

Vysoké učení technické v Brně
Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

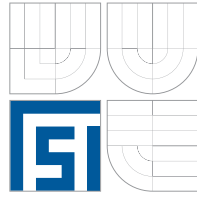
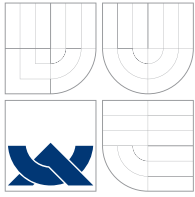
Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Thesis Type]

Autor práce: **Ing. Zbyněk Strecker**
Author

Brno 2011





Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Thesis Type]

Autor práce: **Ing. Zbyněk Strecker**
Author

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**
Supervisor

OBSAH

Obsah	3
Úvod	4
1 Vymezení řešené problematiky a předběžné cíle disertační práce	8
2 Shrnutí současného stavu poznání	9
2.1. Modely MR tlumiče	9
2.2. Algoritmy řízení MR tlumiče	19
2.3. Dynamické chování MR tlumiče	29
3 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše	44
4 Vymezení cíle disertační práce a návrh způsobu jejího řešení	45
5 Současný stav řešení disertační práce	46
6 Závěr	48
7 Seznam použitých zdrojů	49
Seznam obrázků a grafů	50
Seznam tabulek	51

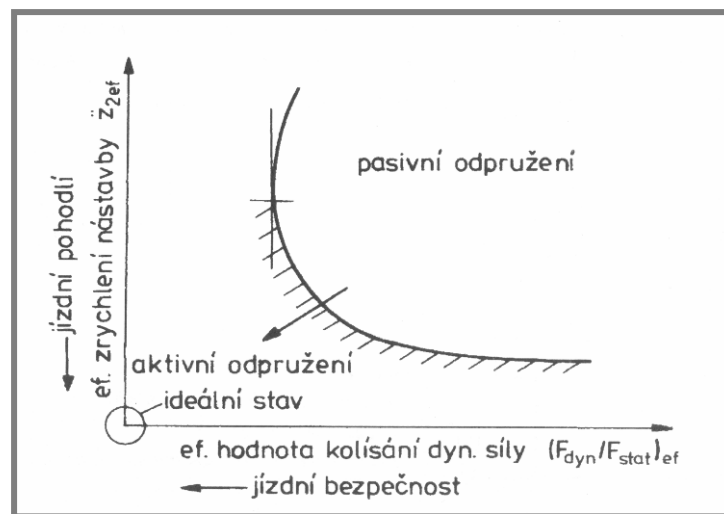
1 ÚVOD

Pojednání o disertační práci se zabývá odpružením automobilu. Cílem odpružení automobilu je zajistit pohodlí cestujících (minimalizace svislého zrychlení působícího na posádku) a dále zajistit jízdní bezpečnost (zajištění konstantního přitlaku kola na vozovku).

Už u kočárů tažených koňmi se kvůli izolaci posádky od nerovností vozovky vkládaly mezi kolo a kabinu pružiny. Účinky rázů zmírňují pružiny tím, že přeměňují pohybovou energii nárazujícího tělesa na potenciální energii (napjatost) pružiny.

Z fyzikálního hlediska je pružina akumulátor energie a pokud dojde ke stlačení pružiny, hmotnost připevněná na pružině se netlumeně rozkmitá. Aby se kmitání zabránilo, musí se použít prvek, který pohybovou energii přemění na jinou formu (teplo). Tímto prvkem je tlumič.

U dnešních automobilů jsou nejrozšířenější závěsy s kapalinovým tlumičem paralelně připojeným k pružině. Tento typ závěsu se nazývá pasivní. Pasivní závěs lze ale vždy nastavit jen jako kompromis mezi jízdním pohodlím a bezpečností jízdy (Obr. 1). Pro zlepšení jak jízdních vlastností tak komfortu vozidla je možné využít adaptivních systémů odpružení.



Obr. 1: Závislost jízdního pohodlí na jízdní bezpečnosti [1]

Adaptivní systémy se dále podle zdrojů [1,2] dělí na:

- Aktivní
- Adaptivní pasivní
- Semiaktivní

Pro ideální odpružení automobilu je třeba použít aktivního závěsu. Aktivní závěs se vyznačuje aktuátorem, který je schopen do závěsu dodávat energii. Příkladem takového systému je například odpružení od firmy BOSE [3]. V tomto závěsu je místo pružiny a tlumiče použit lineární elektromotor, který se snaží pohybovat kolem tak, aby kolo co nejpřesněji kopírovalo terén. Pak by na vozovku měla být vyvozována

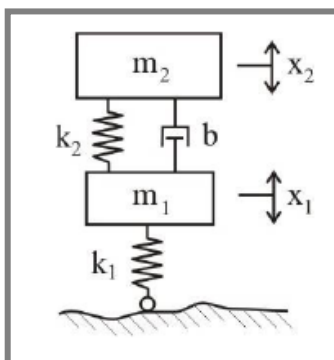
stálá síla při minimálních hodnotách zrychlení odpružené hmoty. Nevýhodou těchto systémů je ale i přes rekuperaci energie poměrně vysoký stálý příkon, vysoká složitost a tím i cena. Při poruše systému se navíc prudce zhorší jízdní vlastnosti vozidla.



Obr. 2: Závěs BOSE s lineárními elektromotory [3]

Jako levnější a jednodušší varianta odpružení automobilu, která dokáže zlešit jízdní vlastnosti automobilu se jeví adaptivní pasivní resp. semiaktivní odpružení. Adaptivní pasivní systémy mohou měnit svou charakteristiku z dlouhodobého hlediska (zatížení vozidla apod), ale nejsou schopny měnit svou charakteristiku s frekvencí blízkou rezonanční frekvenci závěsu kola.

Semiaktivní způsob řízení znamená, že do systému není možné (na rozdíl od aktivního řízení) dodávat energii, ale je možné měnit velikost disipované energie (změna charakteristiky systému) [4]. Hlavní rozdíl oproti adaptivním pasivním systémům je, že charakteristika semiaktivních systémů lze měnit řádově minimálně s frekvencí rezonančních frekvencí závěsu. Výhodou oproti aktivním systémům je malá energetická náročnost, a že i při poruše řídicí jednotky tlumič stále funguje jako klasický tlumič - jedná se tedy o fail-safe systémy [5].

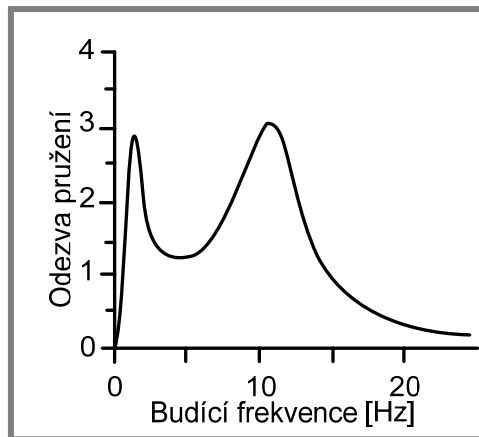


Obr. 3: Čtvrtinový model automobilu [6]

Jako zjednodušení odpružení vozidla pro účely modelování se používá čtvrtinový model vozidla (Obr. 3), což je model se dvěma stupni volnosti skládající se z odpružené hmoty m_2 , neodpružené hmoty m_1 , tlumiče s tlumením b pružinou o tuhosti k_2 a tuhosti pneumatiky k_1 . Frekvenční charakteristika závěsu kola (Obr. 4) má dva výrazné vrcholy - rezonanční frekvence odpružené hmoty (nižší frekvence) a rezonanční frekvence neodpružené hmoty (vyšší frekvence).

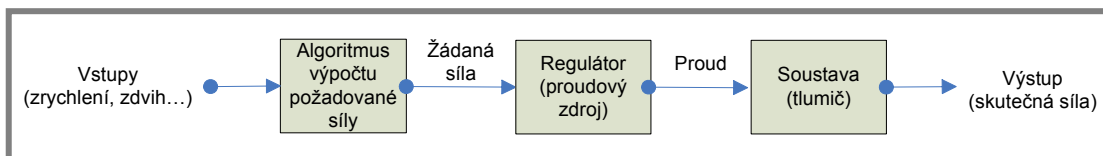
Cílem závěsu kola je, aby přenos výchylky z kola do odpružené hmoty byl co nejmenší (malé tlumení, měkká pružina) a naopak aby přenos výchylky z kola do neodpružené hmoty byl roven jedné do co nejvyšších frekvencí (tvrdá pružina, velké tlumení).

Při použití semiaktivního pružení je tlumič použit jako generátor síly. Pro semiaktivní utlumení odpružené hmoty je třeba generovat sílu o nejméně o frekvencích odpružené hmoty, pro semiaktivní utlumení neodpružené hmoty nejméně o frekvencích neodpružené hmoty.



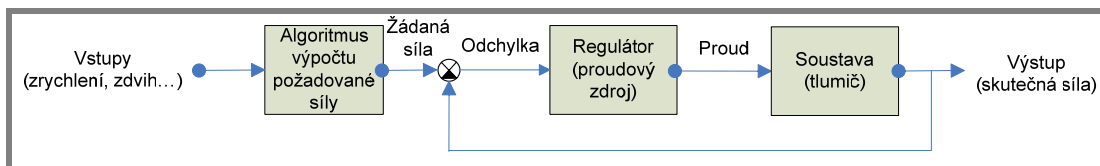
Obr. 4: Frekvenční závislost závěsu kola

Adaptivní systémy s sebou přinášejí nutnost systém regulovat to znamená na základě vstupních veličin generovat řídicí signál pro aktuátor. Nejjednodušším způsobem řízení je, že na základě vstupních parametrů (zrychlení odpružené hmoty, zdvih tlumiče) podle určitého algoritmu dostaneme požadovaný signál (velikost tlumicí síly). Na základě modelu se do aktuátoru (tlumiče) se vygeneruje odpovídající akční zásah (proud do cívky) a předpokládá se, že na výstupu aktuátoru je požadovaná síla. Takový způsob řízení se nazývá řízení v otevřené smyčce.



Obr. 5: Řízení s otevřenou smyčkou

Výhodou je jednoduchost řešení (není třeba měřit tolik veličin jako u zpětnovazebné regulace), ale nevýhodou je zejména značná citlivost na přesnost modelu soustavy a nemožnost kompenzace chyb.

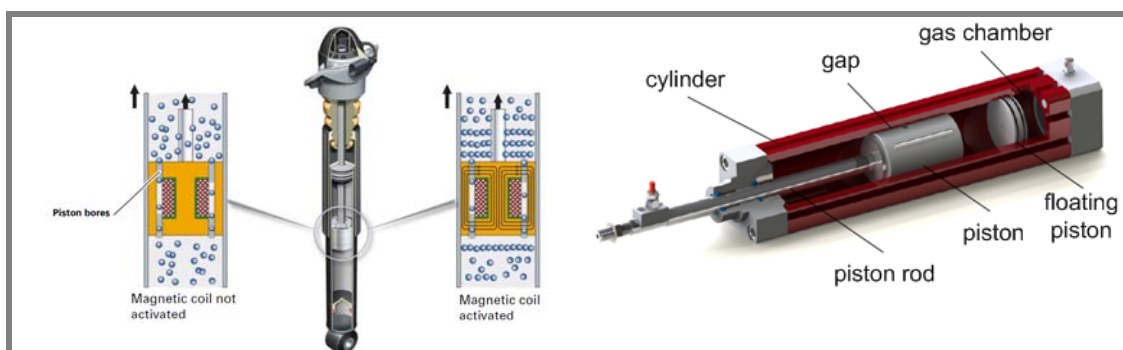


Obr. 6: Řízení s uzavřenou smyčkou

U zpětnovazebné regulace je třeba měřit výstup ze soustavy (síla). Akční zásah je pak závislý na rozdílu mezi požadovanou a skutečnou hodnotou výstupu ze soustavy. Výhodou tohoto způsobu řízení je, že pokud se použije vhodný regulátor, na výstupu ze soustavy je možné dosáhnout přesné síly i bez přesného modelu soustavy. Nevýhodou je větší složitost řešení.

V adaptivních závěsech je možné použít jako zdroj proměnné síly MR, nebo ER tlumič. Objev a rozvoj aplikací využívajících MR resp ER efekt se datuje od konce 50-tých let [7, 8]. Koncem 90-tých let se hlavní firmou vyvíjející MR systémy stala firma Delphi (dnes BWI Group). Semiaktivní odpružení pomocí MR tlumičů se v sériově vyráběných automobilech začalo objevovat od roku 2002 [11] (Ferrari 599GTB, Audi TT, Chevrolet Corvette atd...).

Princip MR tlumiče je na Obr. 7. Hlavním rozdílem oproti běžným tlumičům je cívka navinutá na pístu a náplň tlumiče – MR kapalina. MR kapalina je koloidní suspenze tvořená nosnou kapalinou a feromagnetickými mikročásticemi (2-5 μ m). Pokud se do cívky pustí elektrický proud, magnetické pole ve štěrbině, kterou protéká MR kapalina, způsobí zřetězení částic a tím zdánlivé navýšení viskozity kapaliny.



Obr. 7: Princip MR tlumiče [1] (vlevo) a ER tlumiče (vpravo) [12]

ER tlumiče pracují na obdobném principu. Náplň ER tlumičů je ER kapalina, což je suspenze nosné kapaliny a elektricky polarizovatelných mikročástic (nejčastěji PUR). ER kapalina protéká přes štěrbinu mezi pístem a válcem, ve které je elektrické pole (jedna elektroda je válec, druhá píst). V elektrickém poli opět dojde ke zřetězení částic a tím ke zdánlivému navýšení viskozity.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce se věnuje optimalizaci řídicího algoritmu MR tlumiče. V současnosti se u sériově vyráběných vozů s MR tlumiči používá adaptivní způsob odpružení. Práce má určit limity, kterých jsou MR tlumiče schopny dosáhnout, určit omezující parametry, podle těchto parametrů určit optimální způsob semiaktivního řízení a porovnat s adaptivním způsobem odpružení. Jako předběžné cíle disertační práce lze označit:

1. Určení limitních parametrů určujících dynamiku tlumiče

- Určení vhodné metodiky měření parametrů tlumiče
- Zjištění časové odezvy sériového tlumiče s ŘJ
- Optimalizace regulátoru proudu s cílem minimalizace vlivu regulátoru na celkovou délku časové odezvy MR tlumiče
- Určení minimální dosažitelné odezvy MR tlumiče

2. Optimalizace regulačních algoritmů

- Vliv dynamiky MR tlumiče na kvalitu odpružení
- Vliv omezeného rozsahu generovaných sil na kvalitu odpružení
- Určení robustnosti jednotlivých algoritmů

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rešeršní část je rozdělena na následující části:

Modely MR tlumiče

Pro semiaktivní způsob řízení je třeba znát velikost síly, která je generována tlumičem. Pro nasazení MR tlumiče v praxi je třeba mít výpočetně nenáročný ale dostatečně přesný model MR tlumiče.

Algoritmy řízení odpružení

Podle různých algoritmů řízení odpružení je určena potřebná síla, kterou má semiaktivní tlumič vyvodit. Algoritmy mohou být optimalizovány na bezpečnost jízdy, nebo spíše na pohodlí. Důležité je také množství snímaných parametrů pro jednotlivé algoritmy.

Dynamické chování MR tlumiče

V této části je rozebírána rychlost náběhu síly v závislosti na řídicím signálu. Indukčnost způsobená cívkou na pístu tlumiče ovlivňuje rychlost náběhu požadovaného proudu v závislosti na použitém napájecím zdroji. Také MR kapalina není schopna změnit své parametry okamžitě v závislosti na intenzitě magnetického pole.

3.1. Modely MR tlumiče

3.1.1. SPENCER, B.F.Jr.; DYKE, S.J.; SAIN, M.K.; CARLSON, J.D.

Phenomenological model for magnetorheological dampers.

Journal of Engineering Mechanics-Asce, 1997, no. 123, 3, s. 230-238.

3.1.

3.1.1.

Hlavní cíle článku

- Představení použitelných modelů MR tlumiče
- Návrh nového modelu MR tlumiče

Testovací aparatura:

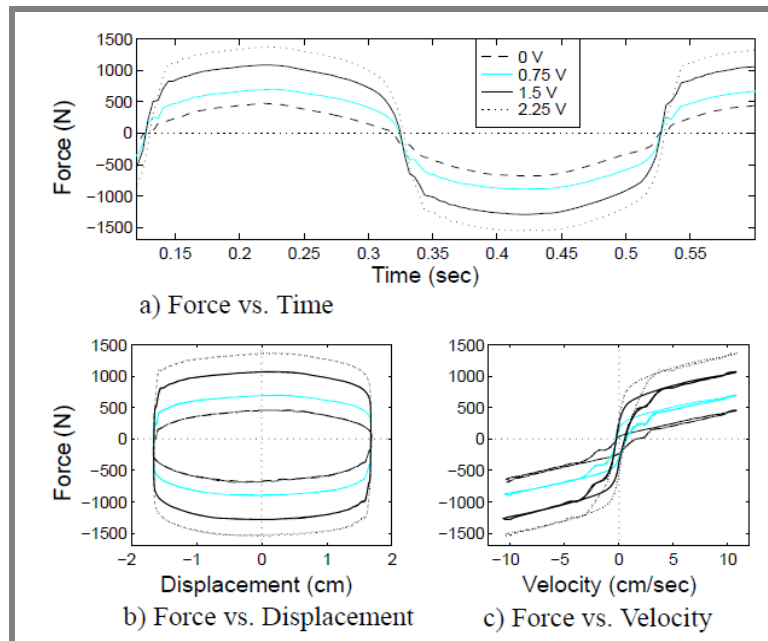
- hydraulický aktuátor Nopak (průměr 3,8 cm, zdvih 30,5 cm, max. frekvence 45 Hz)
- LVDT snímač na snímání zdvihu
- siloměr Omega (rozsah ± 4540 N) na měření síly vyvozované tlumičem
- LSDAS 16-AC-mod2 karta s 16 bit AD převodníky

Testován byl MR tlumič vlastní konstrukce o parametrech:

- průměru válce 3,8cm, délka 21,5cm, zdvih $\pm 2,5$ cm,
- naplněn kapalinou Lord VersaFlo MRX-135GD.
- Vnitřní průměr válce je 28 mm, vnější průměr pístu je 27 mm. Délka kanálu je 15 mm, aktivní zóna je 7 mm.
- Velikost intenzity magnetického pole ve šterbině může být v rozsahu 0 – 200 kA/m pro proudy 0-1A
- Odpor cívky tlumiče je 4 Ω , indukčnost 40 mH

- Časová odezva (10-90%) na jednotkový skok napětí do proudového regulátoru je asi 8 ms

Vstupní charakteristiky pro vytvoření modelu tlumiče byly získány měřením síly v závislosti na čase, vstupem byl sinusový signál (závislost posunutí na čase) o konstantní frekvenci a konstantním napětí na cívce tlumiče. Závislost síly na čase, síly na poloze a síly na rychlosti jsou na Obr. 8 a), b), c).



Obr. 8: Naměřené charakteristiky při buzení signálem o frekvenci 2,5 Hz a amplitudě 1,5 cm.

Pokud je cívka MR tlumiče bez napětí, tlumič se chová jako běžný viskózní tlumič. Se vzrůstajícím napětím se tlumič začne chovat, jako by byl paralelně připojen plastický materiál. Chování odpovídá Binghamskému modelu. Nárůst síly je až do napětí 2,25 V lineární.

Z charakteristik je dále patrné, že tlumič i při nulové rychlosti produkuje nenulovou sílu. V tlumiči je totiž v části válce zásobník se stlačeným dusíkem pod tlakem 2,07 MPa, který je od MR kapaliny oddělen plovoucím pístkem. Zásobník zabraňuje kavitacím v tlumiči a kompenzuje objem vytlačený pístnicí tlumiče. Stlačený dusík se chová jako pružina připojená sériově k tlumiči a způsobuje hysterezi v F-v charakteristice tlumiče.

Z F-v charakteristiky je vidět, že tlumič se chová lineárně jen pro vyšší rychlosti. Jakmile začne rychlost klesat, síla začne klesat rychleji a hladce přechází do záporných hodnot.

Modely MR tlumiče se dělí na 2 typy

- neparаметrické modely
- parametrické modely

Z neparаметrických modelů je nejvíce rozšířen model pomocí Chebyshevových polynomů (Ehrgott, Masri). Nevýhodou tohoto typu modelů je, že jsou velmi složité a neexistuje obecná metodika návrhu neparаметrických modelů pro konkrétní tlumič.

Z parametrických modelů jsou nejrozšířenější modely:

Binghamský model

Binghamský model se často používá pro popis chování MR a ER kapalin. Model definuje závislost smykového napětí τ na smykovém spádu $\dot{\gamma}$ podle vzorce:

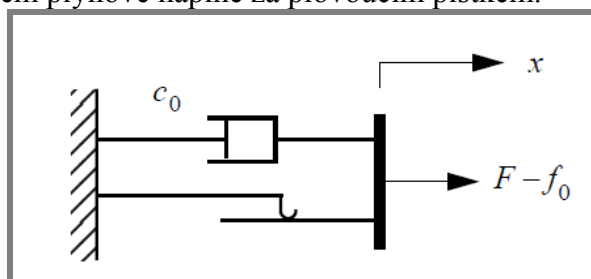
$$\tau = \tau_{y(\text{field})} \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

$\tau_{y(\text{field})}$ je mez kluzu závislá na magnetickém poli a η je viskozita.

Na základě tohoto modelu chování ER kapaliny navrhl kolektiv Stanwaye idealizovaný mechanický model ER tlumiče. Tento model (Obr. 9) se skládá z Coulombova tření paralelně připojenému k viskóznímu tlumiči. Síla vyvozovaná takovýmto tlumičem je vyjádřena:

$$F = f_c \text{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (2)$$

kde c_0 je tlumicí koeficient, f_c je třecí síla, která je úměrná magnetickému poli. f_0 je síla způsobená tlakem plynové náplně za plovoucím pístkem.



Obr. 9: Binghamský model MR tlumiče

Zatímco závislost síly na poloze předpovídá model téměř správně, v F-v charakteristikách model špatně předpovídá v oblastech kolem nulové rychlosti.

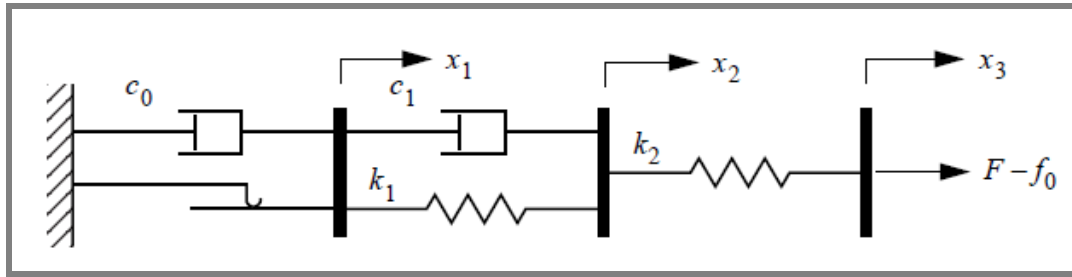
Gamota and Filisko model

Tento model (Obr. 10) je rozšíření Binghamského modelu o viskoelastický člen zapojený do série. Rovnice, podle které se síla počítá je následující:

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \\ &= c_0 \dot{x}_1 + f_c \text{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 \\ &= k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, |F| > f_c \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1 \dot{x}_2 + f_0 \\ &= k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, |F| \leq f_c \quad (4)$$

kde c_0 je tlumicí koeficient tlumiče Binghamského modelu, k_1 , k_2 a c_1 jsou parametry viskoelastického modelu.



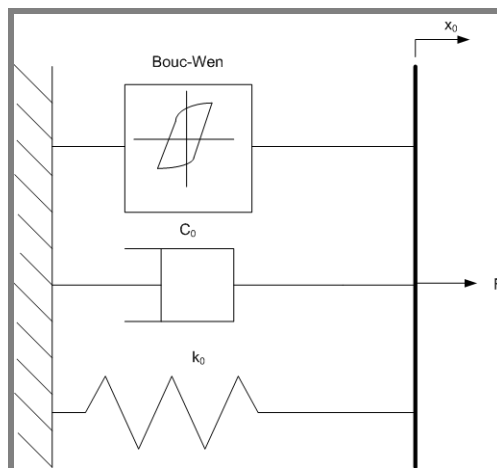
Obr. 10: Gamota-Filisko model

Tento model opět dobře modeluje F-z charakteristiku. F-v charakteristika modelu se blíží naměřené charakteristice.

Nevýhodou tohoto modelu je, že ze soustavy rovnic je numerickou cestou velmi složité získat potřebné parametry.

Jednoduchý Bouc-Wen model

Tento model se používá na modelování systémů s hystezí. Výhodou je především univerzálnost modelu na velký rozsah tvarů hysterezí a numerická jednoduchost zjištění vstupních parametrů.



Obr. 11: Bouc-wen model MR tlumiče

Síla tlumiče je vyjádřena následujícími rovnicemi:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (5)$$

Kde z je proměnná definující tvar hystereze:

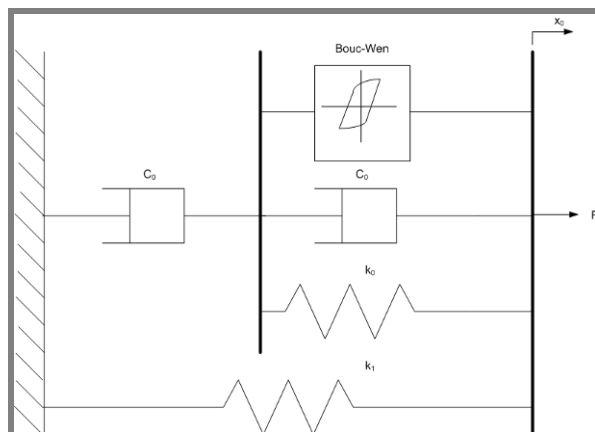
$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (6)$$

Tvar hystereze tedy lze tvarovat pomocí proměnných γ , β , A . Model v sobě také zahrnuje sílu způsobenou nádržkou se stlačeným plynem.

Model opět správně modeluje síly pro vyšší rychlosti, v oblasti nízkých rychlostí ale není přesný.

Nový Bouc-Wen model

Navrhovaný nový Bouc-Wen model MR tlumiče je na Obr. 12.



Obr. 12: Nový Bouc-Wen model tlumiče

Podle Obr. 12 lze psát rovnici :

$$c_1 \dot{y} = \alpha z + k_0(x - y) + c_0(\dot{x} - \dot{y}) \quad (7)$$

Kde z je:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (8)$$

Což vede na rovnici:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 - c_1)} [\alpha y + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (9)$$

Celková síla může být vyjádřena:

$$F = \alpha z + k_0(x - y) + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_1(x - x_0) \quad (10)$$

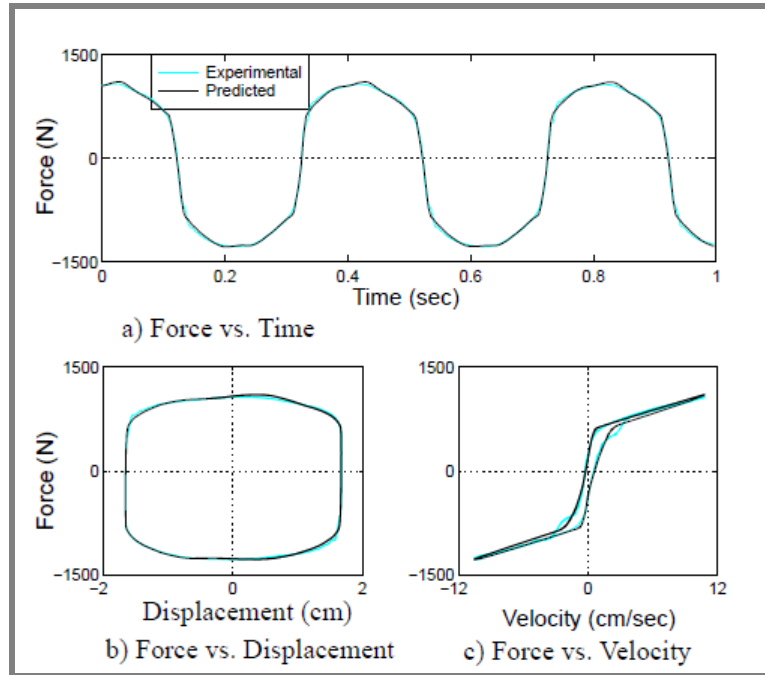
Což lze zjednodušit:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (11)$$

U tohoto modelu je „tuhost“ stlačeného plynu reprezentována proměnnou k_1 , viskózní tlumení pro vysoké rychlosti je dáno proměnnou c_0 , c_1 je tlumicí koeficient pro malé rychlosti, k_0 je tuhost při vysokých rychlostech a x_0 je výchylka pružiny k_1 .

Model byl porovnán s reálným tlumičem při testovacích podmínkách:

- budicí frekvence aktuátoru - 2,5Hz, sinusový signál
- napětí na cívce - 1,5V
- zvolené parametry modelu $\alpha = 963 \text{ N/cm}$, $c_0 = 53 \text{ N.s/cm}$, $k_0 = 14 \text{ N/cm}$, $c_1 = 930 \text{ N.s/cm}$, $k_1 = 5,4 \text{ N/cm}$ $\gamma = 200 \text{ cm}^{-2}$, $\beta = 200 \text{ cm}^{-2}$, $n = 2$, $A = 207$, $x_0 = 18,9 \text{ cm}$



Obr. 13: Porovnání charakteristik Bouc-Wen modelu s reálným tlumičem

Z Obr. 13 je patrné, že tento model velmi dobře modeluje sílu jak v závislosti na posunutí, tak v závislosti na rychlosti a to i pro rychlosti blízké nule.

Všechny výše uvedené modely jsou navrženy pro konstantní úroveň napětí resp. proudu procházejícího cívkou tlumiče. Pro účely rychlého řízení MR tlumiče je třeba, aby parametrem modelu bylo i vstupní napětí na cívce tlumiče (u).

Proto jsou navrženy následující závislosti:

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (12)$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \quad (13)$$

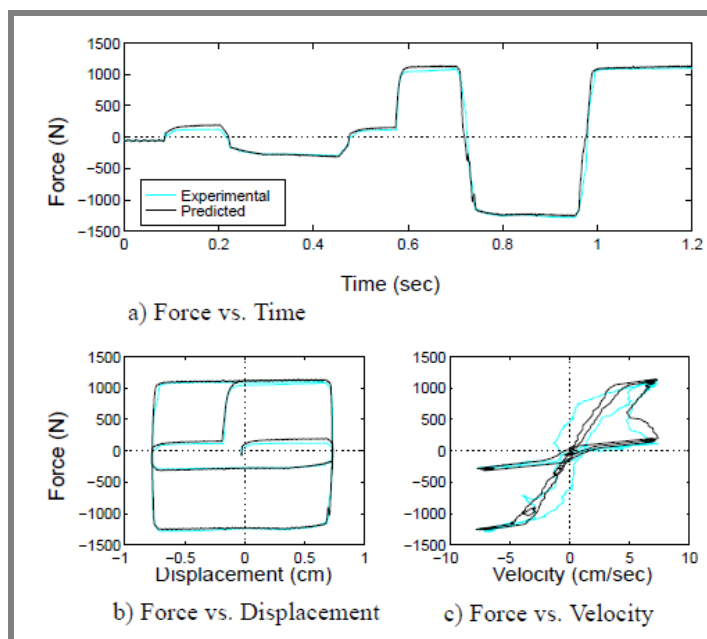
$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (14)$$

Konstanty konkrétního MR tlumiče byly získány numericky pomocí „sequential quadratic programming algorithm“, který je implementován v Matlabu. Vstupní data pro identifikaci modelu tlumiče byla získána z trojúhelníkového průběhu závislosti polohy pístu na čase a jednotkového skoku napětí. Zjištěné konstanty jsou v Tab. 1:

Parameter	Value	Parameter	Value
c_{0a}	21.0 N·sec/cm	α_a	140 N/cm
c_{0b}	3.50 N·sec/cm·V	α_b	695 N/cm·V
k_0	46.9 N/cm	γ	363 cm ⁻²
c_{1a}	283 N·sec/cm	β	363 cm ⁻²
c_{1b}	2.95 N·sec/cm·V	A	301
k_1	5.00 N/cm	n	2
x_0	14.3 cm	η	190 sec ⁻¹

Tab. 1: Konstanty měřeného MR tlumiče

Z Obr. 14 je patrné, že model je přesný pro závislost síly na čase a posunutí na čase. F-v charakteristika ale není zcela přesná.



Obr. 14: Porovnání odezvy jednotkového skoku napětí modelu a reálného tlumiče

Zhodnocení řešerše

- Shrnuty 4 parametrické modely MR tlumiče, experimentálně vyzkoušeny na MR tlumiči vlastní konstrukce
- Binghamský model je pro model MR tlumiče nevhodný, protože špatně předpovídá sílu v oblasti nízkých rychlostí
- Model Gamota-Filisco dobře modeluje jak F-z tak F-v charakteristiku, ale je náročné určit parametry pro konkrétní tlumič
- Jednoduchý Bouc-Wen model špatně modeluje oblasti nízkých rychlostí
- Jako nejlepší se jeví nový Bouc-Wen model. Parametry konkrétního modelu byly získány numericky pomocí modelu „sequential quadratic programming algorithm“ v Matlabu
- Bouc-Wen model byl rozšířen i o parametr proudu
- Pro harmonický, obdélníkový i trojúhelníkový signál je vysoká míra shody mezi Bouc-Wen modelem a skutečným MR tlumičem, pro náhodný signál již shoda není úplná
- Autoři uvádějí že indukčnost cívky je 40 mH , není ale popsáno, jak indukčnost změřili, také není jasné, zda měřili indukčnost s MR kapalinou, nebo bez. Při odporu samotné cívky 4Ω je časová konstanta $L/R = 40 \cdot 10^{-3} / 4 = 10 \text{ ms}$
- Autoři uvádějí časovou konstantu tlumiče s regulátorem 8 ms , tuto konstantu ale chápou jako čas nutný k dosažení $10\text{-}90\%$ požadované síly. Není popsáno jakým způsobem byl tlumič řízen.

3.1.2. SEONG, Min-Sang; CHOI, Seung-Bok; HAN, Young-Min.

Damping force control of a vehicle MR damper using a Preisach hysteretic compensator.

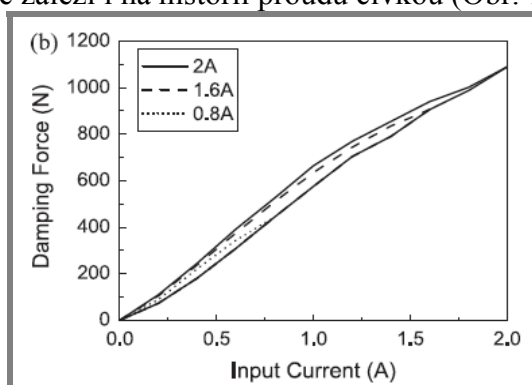
Smart materials and structures. 2009, no. 18, s. 1-13.

CHOI, Seung-Bok; SEONG, Min-Sang; HA Sung-Hoon.

Vibration control of an MR vehicle suspension system considering both hysteretic behavior and parameter variation.

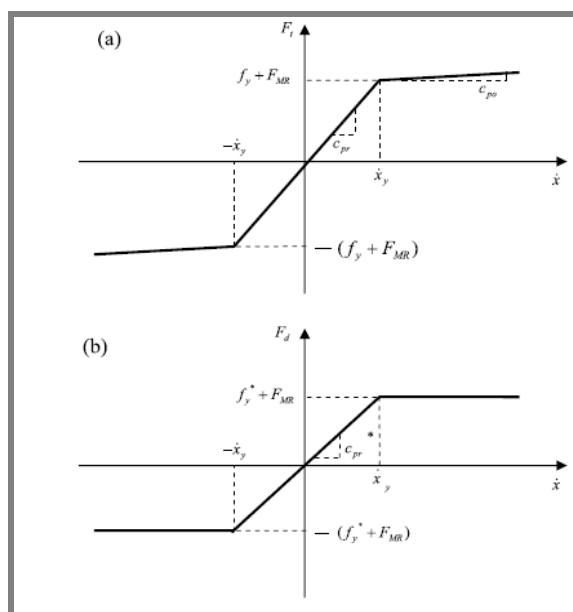
Smart materials and structures. 2009, no. 18, s. 1-14.

Článek se zabývá jevem magnetické hystereze. Síla tlumiče není dána jen aktuálním proudem do cívky, ale záleží i na historii proudů cívkou (Obr. 15).



Obr. 15: Hysterezní chování MR tlumiče v závislosti na proudu cívkou

Tlumič je modelován zjednodušeným bi-viscous modelem (tzn. po mezi kluzu je síla tlumiče nezávislá na rychlosti pístu).



Obr. 16: Bi-viscous model a) a zjednodušený bi-viscous model MR tlumiče b)

Tento model je doplněn kompenzátorem hystereze typu Preisach.

síla tlumiče F_t je určena jako:

$$F_t = \begin{cases} c_{pr} \cdot \dot{x} & -\dot{x}_y \leq \dot{x} \leq \dot{x}_y \\ c_{po} \cdot \dot{x} + f_y + F_{MR} & \dot{x} > \dot{x}_y \\ c_{po} \cdot \dot{x} - (f_y + F_{MR}) & \dot{x} < -\dot{x}_y \end{cases} \quad (15)$$

kde \dot{x}_y je rychlost při které dochází k mezi kluzu (závislé na proudu) výpočet je:

$$\dot{x}_y = a \cdot i_B^2 + b \cdot i_B + c$$

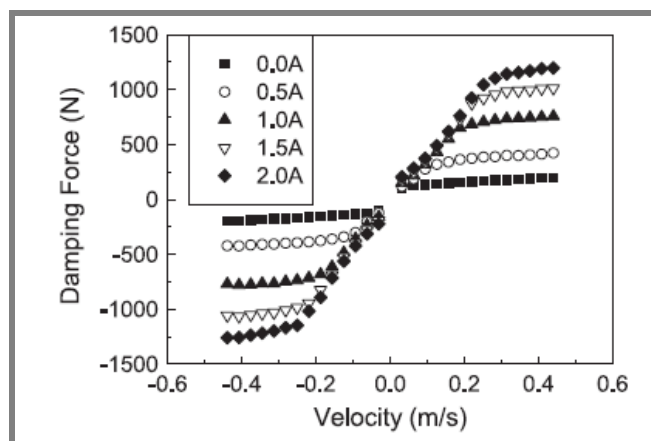
Konstanty a, b, c jsou experimentálně zjištěny stejně tak jako c_{pr}, c_{po} .

Vzorec pro F_t lze pak dále zjednodušit na:

$$F_d = \begin{cases} c_{pr}^* \cdot \dot{x} & -\dot{x}_y \leq \dot{x} \leq \dot{x}_y \\ f_y^* + F_{MR} & \dot{x} > \dot{x}_y \\ -(f_y^* + F_{MR}) & \dot{x} < -\dot{x}_y \end{cases} \quad (16)$$

Experiment

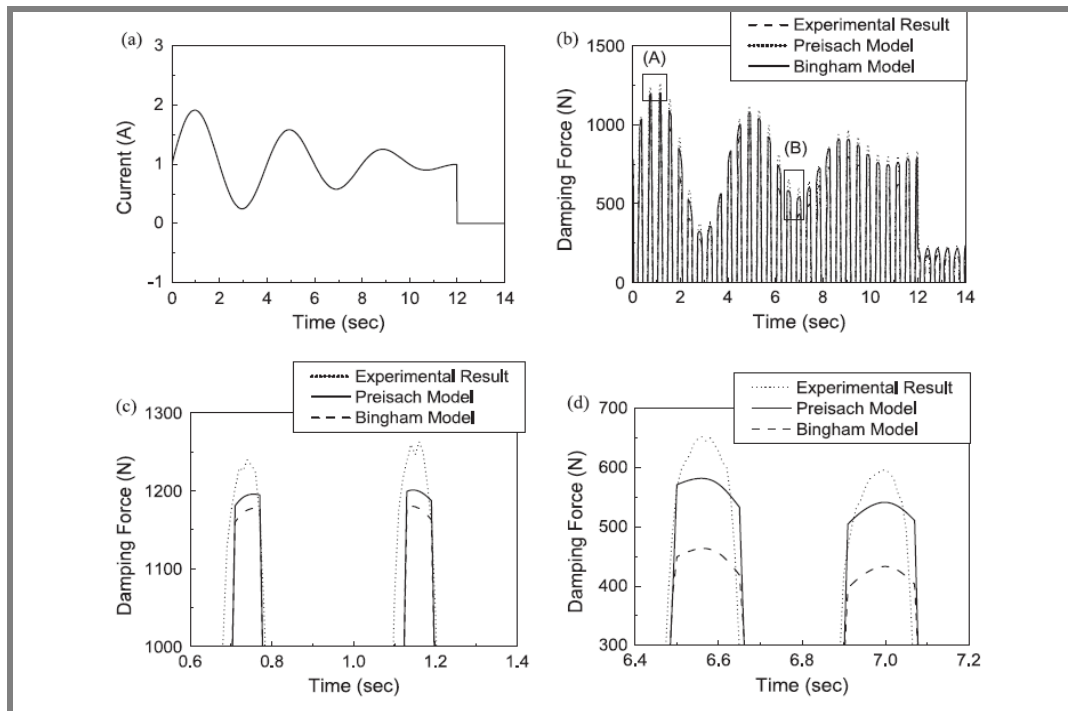
Použit tlumič Delphi Magneride. Na začátku je provedena identifikace parametrů tlumiče.



Obr. 17: F-v charakteristika MR tlumiče Delphi

Síla může být měněna od cca 250N do 1250.

Dále byla změřena frekvenční šířka pásma tlumiče pomocí sweep signálu a proudu 2A. Bylo zjištěno, že mezní frekvence je 38Hz což by mělo být dostatečně rychlé pro semiaktivní odpružení odpružené hmoty (1-2Hz).



Obr. 18: Porovnání modelů s naměřenými daty

Na závěr se testuje odpružení se skyhook algoritmem, sestaví se čtvrtinový model automobilu a dělá se přejezdová zkouška. Porovnává se Binghamův model s navrženým bi-viscous modelem s Preisach kompenzátorem. Ukazuje se, že regulátor s kompenzací hystereze reguluje o něco lépe než regulátor bez kompenzace hystereze (Obr. 18).

Zhodnocení řešení

- Síla MR tlumiče závisí na historii proudů tlumičem, v přesném modelu MR tlumiče je třeba tento parametr zahrnout
- Autoři vycházejí z velmi zjednodušeného modelu MR tlumiče, i porovnání provádějí s velmi přibližným modelem MR tlumiče. F-v charakteristika vychází bez hystereze v závislosti na rychlosti, autoři nepopisují, zda je v tlumiči stlačený plyn.
- Autoři použili na kompenzaci magnetické hystereze Preisach kompenzátor
- V článku není popsána příčina hystereze závislosti síly na proudu – pravděpodobně remanentní indukce materiálu.
- Obr. 18 ukazuje, že navrhovaný model, ani Binghamův model nemodeluje sílu správně. Na grafu c) je patrné značné zpoždění modelu oproti reálnému tlumiči při náběhu proudu (zpoždění cca 20ms).
- Obr. 15 ukazuje graf závislosti síly na proudu – tato závislost ale platí jen pro určitou rychlost správně by se místo síly měla uvádět magnetická indukce, která teoreticky při všech rychlostech pístitnice zůstane stejná.

3.2. Algoritmy řízení MR tlumiče

3.2.

3.2.1. KARNOPP, D.; CROSBY, M.J; HARWOOD, R.A.

3.2.1.

Vibration Control Using Semi-Active Force Generators.

Journal of Engineering for Industry. 1974, no. 96, s. 619-626.

LIU, Y.; WATERS, T.P.; BRENNAN, M.J.;

A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances.

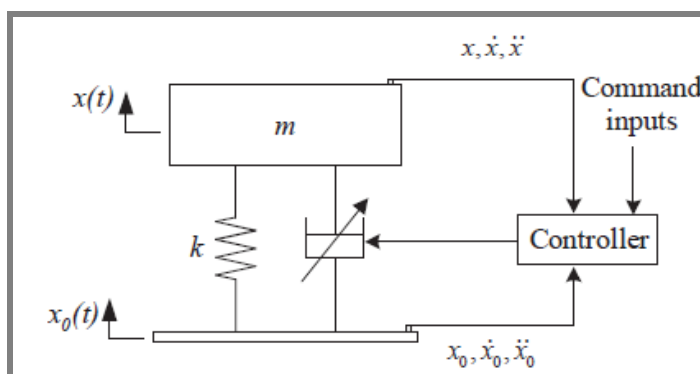
Journal of Sound and Vibration. May 2003, 280, s. 21-39.

Tým D. Karnoppa poprvé popsal možnosti semiaktivního řízení. Poprvé je zde představen algoritmus řízení odpružení odpružené hmoty - skyhook control. Druhý článek a kapitola 2.2.2 vychází ze skyhook algoritmu a navrhuje další možné algoritmy řízení systémů semiaktivního odpružení.

V článku jsou popsány metody řízení:

- adaptivní pasivní
- skyhook
 - on-off
 - continuous
- balance control
 - on-off
 - continuous

Vlastnosti se zkoumají na systému s jedním stupněm volnosti



Obr. 19: Schéma systému s jedním stupněm volnosti a říditelným tlumičem

Adaptivní pasivní

- Pasivní odpružení dokáže dobře izolovat ve frekvencích $\omega/\omega_n > 2^{1/2}$ kde ω je budící frekvence a ω_n je vlastní frekvence.
- Zvýšením tlumícího koeficientu ve frekvencích $\omega/\omega_n \leq 2^{1/2}$ se na amplitudové charakteristice zmenší amplituda v rezonanci, ale zhorší se odpružení na vyšších frekvencích

Z výše uvedených bodů je odvozeno pravidlo na řízení adaptivních pasivních systémů:

$$c = \begin{cases} c_{max}, & r.m.s.(\ddot{x}) \geq r.m.s.(\ddot{x}_0) \\ c_{min}, & r.m.s.(\ddot{x}) < r.m.s.(\ddot{x}_0) \end{cases} \quad (17)$$

Pokud je efektivní hodnota zrychlení odpružené hmoty větší než je efektivní hodnota zrychlení budícího signálu, tlumič se přepne na maximální tlumení, v opačném případě se tlumič přepne na minimální tlumení.

efektivní hodnota zrychlení se počítá za čas mnohem delší než je délka jedné periody budícího signálu.

Tento algoritmus je vhodný zejména pro odpružení harmonických budících signálů.

Skyhook

Tento algoritmus je nadefinován tak, že pokud rychlost odpružené hmoty a relativní rychlost odpružené ku neodpružené hmotě má stejné znaménko (tzn. odpružená hmota jde nahoru a tlumič se roztahuje, nebo odpružená hmota jde dolů a tlumič se stlačuje), aplikuje se síla dle vzorce:

$$F_{sa} = \begin{cases} c_{sky}\dot{x}, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0 \\ 0, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

On-off skyhook

Jedná se o jednodušší verzi skyhook řízení, kdy pokud tlumič má generovat sílu, je přepnut na nejvyšší možné tlumení ($c_{sky} = c_{max}$), pokud nemá generovat sílu, je vypnut.

Continuous balance control

Alternativa ke skyhook control. Tento algoritmus se snaží vyrušit sílu pružiny pomocí tlumiče. Vstupem do algoritmu je relativní posun a relativní rychlost mezi odpruženou hmotou a základnou. Zrychlení odpružené hmoty lze vyjádřit jako:

$$\ddot{x} = -\frac{1}{m}(F_k + F_d) \quad (19)$$

kde F_k je síla pružiny a F_d je síla tlumiče

$$F_k = k(x - x_0), \quad F_d = c(\dot{x} - \dot{x}_0) \quad (20)$$

Absolutní hodnota zrychlení tedy je:

$$|\ddot{x}| = \frac{|F_k| + |F_d|}{m}, (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0 \leq 0) \quad (21)$$

$$|\ddot{x}| = \frac{|F_k| - |F_d|}{m}, (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0 > 0) \quad (22)$$

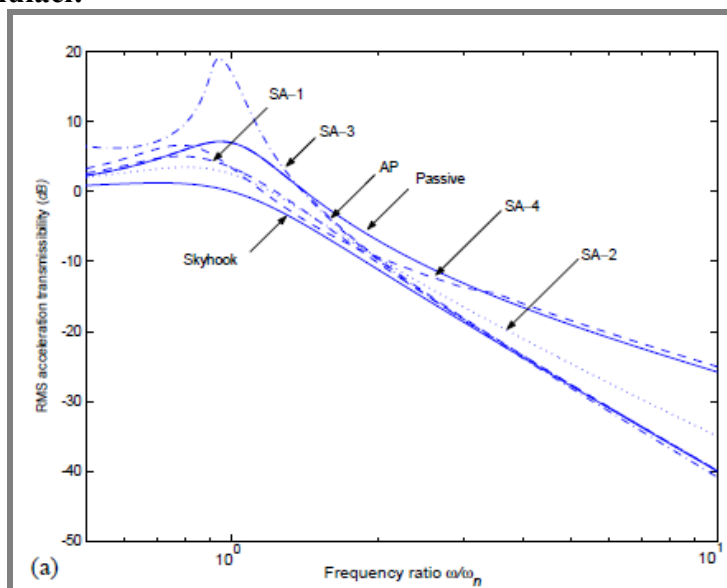
Aby bylo zrychlení odpružené hmoty co nejmenší, tlumič by měl generovat sílu podle vzorce:

$$F_{sa} = \begin{cases} -k(\dot{x} - \dot{x}_0), & (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0 \leq 0) \\ 0 & , (x - x_0)(\dot{x} - \dot{x}_0 > 0) \end{cases} \quad (23)$$

On-off balance control

Opět vychází z continuous balance control, jen není možné tlumicí koeficient měnit spojitě, ale k dispozici jsou jen 2 stavy – největší možné tlumení a nejmenší možné tlumení.

U simulací vychází, že u on-off způsobu řízení dojde k rychlému přepínání charakteristik tlumiče, což by vedlo k drnčení. U reálných systémů s frekvenčním přenosem typu dolní propust by měl být tento problém do jisté míry kompenzován.

Výsledky simulací:

Obr. 20: Porovnání přenosů pro různé algoritmy řízení. SA-1 - continuous skyhook, SA-2 on-off skyhook SA3-continuous balance control, SA-4 on-off balance control, AP - adaptivní pasivní

- Všechny výše popsané semiaktivní způsoby řízení oproti pasivním zlepšují izolaci od vibrací odpružené hmoty na vyšších frekvencích
- Skyhook control podává nejlepší výsledky v celém frekvenčním spektru
- Pro harmonické signály podává dobré výsledky i adaptivní pasivní systém, pro obecné signály ale jeho výsledky budou horší

Zhodnocení řešerše

- Pro regulaci pomocí skyhook, resp. groundhook algoritmu je třeba měřit zrychlení resp. rychlost odpružené hmoty a relativní posunutí odpružené a neodpružené hmoty.
- Pro regulaci pomocí hybrid control je třeba měřit jen vzájemný posun odpružené a neodpružené hmoty, relativní rychlost se získá derivací.
- Skyhook i balance control zhorší přítlak kola na vozovku.
- Groundhook control vylepší přítlak kola na vozovku, ale zhorší kvalitu odpružení odpružené hmoty.
- Simulace byly provedeny na systému s jedním stupněm volnosti což by pro porovnání algoritmů kvality odpružení odpružené hmoty mělo být dostatečné, ale nezkoumají jaký vliv mají regulační algoritmy na chování neodpružené hmoty.

- Autoři kvalitu odpružení s jednotlivými algoritmy jen simulují, nepočítají s dynamickým chováním MR tlumiče.
- On-off verze řízení je na hardware jednodušší, ale kvalita odpružení není tak dobrá jako u continuous variant, navíc hrozí riziko drnčení – pokud se tlumič bude velmi rychle přepínat z jednoho stavu do druhého.
- Popsaný způsob adaptivního pasivního algoritmu je vhodný zejména pro harmonické budící signály.

3.2.2. AHMADIAN, Mehdi; GONCALVES, Fernando D.; SANDU Corina.

An experimental analysis of suitability of various semiactive control methods for magneto-rheological vehicle suspensions.

Smart materials and structures. 2005, vol. 5760, s. 208-216.

Článek vysvětluje princip a porovnává 5 regulačních algoritmů

- Skyhook
- Groundhook
- Hybrid
- Displacement skyhook
- Relative displacement skyhook (balance control)

Algoritmy testují na systému s dvěma stupni volnosti, algoritmy tedy mohou být zkoumány i z pohledu přítlaku kola na vozovku.

Groundhook

Je nedefinován tak, že pokud je rychlost neodpružené hmoty (vůči povrchu země) opačná jako relativní rychlost odpružené ku neodpružené hmotě (tzn. pokud jde kolo nahoru od povrchu a tlumič se stlačuje, nebo pokud jde směrem k povrchu a tlumič se roztahuje) aplikuje se síla dle vzorce:

$$\begin{aligned} -v_2 v_{12} \geq 0 & \quad F_{sa} = c_{gnd} v_2 \\ -v_2 v_{12} < 0 & \quad F_{sa} = 0 \end{aligned} \tag{23}$$

kde

v_2 – rychlost neodpružené hmoty

c_{gnd} – groundhook tlumicí koeficient

x_1 – poloha odpružené hmoty

v_1 – rychlost odpružené hmoty

v_{12} – relativní rychlost odpružené ku neodpružené hmotě

F_{sa} – vypočtená síla semiaktivního tlumiče

c_{sky} – skyhook tlumicí koeficient

Hybrid control

jedná se o kombinaci skyhook a groundhook, kde každému z algoritmů je možné přiřadit rozdílnou váhu.

$$\begin{cases} v_1 v_{12} \geq 0 & \sigma_{sky} = v_1 \\ v_1 v_{12} < 0 & \sigma_{sky} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} -v_2 v_{12} \geq 0 & \sigma_{gnd} = v_2 \\ -v_2 v_{12} < 0 & \sigma_{gnd} = 0 \end{cases}$$

$$F_{sa} = G[\alpha \sigma_{sky} + (1 - \alpha) \sigma_{gnd}]$$

Výsledná síla se vypočítá jako součet příspěvků Groundhook a skyhook algoritmu.

G – koeficient zesílení

Displacement skyhook:

Tento algoritmus je modifikací Balance control (relative displacement control). Síla se vypočítá jako:

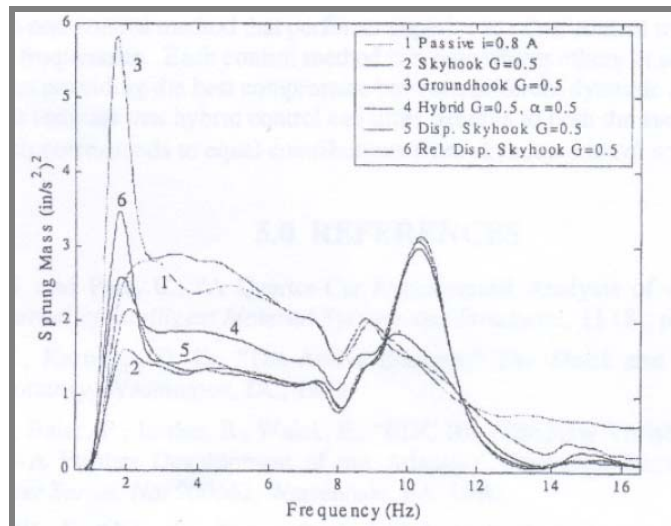
$$\begin{aligned} x_1 v_{12} \geq 0 & \quad F_{sa} = c_{sky} v_1 \\ x_1 v_{12} < 0 & \quad F_{sa} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Experiment

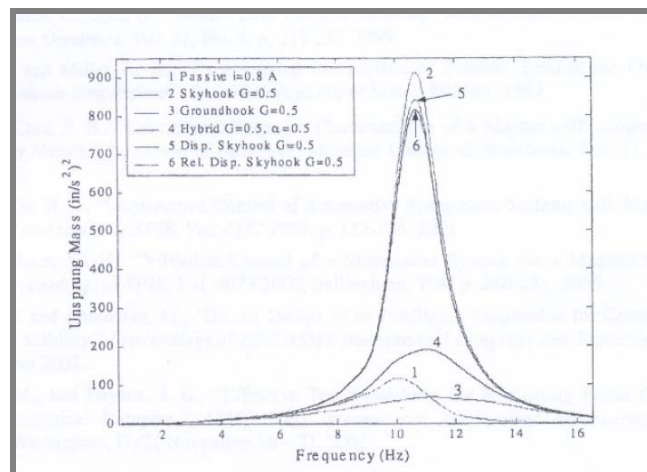
Kvalita odpružení pomocí výše uvedených algoritmů byla testována na čtvrtinovém modelu automobilu, pohon byl zajištěn hydraulickým aktuátorem. Budicí signál byl rozmítaný harmonický v rozmezí frekvencí 0–16 Hz Pneumatika byla nahrazena elastomerovými vložkami, které byly umístěny mezi aktuátor a neodpruženou hmotu. Parametry modelu byly nastaveny aby přibližně odpovídaly osobnímu automobilu:

- hmotnost odpružené hmoty – $m_1 = 431$ kg
- hmotnost neodpružené hmoty – $m_2 = 45,4$ kg
- tuhost pružiny – $k_s = 35\,120$ N/m
- tuhost pneumatiky – $k_t = 190\,524$ N/m

Porovnání kvality odpružení je na obrázcích Obr. 21 a Obr. 22. Z obrázků je patrné, že nejlepšího odpružení odpružené hmoty je dosaženo s algoritmem skyhook, nejhoršího s algoritmem groundhook. Hybrid control byl nastaven na váhu 0,5, tzn. přikládá stejnou váhu skyhook i groundhook algoritmu. I s touto váhou je hybrid control lepší než displacement skyhook. Pro odpružení neodpružené hmoty je nejlepší algoritmus groundhook, nejhorší je skyhook. ze skyhook algoritmů je na odpružení neodpružené hmoty nejlepší relative displacement.



Obr. 21: frekvenční přenos zrychlení odpružené hmoty



Obr. 22: frekvenční přenos zrychlení neodpružené hmoty

Zhodnocení řešení

- Experiment byl prováděn na čtvrtinovém modelu automobilu se dvěma stupni volnosti.
- Jako náhrada pneumatiky byl použit elastomerovými vložkami – chování pravděpodobně nebude zcela shodné s pneumatikou.
- Jsou uvedeny frekvenční přenosy zrychlení pro odpruženou a neodpruženou hmotu, pro neodpruženou hmotu ale chybí informace o fázovém posuvu, není tedy možné určit velikost přitlaku na vozovku .
- Byly navrženy algoritmy, které by měly zlepšit bezpečnost jízdy – groundhook a hybrid control.
- Displacement skyhook je ze skyhook algoritmů nejlepší na odpružení neodpružené hmoty.
- Jako nejlepší varianta se jeví použití hybrid control, která oproti pasivnímu závěsu výrazně zlepšila jak odpružení odpružené tak neodpružené hmoty.

- Pro hybrid control je uvedena charakteristika jen pro jedno nastavení váhy příspěvku skyhook resp. groundhook algoritmu.
- Kvalita odpružení odpružené hmoty je vyjádřena jako integrál zrychlení odpružené hmoty, kvalita neodpružené hmoty je vyjádřena jako integrál zrychlení neodpružené hmoty, ve zdroji [1] je jako hodnotící parametr bezpečnosti jízdy integrál střídavé složky přitlaku kola (směrodatná odchylka svislého zatížení kola) na vozovku.

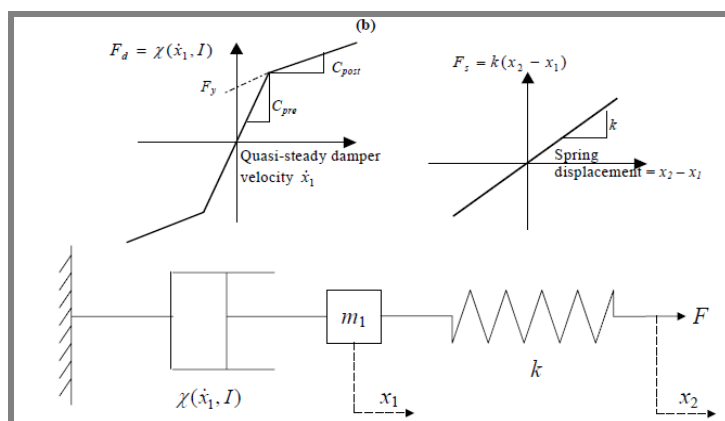
3.2.3. BATERBEE, D.; SIMS, N.D.

Temperature sensitive controller performance of MR dampers

Journal of Intelligent Material Systems and Structures. February 2009, vol. 20, s. 297-309.

3.2.3.

Cílem bylo zjištění vlivu teploty na chování MR tlumiče. Autoři používají svůj model tlumiče (Batterbee, Sims), který je jednodušší než Bouc-Wen. Model se skládá z pružiny sériově spojené s hmotností a bi-viskózního tlumiče s nelineární závislostí síly na rychlosti \dot{x}_1 a řídicím signálem I (Obr. 23). Tlumič má v závislosti na rychlosti dvě různé viskozity – C_{pre} – viskozita před mezí kluzu a C_{post} – viskozita po mezi kluzu. Pružina o tuhosti k charakterizuje pružnost plynové náplně tlumiče a určuje šířku hysterezní křivky. Hmotnost m_1 je hmotnost MR kapaliny v tlumiči. C_{pre} považují autoři za teplotně nezávislou a velikost je 411 KNsm^{-1} .



Obr. 23: Model MR tlumiče

Experiment

Testovací aparatura:

- Servo-hydraulický válec INSTRON vč. měření zdvihu a síly
- MR tlumič LORD RD-1005
- PC s měřicí kartou NI PCI-MIO-16XE-10
- Proudový zesilovač KEPCO BOP
- Vodní chlazení vlastní výroby

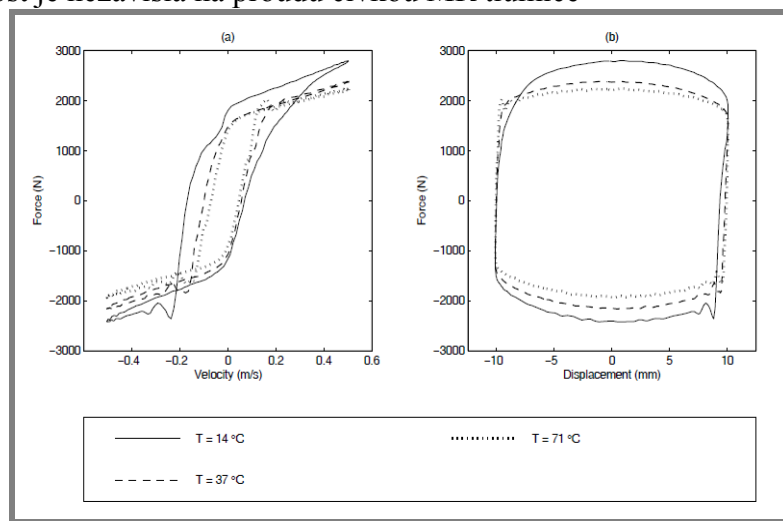
Měřila se F-v charakteristika tlumiče, pro určení viskozity C_{post} se používal se sinusový excitační signál o amplitudě 10 mm a frekvenci 8 Hz (max. rychlost je $0,5 \text{ m/s}$). Pro určení meze kluzu se používal sinusový excitační signál o amplitudě 5 mm a frekvenci 4 Hz . Mez kluzu byla zjištěna jako průsečík osy y s přímkou získanou aproximací části F-v charakteristiky po mezi kluzu. Offset síly způsobený

tlakem stlačeného plynu se zanedbává. Proudly byly mezi $0-1 A$, teplota byla v rozmezí $15 - 75^{\circ}C$.

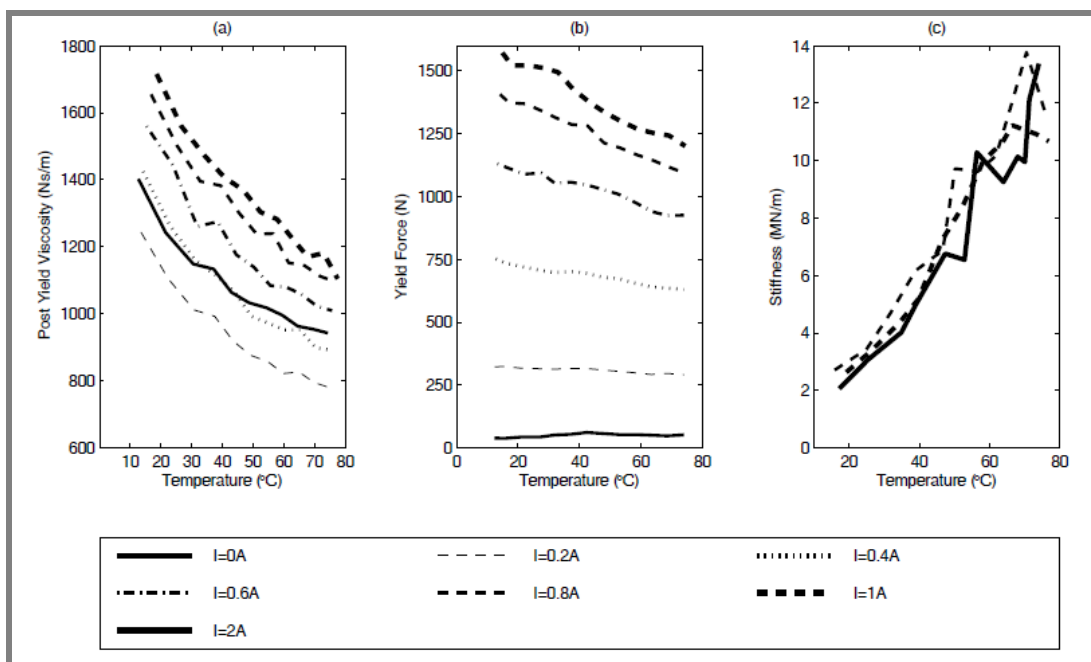
Diskuze výsledků:

Byly zjištěny následující poznatky:

- s rostoucí teplotou klesá síla F_y (tím i mez kluzu MR kapaliny) – při proudu $0,2 A$ je pokles meze kluzu o 22 %.
- směrnice F-v charakteristiky po mezi kluzu s rostoucí teplotou klesá (pokles viskozity MR kapaliny) – při proudu $0,8A$ je pokles viskozity 34 %
- šířka hysterezní křivky se s rostoucí teplotou zmenšuje (způsobeno nárůstem tlaku plyné náplně)
- nárůst tuhosti plynové náplně byl ve sledovaném rozmezí teplot 300 %, tuhost je nezávislá na proudu cívku MR tlumiče



Obr. 24: F-v a F-z charakteristika MR tlumiče při $I = 1A$



Obr. 25: Závislost viskozity C_{pos} a), meze kluzu F_y b) a tuhosti tlumiče k c)

Pokles naměřené viskozity, pokles meze kluzu a nárůst tuhosti stlačeného plynu byly aproximovány lineární závislostí podle tabulky:

proud [A]	změna viskozity [Ns/m/°C]	viskozita při 15°C [Ns/m]	změna meze kluzu [N/°C]	mez kluzu při 15°C [N]	změna tuhosti [kN/m/°C]	tuhost při 15°C [kN]
0	-6.78	1400	0.19	41	150	1500
0.2	-7.07	1265	-0.53	331	150	1500
0.4	-8.11	1451	-1.87	766	150	1500
0.6	-8.74	1616	-3.47	1178	150	1500
0.8	-8.91	1734	-5.26	1481	150	1500
1	-9.43	1824	-6.42	1667	150	1500

Tab. 2: Koeficienty použité pro teplotně závislý model MR tlumiče

V druhé části článku se provedla metodou hardware-in-the-loop-simulace (HILS) skyhook algoritmu s různými regulátory proudu. Tato metoda spočívá v tom, že na jednom počítači se simuluje reálný systém (v tomto případě závaží na pružině) kde jedním vstupem je síla z MR tlumiče a výsledky této simulace (rychlost pohybu závaží) se pomocí aktuátoru (hydraulický válec) přivádí jako vstup pro reálný MR tlumič.

Autory bylo navrženo několik regulátorů proudu:

1 Proporčně-integračně derivační regulátor (PID)

Proud, který se má pustit do cívky se vypočítá jako:

$$I = K_p e + K_i \int e + K_d \dot{e} \quad (26)$$

kde e je rozdíl mezi žádanou silou a skutečnou silou, K_p , K_i , K_d jsou zesílení proporční, integrační a derivační složky. Experimentálně byly zjištěny pomocí metody Ziegler-Nicholse na $K_p = 5 \times 10^{-4} \text{ AN}^{-1}$, $K_i = 0,2 \text{ AN}^{-1}$, $K_d = 3,13 \times 10^{-7} \text{ AsN}^{-1}$.

2 Proporční regulátor (P)

Proud cívkou se počítá jako:

$$I = (F_d - BF)G \quad (27)$$

kde B je zesílení zpětné vazby a G je zesílení regulátoru a byly experimentálně zjištěny $B = 0,6$ a $G = 0,0012 \text{ AN}^{-1}$.

3 Gain Scheduling regulátor (GS)

Tento regulátor nemá jako vstupní parametr rychlost, vstupem je pouze žádaná síla. Síla tlumiče se vypočítá podle vzorce:

$$F_q(I) = F_y(I) + C_{post}(I)v_p \quad (28)$$

kde v_p se bere jako konstanta (v tomto případě $v_p = 0,25 \text{ m/s}$). Proud pro požadovanou sílu se najde v tabulce, která musí být nahrána v regulátoru

4 ON/OFF (OO control)

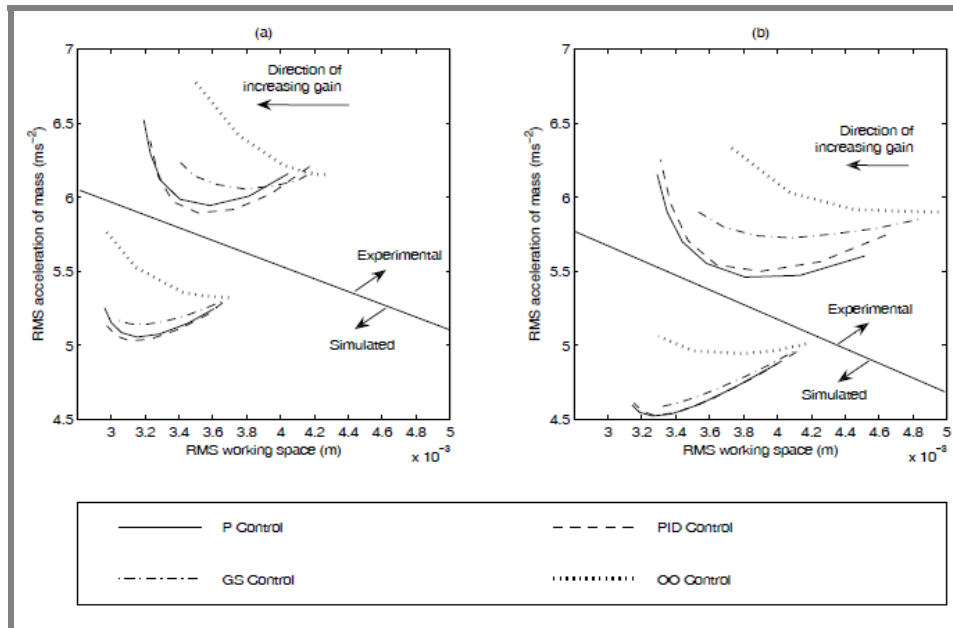
Proud může nabývat pouze dvou hodnot – nulová a maximální, řídí se podle rovnice:

$$I = I_{max} \text{ pokud } \dot{x}_m(x_m - \dot{x}_b) \geq 0 \quad (29)$$

Účinnost jednotlivých regulátorů se vyhodnocovala ze dvou parametrů:

- RMS zrychlení odpružené hmoty
- RMS pracovního zdvihu tlumiče

Závislost je vynesena na obrázku Obr. 26:



Obr. 26: Závislost RMS zrychlení odpružené hmoty na RMS zdvihu tlumiče pro a) nízkou teplotu, b) vysokou teplotu

Experimentální data se liší od vypočítaných. Autoři tento rozdíl vysvětlují tím, že v modelu je zanedbána dynamika aktuátoru, nicméně je ověřeno, že pořadí kvality odpružení s různými regulátory je shodné jak pro simulaci, tak pro reálný tlumič. Nejlepšího odpružení se dosahuje s regulátory P a PID, nejhoršího výsledku dosahuje ON/OFF regulace.

Zhodnocení řešerše:

- Použit jednodušší model než Bouc-Wen, ale není uvedena přesná rovnice pro výpočet síly v závislosti na rychlosti a proudu. Pro využití pro potřeby regulace by tento model měl být poměrně vhodný. Autoři pro výpočet síly používají tab. 2 – z té pro daný proud a teplotu určí sílu kdy dochází k mezi kluzu, viskozitu a tuhost pružiny. Největší nepřesnosti budou v nízkých rychlostech kolem meze kluzu.
- Změny síly v závislosti na teplotě jsou značné a pro výpočet aktuální síly je třeba teplotu zahrnout do modelu, zdá se, že pokles viskozity, meze kluzu, i nárůst tuhosti na teplotě má přibližně lineární charakter.
- Viskozita po mezi kluzu pro proud 0,2 A byla nižší, než pro proud 0A – není vysvětlena příčina. Autoři pravděpodobně měření neopakovali a mohla se projevit degradace MR kapaliny, nebo neodmagnetování MR tlumiče.

- V článku není uvedeno jakým způsobem měřili teplotu a proud cívkou. Autoři používají proudový mód napájení, čili proud by měl být v průběhu měření nezávislý na změně odporů cívky tlumiče
- Se zvyšujícím se tlakem plynné náplně by se měla šířka hysterezní křivky také zvětšovat, autorům se zúžuje
- Ve druhé části je k testování reálného tlumiče použita metoda HILS – síly se měří na reálném tlumiči, posunutí tlumiče může být simulováno pro různé soustavy, které jsou simulovány na PC, kde vstupem do simulace je aktuální síla z reálného tlumiče
- Pro nastavení konstant PID regulátoru je použita metoda Ziegler-Nicholse, Není popsáno jak došli k hodnotě kritického zesílení
- GS má jediný vstup a tím je požadovaná síla. Z principu je v generování požadované síly nepřesný, protože sílu počítá jen jako funkci proudu
- ON/OFF control je v podstatě on-off skyhook control
- P, nebo PID regulace proudu je z hlediska odpružení nejlepší, nejhorší výsledek měl regulátor ON/OFF
- Autoři přičítají horší kvalitu utlumení s reálným tlumičem oproti simulacím dynamikou aktuátoru, je ale možné, že se projevila i dynamika tlumiče s proudovým zdrojem.
- Autoři používají proudový programovatelný zdroj KEPCO BOP – verze 100-4M je schopna dodávat napětí ± 100 V, ± 4 A, při šířce pásma v řádu kHz

3.3. Dynamické chování MR tlumiče

3.3.

3.3.1. KOO, Jeong-Hoi; GONCALVES, Fernando D.; AHMADIAN, Mehdi.

3.3.1

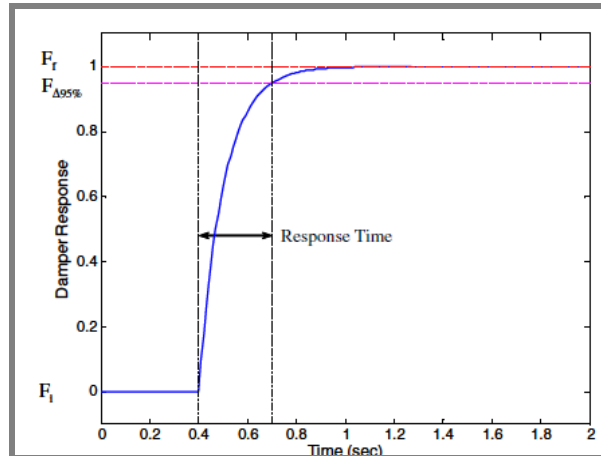
A comprehensive analysis of the response time of MR dampers.
Smart Materials & Structures. January 2006, 15, s. 351-358.

Článek se zabývá zjištěním časové odezvy v závislosti na požadované proudu a rychlosti pístnice.

Tlumič je excitován trojúhelníkovou závislostí polohy na čase na čase, protože rychlost je pak po celý zdvih konstantní. Autoři používali komerčně běžně dostupný MR tlumič Lord Motion Master®.

Tlumič je testován v MTS standu, snímá se

- Síla vyvozovaná tlumičem
- Poloha pístu v závislosti na čase
- Proud procházející cívkou tlumiče



Obr. 27: Definice doby odezvy

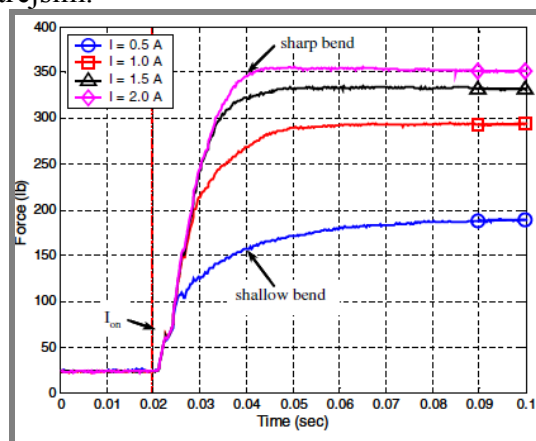
Doba odezvy (Obr. 27) je definována jako časový úsek nutný k dosažení 95% rozdílu požadované a počáteční síly.

Pro simulace je použit Bouc-wen model. Proud se měnil na začátku a konci zdvihu kde je rychlost pístu nulová.

Byly zjišťovány tyto parametry:

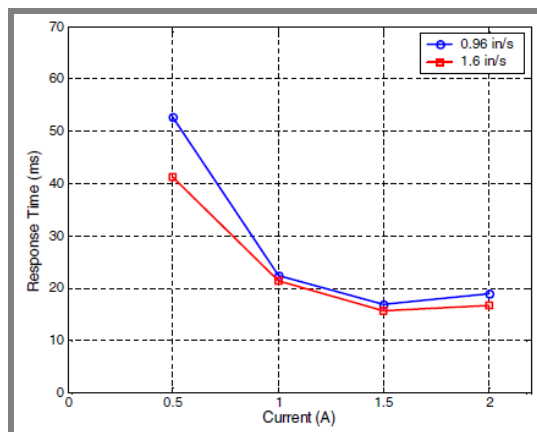
- Závislost časové odezvy tlumiče na velikosti proudu cívku
- Závislost časové odezvy náběhu proudu na velikosti požadovaného proudu

Časová odezva síly v závislosti na proudu cívku je na Obr. 28. Z grafu je patrné, že se vzrůstajícím proudem doba odezvy do proudu $1,5 A$ klesá. Zásadně se ale mění tvar křivky. Zatímco pro malé proudy je ohyb křivky pozvolný, pro větší proudy se ohyb křivky stává ostřejším.



Obr. 28: Časová závislost síly pro různé proudy

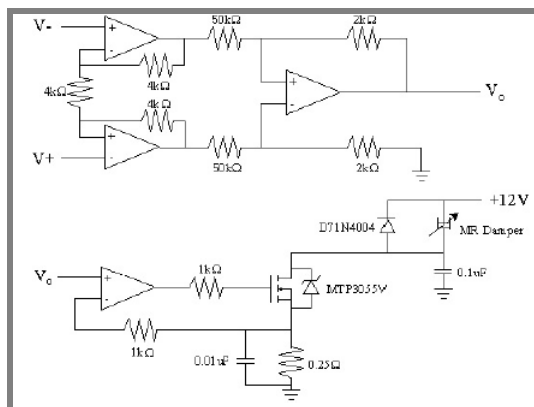
Na Obr. 29 je vynesena změřená závislost doby odezvy v závislosti na proudu cívku. Graf ukazuje, že pokud je vyšší pístová rychlost, je i doba odezvy tlumiče nižší.



Obr. 29: Odezva tlumiče v závislosti na pístové rychlosti

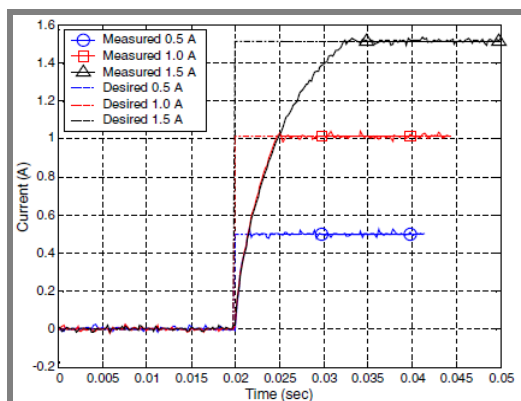
Autoři pro zrychlení odezvy navrhují využít „overdrive“ proudu – tzn. když bude třeba vyvodit sílu odpovídající statickému proudu po odeznění přechodného děje 0,5 A, do dosažení potřebné síly se do cívky bude pouštět maximální povolený proud 2 A a po dosažení této síly se proud sníží na 0,5 A.

V druhé část článku je zkoumána časová odezva proudu cívkou. Jako proudový zdroj používají vlastní zapojení (Obr. 30).



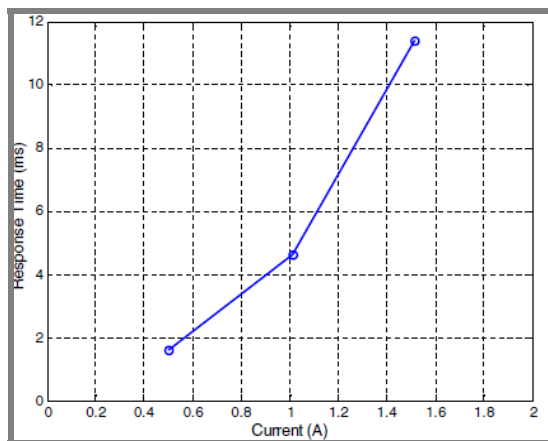
Obr. 30: Zapojení proudového zdroje

Odezva proudu na jednotkový skok je na Obr. 31.



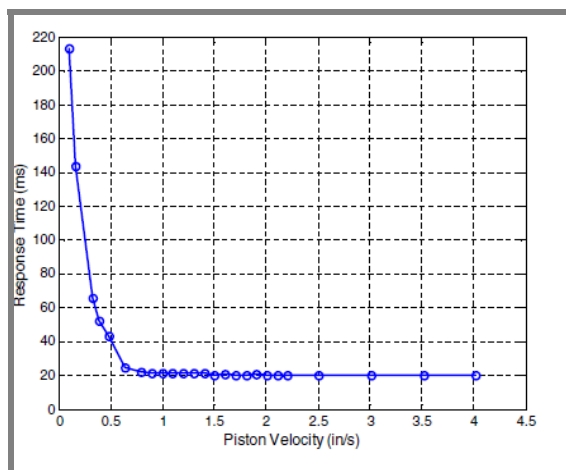
Obr. 31: Časová odezva proudu na jednotkový skok

Odezva řídicí elektroniky se vzrůstajícím požadovaným proudem narůstá podle Obr. 32. Zdá se, že řídicí elektronika v tomto zapojení může dělat více než polovinu času celkové odezvy tlumiče (pro proud 1,5 A je odezva řídicí elektroniky 11 ms, celková doba odezvy tlumiče je 18 μ s).



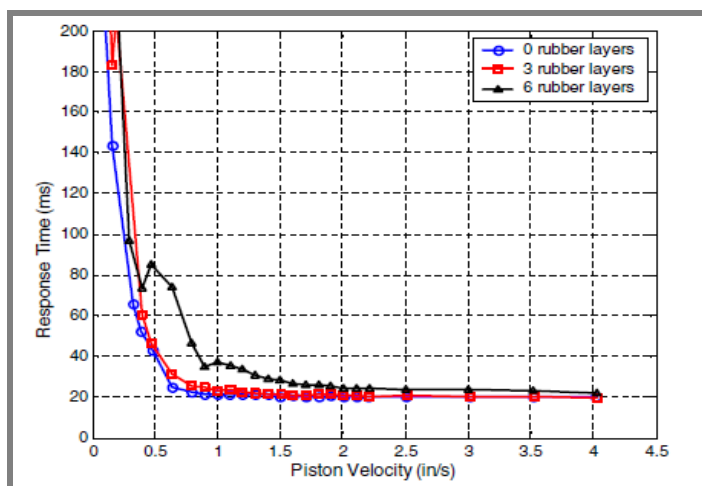
Obr. 32: Závislost doby odezvy řídicího obvodu na proudu

Aby odezva tlumiče byla rychlá, musí být také nejmenší pístová rychlost asi 2 cm/s. Po překročení této pístové rychlosti už další navyšování ztrácí vliv. U malých rychlostí se autoři domnívají, že delší časová odezva je způsobena tuhostí systému. Tuhost může být aproximována pružinou v sérii s tlumičem – je nutné překonat určitou vzdálenost resp. dobu, než se tlumič pohne tak aby stlačil pružinu a začal se stlačovat tlumič.



Obr. 33: Doba odezvy tlumiče v závislosti na pístové rychlosti

Aby se daná teorie ověřila, vložily se mezi uchycení testeru a tlumič kusy gumy. Závěr je, že pokud se do série s tlumičem přidá tato pružnost, odezva tlumiče při malých rychlostech se prodlouží (Obr. 34).



Obr. 34: Vliv pružného uchycení MR tlumiče na délku odezvy

Zhodnocení řešerše

- Na Obr. 28 by bylo dobré zobrazit průběh proudu – pak by bylo patrné, jaká část časové odezvy je způsobena řídicím obvodem a co zbytkem systému.
- Dle firmy Delphi může řídicí počítač měnit tuhost tlumiče až 1000x za sekundu [11]. Časová konstanta MR kapaliny je menší než 1 ms a celková odezva tlumiče je ovlivněna především přechodovým jevem cívky elektromagnetu a řídicí elektroniky.
- Pokud by se použilo zpětnovazebné řízení tlumiče, už i proporční regulátor se zpětnou vazbou od síly by měl fungovat podobně jako „overdrive“ proudu.
- Zapojení zvláště koncového stupně je nestandardní. Kondenzátor paralelně s odporem 0R25 nemá smysl, časová konstanta tohoto filtru je 2,5 μ s. Rezistor 1 k Ω na gate tranzistoru je velký – bude dlouho trvat než se nabije i vybijí kapacita v gate. Ta je asi 17 nC, časová konstanta je tedy 17 μ s. Ve srovnání s časovou konstantou cívky je ale zanedbatelná, čili vyhoví i toto zapojení.
- Závislost rychlosti odezvy řídicího obvodu pro různé proudy je nakreslena jen do proudu 1,5 A. Aproximací by odezva pro proud 2 A vyšla hodnota kolem 20 ms, což je převážná část odezvy tlumiče.
- V článku nejsou přesně popsány podmínky měření jak času odezvy řídicí elektroniky (pístová rychlost) tak času odezvy tlumiče (teplota). Pokud by se při jednotkovém skoku proudu měřila zároveň jak síla, tak proud cívkou, dala by se časová odezva přesně rozdělit na složku způsobenou řídicí elektronikou a složku způsobenou odezvou MR kapaliny. Pro vyloučení vlivu deformace úchytů by bylo dobré měřit posunutí přímo mezi pístnicí a pístem a ne až mezi úchyty tlumiče. Dále není změřen odpor vinutí cívky. Pokud bude odpor cívky malý vůči napájecímu napětí zdroje, závislost doby odezvy na proudu by měla růst zhruba lineárně.
- Výzkum sice prokázal, že pružné uchycení mírně prodlouží dobu odezvy, ta se ale mění jen velmi málo. Změna doby odezvy při malých rychlostech tedy není způsobena jen pružným uchycením.

3.3.2. GONCALVES, Fernando D.; AHMADIAN, Mehdi; CARLSON, J.D.

Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities
Smart Materials & Structures. 22 December 2005, 15, s. 75-85.

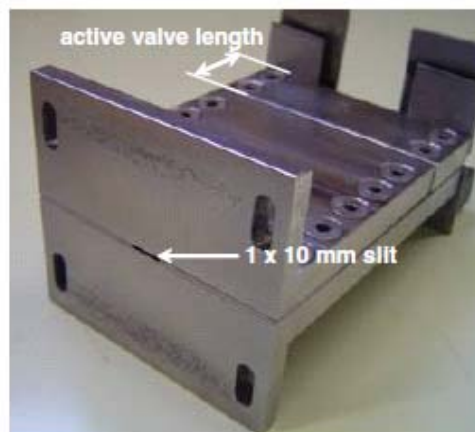
Článek se zabývá vlastnostmi MR kapalin za vysokých tokových rychlostí. Zkoumá se především:

- Změna meze kluzu při různých rychlostech a změna viskozity.
- Vliv délky průletu železné částice aktivní zónou MR tlumiče (místo kde prochází magnetické indukční čáry).

Ukazatel kvality návrhu MR tlumiče definují jako poměr maximální síly (při max. proudu) ku minimální síle (při nulovém proudu).

Tento poměr je možné měnit zejména šířkou štěrby. Část síly kontrolovatelná magnetickým polem není tak závislá na změně šířky štěrby, jako minimální síla tlumiče v neaktivovaném stavu.

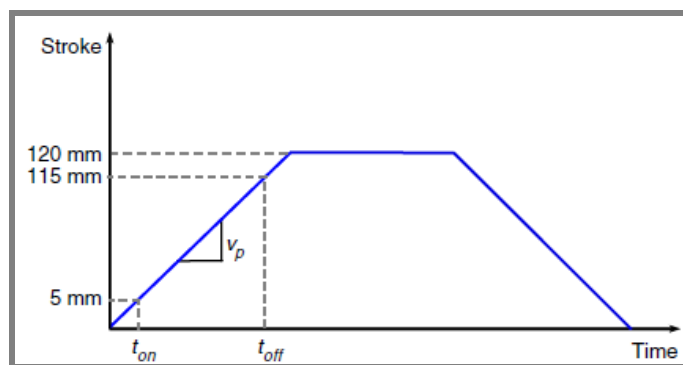
Testy byly prováděny na reometru z nerez oceli, jehož hlavní část je kanálek 10x1 mm (Obr. 35). Intenzita magnetického pole byla měřena Hallovým čidlem. Konstrukce reometru umožňuje změnu délky MR ventilu. Pokud je délka MR ventilu 6,35 mm, je poslední část (MR ventil) je z nízkouhlíkové oceli, pokud je délka MR ventilu 25,4 mm, jsou všechny destičky z nízkouhlíkové oceli.



Obr. 35: Kanálek s MR ventilem

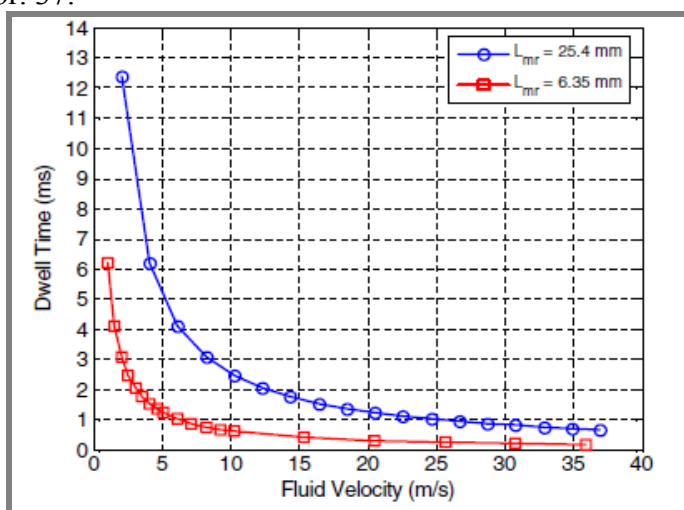
Tlak MR oleje na vstupu reometru byl vyvozován MTS válcem s průběhem posunu pístu na čase podle Obr. 36. Lineární závislost posunu na čase by měla zajistit konstantní rychlost průtoku MR kapaliny kanálkem. Elektromagnet se kvůli redukci rázů do systému zapíná až při vzdálenosti 5 mm od úvratí pístu.

Měří se závislost meze kluzu na době průletu částice aktivní zónou.



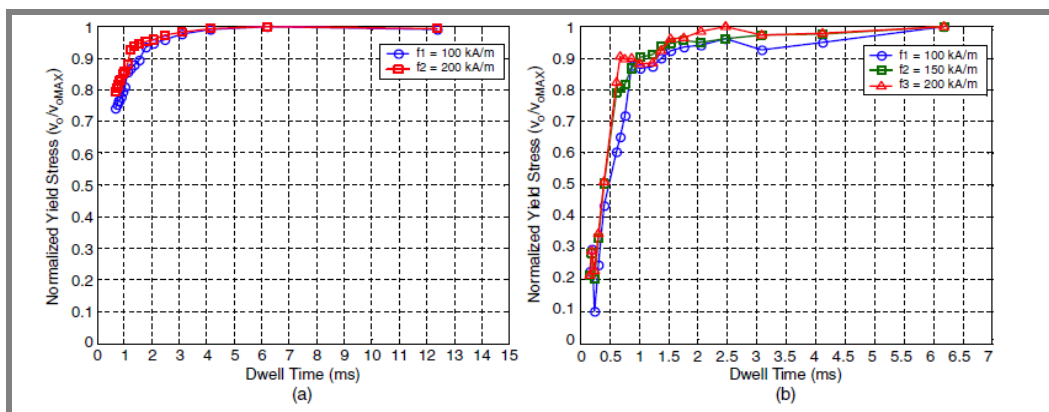
Obr. 36: Časová závislost zdvihu pístu

Testuje se při rychlostech 1 do 37 m/s. Tomu odpovídající doby průletu částic aktivní zónou podle Obr. 37.



Obr. 37: Závislost doby průletu částice aktivní zónou v závislosti na rychlosti proudění MR kapaliny

Obr. 38 ukazuje normalizovanou mez kluzu, tzn. podíl meze kluzu v dané době průletu částice aktivní zónou ku maximální mezi kluzu. Z průběhů je patrné, že při dobách průletu kratších než 1 ms prudce klesá mez kluzu. Normalizovaná mez kluzu při prodlužující se délce průletu částice šterbinou narůstá rychleji pro větší intenzity magnetického pole.



Obr. 38: Normalizovaná mez kluzu v závislosti na době průletu MR částice aktivní zónou

Zhodnocení řešerše

- Z charakteristik je patrné, že aby tlumič správně fungoval, musí být doba průletu částic větší než 1 ms, otázka je, jestli to platí u všech MR kapalin, nebo jestli je minimální doba průletu závislá na poměru železných částic ku množství oleje.
- Z Článků není zcela jasné, jestli prodloužení časové odezvy při malých rychlostech pístu popsané v „A comprehensive analysis of the response time of MR dampers“ souvisí z popisovanou závislostí meze kluzu na délce průletu částice aktivní zónou. Není jasné, zda snížená mez kluzu pro malé rychlosti je časově nezávislá, nebo jestli mez kluzu s časem roste a byla jen změřena dříve, než dosáhla svého maxima. Pokud by jevy byly nezávislé tak by se u tlumičů u malých rychlostí projevovale jednak prodloužení odezvy tlumiče a jednak značný pokles vyvozované síly.
- Není patrné kde Hallovo čidlo bylo. Aby byly hodnoty intenzity magnetického pole správné, museli by měřit přímo v kanálku. Jinak mohlo dojít k nasycení v některé z částí reometru.
- V článku není zohledněna teplota
- Není zřejmé, jestli naměřené časy jsou časovou konstantou MR kapaliny.

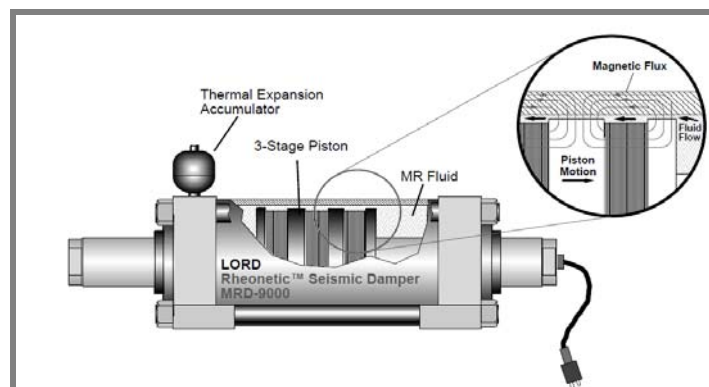
3.3.3. YANG, Guangqinang; SPENCER, Billie F. Jr.; JUNG, Hyung-Jo; CARLSON, David J.

3.3.3.

Dynamic modeling of large-scale magnetorheological damper systems for civil engineering applications.

Journal of Engineereng Mechanics. October 2003, vol.130, no. 9, s. 1107-1114

V článku se zabývají řízením velkého MR tlumiče (MRD-9000), který se používá k utlumení kmitů budov (20 t, zdvih ± 8 cm). V tlumiči jsou 3 cívky, které jsou zapojeny do série. Celková indukčnost cívek je 6,6 H a odpor $R_0=21,9 \Omega$. Tlumič obsahuje 5 l MR kapaliny.

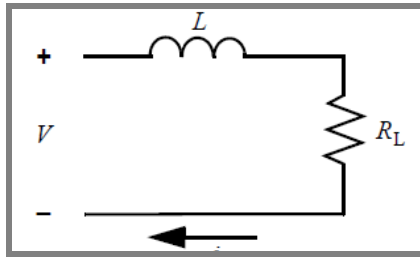


Obr. 39: Tlumič Lord MRD-9000

Článek je rozdělen na dvě části.

V první části je navržen dynamický model řízení MR tlumiče pomocí proudového regulátoru.

Obvod MR tlumiče je modelován podle obrázku:



Obr. 40: Elektrický model MR tlumiče

Rovnice, která popisuje závislost proudu na čase a přiloženém napětí je následující:

$$L \frac{d}{dt} i(t) + R_L i(t) = V(t) = V_H \frac{T_{on}}{T} \quad (30)$$

- L je indukčnost cívky
- $i(t)$ je proud cívkou
- R_L je odpor cívky
- $V(t)$ je napětí na cívce
- V_H je napětí zdroje

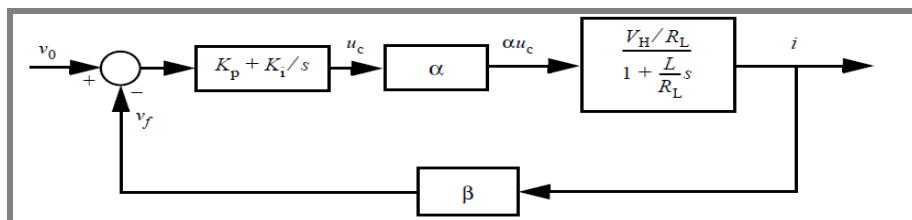
Protože se počítá, že tlumič bude řízen pomocí PWM modulace (obdélkový signál s proměnnou délkou doby vysoké úrovně signálu T_{on} ku době jedné periody T , jehož ekvivalent stejnosměrného signálu je $U_{ss} = U_H \cdot T_{on}/T$). Přiložené napětí je vyjádřeno jako součin napětí zdroje a poměru času kdy je toto napětí připojeno k cívce (T_{on}) tlumiče k celkové délce periody signálu (T).

Pokud se z této diferenciální rovnice vyjádří proud cívkou, dostaneme závislost:

$$i(t) = \frac{V_H T_{on}}{R_L T} \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L} t} \right) = I_s \left(1 - e^{-\frac{R_L}{L} t} \right) \quad (31)$$

Pokud bychom jako řídicí veličinu používali napětí – tzn. že ze známého odporu a požadovaného proudu se vypočítá nutné napětí, které se musí připojit na tlumič, čas k dosažení 95 % požadovaného proudu je roven $3L/R_L$.

Pro zrychlení doby odezvy tlumiče je výhodnější použít proudového zdroje. Regulace proudového zdroje je realizována jako PI regulátor. Blokové schéma obvodu regulátoru proudu s připojeným tlumičem je na obrázku níže:



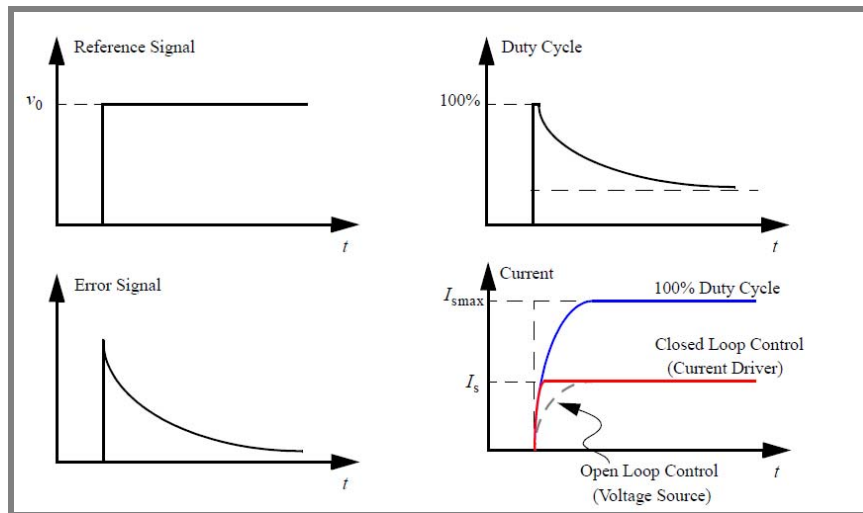
Obr. 41: Blokové schéma regulátoru proudu

v_0 je požadovaný proud, v_f je skutečný proud. Blok $K_p + K_i/s$ symbolizuje PI regulátor, Blok $(V_H/R_L)/(1+...)$ symbolizuje tlumič. Součin αu_c je poměr délky doby vysoké úrovně signálu ku době jedné periody PWM modulace. Po vynásobení αu_c s V_H tedy získáme ekvivalent stejnosměrného napětí ($V(t)$) připojeného na cívku MR

tlumiče. Rovnice pro výpočet napětí, které se má připojit na cívku tlumiče se vypočítá podle rovnice:

$$V(t) = \alpha V_H \left[K_i \int_0^t (v_0 - \beta i) dt + K_p (v_0 - \beta i) \right] \quad (32)$$

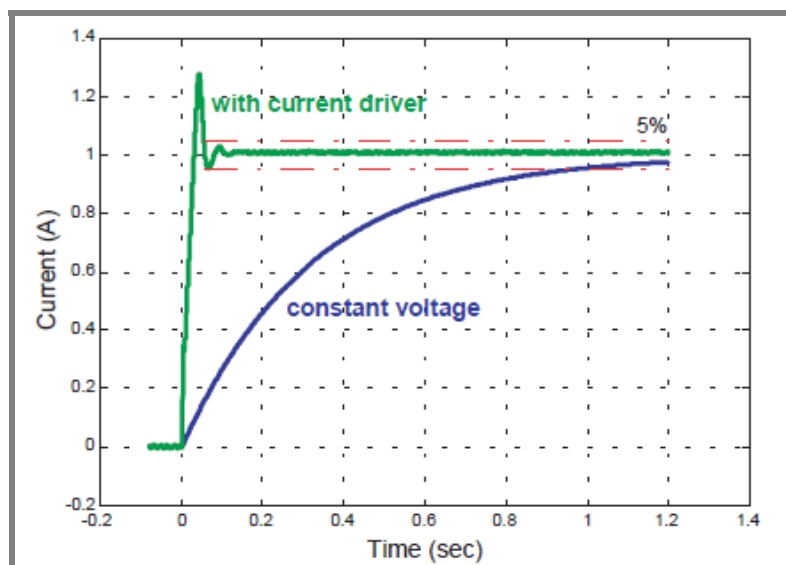
Průběhy požadovaného proudu, vypočítaného napětí na tlumiči, odchylky požadovaného od skutečného proudu a skutečného proudu v závislosti na čase jsou na obrázku níže.



Obr. 42: odezvy signálů na skok požadovaného proudu

Na Obr. 42 je porovnání náběhu proudu pokud se použije regulátor proudu (červený průběh) a pokud je použit napěťový regulátor (čárkovaná čára).

Výše popsaný způsob řízení tlumiče byl vyzkoušen na tlumiči MRD-9000. Pokud byl tlumič řízen napěťovým regulátorem, doba potřebná k dosažení 95% požadovaného proudu byla 0,3 s. Při použití proudového PWM regulátoru (s napětím $V_H = \pm 120$ V) činil čas k dosažení požadovaného proudu s odchylkou 5% 0,06 s viz. Obr. 43.



Obr. 43: Porovnání doby náběhu proudu za použití napěťového a proudového regulátoru

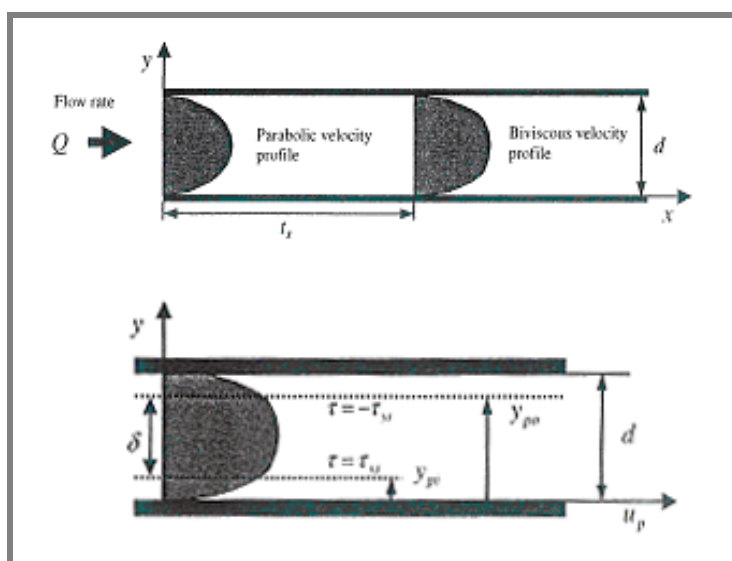
Zhodnocení řešerše

- Způsob řízení pomocí proudové regulace byl použit na tlumiči s řádově větší indukčností a odporem, než se používá u automobilových tlumičů, nicméně princip regulace by měl být stejný. Z výzkumu je patrné, že s proudovým regulátorem s napětím asi 5x vyšším než by bylo třeba pro napěťovou regulaci lze dosáhnout asi 5x rychlejší doby odezvy tlumiče. V tomto případě je ale odezva řídicího obvodu mnohem pomalejší než celý zbytek systému, je možné, že u tlumičů s menší indukčností nebude pokles doby odezvy celého tlumiče tak rapidní.
- Autoři nezohledňují nárůst odporu vlivem ohřátí cívky a tím i zpomalení doby odezvy tlumiče
- Z článku není zřejmé, jak se došlo k indukčností cívky. Indukčnost cívky bude jiná, pokud bude tlumič naplněn MR kapalinou a pokud bude prázdný. Záleží i na způsobu měření indukčnosti.
- Z článku vyplývá, že velikost indukčnosti je jeden z nejvýznamnějších parametrů ovlivňující délku časové odezvy MR tlumiče, při návrhu tlumiče by se měla indukčnost (při zachování velikosti magnetické indukce ve štěrbině) minimalizovat.

3.3.4. CHOI, Y.; WERELEY, N.M.

Comparative Analysis of the Time Response of Electrorheological and Magnetorheological Dampers Using Nondimensional Parameters
Journal of Intelligent Material Systems and Structures. July 2002, vol. 130, no. 20, s. 443-451.

Článek se zabývá porovnáním teoretického porovnání rozsahu sil a rychlostí odezvy MR a ER tlumičů. Oba typy kapalin se chovají podle stejného modelu (použit bi-viscous resp. Binghamský). Počítá se rychlost proudící kapaliny v kanálku s obdélníkovým profilem v závislosti na čase a souřadnici y .



Obr. 44: Změna rychlosti proudění v závislosti na elektrickém resp. magnetickém poli

V článku je provedeno odvození rovnice, která tuto závislost určuje:

$$u(y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin(\omega_n y) \left[\frac{P'/d^2}{2\mu_{p0}(n\pi)^3} \{2 - 2\cos(n\pi) - \Delta_1(\bar{\delta}) - \Delta_2(\bar{\delta}) - \Delta_3(\bar{\delta})\} e^{-t/t_s} \right] + u_p(y, \infty)$$

$$t_s = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho d^2}{(n\pi)^2 \mu_{p0}} \quad (36)$$

kde

$\omega_n = n\pi/d$, P' je gradient tlaku, μ_{p0} je viskozita po mezi kluzu, $\Delta_1 - \Delta_3$ jsou proměnné závislé na $\bar{\delta} = (y_{p0} - y_{pi})/d$, ρ je hustota kapaliny.

Z výše uvedené závislosti vyplývá, že čím bude mít kapalina menší hustotu a čím bude menší šířka škrťacího ventilu, tím bude odezva ventilu rychlejší (nezapočítává se rychlost řídicí elektroniky).

Protože ER a MR kapaliny mají různý typ pole, pro porovnání vlastností tlumičů byla zavedena proměnná „Binghamské číslo“ Bi , která porovnává rozsah regulace síly. Čím vyšší toto číslo bude (při stejných geometrických rozměrech a průtoku), tím vyšší bude i mez kluzu.

$$Bi = \frac{\tau_{ys} b d^2}{\mu_{p0} Q} \quad (37)$$

$$\tau_{ys} = \alpha G^\beta \quad (38)$$

kde τ_{ys} je mez kluzu, která je závislá na poli G . Pro ER kapaliny se za G dosadí elektrické pole E , přímo úměrné přiloženému napětí, pro MR tlumiče je G magnetické pole H , které je úměrné proudu procházejícímu cívkou. Koeficienty α a β jsou experimentálně určeny.

Experiment

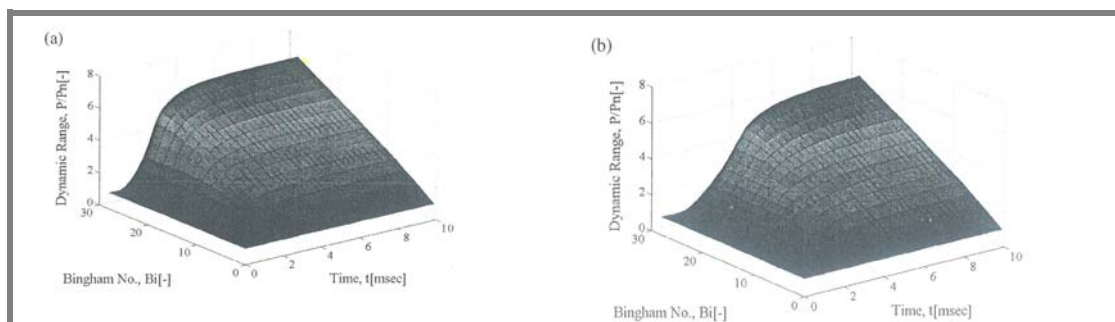
Podle výše uvedených rovnic byla provedena simulace. Simulován byl průtok šěrbinou o výšce $d = 1 \text{ mm}$, šířce $b = 10 \text{ mm}$ a délce $L = 10 \text{ mm}$. Jako MR kapalina byla použita komerčně dostupná kapalina MRF-132LD, ER kapalina byla namíchána z arašídového oleje a škrobu. Koeficienty α , β byly určeny jako:

$$\tau_{ys}(E) = 168.69 E^{1.30} \quad (39)$$

$$\tau_{ys}(H) = 1.91 H^{1.73} \quad (40)$$

Ve výše uvedených závislostech je E zadáváno v kV/mm , H je zadáváno v A/mm . Viskozita po mezi kluzu byla pro ER kapalinu určena jako $\mu_{p0} = 0.174 \text{ Pa s}$, a hustota $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$. Pro MR kapalinu byly parametry $\mu_{p0} = 0.33 \text{ Pa s}$, a hustota $\rho = 3055 \text{ kg/m}^3$. Rychlost proudění kapaliny je konstantní $Q = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

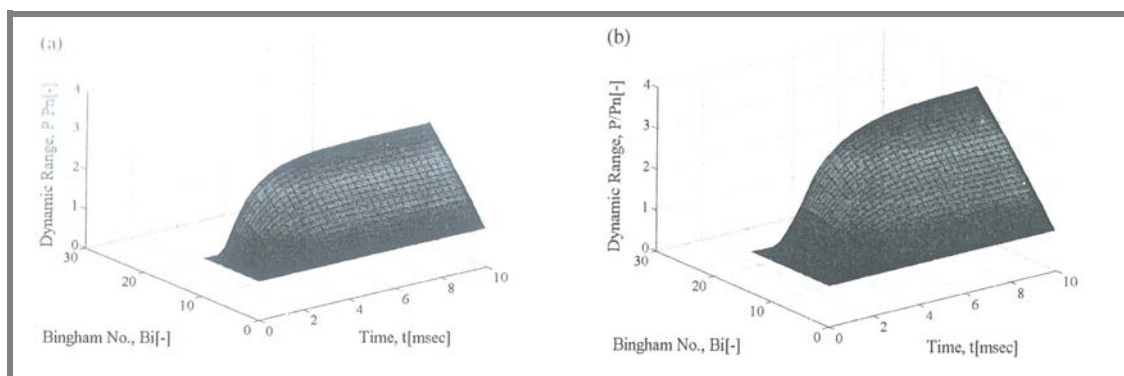
Pro stejnou velikost Binghamského čísla $Bi = 30$ (**Obr. 45**) je odezva ER tlumiče kratší a dynamický rozsah tlaků P/P_n větší. P je rozdíl tlaků za působení magnetického resp. elektrického pole, P_n je rozdíl tlaků v neaktivovaném stavu.



Obr. 45: porovnání dynamického rozsahu a odezvy tlumiče (a) - ER, b) - MR) při stejném $Bi = 30$

Podle Obr. 45 se ER tlumič zdá být lepší v obou sledovaných parametrech. V reálných aplikacích jsou ale ER tlumiče limitovány velikostí maximálního elektrického pole. Maximální možné elektrické pole souvisí s geometrií ER ventilu, ze které vyplývá průrazné napětí. Při vyšších napětích také roste proudová hustota ER kapaliny. MR tlumiče jsou limitovány zejména maximální velikostí magnetického pole. To je určeno z geometrických rozměrů ventilu – intenzita magnetického pole v magnetickém obvodu by neměla překročit saturační mez materiálu, ze kterého je ventil zhotoven.

Po zvážení těchto omezujících parametrů bylo maximální možné napětí na ER tlumiči určeno jako 8 kV čemuž odpovídá Binghamské číslo $Bi = 9.65$. Maximální proud pro MR tlumič byl zvolen jako 1.5 A , čemuž odpovídalo Binghamské číslo = 13.88. Pokud se zohlední tato maximální Binghamská čísla, budou dynamické rozsahy tlumičů podle Obr. 46.



Obr. 46: porovnání dynamického rozsahu a odezvy tlumiče (a) - ER, b) - MR) při maximálním reálném Bi pro danou kapalinu

Model byl ověřen na reálných tlumičích se zásobníkem stlačeného plynu odděleného plovoucím pístkem o parametrech:

Parametr	ER tlumič	MR tlumič
délka aktivní oblasti	43 mm	10 mm
šterbina mezi pístem a válcem	0.7 mm	0.65 mm
plocha řezu pístu	$2.0 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2$	$1.3 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2$
plocha řezu pístnice	$1.95 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$	$1.95 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$

Tab. 3: Parametry tlumičů

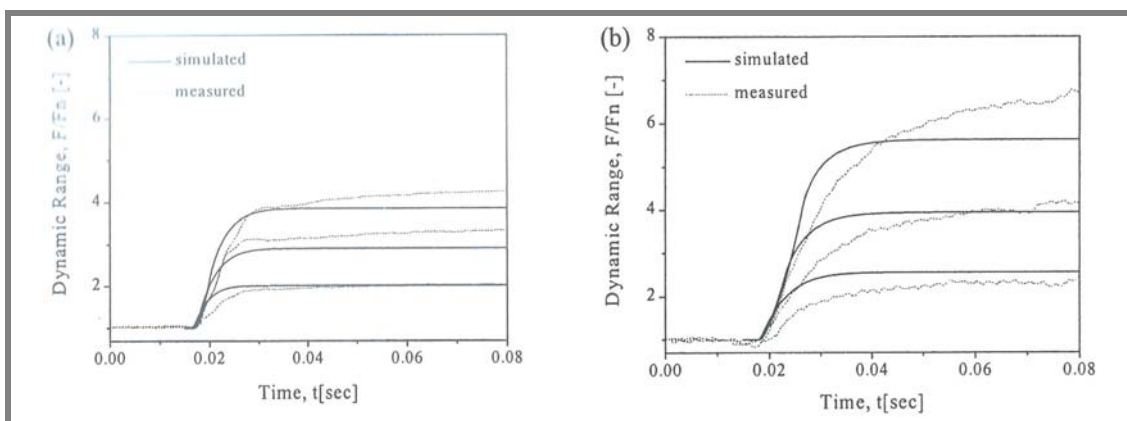
Síla se měří za konstantní rychlosti pístu 0.041 m/s. Vzhledem k rozdílné geometrii pístu jednotlivých tlumičů je ale rychlost proudění kapaliny šterbinou rozdílná. U ER tlumiče se síla měřila při třech různých intenzitách elektrických polí, u MR tlumičů při třech různých intenzitách magnetických polí.

ER tlumič			MR tlumič		
el. napětí [kV]	intenzita el. pole [kV/mm]	Bi [-]	Proud [A]	intenzita mag. pole [A/mm]	Bi [-]
5.6	8	13.22	1.2	144	24.76
4	5.7	8.56	0.9	107	14.89
2.4	3.4	4.36	0.6	72	7.45

Tab. 4: Velikosti elektrických a magnetických polí, pro která se měřily síly vyvozené tlumičem

Výsledné charakteristiky pro napětí a proudy z jsou na Obr. 47. F je síla měřená v aktivovaném stavu, F_n je síla v neaktivovaném stavu. Z obrázků vyplývá:

- MR tlumič je schopen vygenerovat větší dynamický rozsah sil než ER tlumič
- ER tlumič má kratší dobu odezvy



Obr. 47: Dynamický rozsah ER (a) a MR (b) tlumiče

V charakteristikách je možno vidět nárůst síly i od času 0.03 s, ačkoliv model už předpovídá sílu konstantní. Autoři se domnívají, že tento jev je způsoben stlačováním plynové náplně.

Z článku vyplývá, že pro aplikace vyžadující rychlou odezvu je vhodné použít ER tlumič, zatímco pro aplikace vyžadující velký rozsah sil je vhodné použít MR tlumič.

Zhodnocení řešerše

- V článku jsou porovnávány teoretické vlastnosti ER a MR kapalin. Jako model pro oba typy byl použit Bi-viscous, resp. Binghamský model.
- Uveden vzorec pro délku odezvy kapalin. ER kapalina má teoreticky kratší dobu odezvy než MR kapalina.
- Zavedena proměnná Binghamské číslo, které porovnává dynamický rozsah sil ER a MR kapalin při průtoku škrťcím kanálkem o stejných rozměrech.

- Autoři používají vlastní namíchanou ER kapalinu. Dá se předpokládat, že komerční ER kapalina bude lepší, rozdíl v dynamickém rozsahu sil mezi ER a MR tlumičem pak pravděpodobně nebude tak velký
- U měření MR tlumičů bylo počítáno se zpožděním řídicí elektroniky, není ale popsáno jak toto zpoždění měřili. Z odezvy na jednotkový skok vyplývá, že časová konstanta řídicí elektroniky byla pravděpodobně mnohem delší. Autoři přičítají nárůst síly (Obr. 47) se vzrůstajícím časem stlačováním plynové náplně – přírůstek síly by pak musel být stejný i pro nejmenší proud – což není. Pro nejmenší proud se odezva zdá být rychlejší, což by odpovídalo tomu, že hlavní příčinou zvyšování síly je pomalá řídicí elektronika.
- Pokud je nárůst síly způsoben řídicí elektronikou, MR tlumič dosahuje ještě většího dynamického rozsahu, než obdobný ER tlumič. Pokud by se použil vhodný regulátor pro MR tlumič, v oblastech dynamického rozsahu ER tlumiče by mělo jít dosáhnout stejně rychlé odezvy. Samotná odezva MR kapaliny bude vzhledem k větší hustotě vždy pomalejší.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Zdroj 3.1.1. shrnuje známé parametrické modely MR tlumiče a posuzuje je z hlediska shody s reálným MR tlumičem. Kapitola 3.1.2 zpřesňuje Bouc-Wen model o hysterezi způsobenou zmagnetováním částí tlumiče.

Kapitola 3.2.1 a 3.2.2 shrnuje možné algoritmy řízení odpružení semiaktivního závěsu. Oddíl 3.2.1 algoritmy posuzuje pouze z hlediska kvality odpružení odpružené hmoty, článek 3.2.2 posuzuje i hledisko bezpečnosti. Jako kompromisní řešení mezi komfortem a bezpečnou jízdou nejlépe vychází hybrid control. Článek 3.2.3 popisuje vliv teploty na chování MR tlumiče a navrhuje několik způsobů regulace MR tlumičů. Tyto regulátory jsou experimentálně zkoušeny metodou HILS. Z kapitoly 3.3 vyplývá, že celková doba odezvy tlumiče lze rozdělit na 2 části:

- Odezva MR kapaliny
- Odezva řídicího obvodu s připojenou indukčností

Článek 3.3.2 určuje minimální dobu, po kterou se MR kapalina musí zdržet v magnetickém poli, aby se ustálila mez kluzu. Tato hodnota byla experimentálně určena asi na 1 ms , což by měla být odezva samotné kapaliny.

Rešerše kapitoly 3.3.3 potvrzuje možnost urychlení odezvy MR tlumiče zvýšením napětí regulátoru, je ale použit tlumič na tlumení kmitů budov, který má řádově vyšší indukčnost a odpor, než tlumiče používané v automobilismu.

Na základě Binghamského modelu je v kapitole 3.3.4 odvozen výpočet pro dobu odezvy MR a ER kapaliny. Z výzkumu vyplývá, že ER kapaliny mají kratší dobu odezvy, ale nevýhodou je menší dynamický rozsah sil při stejných rozměrech škrťacího ventilu.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Při stanovení hlavního a vedlejších cílů práce je třeba respektovat primární záměr práce, kterým je vytvoření metodiky pro implementaci MR tlumiče v semiaktivním závěsu automobilu. Dosud používané semiaktivní závěsy s MR tlumiči nefungují v plně semiaktivním režimu. Návrhy algoritmů semiaktivního odpružení nepočítají s omezeným rozsahem sil a dynamikou MR tlumiče.

Hlavním cílem tedy bude na základě zjištěných omezujících parametrů MR tlumičů navrhnout metodiku návrhu optimálního algoritmu řízení MR tlumiče. Kvalita odpružení pomocí jednotlivých algoritmů bude vyhodnocována z dat experimentálního vozíku jedoucího po simulátoru vozovky.

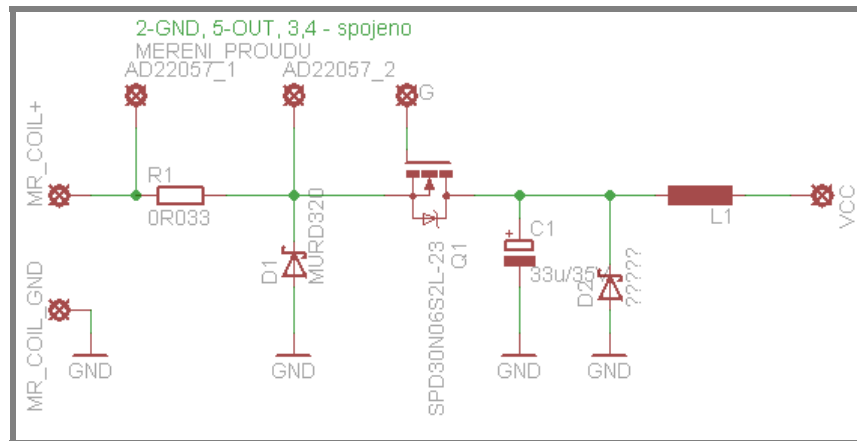
Při řešení práce lze definovat následující vedlejší cíle:

- Určení metodiky měření a identifikace základních parametrů MR tlumiče (indukčnost, doba odezvy tlumiče, doba odezvy kapaliny...), sestavení zjedodušeného modelu MR tlumiče
- Zjištění způsobu regulace u současných vozů s MR tlumiči, určení možnosti vylepšení
- Návrh a sestavení vhodného regulátoru proudu
- Sestavení čtvrtinového modelu experimentálního vozíku
- Určení metodiky měření vstupních parametrů pro regulační algoritmy semiaktivních závěsů
- Implementace regulačních algoritmů pomocí vhodného SW
- Zjištění vlivu omezeného rozsahu sil na kvalitu semiaktivního odpružení
- Zjištění vlivu dynamiky tlumiče na kvalitu semiaktivního odpružení
- Provedení shrnutí poznatků práce do výsledné metodiky pro implementaci MR tlumiče v semiaktivním závěsu kola

Na základě analýzy vstupních experimentů budou stanoveny priority dalšího směřování výzkumných prací. Předpokládáme zaměření následných experimentů na zjištění dominantních omezujících parametrů ovlivňujících regulaci MR tlumičů.

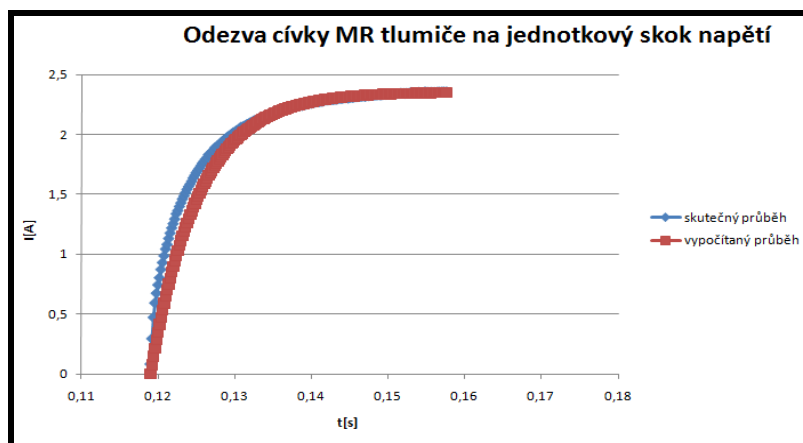
6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

- Zjištění způsobu regulace u soudobých vozů vybavených MR tlumiči
Byla rozebrána a analyzována řídicí jednotka odpružení Audi TT (2007). Ze zapojení vyplývají následující skutečnosti:
 - Na desce není zdroj vyššího napětí, než palubní napětí automobilu. Koncový stupeň funguje ve spínaném režimu. Maximální vstupní napětí je palubní. Rychlost řízení MR tlumiče bude limitována převážně dynamikou samotné cívky tlumiče.
 - Řídicí jednotka neměří zrychlení odpružené ani neodpružené, nemůže být tedy použit skyhook, nebo groundhook algoritmus
 - Řídicí obvod je realizován 16-bitovým mikrokontrolérem ST10F272B což je 64MHz mikrokontrolér se zabudovaným CAN řadičem, AD převodníkem (10b max 25 kHz). Samotný mikrokontrolér i spínací prvky v koncovém stupni mají řádově kratší odezvy, než je časová konstanta samotné cívky tlumiče.



Obr. 48: Schéma zapojení koncového stupně ŘJ Audi TT

- Určení indukčnosti cívky MR tlumiče
Indukčnost cívky se může pro různé způsoby měření lišit. Proto je indukčnost cívky nutné měřit za podmínek přibližně stejných, v jakých bude cívka posléze pracovat. Indukčnost cívky MR tlumiče byla určena z přechodové charakteristiky skoku napětí. V reálném provozu se také předpokládá, že se tlumič bude řídit PWM signálem tzn. na cívku se připojí buď napětí zdroje, nebo se od zdroje odpojí. K tomuto účelu byl sestaven obvod spínající napětí na cívku tlumiče. Po sepnutí napětí na cívku byl snímán proud cívku. Z této naměřené charakteristiky je možné určit indukčnost cívky. Z měření tlumiče Audi TT vyplynulo, že indukčnost cívky bez MR kapaliny je asi 5 mH . Na Obr. 49 jsou porovnány skutečný průběh proudu a vypočítaný průběh proudu pro indukčnost 5 mH .



Obr. 49: Porovnání měřeného a vypočteného průběhu proudu cívkou MR tlumiče

7 ZÁVĚR

Pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje současný stav poznání v oblastech modelování MR tlumičů, regulační algoritmy semiaktivních závěsů a dynamické chování MR tlumiče. Z literární rešerše vyplývá, že dosavadní výzkum používal příliš idealizované modely a nezahrnoval v sobě omezující parametry MR tlumiče, které ale výrazně ovlivní výsledný výkon semiaktivního závěsu.

Přínos následující disertační práce bude zejména ve vytvoření metodiky návrhu semiaktivního závěsu kola s reálným MR tlumičem.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2005. 432 s. ISBN: 80-239-0024-2
- [2] VLK, F. *Systémy řízení podvozku a komfortní systémy*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006. 308 s.
- [3] *Bose.co.uk* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. The bose suspension system. Dostupné z WWW: <<http://www.bose.co.uk/GB/en/learning-centre/suspension/4-applied-learning/>>.
- [4] KARNOPP, D. Design Principles for Vibration Control Systems Using Semi-Active Dampers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. September 1990, 112, s. 448-455.
- [5] DYKE, S. J.; SPENCER, B. F.: Comparison of semi-active control strategies for the MR damper. *Intelligent Information Systems*, Los Alamitos: Ieee Computer Soc.
- [6] PRAŽÁK, František. *Tlumič odpružení jako prvek ovlivňující jízdní vlastnosti vozidel*. Brno, 2006. 53 s. Dizertační práce. VUT v Brně.
- [7] Winslow, W. M. Induced Fibration of Suspensions, *Journal of Applied Physics*, Wheatridge, dec 1949, vol. 20, no.15, s.1137-1140.
- [8] RABINOW, J., The magnetic fluid clutch, *AIEE Trans.*, 1948, vol. 67, p. 1308.
- [9] *Bwigroup.com* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. MAGNERIDE™ CONTROLLED SUSPENSION. Dostupné z WWW: <http://www.bwigroup.com/static/suspension_magneride/>.
- [10] *Audi TT Coupé '07 - Suspension System* [online]. Ingolstadt : AUDI AG, 05/06 [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <www.volkswagen.net/technik/suspension/SSP_381.pdf>.
- [11] *Lord Corporation* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. LORD Magneto-Rheological (MR). Dostupné z WWW: <<http://www.lord.com/Products-and-Solutions/Magneto-Rheological-%28MR%29/Automotive-Suspensions.xml>>.
- [12] *Rhedamp* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. Fludicon GmbH. Dostupné z WWW: <<http://www.fludicon.de/Geraeuscfreie-stufenlos-verstellbare-und-verschleissfreie-Daempfersysteme.56.0.html>>.
- [13] New electrorheological fluids — characteristics and implementation in industrial and mobile applications. *Journal of Physics*. 2009, 149, s. 1-5.

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

- Obr. 1: Závislost jízdního pohodlí na jízdni bezpečnosti [1]
Obr. 2: Závěs BOSE s lineárními elektromotory [3]
Obr. 3: Čtvrtinový model automobilu [6]
Obr. 4: Frekvenční závislost závěsu kola
Obr. 5: Řízení s otevřenou smyčkou
Obr. 6: Řízení s uzavřenou smyčkou
Obr. 7: Princip MR tlumiče [1] (vlevo) a ER tlumiče (vpravo) [12]
Obr. 8: Naměřené charakteristiky při buzení signálem o frekvenci 2,5 Hz a amplitudě 1,5 cm.
Obr. 9: Binghamský model MR tlumiče
Obr. 10: Gamota-Filisko model
Obr. 11: Bouc-wen model MR tlumiče
Obr. 12: Nový Bouc-Wen model tlumiče
Obr. 13: Porovnání charakteristik Bouc-Wen modelu s reálným tlumičem
Obr. 14: Porovnání odezvy jednotkového skoku napětí modelu a reálného tlumiče
Obr. 15: Hysterezní chování MR tlumiče v závislosti na proudu cívkou
Obr. 16: Bi-viscous model a) a zjednodušený bi-viscous model MR tlumiče b)
Obr. 17: F-v charakteristika MR tlumiče Delphi
Obr. 18: Porovnání modelů s naměřenými daty
Obr. 19: Schéma systému s jedním stupněm volnosti a říditelným tlumičem
Obr. 20: Porovnání přenosů pro různé algoritmy řízení. SA-1 - continuous skyhook, SA-2 on-off skyhook SA3-continuous balance control, SA-4 on-off balance control, AP - adaptivní pasivní
Obr. 21: frekvenční přenos zrychlení odpružené hmoty
Obr. 22: frekvenční přenos zrychlení neodpružené hmoty
Obr. 23: Model MR tlumiče
Obr. 24: F-v a F-z charakteristika MR tlumiče při $I = 1A$
Obr. 25: Závislost viskozity C_{pos} a), meze kluzu F_y b) a tuhosti tlumiče k c)
Obr. 26: Závislost RMS zrychlení odpružené hmoty na RMS zdvihu tlumiče pro a) nízkou teplotu, b) vysokou teplotu
Obr. 27: Definice doby odezvy
Obr. 28: Časová závislost síly pro různé proudy
Obr. 29: Odezva tlumiče v závislosti na pístové rychlosti
Obr. 30: Zapojení proudového zdroje
Obr. 31: Časová odezva proudu na jednotkový skok
Obr. 32: Závislost doby odezvy řídicího obvodu na proudu
Obr. 33: Doba odezvy tlumiče v závislosti na pístové rychlosti
Obr. 34: Vliv pružného uchycení MR tlumiče na délku odezvy
Obr. 35: Kanálek s MR ventilem
Obr. 36: Časová závislost zdvihu pístu
Obr. 37: Závislost doby průletu částice aktivní zónou v závislosti na rychlosti proudění MR kapaliny
Obr. 38: Normalizovaná mez kluzu v závislosti na době průletu MR částice aktivní zónou
Obr. 39: Tlumič Lord MRD-9000
Obr. 40: Elektrický model MR tlumiče
Obr. 41: Blokové schéma regulátoru proudu
Obr. 42: odezvy signálů na skok požadovaného proudu
Obr. 43: Porovnání doby náběhu proudu za použití napěťového a proudového regulátoru
Obr. 44: Změna rychlosti proudění v závislosti na elektrickém resp. magnetickém poli
Obr. 45: porovnání dynamického rozsahu a odezvy tlumiče (a) - ER, b) - MR) při stejném $Bi = 30$
Obr. 46: porovnání dynamického rozsahu a odezvy tlumiče (a) - ER, b) - MR) při maximálním reálném Bi pro danou kapalinu
Obr. 47: Dynamický rozsah ER (a) a MR (b) tlumiče
Obr. 48: Schéma zapojení koncového stupně ŘJ Audi TT
Obr. 49: Porovnání měřeného a vypočteného průběhu proudu cívkou MR tlumiče

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Konstanty měřeného MR tlumiče	14
Tab. 2: Koefficienty použité pro teplotně závislý model MR tlumiče	27
Tab. 3: Parametry tlumičů	41
Tab. 4: Velikosti elektrických a magnetických polí, pro která se měřily síly vyvozené tlumičem	42

