

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Kučera

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Experimentální zjištění doby odezvy MR tlumiče s modifikovaným pístem

v anglickém jazyce:

Experimental determination of the response time of MR damper with modified piston group

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je ověřit zkrácení časové odezvy MR tlumiče s pístem z feritového materiálu. Měřeny budou charakteristiky pro harmonický signál, náhodný signál a rampu. Měření budou podložena FEM modelem ideálně 3D Ansys Maxwell.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

KOO, J. H., F. D. GONCALVES a M. AHMADIAN. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. Smart Mater. Struct. 2006, roč. 15, č. 2.

MAAS, J. a D. GÜTH. Experimental Investigation of the Transient Behavior of MR Fluids. In: ASME Conference on Smart Material, Adaptive Structures and Intelligent System. Scottsdale, Arizona, USA, ASME, 2011. ISBN 978-0-7918-5471-6.

GONCALVES, F. D., M. AHMADIAN a J. D. CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. Smart Materials and Structures. 2006, roč. 15, č. 1.

LORD CORPORATION, MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid. Datasheet – Lord Corporation, 2008.

LORD CORPORATION, Magnetic circuit design. Engineering Note – Lord Corporation, 1999.

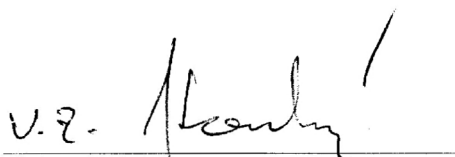
SHIGLEY, J. E, MISCHKE, Ch. R, BUDYNAS, R. G. Konstruování strojních součástí. VUTIUM, 2008. 1300 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

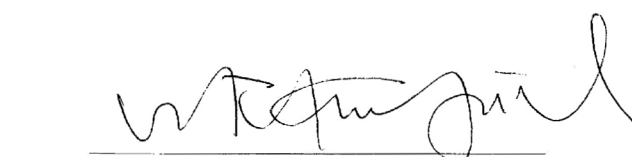
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zbyněk Strecker

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 14.11.2013

L.S.


prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá měřením odezvy magnetoreologického tlumiče. V úvodní části byl proveden průzkum současné situace, popsána současná konstrukční řešení pasivních tlumičů, z nichž MR tlumiče vycházejí. Byla zde také analyzována a popsána omezení, která plynou z konvenční konstrukce tlumiče. V první části experimentu bylo provedeno měření odezvy magnetické indukce na vzduchu. Druhá část pak byla věnována experimentu na hydraulickém pulzátoru, jehož výsledkem je odezva síly tlumiče v závislosti na procházejícím proudu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, MR tlumič, časová odezva

ABSTRACT

This work is dedicated to measuring of response time of magnetorheological damper. Introduction part includes description of present used conceptions of passive dampers that are basis for MR dampers. This part also includes description of limits of MR damper. First part of experiment contains measuring of magnetic induction on air. Second part includes measuring of response time of force using hydraulic pulsator.

KEY WORDS

Magnetorheological fluid, MR damper, response time

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUČERA, P. *Experimentální zjištění doby odezvy MR tlumiče s modifikovaným pístem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Experimentální zjištění doby odezvy MR tlumiče s modifikovaným pístem“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Zbyňka Streckera Ph.D. a v seznamu jsem uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně 20. května 2014

Petr Kučera

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu práce Ing. Zbyňku Streckerovi, Ph.D. za jeho ochotu, odborné vedení a věcné rady a připomínky při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a všem ostatním za podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD	12
1. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	13
1.1 Tlumiče.....	13
1.1.1 Princip.....	13
1.1.2 Fyzikální model	14
1.1.3 Semiaktivní tlumiče	15
1.2 MR tlumič.....	15
1.3 Regulace MR tlumiče	16
1.3.1 Přechodová charakteristika [6]	17
1.4 Algoritmy pro řízení semiaktivních tlumičů [7].....	18
1.4.1 Algoritmus Skyhook.....	18
1.5 Omezující parametry MR tlumičů	19
1.5.1 Vířivé proudy.....	20
1.6 Metodika měření odezvy	21
2. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	23
3. MATERIÁL A METODY	24
3.1 Přechodová charakteristika magnetické indukce.....	24
3.1.1. Napěťový režim (pomalý režim)	24
3.1.2. Proudový režim (rychlý režim).....	25
3.1.3. Použité vybavení	25
3.1.4. Zapojení	25
3.1.5. Postup vyhodnocení.....	26
3.2 Přechodová charakteristika síly	29
3.2.1 Vstupní parametry	29
3.2.2 Použitá regulace.....	29
3.2.3 Výstup.....	29
3.2.4. Algoritmus vyhodnocení dat	30
4. VÝSLEDKY	32
4.1 Výsledky přechodové charakteristiky	32
4.1.1. Regulace v pomalém režimu	34
4.1.2. Regulace v rychlém režimu	36
4.2 Výsledky dynamické simulace na hydraulickém pulzátoru	38
4.2.1. Rychlý režim	38
4.2.2. Pomalý režim	40
5. DISKUZE	42
6. ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	44
SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	46
Seznam obrázků.....	46
Seznam grafů	46
Seznam tabulek.....	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	48
SEZNAM PŘÍLOH	49
SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY	50
Příloha I	50

ÚVOD

Úkolem odpružení automobilu je zajistit jízdní komfort posádky, tj. tlumit vibrace ve vertikálním směru a zároveň zajistit dostatečnou bezpečnost jízdy, tj. vyvozovat dostatečnou sílu, kterou působí pneumatika na vozovku. Odpružení současných automobilů je realizováno jako paralelní spojení tlumiče a pružiny. Pružina slouží k rekuperaci kinetické energie při přejezdu nerovnosti, tlumič pak k tlumení vibrací, které by sama pružina nedokázala pohltit. Levné varianty automobilových podvozků využívají komponenty s pevnými charakteristikami, tj. pružina má pevnou hodnotu tuhosti (případně závislou na stlačení – progresivní pružiny) a tlumič pevnou hodnotu útlumu. Nastavení výrobcem je pevně dáno a nelze jej z pohledu uživatele nijak měnit. Takové nastavení je kompromisem mezi dostatečným komfortem a bezpečností. S vyvíjející se technologií vyvstal požadavek na komponenty, zejména tlumiče, které jsou schopny dynamicky měnit své vlastnosti na základě aktuální situace v dané aplikaci.

1. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

1

1.1 Tlumiče

1.1

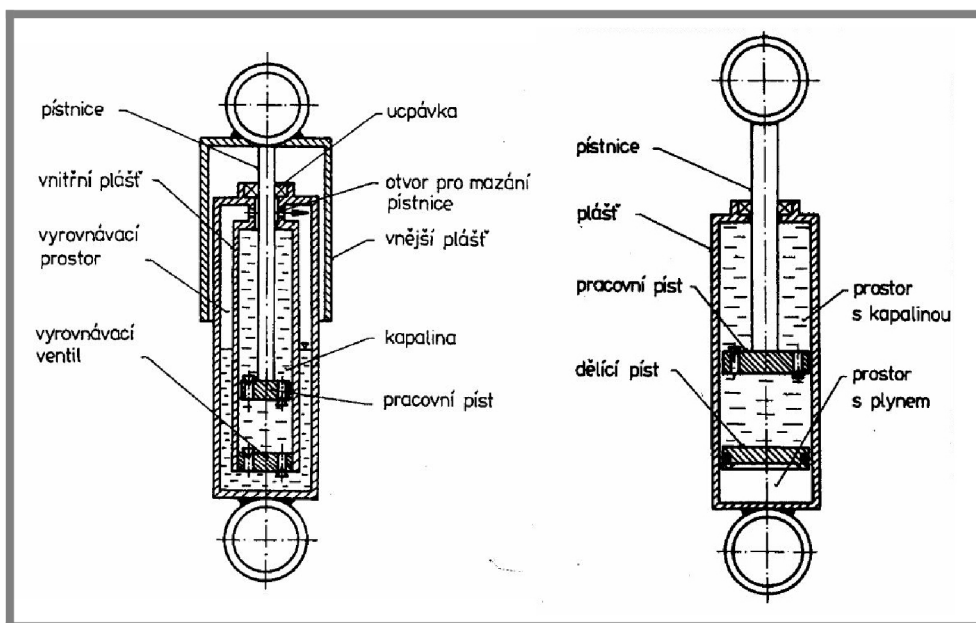
1.1.1 Princip

1.1.1

Tlumič pérování je pasivní prvek zavěšení automobilu, v němž probíhá *disipace kinetické energie neodpružené hmoty* (tj. kola, brzdového systému a zavěšení) pomocí přeměny na tepelnou energii. Tato přeměna probíhá prepouštěním kapaliny přes soustavu ventilů, čímž se kapalina díky své viskozitě zahřívá.

Hlavní funkcí tlumiče je zajištění *stálého a kontinuálního kontaktu kola s vozovkou* i při jízdě po nerovném povrchu. Mezi další jeho funkce patří tlumení nárazů a vibrací, snížení houpání a naklánění vozu v zatáčkách, obecně tedy *zvýšení komfortu*. V současnosti nejrozšířenějším konstrukčním řešením tlumiče je *teleskopický hydraulický tlumič s olejovou náplní*. Na trhu lze kromě výše zmíněných konvenčních tlumičů najít i nekonvenční řešení, z nichž stojí za zmínku například systém firmy Bose, který využívá k ovládní závěsu vozidla lineární motory.

Z hlediska konstrukce lze konvenční typy tlumičů rozdělit na dvě hlavní skupiny, *jednoplášťové a dvouplášťové* tlumiče (viz obr. 1). Podrobněji se dynamice automobilových podvozků věnuje publikace [1].



Obr. 1 Náčrsek konstrukce tlumičů (vlevo dvouplášťový, vpravo jednoplášťový) [1]

1.1.2 Fyzikální model

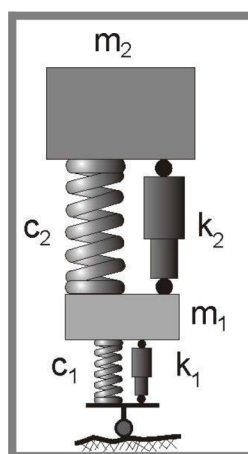
Z fyzikálního pohledu lze zavěšení automobilu chápat jako soustavu se dvěma stupni volnosti, složenou ze dvou hmotností (obr. 2), která uskutečňuje tlumený kmitavý pohyb. Na základě této myšlenky lze použít toto matematické vyjádření [2]:

$$M\ddot{q} + B\dot{q} + Kq = Q(t)$$

kde:

- M - matice hmotnosti
- B - matice útlumu
- K - matice tuhosti
- Q - matice silových působení
- q - obecná souřadnice

Jedná se o diferenciální rovnici druhého řádu v maticovém tvaru a na základě jejího řešení lze získat, pro nás velmi podstatnou veličinu, *vlastní frekvenci*, která se označuje jako Ω_0 . Z matematického pohledu jde o matici vlastních frekvencí, z nich pro nás nejpodstatnější je první vlastní frekvence, tedy ta nejnižší. Ve starších zdrojích literatury [1] je uváděno, že vlastní frekvence závěsu osobního automobilu dosahuje hodnot 10-15Hz, ale současné konstrukce podvozků jsou naladěny na hodnoty až okolo 20Hz (*Škoda Roomster*).



Obr. 2 Čtvrtinový model zavěšení automobilu

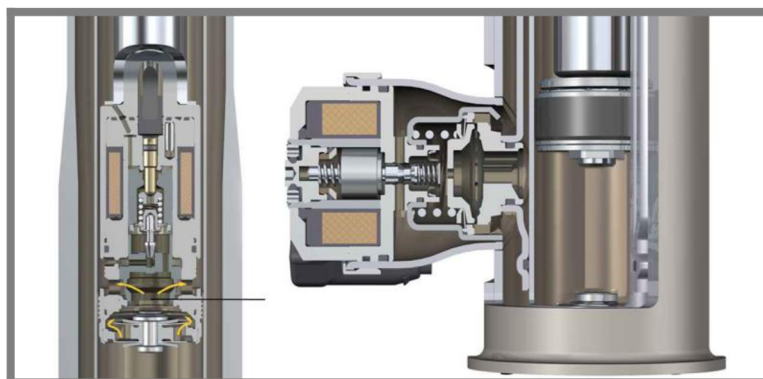
(m_1 - hmotnost závěsu, m_2 - hmotnost karoserie, c_1 - tuhost pneumatiky, k_1 - útlum pneumatiky, c_2 - tuhost pružiny, k_2 - útlum tlumiče) [3]

V současnosti se vývoj tlumičů dostal do bodu, kdy pasivní tlumiče přestávají stačit, a proto bylo nutné přijít s novým řešením, které by umožňovalo nastavování charakteristiky tlumiče v závislosti na podmínkách, v nichž tlumič pracuje. Tento požadavek odstartoval vývoj semiaktivních tlumičů a jejich nasazování do praktických aplikací nejen v automobilovém průmyslu. Významným producentem v této oblasti je firma *Delphi*, která vyvinula systém semiaktivního podvozku, který využívá např. firma *Audi* (*Audi Magnetic Ride*) [14].

1.1.3 Semiaktivní tlumiče

V současnosti jsou na trhu dostupné dva hlavní typy semiaktivních tlumičů, CDC tlumiče, které pracují na principu regulačních ventilů a MR tlumiče, které pracují na principu změny viskozity feromagnetické kapaliny.

CDC tlumiče [3][4] konstrukčně vycházejí z dvouplášťových pasivních tlumičů a ke změně svých parametrů používají regulačních ventilů umístěných přímo v pístu nebo v plášti (viz obr. 3). Autorem tohoto řešení je firma *Sachs*.

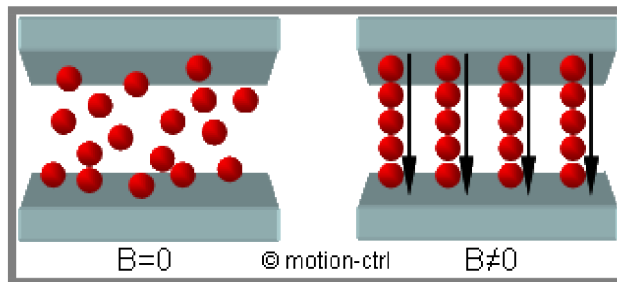


Obr. 3 CDC tlumič (vlevo regulátor v pístu, vpravo regulátor v plášti) [4]

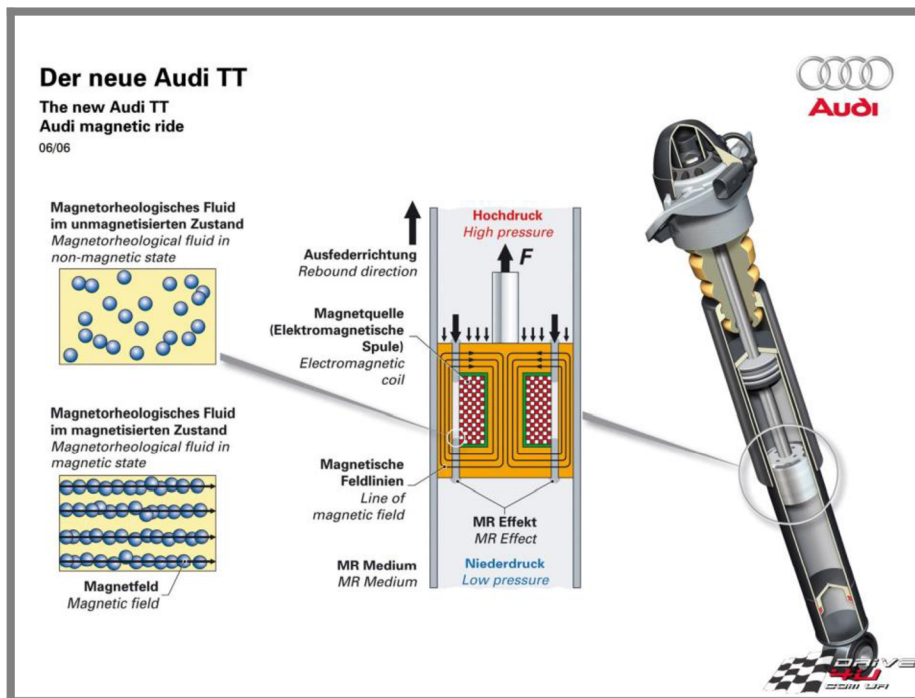
Druhým typem je magnetoreologický tlumič (*MR tlumič*), který konstrukčně vychází z jednoplášťového tlumiče a jeho detailnímu popisu je věnována následující část práce.

1.2 MR tlumič

Tento typ konstrukčně vychází z jednoplášťového tlumiče (obr. 5), a ke změně svých parametrů využívá tzv. MR efektu (obr. 4). Princip tohoto efektu spočívá ve změně *zdanlivé viskozity* (dále jen *viskozity*) kapaliny vlivem působení magnetického pole v jejím okolí. Za těmito vlastnostmi stojí složení MR kapaliny, jehož hlavními složkami jsou *nosná kapalina* (olej, voda, glycerín), *feromagnetické částice* (železný prášek) a *detergenty*, které zajišťují odolnost kapaliny vůči sedimentaci. [13] Konstrukčně je vyvolání změny viskozity kapaliny vyřešeno tak, že kapalina proudí skrze píst se štěrbinami, v nichž je za pomoci elektromagnetické cívky buzeno elektromagnetické pole, čímž dojde k aktivování kapaliny, v níž se začnou tvořit řetězce zpolarizovaných částic, které při průchodu přes štěrbinu v pístu kladou odpor, což lze pozorovat právě jako změnu viskozity kapaliny. Změna viskozity také závisí na procházejícím proudu, neboť čím je vyšší změna proudu, tím rychleji kapalina reaguje.[5]



Obr. 4 MR efekt (vlevo neaktivovaný stav, vpravo aktivovaný stav) [7]



Obr. 5 Komerční MR tlumič [14]

(Rebound direction – směr roztažení tlumiče, Electromagnetic coil – elektromagnetická cívka, Line of magnetic field – magnetické siločáry, MR Medium – MR kapalina, High pressure – vysoký tlak, Low pressure – nízký tlak)

1.3

1.3 Regulace MR tlumiče

Aby bylo možné efektivně regulovat vlastnosti MR tlumiče, je nutné vytvořit matematický model, který slouží k jeho popisu. Z pohledu teorie regulace lze tlumič popsat dynamickým systémem prvního řádu, jehož přenos je dán funkcí:

$$G(s) = \frac{K}{T_s s + 1}$$

kde:

- K - konstanta zesílení (poměr výstupní a vstupní veličiny)
- T - konstanta odezvy
- G - výstupní veličina
- s - vstupní veličina

Pro tento systém je možné definovat 3 typy charakteristik – *statická, impulsní a přechodová* [6]. Na základě těchto charakteristik jsme schopni popsat vlastnosti dané soustavy – zesílení K a časovou konstantu T , též nazývanou *odezva*. Statická charakteristika popisuje stav soustavy po odeznění přechodových dějů, takže nám dává informaci o zesílení nikoli však o době odezvy, proto je pro dynamický systém irelevantní. K určení dynamických parametrů soustavy lze tedy použít impulsní nebo přechodovou charakteristiku. Z těchto dvou lze lépe a snáze realizovat přechodovou charakteristiku. V další části je popsána přechodová charakteristika podrobněji.

1.3.1 Přechodová charakteristika [6]

1.3.1

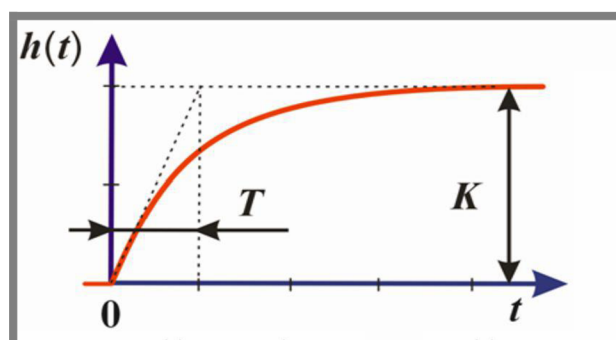
Z elektrotechnického hlediska se MR tlumič v obvodu chová jako cívka (sériové zapojení induktoru a rezistoru). Parametry cívky lze popsat následující rovnicí v integrálním tvaru:

$$I(t) = \frac{1}{L} \int U dt$$

kde:

I	[A]	- proud
L	[H]	- indukčnost cívky
U	[V]	- napětí na svorkách cívky

Pokud bychom realizovali jednotkový skok napětí na ideální cívce (tzv. induktor – cívka beze ztrát), proud procházející cívkou by měl přibližně exponenciální průběh jako je na obr. 6. Na základě výše popsané rovnice je možno cívku aproximovat pomocí systému prvního řádu, pro který jsou hlavními parametry K – *zesílení* a T – *časová konstanta*. Postup určení těchto veličin je patrný z obr. 6. Konstanta K je poměr výstupní veličiny (proud) a řídicí veličiny (napětí) a určuje se v místě maximální hodnoty výstupní veličiny po odeznění přechodových dějů. Konstanta T je čas potřebný k tomu, aby výstupní veličina dosáhla 63,2% své maximální hodnoty. Bližší popis metody měření této charakteristiky a potřebné vybavení jsou popsány v kapitole 3.



Obr. 6 Přechodová charakteristika [8]

1.4 Algoritmy pro řízení semiaktivních tlumičů [7]

Na základě údajů z přechodové charakteristiky lze vytvořit řídicí algoritmy, které zajistí požadované parametry tlumiče. Řídicí algoritmy lze rozdělit do dvou hlavních skupin podle toho, na jakou část jízdní dynamiky se zaměřují. První skupinou jsou algoritmy, které se zaměřují na omezení vibrací odpružené hmoty, tedy na zvýšení komfortu posádky. Do této skupiny patří algoritmy *Skyhook* (viz níže), *Acceleration Driven Control* a *Balance Control*. Druhou skupinou jsou algoritmy zvyšující bezpečnost, kam se řadí algoritmus *Groundhook*.

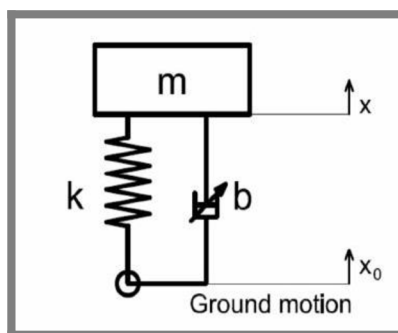
1.4.1 Algoritmus Skyhook

Tento algoritmus pochází z roku 1974 a jeho autorem je D. Karnopp. Název Skyhook pochází ze složení dvou anglických slov, sky (obloha) a hook (hák), neboť algoritmus má za cíl, aby se karoserie chovala jako by byla zavěšena na obloze. Řízení tlumiče je popsáno takto:

$$F_d = \begin{cases} b\dot{x}, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0 \\ 0, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \end{cases}$$

kde:

F_d	[N]	- síla vyvozená tlumičem
b	[N.s.m ⁻¹]	- tlumení
\dot{x}	[m.s ⁻¹]	- rychlost nástavby (hmotnost m)
\dot{x}_0	[m.s ⁻¹]	- rychlost závěsu



Obr. 7 Schéma reálného Skyhooku (pro systém s 1° volností) [7]

Předpis udává, že pokud budou směry rychlostí \dot{x} a \dot{x}_0 stejné, pak tlumič působí silou, která je rovna výrazu $b\dot{x}$. Pokud budou rychlosti vzájemně opačné, pak tlumič působí nulovou silou. U reálného tlumiče však není možné, aby při nenulové rychlosti pístu generoval nulovou sílu, proto je ideální Skyhook prakticky nerealizovatelný. Z toho důvodu musel být vytvořen model tzv. *reálného Skyhooku* (viz obr. 7), ve kterém je ideální tlumič nahrazen semiaktivním tlumičem a podle výše uvedeného předpisu je tlumič přepínán mezi aktivovaným a neaktivovaným stavem.

Pro efektivní řízení pomocí semiaktivních algoritmů, by měla být doba odezvy kratší, než přibližně desetina převrácené hodnoty vlastní frekvence závěsu, což nejsou současné tlumiče schopny zajistit. Podrobně se semiaktivním algoritmům věnuje publikace [7].

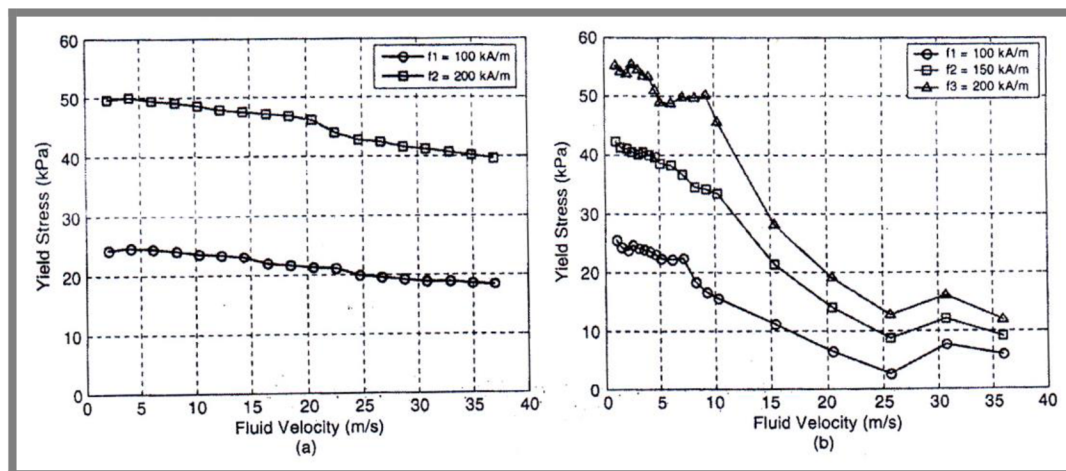
1.5 Omezující parametry MR tlumičů

1.5

Jak bylo výše popsáno, pro semiaktivní řízení je vyžadována co možná nejkratší doba odezvy tlumiče. Celkový čas odezvy se skládá ze dvou hlavních dílčích časů[7]:

- odezva MR kapaliny
- odezva cívky

Jako doba odezvy MR kapaliny je brána doba, za kterou kapalina dosáhne 63,2% smykového napětí odpovídajícího dané indukci. Autoři článku [5] provedli experiment, při němž testovali závislost meze kluzu na rychlosti proudění kapaliny skrz štěrbinu s magnetickým polem (aktivní zónou). K tomuto experimentu využili *slit-flow reometr*, který umožňuje měnit délku aktivní zóny i rychlost, jakou kapalina proudí skrze štěrbinu. Výsledky tohoto experimentu jsou zobrazeny na obr. 8.



Obr. 8 Závislost smykového napětí na rychlosti proudění (vlevo píst 25,4mm, vpravo 6,35mm)[5]

Jak je z grafu patrné, čím rychlejší je proudění kapaliny aktivní zónou, tím menší je dosažitelná mez kluzu. Jednoduše řečeno, částice kapaliny nemají dostatek času k vytvoření řetězců a proto je změna viskozity menší.

Druhou složkou celkové odezvy je vlastní doba odezvy cívky. Jak bylo výše zmíněno, lze cívku popsat jako systém prvního řádu, kde vstupní veličinou je napětí a výstupem je procházející proud. Pokud tedy na vstup přivedeme konstantní napětí, bude proud narůstat po exponenciále. Jelikož je magnetická indukce přímo závislá na procházejícím proudu, respektive mez kluzu je přímo úměrná magnetické indukci ve štěrbině, požadujeme, aby náběh proudu v cívce byl co nejrychlejší. Výrazného zkrácení doby odezvy cívky lze dosáhnout sofistikovanějším řízením

tlumiče pomocí proudového regulátoru. Tento regulátor pracuje tak, že při náběhu proudu vyvodí na vstupu cívky vyšší napětí, než jaké odpovídá požadovanému proudu a poté, co proud dosáhne požadovanou hodnoty, ustálí se napětí na odpovídající hodnotě tomuto proudu. Ve srovnání s napěťovým regulátorem, kdy byla doba potřebná k dosažení 95% požadovaného proudu asi 0,3s, při použití PWM regulátoru činil čas asi 0,06s. Tento způsob regulace je sice složitější a dražší, nicméně výrazně rozšiřuje možnosti použití MR tlumičů i do náročnějších podmínek, jakými je semiaktivní odpružení.

1.5.1

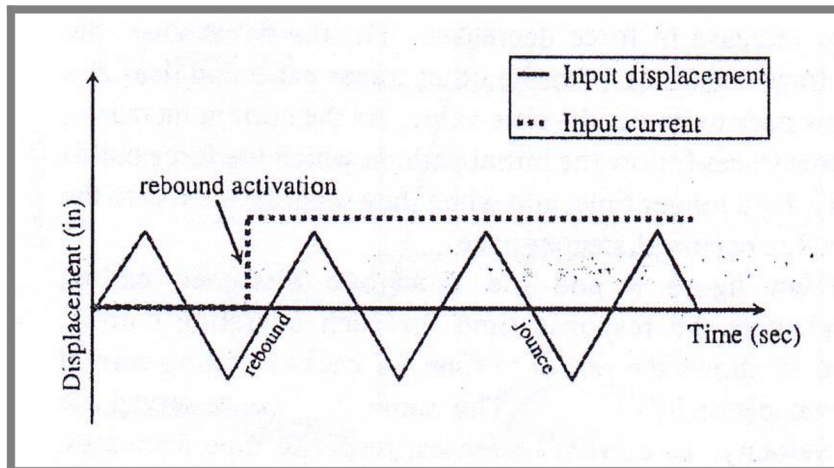
1.5.1 Vířivé proudy

Objevitelem tohoto jevu byl francouzský fyzik J. Foucault (1819-1868). Ten svými pokusy zjistil, že pokud se vodič pohybuje v magnetickém poli, dochází v něm k indukci napětí. Toto napětí ve vodiči vyvolává indukovaný proud, který si lze představit jako malé víry (odtud název jevu), a tento proud brání změně, která ho vyvolala [11].

Problematice vlivu vířivých proudů v MR technologii se věnuje článek [10]. Autoři zkonstruovali experimentální MR spojku a testovali dobu odezvy MR kapaliny ve stříhovém módu. V rámci experimentu bylo zjištěno, že doba odezvy MR spojky je závislá na použitém materiálu magnetického obvodu. Na základě tohoto výsledku byla autory navržena MR spojka s magnetickým obvodem z ferritu místo do té doby používané nízkouhlíkové oceli. Další měření pak prokázala, že při použití ferritu magnetická indukce daleko přesněji kopíruje průběh proudu v cívce. Z těchto výsledků se vycházelo i při konstrukci modifikovaného tlumiče, který byl navržen a zkonstruován na VUT v Brně.

1.6 Metodika měření odezvy

Aby bylo možné relevantně porovnávat získané výsledky z měření s výsledky experimentů ostatních týmů, je potřeba na tomto místě definovat metodiku určení odezvy. V článku [8] tým J. H. Koo použili při vyhodnocování trojúhelníkový budící signál (obr. 9), který zaručuje konstantní rychlost pístu a je tedy jednodušší na vyhodnocení. Tento model však enormně zatěžuje měřicí soustavu, zejména hydraulickou část pulzátoru, neboť při změně směru pohybu, tj. horní a dolní úvrat, dochází k teoreticky nekonečně velkému nárůstu zrychlení.



Obr. 9 Trojúhelníkový budící signál [8]

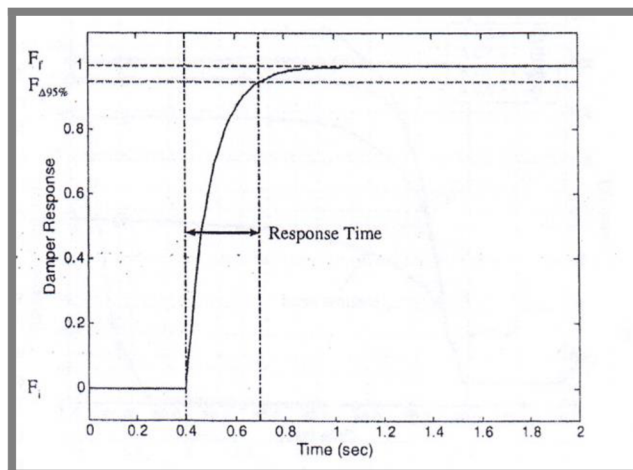
Výsledkem měření je graf závislosti síly na čase. Aby bylo možné srovnávat odezvu v různých režimech spínání, byl zaveden tzv. *normovaný tvar síly* (obr. 10), což je procentuální vyjádření působící síly. Tuto závislost získáme tak, že síla, která působí těsně před sepnutím je označena hladinou 0% a maximální síla vyvozená v aktivovaném stavu je označena hladinou 100%. Jako referenční hodnota byl určen čas, který je potřebný k *dosažení 95% maximální hodnoty*. Při experimentu byly dále nastaveny tyto parametry:

Rychlost pístu - 0,1-4 in/s (2,54-101,6 mm/s)

Amplituda výchylky - 0,5in (12,7mm)

Frekvence budícího signálu - 2Hz

Rozsah spínaného proudu - 0,5-2A (krok 0,5A)



Obr. 10 Graf normalizované síly[8]

Z grafu je patrná doba odezvy, která činí 25ms (pro rychlost pístu 6in/s a řídicí proud 1A). Výše popsaný postup je velmi vhodný z důvodu snadného vyhodnocení, nicméně není dostatečně blízký reálné situaci, neboť konstantní rychlosti prakticky nelze v reálné aplikaci dosáhnout. Z toho pohledu se jeví jako vhodnější *harmonický budicí signál*. Detailní postup měření doby odezvy je popsán v kapitole 3.

2. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

V současnosti není na trhu dostupný sériově vyráběný tlumič, který by poskytoval dostatečně krátkou dobu odezvy pro semiaktivní řízení. Z toho důvodu vyvstal požadavek, na vývoj nového typu tlumiče, který dokázal by dobu odezvy zkrátit na co nejnižší hodnotu, a tím by umožňoval nasazení i v extrémnějších podmínkách. Návrh nového tlumiče vychází z experimentů provedených na MR spojce, kde se jasně potvrdil fakt, že použití ferritu v magnetickém obvodu tlumiče výrazně zlepšuje průběh magnetické indukce ve štěrbině a tím zkracuje dobu odezvy celého tlumiče. Experimenty na VUT také potvrdily, že výrazný vliv na dobu odezvy má použitý regulátor. Z toho důvodu se domníváme, že při použití rychlého PWM regulátoru v kombinaci s modifikovaným pístem se budeme schopni s dobou odezvy dostat na hodnotu potřebnou pro semiaktivní řízení.

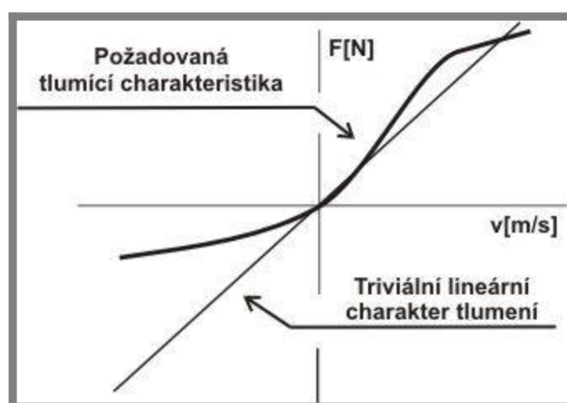
Hlavním cílem této práce je popsat *experimentální zjištění doby odezvy MR tlumiče s modifikovanou pístovou skupinou* a vyhodnotit naměřená data, aby je bylo možné použít k dalšímu zpracování, v podobě grafu normalizované síly závislé na čase a tabulek s dobou odezvy v různých režimech, kdy bude měření provedeno pro harmonický signál a trojúhelníkový signál.

Mimo hlavní cíl, bylo určeno několik dalších dílčích cílů:

- *Určení parametrů přechodové charakteristiky*
- *Navržení optimalizace měřicí metodiky při určení odezvy*
- *Ověření změny účinků vířivých proudů*
- *Porovnání vlastností originálního a modifikovaného tlumiče*

3. MATERIÁL A METODY

Pro objektivní a relevantní měření, musíme zavést postupy, které přesně definují, které veličiny a jakým způsobem budeme měřit. Hlavními veličinami charakterizující vlastnosti tlumiče jsou síla vyvozená tlumičem a rychlost pístu. Závislost těchto veličin vyjadřuje F-v charakteristika (obr. 11). Tuto charakteristiku lze přímo měřit na hydraulickém pulzátoru. Pro naše měření jsme použili hydraulický pulzátor značky Inova. Problémem při měření F-v charakteristiky je hysterezní chování tlumiče, které je výrazně ovlivněno frekvencí budícího signálu, proto je nutné při každém měření definovat amplitudu výchylky a frekvenci budícího signálu. To nám zaručuje, že v budoucnu bude možné tento experiment opakovat za stejných podmínek. Parametry byly měřeny na třech typech tlumičů. První tlumič byl konvenční tlumič s ocelovým pístem i jádrem cívky. Druhý tlumič byl osazen ferritovým jádrem a ocelovým pístem. Třetí tlumič obsahoval ferritový píst i jádro cívky. U všech tří konstrukčních variant je cílem zjistit dobu odezvy, nejdříve magnetické indukce ve šterbině, a pak odezvu síly, kterou tlumič generuje.



Obr. 11 Idealizovaná F-v charakteristika [3]

3.1 Přejchodová charakteristika magnetické indukce

Prvním měřením, které jsme provedli, bylo určení odezvy magnetické indukce ve šterbině pístu. Toto měření probíhalo *na vzduchu za normálních podmínek*. Měření probíhalo ve dvou režimech regulování pomocí PWM regulátoru vyvinutého na VUT. V prvním režimu fungoval regulátor jako generátor *skokového signálu napětí*, který byl držen po určité době a pak odpojen. Takový typ regulace odpovídá běžně používané napěťové regulaci. Tento režim je dále označován jako *pomalý režim*. V druhém režimu byl regulátor použit v režimu proudové regulace, což znamená, že na výstupu regulátoru byla generována *skoková změna řídicího proudu*. Tento režim je dále označován jako *rychlý režim*.

3.1.1. Napěťový režim (pomalý režim)

V tomto režimu fungoval regulátor jako napěťový zdroj, tj. byla pomocí regulátoru realizována vazba mezi vstupním signálem a výstupním napětím. Regulátor při sepnutí obvodu vygeneroval *jednotkový skok řídicího napětí* a tuto hodnotu držel po celou nastavenou dobu. V tomto režimu se jedná o to, že odezva na skokovou změnu řídicího napětí je skoková změna napětí na cílce tlumiče. Tento režim je

typický tím, že náběh proudu je velmi plynulý a pozvolný v případě MR tlumiče se v tomto režimu doba odezvy pohybuje v řádu desítek ms.

3.1.2. Proudový režim (rychlý režim)

3.1.2

V tomto režimu fungoval regulátor jako proudový zdroj, tj. byla realizována vazba mezi vstupním signálem a výstupním proudem. Regulátorem byl při sepnutí vygenerován *jednotkový skok proudu* (v ideálním případě), což zaručilo, že náběh magnetické indukce bude nejrychlejší možný. Při použití tohoto režimu regulace jde o to, že odezva na skokovou změnu řídicího napětí je skoková změna proudu. Doba odezvy při tomto režimu se pohybovala v jednotkách ms.

3.1.3. Použité vybavení

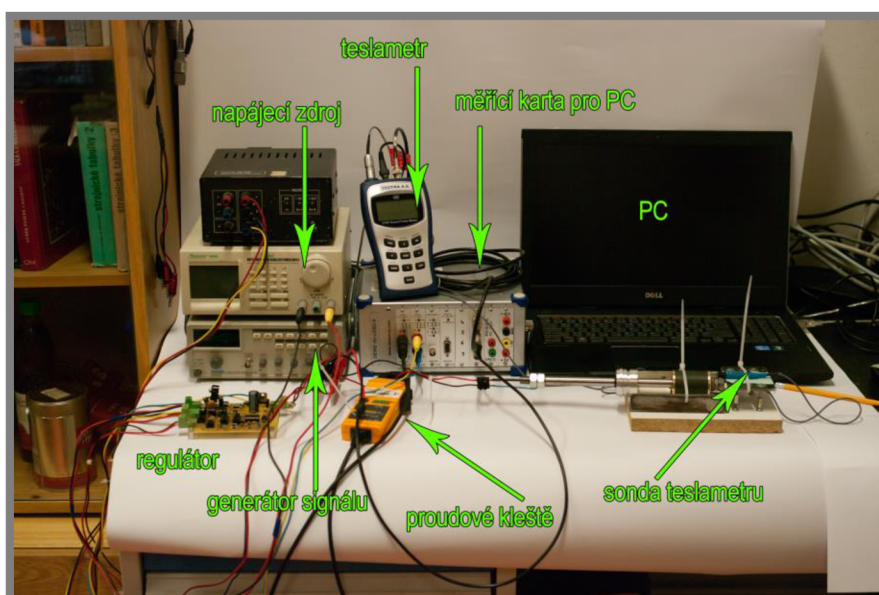
3.1.3

Teslametr, laboratorní napájecí zdroj, generátor pulsního signálu, regulátor, měřící karta, proudové kleště, PC s měřícím softwarem DEWEsoft,

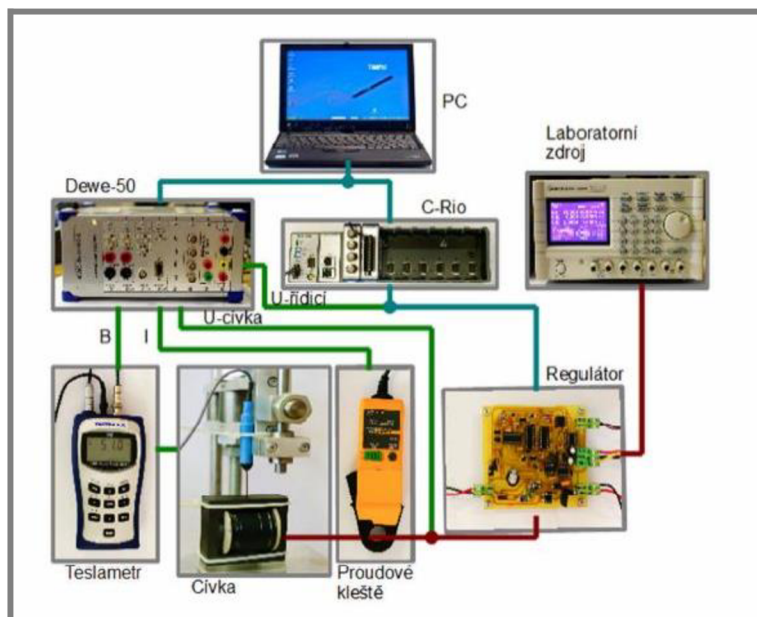
3.1.4. Zapojení

3.1.4

Na vstup regulátoru byl připojen napájecí zdroj společně s generátorem signálu. Na výstup z regulátoru byl připojen samotný tlumič a z propojovacího vodiče byl pomocí proudových kleští měřen procházející proud, který byl přes měřící kartu zaznamenáván počítačem. Přes měřící kartu byl připojen také teslametr. Schéma celé sestavy znázorňují obr. 12 a 13.



Obr. 12 Foto měřicí sestavy



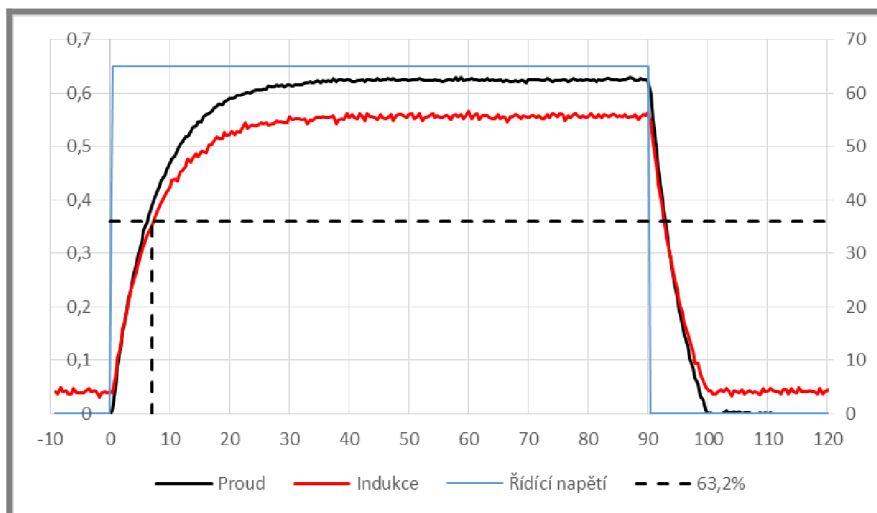
Obr. 13 Schéma měřicí sestavy
(převzato z práce [7])

3.1.5

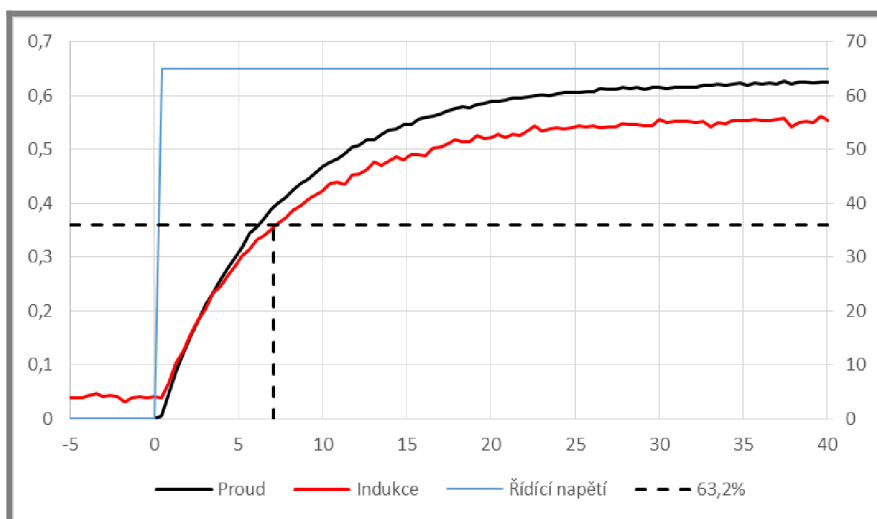
3.1.5. Postup vyhodnocení

Jelikož jsme celý systém aproximovali soustavou 1. řádu, je brána jako referenční hodnota pro určení odezvy 63,2% výsledné hodnoty pozorované veličiny. Pro demonstraci postupu vyhodnocení byl zvolen proud 0,5A měřený na ferritovém pístu.

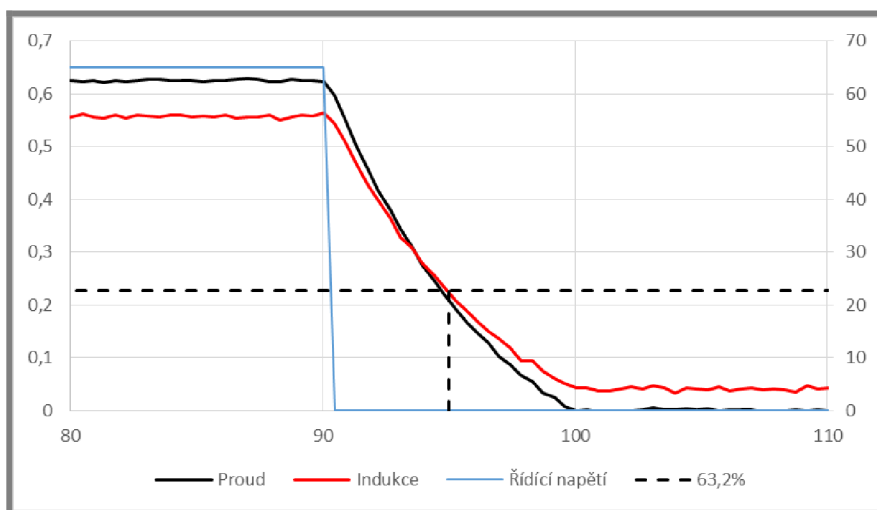
V prvním grafu (obr. 14) je zaznamenán časový průběh elektrického proudu a magnetické indukce ve jmenovitých hodnotách ve šterbině pístu. Černá křivka platí pro proud a odpovídající hodnoty jsou zobrazeny na levé ose. Červená křivka popisuje průběh magnetické indukce a odpovídající hodnoty jsou vyneseny do pravé osy. Čárkovaná křivka udává jmenovitou hodnotu 63,2% a čas, v němž je tato hodnota dosažena (hodnota odezvy je ale určována z normovaného průběhu, viz dále). Graf je ještě doplněn o průběh napětí, aby bylo možné posoudit, jak rychle celý systém reaguje na sepnutí obvodu. Obr. 15 a 16 zobrazují detail náběžné a sestupné hrany.



Obr. 14 Průběh proudu a magnetické indukce v čase (jmenovité hodnoty) – napět'ový režim



Obr. 15 Detail náběžné hrany – napět'ový režim



Obr. 16 Detail sestupné hrany – napět'ový režim

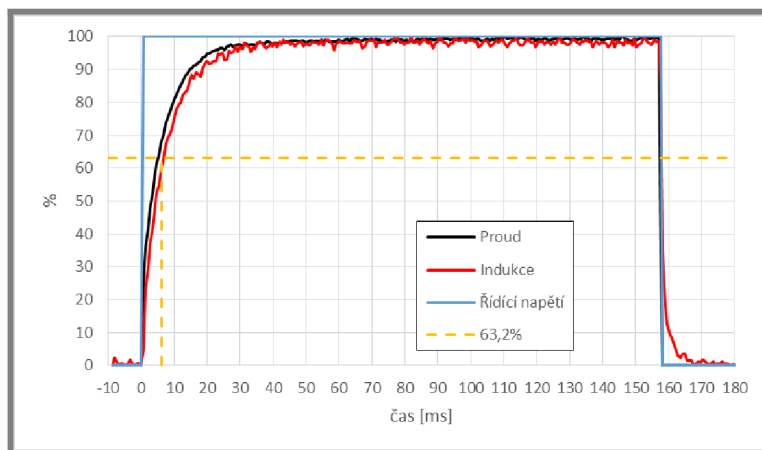
Algoritmus pro vyhodnocení dat byl naprogramován tak, aby naměřená data nejdříve převedl do *normalizovaného tvaru*, což je procentuální vyjádření okamžité hodnoty v závislosti na čase. Z tohoto průběhu pak byla určena časová odezva jako bod, kdy pozorovaná veličina dosáhne 63,2%. Vztah, pro výpočet normalizovaného průběhu magnetické indukce je následující:

$$B_n = \frac{B - B_{min}}{B_{max} - B_{min}} \cdot 100 [\%]$$

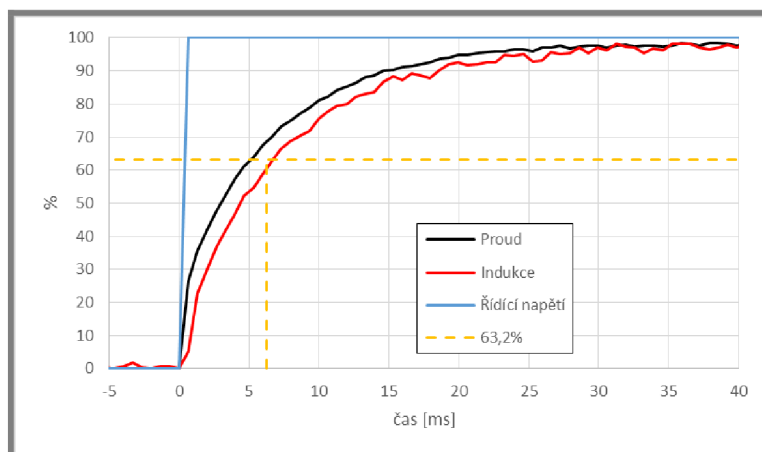
kde:

B_n	[T]	- normalizovaná hodnota
B	[T]	- naměřená hodnota
B_{max}	[T]	- maximální naměřená hodnota
B_{min}	[T]	- minimální naměřená hodnota (tzv. remanentní magnetismus)

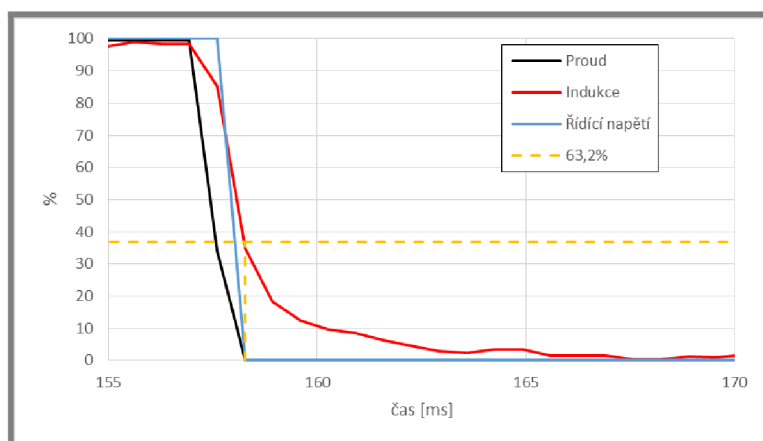
Pro výpočet normalizovaného průběhu proudu platí analogický vzorec, pouze hodnota I_{min} bude rovna nule, neboť v momentě před sepnutím byl obvod rozpojen, takže neprocházela žádný proud. Průběh normovaných veličin je zobrazen na obr. 17, 18 a 19 včetně znázornění doby odezvy. Cílem převodu veličin do normovaného tvaru je fakt, že v tomto zobrazení lze velmi dobře sledovat průběh veličin a zkoumat do jaké míry se jednotlivé průběhy překrývají.



Obr. 17 Normovaný průběh veličin (napět'ový režim)



Obr. 18 Normovaný průběh veličin - detail náběžné hrany



Obr. 19 Normovaný průběh veličin - detail sestupné hrany

3.2 Přejchodová charakteristika síly

3.2

Při tomto experimentu byl použit hydraulický pulzátor od firmy Inova (obr. 14). Výhodou tohoto zařízení je, že je osazen všemi potřebnými senzory a zpracování informací probíhá přímo na dodaném PC s potřebným softwarem. Výsledná data byla uložena ve formě textového souboru, který byl zpracován a vyhodnocen pomocí softwaru Matlab2013. Metody použité při vyhodnocování odezvy se neliší od metod použitých pro určení odezvy magnetické indukce.

3.2.1 Vstupní parametry

3.2.1

Vstupními parametry pro tento experiment jsou frekvence budícího signálu, amplituda budícího signálu, velikost spínaného proudu. Pro naše podmínky byly nastaveny tyto hodnoty:

Frekvence budícího signálu: *pro harmonický signál 1 a 2 Hz (0,1 m/s a 0,2 m/s)*
pro trojúhelníkový signál 1,67 a 3,34 Hz
(0,1 m/s a 0,2 m/s)

Amplituda výchylky: *14mm*

Spínaný proud: *0,5-2,5A (krok 0,5)*

3.2.2 Použitá regulace

3.2.2

Pro regulaci při tomto experimentu byl zvolen již výše zmíněný PWM regulátor vyvinutý na VUT. Stejně jako při určování přechodové charakteristiky byla odezva měřena v obou režimech regulace.

3.2.3 Výstup

3.2.3

Výstupem tohoto měření je graf normalizované síly v závislosti na čase. Naměřená data je potřeba upravit tak, aby byly průběhy veličin synchronizované, neboť jak

ukázaly testy, hydraulický pulzátor, který byl použit pro naše experimenty, nemá správně synchronizované kanály. Z toho důvodu byl změřen posuv mezi průběhem síly a proudu a bylo zjištěno, že síla se za sepnutím proudu zpožďuje v rozmezí 0,5-1,2ms. Z toho důvodu bylo potřeba průběh síly posunout tak, aby body sepnutí proudu i síly byly přibližně stejné. Jako relevantní hodnotu jsme určili posun síly o 0,5ms, neboť tato hodnota zaručuje, že odezva určená z vyhodnocovacího algoritmu nebude kratší, než skutečná.

3.2.4

3.2.4. Algoritmus vyhodnocení dat

Po načtení dat z externího souboru je potřeba manuálně z naměřeného průběhu proudu najít přibližný bod sepnutí. V našem případě došlo k sepnutí proudu po uplynutí času odpovídající čtyřem periodám, vypnutí pak po šesti. Nastavení zkoumaného intervalu bylo nastaveno -20ms až 80ms od bodu sepnutí. Poté je potřeba určit síly v neaktivovaném respektive aktivovaném stavu. Tyto hodnoty se určí jako okamžitá hodnota síly v bodě o periodu dříve respektive později od bodu sepnutí. Pomocí těchto hodnot určíme normalizovaný průběh podle následujícího vzorce:

$$F_n = \frac{F - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \cdot 100 [\%]$$

kde:

F_n	N	- normalizovaná síla
F	N	- naměřená hodnota
F_{min}	N	- síla v neaktivovaném stavu
F_{max}	N	- síla v aktivovaném stavu

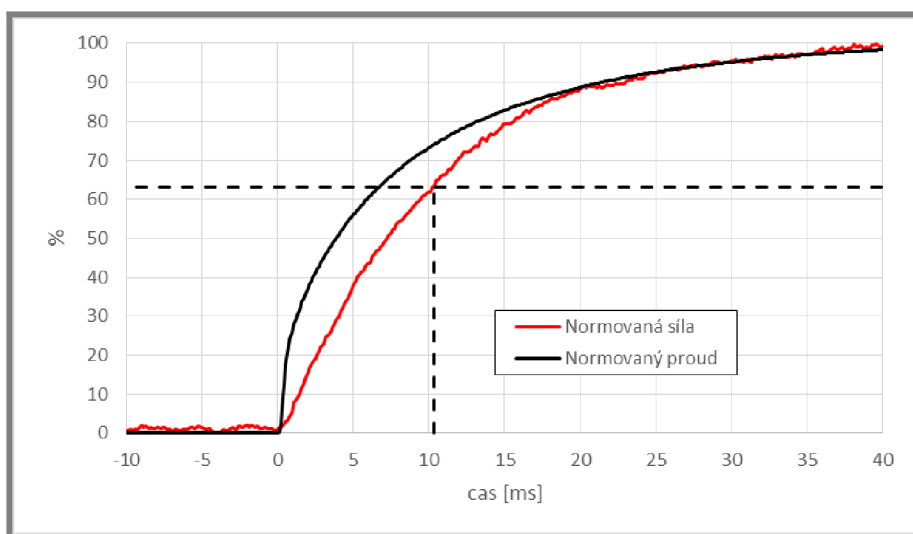
Stejný vzorec platí pro výpočet normalizovaného průběhu proudu pouze s obměnou, kdy minimální hodnota proudu je nulová.

Z normalizovaného průběhu (obr. 20) lze určit hodnotu odezvy T . V tomto bodě se liší algoritmy pro vyhodnocení náběžné respektive sestupné hrany. Pro náběžnou hranu je jako počáteční čas T_0 je určen čas, v němž hodnota proudu dosáhne 0,1 A. Tato hodnota byla experimentálně určena jako vhodná vzhledem k šumu, kterým jsou data zatížena. Jako bod T_{63} je brán čas, v němž veličina dosáhne 63,2% maximální ustálené hodnoty. Hodnota odezvy je brána jako rozdíl těchto časů.

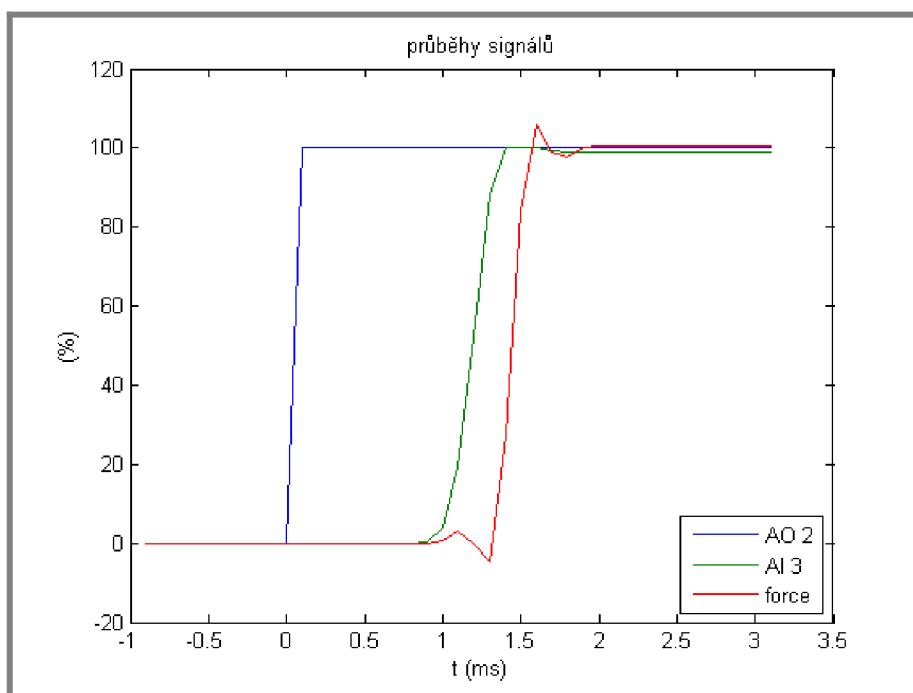
Pro sestupnou hranu je určen jako T_0 čas, kdy dojde k poklesu hodnoty proudu na 96% své maximální ustálené hodnoty. Tato tolerance byla zvolena opět z důvodu zatížení dat šumem. Vyhodnocení času T_{63} je ekvivalentní jako na náběžné hraně.

Na měřicí aparatuře, kterou jsme použili, bylo potřeba ještě brát v úvahu nesynchronní průběh měřených veličin. Jak ukazuje obr. 21 průběh síly (červená křivka) se zpožďuje za průběhem napětí o více než 1ms, tedy tyto kanály nejsou synchronizovány. Z tohoto důvodu musela být provedena při vyhodnocování korekce naměřených dat, která byla zvolena 0,5ms. Taková korekce je možná, neboť neovlivňuje negativně výsledky. Zjednodušeně řečeno, naše korekce nezpůsobí, že bychom získali odezvu kratší, než jakou opravdu tlumič má.

Důležité je také na tomto místě poznamenat, že vzhledem ke vzorkovací frekvenci 10000Hz jsme schopni vyhodnotit pouze odchylky v rámci desetin milisekund. Přesnější měření nám testovací aparatura neumožňuje.



Obr. 20 Průběh normované síly na náběžné hraně (2,5A, pomalý režim, 0,1m/s)

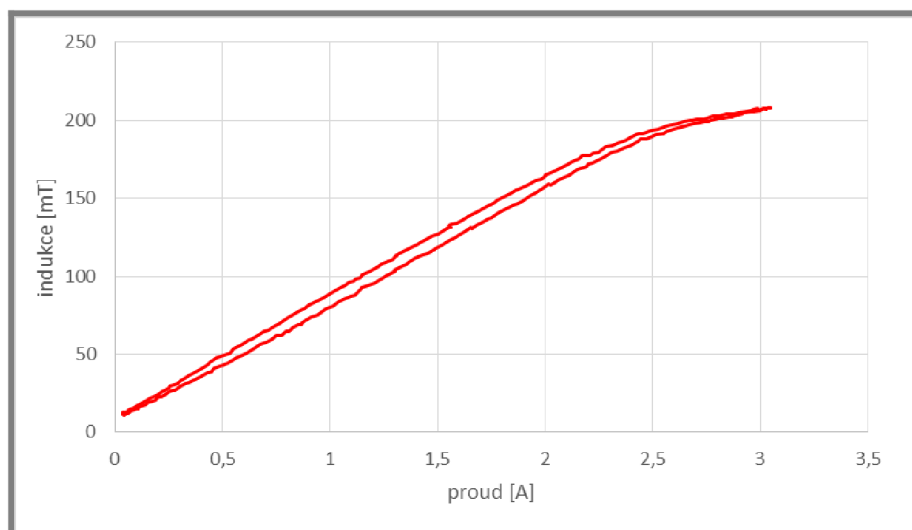


Obr. 21 Reálný průběh náběžné hrany signálu na měřící aparatuře

4. VÝSLEDKY

4.1 Výsledky přechodové charakteristiky

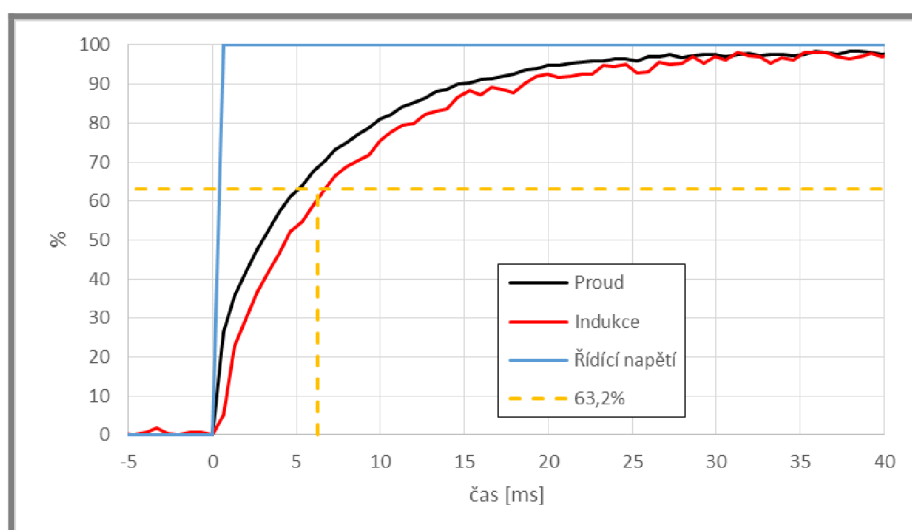
V rámci měření přechodové charakteristiky na vzduchu bylo potřeba nejdříve změřit hysterezní křivku, která slouží k určení intervalu regulačního proudu.



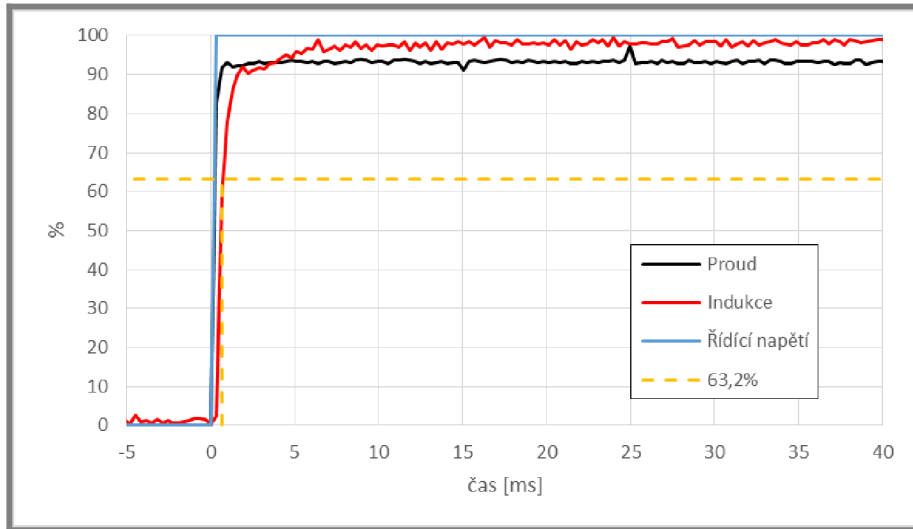
Graf 1 Hysterezní křivka ferrit-ocelového tlumiče

Graf 2 zobrazuje naměřenou hysterezní křivku (pro ferrit-ocelový píst), kde je patrné, že ke zlomu v průběhu magnetické indukce dochází kolem hodnoty 2,5A regulačního proudu. Na základě toho byl určen regulační rozsah 0-2,5 A.

Na grafech 3 a 4 je zobrazeno porovnání náběžných hran obou regulačních režimů pro procházející proud 0,5A.



Graf 2 Detail náběžné hrany - proud 0,5A, pomalý režim regulace



Graf 3 Detail náběžné hrany - proud 0,5A, rychlý regulační režim

4.1.1. Regulace v pomalém režimu

Následující tabulky (1-3) shrnují výsledky měření v pomalém režimu regulace pro různé konstrukční varianty. Je cílem zaznamenat závislost délky odezvy magnetické indukce na procházejícím proudu a použitém materiálu. Tabulky uvádí tyto hodnoty:

I_{max} – maximální dosažený procházející proud

B_{max} – maximální naměřená indukce při dané hodnotě proudu

$B(63,2\%)$; $I(63,2\%)$ – referenční hodnota magnetické indukce resp. procházejícího proudu v 63,2% maximální hodnoty

T_{BN} ; T_{BS} – odezva magnetické indukce na náběžné resp. sestupné hraně

$B(36,8\%)$; $I(36,8\%)$ – referenční hodnota magnetické indukce resp. procházejícího proudu na sestupné hraně v 63,2% sestupu

Tab. 1 Ocelový píst - pomalý režim

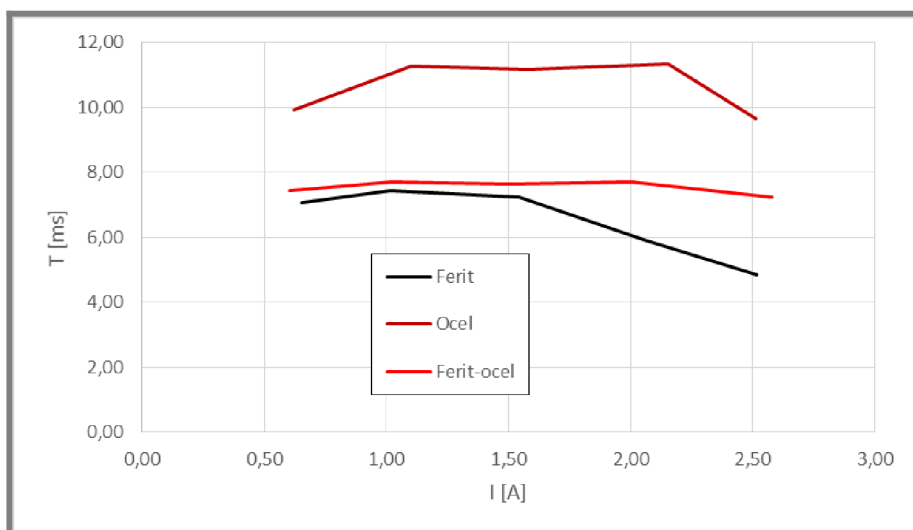
I_{max} [A]	0,62	1,10	1,58	2,16	2,51
B_{max} [mT]	61,44	103,53	147,61	202,99	236,59
$B(63,2\%)$	46,71	73,32	101,08	136,02	157,41
T_{BN} [ms]	9,92	11,28	11,18	11,35	9,65
$I(63,2\%)$	0,39	0,69	1,00	1,36	1,58
T_{IN} [ms]	3,75	4,68	5,07	5,34	4,45
$B(36,8\%)$	36,14	51,64	67,70	87,98	100,60
T_{BS} [ms]	6,17	7,90	8,83	9,48	9,73
$I(36,8\%)$	0,23	0,41	0,58	0,79	0,92
T_{IS} [ms]	1,85	3,16	3,84	4,28	4,50

Tab. 2 Ferrit-ocelový píst - pomalý režim

I_{max} [A]	0,61	1,02	1,51	2,00	2,58
B_{max} [mT]	54,00	85,40	123,26	160,60	198,55
$B(63,2\%)$	37,91	57,55	81,50	105,11	129,14
T_{BN} [ms]	7,44	7,72	7,66	7,72	7,24
$I(63,2\%)$	0,38	0,64	0,95	1,26	1,63
T_{IN} [ms]	5,59	5,94	6,16	6,32	6,31
$B(36,8\%)$	26,36	37,57	51,55	65,29	79,34
T_{BS} [ms]	4,89	6,01	6,64	7,14	7,39
$I(36,8\%)$	0,22	0,38	0,55	0,74	0,95
T_{IS} [ms]	3,16	4,16	4,96	5,37	5,45

Tab. 3 Ferritový píst - pomalý režim

I_{\max} [A]	0,66	1,02	1,55	2,07	2,52
B_{\max} [mT]	57,00	86,54	128,36	150,47	160,31
$B(63,2\%)$	37,01	55,68	82,08	95,99	102,33
T_{BN} [ms]	7,07	7,44	7,23	5,89	4,87
$I(63,2\%)$	0,41	0,64	0,97	1,30	1,59
T_{IN} [ms]	6,67	6,97	7,08	7,16	7,01
$B(36,8\%)$	22,67	33,54	48,87	56,90	60,73
T_{BS} [ms]	4,72	5,54	6,21	6,62	6,65
$I(36,8\%)$	0,24	0,37	0,57	0,76	0,93
T_{IS} [ms]	4,61	5,37	5,96	5,43	4,68



Graf 4. Závislost odezvy magnetické indukce na řídicím proudu v pomalém režimu

4.1.2. Regulace v rychlém režimu

Následující tabulky (4-6) shrnují výsledky měření v rychlém režimu regulace. Stejně jako v předchozím měření jsou výsledky shrnuty do grafické závislosti doby odezvy na regulačním proudu.

Tab. 4 Ocelový píst - rychlý režim

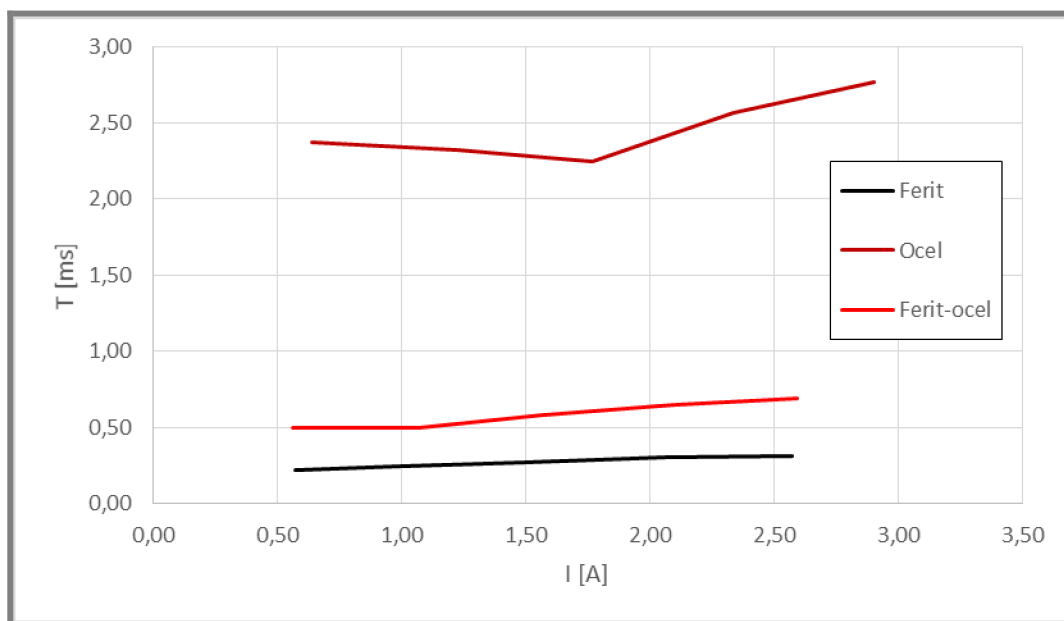
I_{max} [A]	0,64	1,23	1,77	2,34	2,90
B _{max} [mT]	38,47	93,65	144,89	193,06	247,06
B(63,2%)	26,77	63,28	96,86	128,15	163,57
T_{BN} [ms]	2,38	2,32	2,25	2,57	2,77
I(63,2%)	0,40	0,77	1,12	1,47	1,83
T _{IN} [ms]	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
B(36,8%)	18,37	41,49	62,40	81,58	103,67
T_{BS} [ms]	2,84	2,14	2,31	4,55	4,79
I(36,8%)	0,24	0,45	0,65	0,86	1,07
T _{IS} [ms]	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05

Tab. 5 Ferrit-ocelový píst - rychlý režim

I_{max} [A]	0,57	1,07	1,57	2,10	2,59
B _{max} [mT]	47,13	85,79	125,94	164,58	197,13
B(63,2%)	32,82	57,15	82,31	106,67	127,18
T_{BN} [ms]	0,50	0,50	0,59	0,65	0,69
I(63,2%)	0,36	0,67	0,99	1,32	1,63
T _{IN} [ms]	0,04	0,06	0,10	0,14	0,17
B(36,8%)	22,55	36,60	51,01	65,13	76,99
T_{BS} [ms]	0,54	0,51	0,57	0,63	0,68
I(36,8%)	0,21	0,39	0,58	0,77	0,95
T _{IS} [ms]	0,02	0,05	0,08	0,10	0,12

Tab. 6 Ferritový píst - rychlý režim

I_{max} [A]	0,57	1,00	1,49	2,06	2,57
B _{max} [mT]	51,31	85,04	124,01	150,05	162,22
B(63,2%)	33,44	54,77	79,44	95,87	103,60
T_{BN} [ms]	0,22	0,25	0,27	0,31	0,31
I(63,2%)	0,36	0,63	0,94	1,30	1,62
T _{IN} [ms]	0,07	0,11	0,14	0,19	0,23
B(36,8%)	20,62	33,06	47,46	56,99	61,55
T_{BS} [ms]	0,22	0,25	0,28	0,31	0,32
I(36,8%)	0,21	0,37	0,55	0,76	0,95
T _{IS} [ms]	0,09	0,12	0,15	0,17	0,16



Graf 5. Závislost odezvy magnetické indukce na řídicím proudu v rychlém režimu

Z výše uvedených výsledků je patrné, že konstrukční změny výrazně zkrátily dobu odezvy magnetické indukce už při použití pomalého režimu regulace, kdy doba odezvy nepřesáhla hodnotu 8ms. V rychlém režimu regulace se doba odezvy dokonce dostala pod hodnotu 1ms. Tyto výsledky jsou dobrým podkladem pro dynamickou simulaci na hydraulickém pulzátoru, neboť naznačují, že celková doba odezvy by se měla u ferritového pístu výrazně zkrátit v porovnání s ocelovým pístem.

4.2 Výsledky dynamické simulace na hydraulickém pulzátoru

Z naměřených dat byl pro účely publikace výsledků vybrán harmonický režim.

4.2.1 Rychlý režim

Tab. 7 Originální píst - harmonický signál, rychlost 0,1 m/s

I_{max} [A]	0,49	0,94	1,38	1,83	2,26
F _{max} [N]	252,66	362,23	440,43	483,84	509,89
F _{min} [N]	190,41	190,23	191,72	191,27	190,6
T_{FN} [ms]	16,7	13,8	9,1	6,6	5
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
T_{FS} [ms]	14,3	15,3	16,1	24,8	28,3
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Tab. 8 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,1 m/s

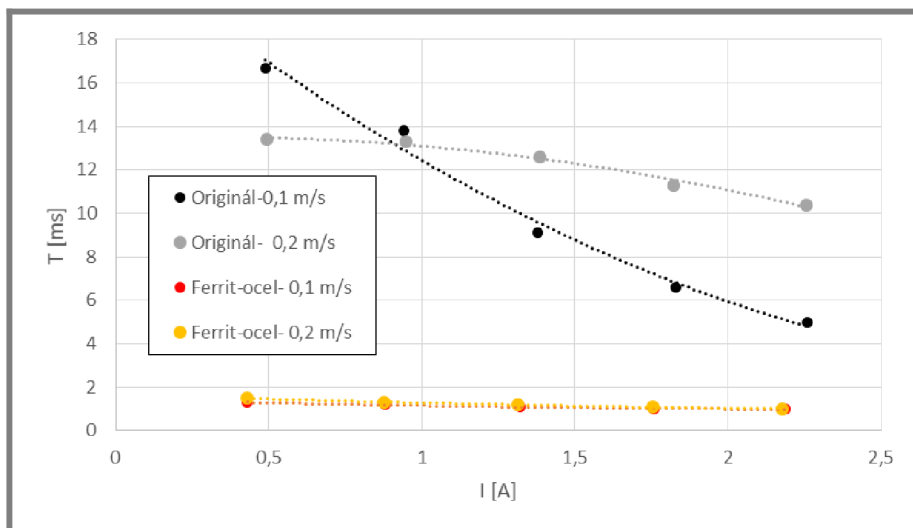
I_{max} [A]	0,43	0,88	1,32	1,76	2,19
F _{max} [N]	425,57	546,76	569,25	585,49	601,16
F _{min} [N]	317,9	315,46	321,2	318,93	318,16
T_{FN} [ms]	1,3	1,2	1,1	1	1
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4
T_{FS} [ms]	1	1,4	1,4	1,4	1,5
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Tab. 9 Originální píst - harmonický signál, rychlost 0,2 m/s

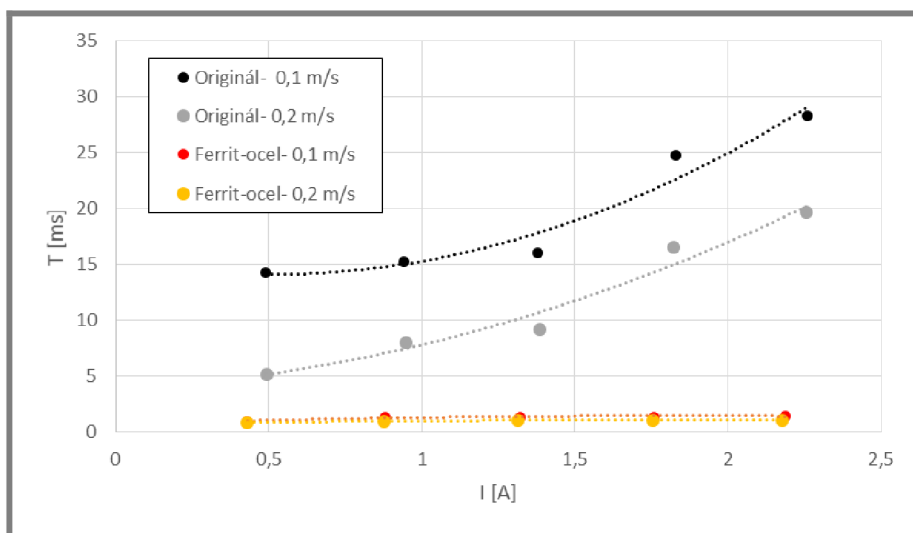
I_{max} [A]	0,49	0,95	1,39	1,82	2,26
F _{max} [N]	278,62	425,87	578,59	692,38	785,93
F _{min} [N]	218,36	212,54	214,45	209,79	213,87
T_{FN} [ms]	13,4	13,3	12,6	11,3	10,4
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
T_{FS} [ms]	5,2	8,0	9,2	16,6	19,7
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Tab. 10 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,2 m/s

I_{max} [A]	0,43	0,88	1,31	1,76	2,18
F _{max} [N]	431,65	573,64	609,20	632,91	641,70
F _{min} [N]	330,71	324,22	326,69	326,15	325,07
T_{FN} [ms]	1,5	1,3	1,2	1,1	1
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
T_{FS} [ms]	0,9	1	1,1	1,1	1,1
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3



Graf 6 Porovnání odezvy při náběhu v rychlém režimu



Graf 7 Porovnání doby odezvy při sestupu v rychlém režimu

4.2.2. Pomalý režim

Tab. 11 Originální píst – harmonický signál, rychlost 0,1 m/s

I_{max} [A]	0,99	1,50	2,00	2,50
F _{max} [N]	383,62	472,82	521,31	553,03
F _{min} [N]	194,28	196,72	196,18	198,29
T_{FN} [ms]	28,4	22,3	16,5	13,3
T _{IN} [ms]	6,4	7,2	7,3	7,2
T_{FS} [ms]	22,7	28,9	29,8	32,9
T _{IS} [ms]	3,1	3,9	4,1	3,9

Tab. 12 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,1 m/s

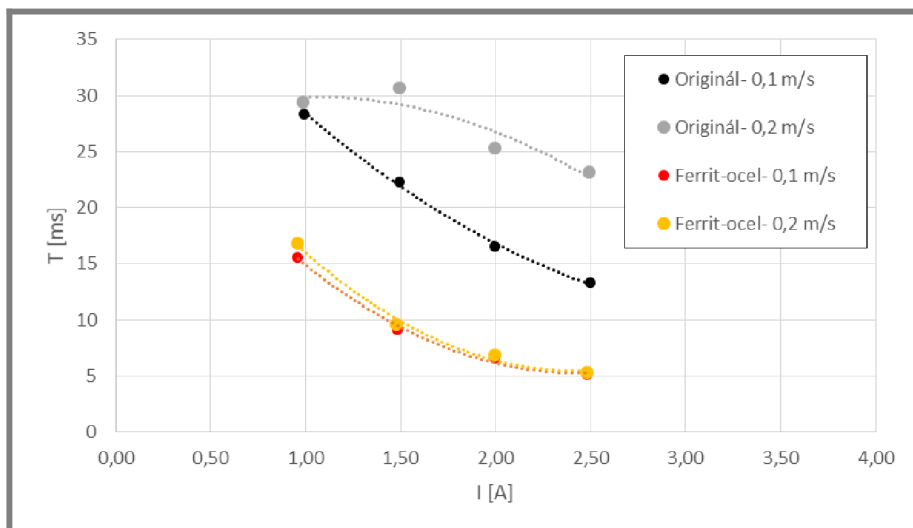
I_{max} [A]	0,96	1,48	2,00	2,48
F _{max} [N]	548,78	575,65	597,03	610,08
F _{min} [N]	314,55	315,99	313,52	316,15
T_{FN} [ms]	15,6	9,1	6,6	5,1
T_{IN} [ms]	12,3	11,4	9,9	7,8
T _{FS} [ms]	15	16,7	16,8	15,7
T _{IS} [ms]	5,5	2,4	1,3	0,9

Tab. 13 Originální píst - harmonický režim, rychlost 0,2 m/s

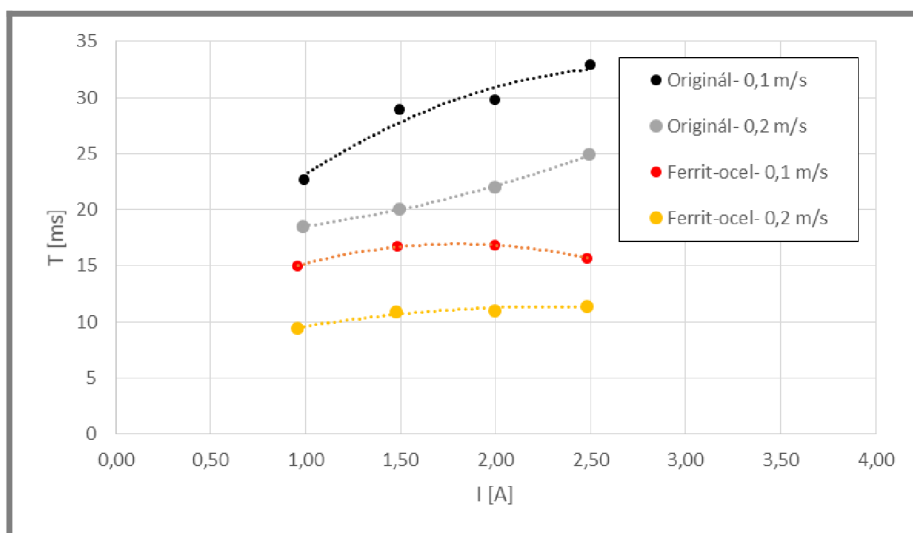
I_{max} [A]	0,99	1,49	1,99	2,49
F _{max} [N]	430,56	607,18	737,90	850,45
F _{min} [N]	213,28	213,47	216,87	214,85
T_{FN} [ms]	29,4	30,7	25,3	23,2
T _{IN} [ms]	6,1	6,8	7	6,9
T_{FS} [ms]	18,5	20,1	22	24,9
T _{IS} [ms]	3,4	4,2	4,3	4,1

Tab. 14 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,2 m/s

I_{max} [A]	0,96	1,48	2,00	2,48
F _{max} [N]	583,57	615,98	640,50	654,26
F _{min} [N]	324,81	325,07	322,14	325,84
T_{FN} [ms]	16,8	9,6	6,9	5,3
T _{IN} [ms]	12,3	11,6	10,2	7,9
T_{FS} [ms]	9,4	10,9	11	11,4
T _{IS} [ms]	6,9	3,6	1,7	1



Graf 8 Porovnání odezvy při náběhu v pomalém režimu



Graf 9 Porovnání odezvy při sestupu v pomalém režimu

5. DISKUZE

Z uvedených výsledku lze jednoznačně usoudit, že konstrukční změny provedené na pístové skupině přinesly výrazné zkrácení doby odezvy.

Při měření přechodové charakteristiky na vzduchu byl nejdříve určen regulační interval, tj. interval hodnot proudu, v němž se závislost magnetické indukce na proudu blíží lineární funkci. Z hysterezní křivky vyplynul interval přibližně 0 – 2,5A. Výsledky naznačily, že konstrukční změny přinesly zkrácení doby odezvy o přibližně 2 až 4ms v pomalém i rychlém regulačním režimu na hodnotu okolo 6ms.

Následovalo měření přechodové charakteristiky na hydraulickém pulzátoru, kde se potvrdilo, že zkrácení odezvy je opravdu markantní. Z pohledu řízení je relevantní odezva v rychlém regulačním režimu pro proudy 1,5-2,5A. Při tomto nastavení byla naměřena odezva o velikosti do 2ms, což znamená zkrácení asi o 10ms. Důležitým poznatkem také je, že doba odezvy je jen velmi málo závislá na procházejícím proudu a drží si téměř konstantní hodnotu jak při náběžné tak sestupné hraně řídicího signálu.

Na tomto místě je potřeba ještě upozornit na jistá zjednodušení a nepřesnosti, které byly do vyhodnocování zaneseny. Jedním z hlavních problémů, se kterými jsme se potýkali, byla špatná synchronizace vstupů a výstupů na hydraulickém pulzátoru, nicméně korekce, která byla provedena ve vyhodnocovacím algoritmu nezapříčinila, že by vyhodnocená odezva byla kratší, než jakou tlumič ve skutečnosti má.

Druhým faktem, který má vliv na přesnost vyhodnocení je vzorkovací frekvence, která byla nastavena na maximální možnou hodnotu, kterou dovoluje testovací aparatura, tedy 10000Hz. Tato frekvence umožňuje maximální rozlišení Δt 0,1ms.

6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo experimentální zjištění doby odezvy MR tlumiče s modifikovanou pístovou skupinou. Modifikace spočívala v nahrazení materiálu jádra elektromagnetické cívky materiálem s vhodnějšími elektromagnetickými vlastnostmi. Při této úpravě se vycházelo z experimentů provedených na MR spojce a byl stanoven předpoklad, že tato úprava by měla přinést výrazné zkrácené doby odezvy, která do té doby nevyhovovala pro použití tlumiče v semiaktivních systémech.

V první části experimentu byla naměřena charakteristika magnetické indukce (hysterezní křivka) ve štěrbině pístu na vzduchu, na jejímž základě byl určen regulační interval (0-2,5A). Společně s hysterezní křivkou byla změřena přechodová charakteristika magnetické indukce na vzduchu, která byla předpokladem pro úspěšné pokračování v experimentu. Výsledky analýzy přechodové charakteristiky indukce lze považovat za uspokojivé, neboť v porovnání s originálním ocelovým tlumičem došlo k výraznému zkrácení doby odezvy přibližně o 80%. Na základě těchto výsledků bylo možné provést druhou část experimentu, tj. měření na hydraulickém pulzátoru, na kterém bylo možné simulovat podmínky velmi blízké reálné aplikaci.

Druhou částí bylo měření přechodové charakteristiky síly na hydraulickém pulzátoru. Testována byla charakteristika v režimu harmonického a trojúhelníkového zatěžovacího signálu pro dvě hodnoty rychlostí. Předpokládalo se, že by data naměřená na obou typech signálu měla korespondovat, neboť rychlost byla pro oba případy stejná. To se podařilo potvrdit u konstrukce pístové skupiny, která sestávala z ferritového jádra a ocelového válce. V tomto případě došlo ke zkrácení doby odezvy proti originální konstrukci o přibližně 80-90% v proudovém regulačním režimu.

Na základě uvedených výsledků lze konstatovat, že tlumič se nyní nachází ve fázi, kdy je po stránce elektromagnetických vlastností, tj. krátká odezva a nízký remanentní magnetismus, připraven k použití v reálné aplikaci nejen i mimo automobilní průmysl.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VLK, František. Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení. říditelnost, ovladatelnost, stabilita. 1. vyd. Brno: VLK, 2000, 432 s. ISBN 80-238-5273-6.
- [2] HOUFEK, Lubomír. *Dynamika*. Brno, 2011. Skripta. VUT v Brně.
- [3] PRAŽÁK, František. Tlumič odpružení jako prvek ovlivňující jízdní vlastnosti automobilu: Shock absorber as element influencing driving properties of vehicle. Brno: VUT FSI, 2006.
- [4] <http://www.auto.cz/cdc-aktivni-tlumice-letos-nasly-cestu-do-beznych-aut-16717/foto?foto=13>
- [5] GONCALVES, F. D., M. AHMADIAN a J. D. CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*. 2006, roč. 15, č. 1.
- [6] ŠVARC, Ivan. Základy automatizace. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 2002. 102 s. Učební texty pro kombinovanou formu bakalářského studia. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] STRECKER, Z. Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 114 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc
- [8] KOO, J. H., F. D. GONCALVES a M. AHMADIAN. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. *Smart Mater. Struct.* 2006, roč. 15, č. 2.
- [9] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie fyzika: Přechodový děj. In: [online]. [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/308-prechodny-dej>
- [10] MAAS, J. a D. GÜTH. Experimental Investigation of the Transient Behavior of MR Fluids. In: ASME Conference on Smart Material, Adaptive Structures and Intelligent System. Scottsdale, Arizona, USA, : ASME, 2011.
- [11] <http://fyzmatik.pise.cz/874-foucaultovy-proudy.html>
- [12] GUAN, Xinchun, Pengfei GUO, Jinsong LENG, Anand K. ASUNDI a Wolfgang ECKE. . 74930U-74930U-9. DOI: 10.1117/12.840217. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=791083>
- [13] NOVÁČEK, V. *Technologie výroby Magnetoreologických kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.

[14] SYLVAIN, Richard. Audi Magnetic Ride : Amortissement piloté à la carte. In: *Audi-Passion* [online]. 2009 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.audipassion.com/news/469/51/Audi-Magnetic-Ride-Amortissement-pilote-a-la-carte/>

SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obr. 1 Nákres konstrukce tlumičů (vlevo dvouplášťový, vpravo jednoplášťový) [1]	13
Obr. 2 Čtvrtinový model zavěšení automobilu	14
Obr. 3 CDC tlumič (vlevo regulátor v pístu, vpravo regulátor v plášti) [4]	15
Obr. 4 MR efekt (vlevo neaktivovaný stav, vpravo aktivovaný stav) [7]	16
Obr. 5 Komerční MR tlumič [14]	16
Obr. 6 Přejížděvací charakteristika [8]	17
Obr. 7 Schéma reálného Skyhooku (pro systém s 1° volnosti) [7].....	18
Obr. 8 Závislost smykového napětí na rychlosti proudění (vlevo píst 25,4mm, vpravo 6,35mm)[5]	19
Obr. 9 Trojúhelníkový budicí signál [8]	21
Obr. 10 Graf normalizované síly[8].....	22
Obr. 11 Idealizovaná F-v charakteristika [3]	24
Obr. 12 Foto měřicí sestavy	25
Obr. 13 Schéma měřicí sestavy.....	26
Obr. 14 Průběh proudu a magnetické indukce v čase (jmenovité hodnoty) – napěťový režim	27
Obr. 15 Detail náběžné hrany – napěťový režim	27
Obr. 16 Detail sestupné hrany – napěťový režim	27
Obr. 17 Normovaný průběh veličin (napěťový režim)	28
Obr. 18 Normovaný průběh veličin - detail náběžné hrany.....	28
Obr. 19 Normovaný průběh veličin - detail sestupné hrany	29
Obr. 20 Průběh normované síly na náběžné hraně (2,5A, pomalý režim, 0,1m/s)....	31
Obr. 21 Reálný průběh náběžné hrany signálu na měřicí aparatuře	31

Seznam grafů

Graf 2 Hysterezní křivka ferrit-ocelového tlumiče.....	32
Graf 3 Detail náběžné hrany - proud 0,5A, pomalý režim regulace	32
Graf 4 Detail náběžné hrany - proud 0,5A, rychlý regulační režim	33
Graf 5. Závislost odezvy magnetické indukce na řídicím proudu v pomalém režimu	35
Graf 6. Závislost odezvy magnetické indukce na řídicím proudu v rychlém režimu	37
Graf 7 Porovnání odezvy při náběhu v rychlém režimu	39
Graf 8 Porovnání doby odezvy při sestupu v rychlém režimu	39
Graf 9 Porovnání odezvy při náběhu v pomalém režimu	41
Graf 10 Porovnání odezvy při sestupu v pomalém režimu.....	41
Graf 11 Doba odezvy na náběžné hraně v rychlém režimu	51
Graf 12 Doba odezvy na sestupné hraně v rychlém režimu	51
Graf 13 Doba odezvy na náběžné hraně v pomalém režimu	53
Graf 14 Doba odezvy na sestupné hraně v pomalém režimu	53

Seznam tabulek

Tab. 1 Ocelový píst - pomalý režim	34
Tab. 2 Ferrit-ocelový píst - pomalý režim	34
Tab. 3 Ferritový píst - pomalý režim	35
Tab. 4 Ocelový píst - rychlý režim	36

Tab. 5 Ferrit-ocelový píst - rychlý režim.....	36
Tab. 6 Ferritový píst - rychlý režim.....	36
Tab. 7 Originální píst - harmonický signál, rychlost 0,1 m/s	38
Tab. 8 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,1 m/s.....	38
Tab. 9 Originální píst - harmonický signál, rychlost 0,2 m/s	38
Tab. 10 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,2 m/s.....	38
Tab. 11 Originální píst – harmonický signál, rychlost 0,1 m/s	40
Tab. 12 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,1 m/s.....	40
Tab. 13 Originální píst - harmonický režim, rychlost 0,2 m/s.....	40
Tab. 14 Ferrit-ocelový píst - harmonický signál, rychlost 0,2 m/s.....	40
Tab. 15 Originální tlumič - rychlost 0,1 m/s	50
Tab. 16 Ferrit-ocelový tlumiče - rychlost 0,1 m/s	50
Tab. 17 Originální tlumiče - rychlost 0,2 m/s.....	50
Tab. 18 Ferrit-ocelový tlumič - rychlost 0,2 m/s	50
Tab. 19 Originální tlumič – 0,1 m/s	52
Tab. 20 Ferri-ocelový tlumič - 0,1 m/s	52
Tab. 21 Originální tlumič - 0,2 m/s	52
Tab. 22 Ferrit-ocelový tlumič - 0,2 m/s.....	52

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CDC	– continuous damping control
MR	– magnetoreologický
PWM	– pulzní šířkový modulátor (pulse wide modulator)
b [N.s.m ⁻¹]	– tlumení
h [-]	– výstupní pozorovaná veličina
k [N.m ⁻¹]	– tuhost pružiny
m [kg]	– hmotnost
s [-]	– vstupní veličina
t [s]	– čas
v [m.s ⁻¹]	– rychlost pístu
x [m]	– výchylky
\dot{x} [m.s ⁻¹]	– rychlost (derivace výchylky)
B [T]	– magnetická indukce, matice tlumení
B_{\max} [T]	– maximální indukce
F [N]	– okamžitá velikost síly
F_d [N]	– síla vyvozená tlumičem
F_{\max} [N]	– maximální velikost síly
F_{\min} [N]	– minimální velikost síly
F_n [N]	– normovaná síla
G [-]	– výstupní veličina
I [A]	– proud
I_{\max} [A]	– maximální proud
K [-]	– konstanta zesílení, matice tuhosti
L [H]	– elektrická indukčnost
M [kg]	– matice hmotnosti
T [s]	– konstanta odezvy
T_0 [s]	– počáteční čas
T_{63} [s]	– čas při dosažení 63,2% maximální hodnoty
T_{BN} [s]	– odezva magnetické indukce na náběžné hraně
T_{BS} [s]	– odezva magneticko indukce na sestupné hraně
T_{IN} [s]	– odezva proudu na náběžné hraně
T_{IS} [s]	– odezva proudu na sestupné hraně
U [V]	– napětí
Ω_0 [Hz]	– vlastní frekvence

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I – Výsledky vyhodnocení odezvy síly pro trojúhelníkový signál

SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY

Příloha I

Výsledky vyhodnocení odezvy síly pro trojúhelníkový signál

Rychlý režim

Tab. 15 Originální tlumič - rychlost 0,1 m/s

I_{max} [A]	0,49	0,94	1,39	1,82
F _{max} [N]	261,07	386,25	497,89	534,02
F _{min} [N]	182,74	189,47	191,35	195,70
T_{FN} [ms]	11,5	10,8	9,1	5,2
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3
T_{FS} [ms]	6,6	11	15	20,9
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3

Tab. 16 Ferrit-ocelový tlumič - rychlost 0,1 m/s

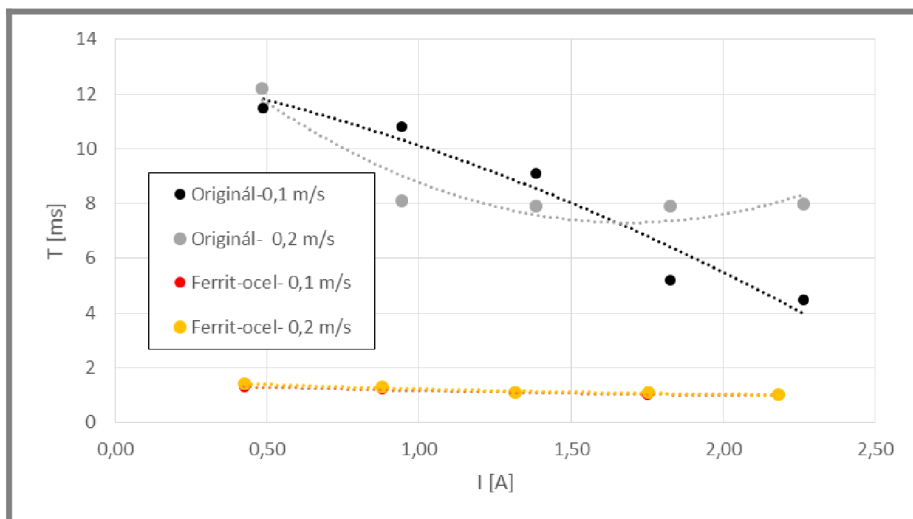
I_{max} [A]	0,43	0,88	1,31	1,75
F _{max} [N]	416,65	533,21	569,74	577,97
F _{min} [N]	318,98	319,60	321,00	319,86
T_{FN} [ms]	1,3	1,2	1,1	1
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,4	0,3
T_{FS} [ms]	1	1,2	1,2	1,3
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3

Tab. 17 Originální tlumič - rychlost 0,2 m/s

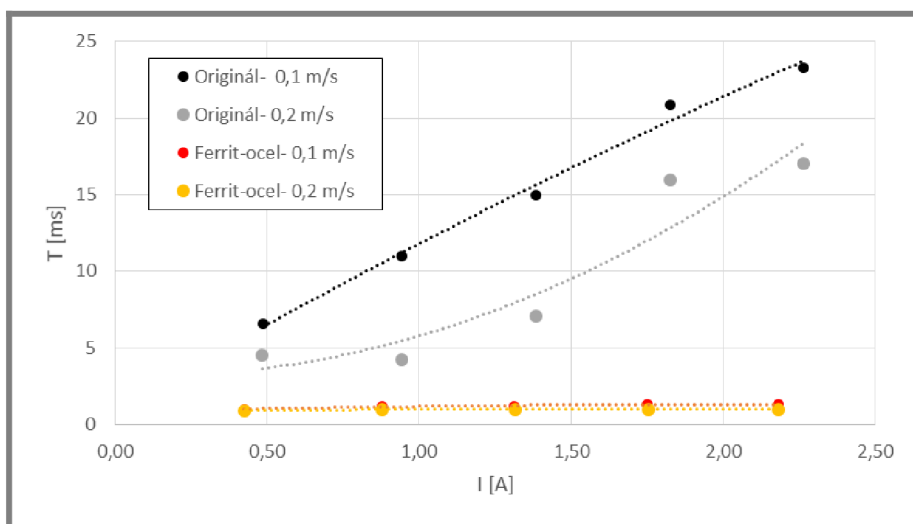
I_{max} [A]	0,48	0,94	1,38	1,83
F _{max} [N]	306,45	435,00	578,68	707,55
F _{min} [N]	229,17	227,62	223,83	228,56
T_{FN} [ms]	12,2	8,1	7,9	7,9
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3
T_{FS} [ms]	4,5	4,2	7,1	16
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3

Tab. 18 Ferrit-ocelový tlumič - rychlost 0,2 m/s

I_{max} [A]	0,43	0,88	1,32	1,75
F _{max} [N]	434,52	581,92	610,89	630,89
F _{min} [N]	331,42	327,87	328,90	331,69
T_{FN} [ms]	1,4	1,3	1,1	1,1
T _{IN} [ms]	0,3	0,3	0,4	0,4
T_{FS} [ms]	0,9	1	1	1
T _{IS} [ms]	0,3	0,3	0,3	0,3



Graf 10 Doba odezvy na náběžné hraně v rychlém režimu



Graf 11 Doba odezvy na sestupné hraně v rychlém režimu

Pomalý režim

Tab. 19 Originální tlumič – 0,1 m/s

I_{max} [A]	0,49	0,99	1,49	1,99
F _{max} [N]	256,70	387,55	503,05	541,16
F _{min} [N]	189,38	190,96	194,40	194,55
T_{FN} [ms]	24	25,9	23,1	16
T _{IN} [ms]	4,3	6,3	7	7,3
T_{FS} [ms]	9,7	22,1	29,3	32,1
T _{IS} [ms]	1,7	3,3	4,1	4,1

Tab. 20 Ferri-ocelový tlumič - 0,1 m/s

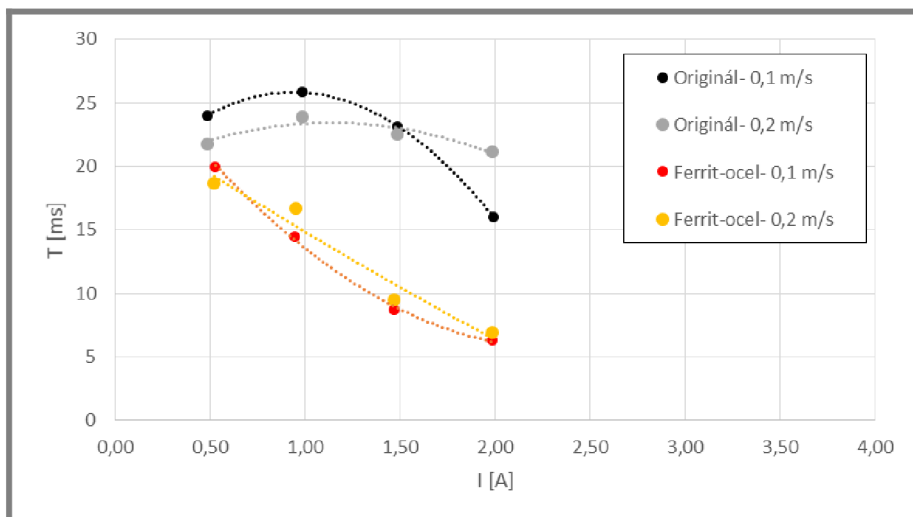
I_{max} [A]	0,53	0,95	1,47	1,99
F _{max} [N]	446,74	539,47	569,39	588,66
F _{min} [N]	318,00	316,13	317,13	319,00
T_{FN} [ms]	20	14,5	8,7	6,3
T _{IN} [ms]	11,6	12,3	11,6	10,1
T_{FS} [ms]	8,1	11,9	13,7	13,7
T _{IS} [ms]	6,9	6	2,5	1,3

Tab. 21 Originální tlumič - 0,2 m/s

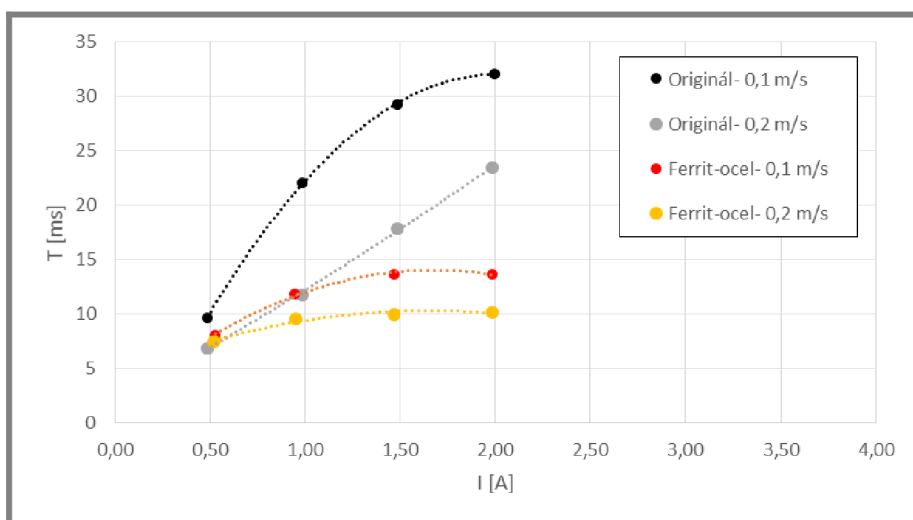
I_{max} [A]	0,48	0,98	1,48	1,99
F _{max} [N]	280,05	422,90	580,31	726,78
F _{min} [N]	215,65	215,11	208,60	213,24
T_{FN} [ms]	21,8	23,9	22,5	21,2
T _{IN} [ms]	4,1	6	6,8	7
T_{FS} [ms]	6,9	11,8	17,9	23,5
T _{IS} [ms]	1,7	3,4	4,2	4,3

Tab. 22 Ferrit-ocelový tlumič - 0,2 m/s

I_{max} [A]	0,52	0,95	1,47	1,98
F _{max} [N]	461,53	587,37	625,97	645,04
F _{min} [N]	322,82	329,35	325,91	329,38
T_{FN} [ms]	18,7	16,7	9,5	6,9
T _{IN} [ms]	10,9	12,2	11,4	10,1
T_{FS} [ms]	7,5	9,6	10	10,2
T _{IS} [ms]	7	7,3	4,1	2,1



Graf 12 Doba odezvy na náběžné hraně v pomalém režimu



Graf 13 Doba odezvy na sestupné hraně v pomalém režimu