjnych tłumika z cieczą magnetoreologiczną Influence de la température et de la section de transfert du liquide sur les propriétés de dissipation d'énergie de l'amortisseur magnétorhéologique, *XIV Colloque Vibrations Chocs et Bruit*, Ecole Centrale de Lyon 69131 Ecully.
6. **Bajkowski J., M Sofonea., M. Shillor** (2005), Modélisation et étude de l'influence de la grandeur de lumière de la fissure de transfert du liquide sur les propriétés de la dissipation de l'énergie d'un amortisseur magnétorhéologique, *Congres CCCM*, Tunisie.
7. **Bajkowski J., Sofonea M.** (2004), Modélisation, description mathématique et les recherches de l'influence de la grandeur de la fissure de transfert du liquide sur les propriétés de la dissipation de l'énergie du amortisseur magnétorhéologique, *Mat. De XIV Coll. Vibrations, Chocs et Bruit.*, Lyon.
8. **Bajkowski M.** (2004), Modelowanie i analiza dynamiczna złożonego obiektu mechanicznego, *Mat. XII Seminaire Franco-Polonais de Mécanique*, Varsovie.
9. **Bajkowski M.** (2006), *Analiza wpływu wybranych charakterystyk tłumika magnetoreologicznego na zmianę właściwości dynamicznych modelu obiektu specjalnego*, Praca doktorska, PW, 2006
10. **Bajkowski M.** (2009), Analiza dynamiczna modelu obiektu specjalnego z magnetoreologicznym tłumikiem, *XXIV Sympozjon PKM*, Białystok-Białowieża.
11. **Bajkowski M., Grzesikiewicz W., Knap L.** (2002), Etudes des amortisseurs magnetorheologiques, *Cahier de Mécanique 1-03; -9<sup>eme</sup> Sem. Franco-Polonais de Mécanique*, Polytech'Lille.
12. **Bajkowski M., Grzesikiewicz W., Sofonea M.** (2005), Etude, modelisation et recherche de la temperature sur la dissipation de l'energie d'un amortisseur magnetorheologique, *XIII Seminaire Franco-Polonais de Mecanique*, Edition Polytech'Lille.
13. **Dudziak B.** (w opracowniu), *Modelowanie I analiza wybranych procesów dyssypacyjnych w pracy tłumika z cieczą magnetoreologiczną*, Praca doktorska, PW.
14. **Milecki A.** (2001), Investigation and Control of Magneto-Rheological Fluid Dampers, *Machine Tools&Manufacture*, 41.
15. **Milecki A.** (2002), Investigation of Dynamic Properties and Control Method Influences on MR Fluid Dampers Performance, *J. of Int. Material Systems and Structures*, Vol. 13, Sage Publications.
16. **Sapiński B.** (2003), *Dynamic Characteristics of on Experimental MR Fluid Damper*, The grant of the State Committee for Scientific Research No8T07B 03520
17. **Skalski P., Woźnica K., Bajkowski J** (2009a), Parameters identification of Bodner-Partom model for fluid in MR damper, *XXIV PKM*, Białystok-Białowieża
18. **Skalski P., Woźnica K., Bajkowski J.** (2009b), Comportement du fluide magnétorhéologique – application au modele viscoplastique de Bodner-Partom, *19-eme Congres Francais de Mécanique*, Marseille.

## SIMULATIONS AND TESTS OF ABSORPTION AND DISPERSION PROCESSES IN MR FLUID DAMPERS

**Abstract:** Presented paper presents some research, structural and operational problems of dampers and shock absorbers designed on the basis of MR fluid. The most important informations related to modelling and mathematical description of selected, characteristic for considered construction, phenomenon are discussed.