



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

PŘEHLED KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ MAGNETOREOLOGICKÝCH TLUMIČŮ

THE DESIGN SURVEY OF MAGNETORHEOLOGICAL DAMPERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Tran

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubík

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Adam Tran
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Michal Kubík
Akademický rok:	2015/16

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:

Přehled konstrukčních řešení magnetoreologických tlumičů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je zpracování současného stavu poznání konstrukcí magnetoreologických tlumičů. Práce musí obsahovat popis konstrukčního a materiálového uspořádání s vysvětlením základních principů funkce jednotných typů konstrukcí.

Cíle bakalářské práce:

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

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

Forma práce: průvodní zpráva, digitální data

Typ práce: rešeršní

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_2016.pdf

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

Seznam literatury:

Yang, G., Spencer, B.F., Carlson, J.D., Sain M.K. (2002): Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, vol. 24, pp. 309- 323, DOI: 10.1016/S0141-0296(01)00097-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca popisuje tlmiace systémy v podobe MR tlmičov a MR ventilov. Na úvod je uvedený samotný MR efekt v MR zariadeniach. Ďalšia časť práce zahŕňa jednotlivé konštrukcie, materiálové usporiadanie, charakteristiky MKP modelov najmä magnetické indukcie, testované charakteristiky (F-v, časová odozva a iné), a použité MR kvapaliny MR zariadení. V druhej časti sú porovnané jednotlivé MR zariadenia uvedených charakteristík z predošlej časti a popisuje problematiku, ktorá sa v článkoch neuvádza.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

MR tlmič, MR ventil, magnetoreologická kvapalina, MR fluid

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with the damping systems such as magnetorheological dampers or magnetorheological valves. At beginning MR effect is described in MR devices. Next part deals with the designs, materials, characteristics of FEM models e.g. magnetic inductions, tested characteristics (F-v, time response), and used MR fluids in MR devices. In second part there are compared each MR device (MR damper or MR valve) in listed characteristics from previous part and describes issues, which are not in publications.

KEY WORDS

MR damper, MR shock absorber, MR valve, magnetorheological fluid, MR fluid

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

TRAN, A. *Přehľad konštrukčných řešení magnetoreologických tlumičů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 66s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Kubík

ČESTNÉ PREHÁSENIE

Prehlasujem, že som moju záverečnú prácu Prehľad konštrukčných riešení magnetoreologických tlmičov vypracoval samostatne pod vedením Ing. Michala Kubíka a že v zozname použitej literatúry som uviedol všetky zdroje literatúry.

V Brne dňa:

.....

podpis

POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Ing. Michalovi Kubíkovi za jeho aktívnu pomoc pri riešení samotnej práce, jeho rady a trpezlivosť pri vysvetľovaní danej problematiky. V neposlednom rade chcem poďakovať rodine, kamarátom a priateľke za morálnu podporu.

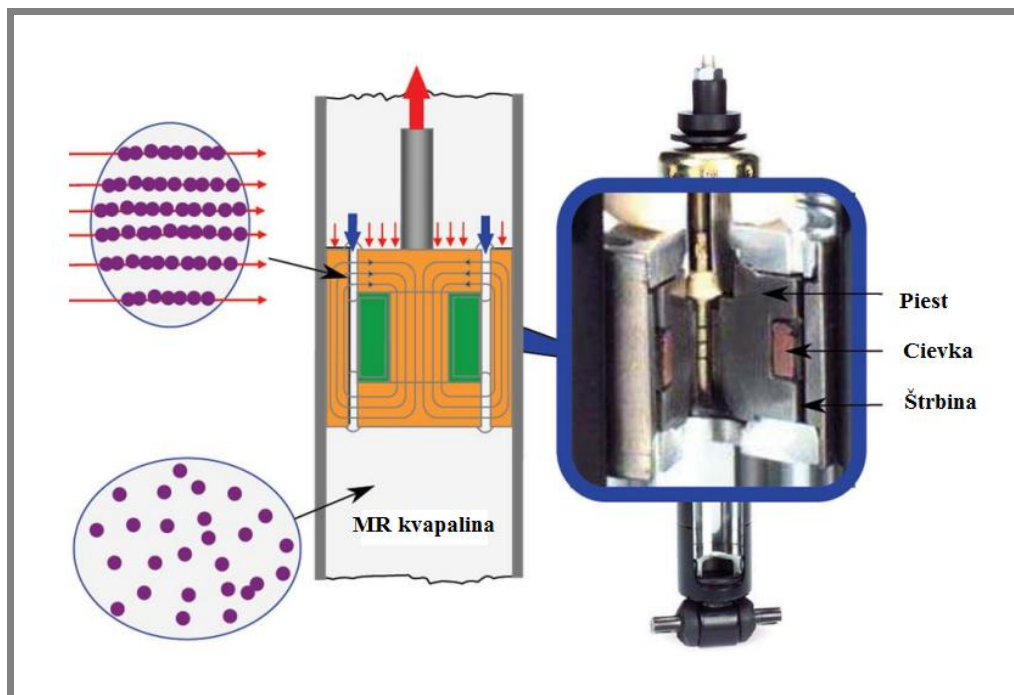
OBSAH

ÚVOD	12
1 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	13
1.1 Analýza problému.....	13
1.2 Cieľ práce.....	13
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	14
2.1 Chaoyang Guo, Gong, Luhang Zong, Chao Peng and Shouhu Xuan, Twin- tube bypass- containing magneto- rheological damper for use in railway vehicles	14
2.1.2 Prúdenie kvapaliny a pracovný princíp tlmiča.....	15
2.1.3 Charakteristiky	17
2.2 G. Yang, B.F. Spencer Jr., J.D. Carlson, M.K. Sain.....	18
Large- scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance consideration	18
2.2.1 Konštrukcia	18
2.2.2 Charakteristiky	19
2.3 Shaishuai Sun, Jian Yang, Weihua Li, Huaxia Deng, Haiping Du, Gursel Alici, Development of novel variable stiffness and damping magnetorheological damper	20
2.3.1 Konštrukcia	21
2.3.2 Pracovný princíp, silový priebeh a prúdenie kvapaliny	22
2.3.3 Charakteristiky	23
2.4 Yang Ding, Lu Zhang, Hai- Tao zhu, Zhong- Xian Li.....	24
A new magneto- rheological damper for seismic control.....	24
2.4.2 Princíp práce tlmiča	26
2.4.3 Charakteristiky MR tlmiča.....	26
2.5 Xian- Xu Bai, Dai- Hua Wang, Hang Fu,.....	28
Radial and annular duct MR damper	28
2.5.1 Konštrukcia a materiály	29
2.5.2 Pracovný princíp piestu a prúdenie kvapaliny	30
2.5.3 Charakteristiky MR tlmiča.....	31
2.6 D H Wang, H X Ai and W H Liao,.....	32
A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps	32
2.6.1 Konštrukcia	33
2.6.2 Charakteristiky MR ventilu	34
2.7 A. Grunwald, A.G. Olabi, Design of magnet- rheological valve	34
2.7.1 MR ventil s medzikruhovou štrbinou	34
2.7.2 MR ventil s valcovým otvorom	35
2.8 Guoliang Hu, Ming Long, Lifan Yu, Weihua Li	36
Design and performance evaluation of a novel magnetorheological valve with tunable resistance gap	36
2.8.1 Konštrukcia	37
2.8.2 Charakteristiky MR ventilu s nastaviteľnou štrbinou	38
2.9 Jin- Hyeong Yoo, Norman M. Wereley.....	39
Design of a high-efficiency magnetrheological valve	39
2.9.1 Konštrukčno- materiálóvé charakteristiky	39
2.9.2 Magnetické hľadisko.....	41

2.10 B Ichwan, S A Mazian, F Imadubbin, Udbaidillah, T Koga, M H Idris, Development of a modular MR valve using meander flow path structure.....	43
.....	43
2.10.1 Konštrukcia.....	43
2.10.2 Prúdenie kvapaliny	44
2.10.4 Charakteristiky	45
3 DISKUSIA.....	47
3.1 Konštrukcia aktívnej zóny MR tlmičov a MR ventilov	47
3.2 Fail- safe tlmiče	48
3.3 Materiály magnetických obvodov	49
3.4 Použité MR kvapaliny	50
3.4 Dynamický silový rozsah	51
3.5 Časová odozva.....	52
3.6 Málo publikovaná problematika pri návrhu MR zariadení	53
3.6.1 Problematika tesniacich manžiet	53
3.6.2 Problematika zmeny magnetických vlastností s teplotou.....	53
3.6.3 Problematika funkcie spätných ventilov.....	54
3.6.4 Sedimentácia v MR tlmičoch či MR ventiloch	54
4 ZÁVER	55
5 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	56
6 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	58
7 ZOZNAM TABULIEK	60
8 ZOZNAM PRÍLOH	61
PRÍLOHOA I; B-H krivky MR kvapalín a medze toku.....	62
PRÍLOHA II; B-H krivky materiálov magnetických obvodov	65

ÚVOD

V dnešnej dobe sa zaoberajú vedci a inžinieri smart materiálmi. Do tejto skupiny patria aj magnetoreologické kvapaliny. Tieto kvapaliny sú zložené z feromagnetických mikročastíc karbonylového železa, aditív a nosného média. Nosná kvapalina je nemagnetická. Väčšinou býva táto kvapalina na báze minerálneho alebo syntetického oleja, môže byť použitá i voda, glycerín alebo silikónový olej. V nosnej kvapaline sú rozptýlene veľmi jemné feromagnetické častice o rozmeroch niekoľko mikromilimetrov. Uvedením MR kvapaliny do magnetického pola môžeme dosiahnuť rýchlu a výraznú zmenu reologických vlastností tejto kvapaliny. To je spôsobené zreťazením častíc v smere magnetického pola.



Obr. 1 Pracovný princíp MR efektu v MR tlmiči (upravené) [1]

Tieto kvapaliny majú niekoľko zastúpení v priemyselných oblastiach pre rôzne aplikácie. Jedným z mnoha zariadení využívajúce MR kvapalinu je MR tlmiče alebo MR ventil. Všeobecne, úlohou tradičných tlmičov je dissipovať energiu. MR tlmiče môžu na viac prevádzať disipáciu a meniť tlmiacu silu v závislosti na meniacom sa budiacom prúde. U MR ventilov je veľkou výhodou že, neobsahujú žiadne pohyblivé časti čo sa prejavuje na ich konštrukčnej jednoduchosti a životnosti. MR tlmiče existujú v rôznych konštrukčných a materiálových prevedeniach v závislosti na určitých požiadavkách pre prax. Spomenuté MR technológie sa v praxi používajú v automobilovom priemysle, v stavebnom inžinierstve, prípadne v biomechanike. [2],[3],[4]

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

1

1.1 Analýza problému

1.1

Výskumná skupina technickej diagnostiky na UK FSI VUT vyvíja tlmiacu a pružiacu plošinu užitočného nákladu nosiču, pre Európsku kozmickú agentúru (ESA). Pre potreby tejto plošiny sa vyvíja semi-aktívne riadená magnetoreologická vzpera. Táto vzpera bude využívať magnetoreologický tlmič. Pre tieto účely je nutné navrhnúť MR tlmič s ohľadom na minimalizáciu hmotnosti a maximalizácie efektívnosti i tlmenia. Pri vývoji tohto typu zariadenia, je nutné sa zoznámiť existujúcimi konštrukciami, ich materiálovým usporiadaním, či technologickým riešením.

1.2 Cieľ práce

1.2

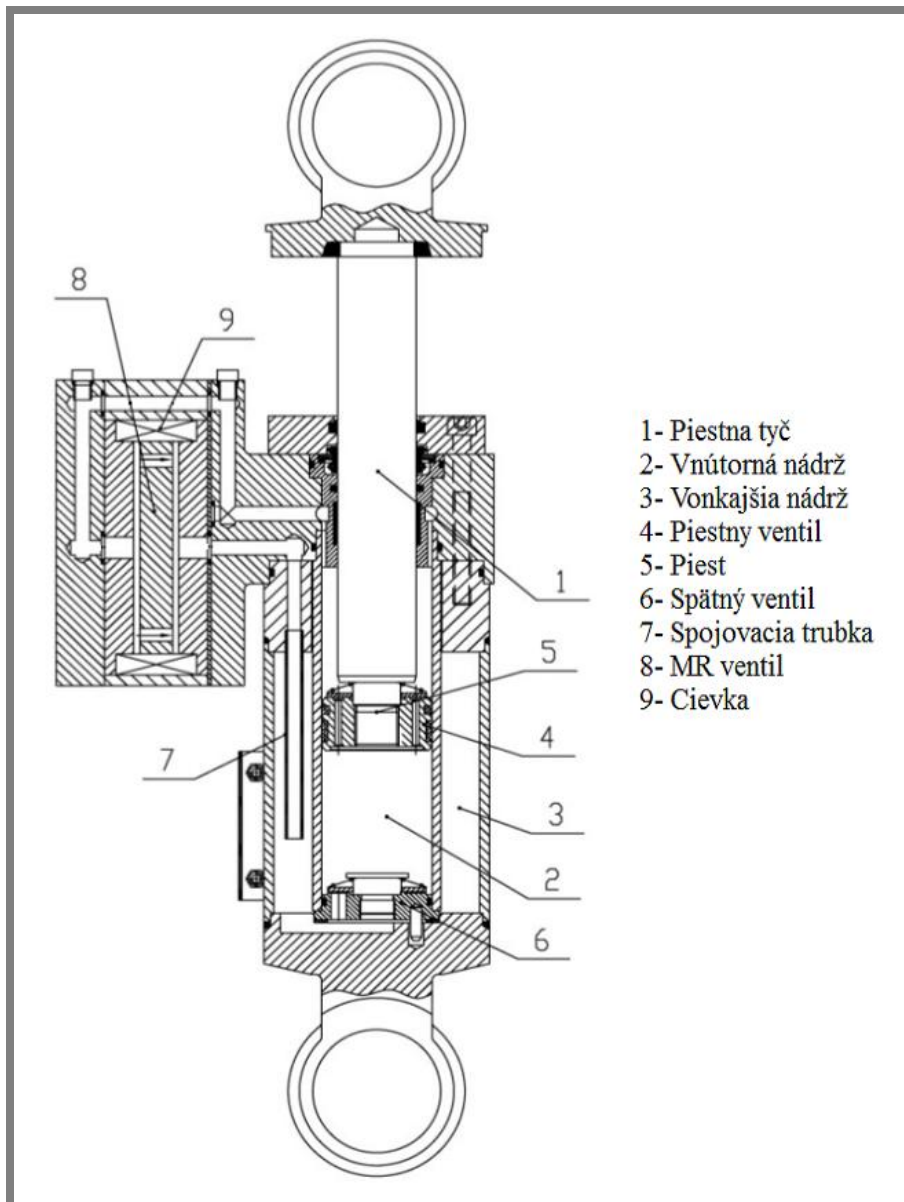
Hlavným cieľom tejto práce je zostavenie súčasného stavu poznania v oblasti konštrukcie magnetoreologických tlmičov a ventilov. Dĺlčí ciele práce sú:

- popis konštrukčného usporiadania s vysvetlením funkcií,
- prúdenie kvapaliny,
- popis materiálov použitých v magnetickom obvode,
- stanovenie dynamického silového rozsahu a časovej odozvy z publikovaných dát.

2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2.1 Chaoyang Guo, Gong, Luhang Zong, Chao Peng and Shouhu Xuan, Twin- tube bypass- containing magneto- rheological damper for use in railway vehicles

Tlmič je navrhnutý pre vozidlá železničnej trate. Z dôvodu bezpečnosti pred výpadkom prúdu, alebo porušením elektromagnetickej cievky kladie tlmič dôraz na veľký dynamický rozsah a tlmiace sily by mali byť symetrické. Ďalšou z požiadaviek je dlhý zdvih piestu, pričom pracovný priestor piestu je pri montáži obmedzený. Preto tlmič využíva vonkajší MR ventil, aby sa predišlo vrtaniu dlhých dier do piestnice pre zavedenie cievky a z dôvodu jednoduchej údržby magnetického obvodu. Na obr. 2 je znázornený rez tohto tlmičom obsahujúci vonkajší MR ventil s popisom hlavných častí. [5]



Obr. 2 Rez MR tlmičom s popisom hlavných častí [5]

2.1.1 Konštrukcia a popis funkcií tmiča s vonkajším MR ventilom

Typ tohto tmiča je dvojplášťového prevedenia. Samotný tmič je zložený z vonkajšej (3) a vnútornej nádrže (2). Piest vo vnútornej nádrži rozdeľuje pracovný priestor piestu na hornú a dolnú komoru. Prietok kvapaliny z vonkajšej nádrže do dolnej komory vnútornej nádrže zabezpečuje spätný ventil (6). Vtokový kanálik MR ventilu je prepojený s vnútornou nádržou tmiča v hornej komore a zabezpečuje prietok MR kvapaliny. Hlavnou časťou MR ventilu sú dva disky tvoriace radiálnu štrbinu. Výtokový kanálik MR ventilu, zabezpečuje výtok MR kvapaliny z MR ventilu do vonkajšej nádrže cez spojovaciu trubku (7). Úlohou spojovacej trubky (7), je zabezpečiť nepretržitý prietok prúdenia MR kvapaliny medzi vonkajšou a vnútornou nádržou. Vonkajšia a vnútorná nádrž sú spojené cez spätný ventil (6). V tab. 1 sú zahrnuté určité rozmery tmiča obsahujúci vonkajší MR ventil. [5]

tab. 1 Rozmery tmiča s vonkajším MR ventilom

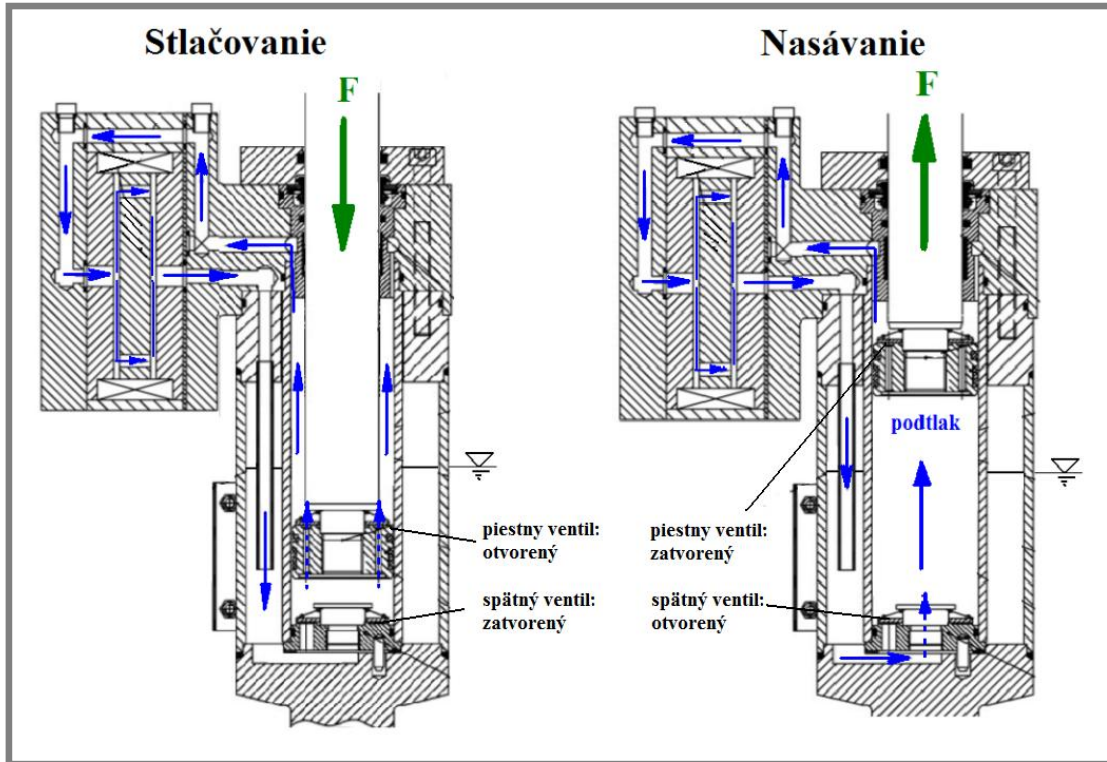
Tmič		Ventil	
Parameter	Hodnota	Parameter	hodnota
pracovný zdvih	33 mm	ventilový plášť	145x 130x 85 (mm)
vnútorný priemer valca	101 mm	priemer štrbiny	100 mm
dĺžka valca	170 mm	šírka štrbiny	0,8 mm
vonkajší priemer plášťa	92 mm		
vnútorný priemer plášťa	50 mm		
priemer piestnej tyče	35,4 mm		

2.1.2 Prúdenie kvapaliny a pracovný princíp tmiča

Pracovný princíp tmiča v vonkajším MR ventilom znázorňuje obr. 3.

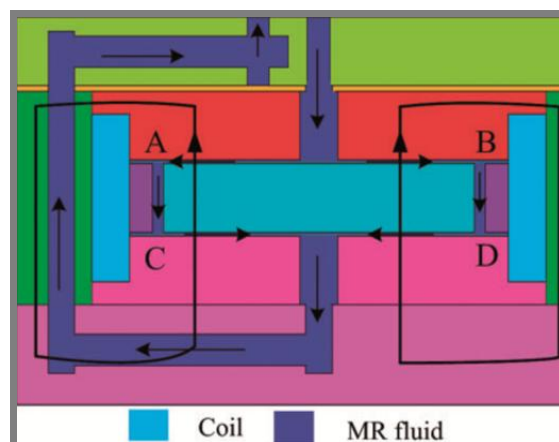
- Pri stlačovaní sa piest pohybuje smerom nadol. Piestny ventil sa otvára, a tým umožňuje prietoku kvapaliny z dolnej komory do hornej. Zároveň sa pri tomto pohybe uzatvára spätný ventil (6), čo zabraňuje prietoku MR kvapaliny z vonkajšej nádrže (3) do vnútornej (2).
- Pri nasávaní sa piest pohybuje smerom nahor. Tým sa zatvára piestny ventil (4) a vytlačuje kvapalinu do vonkajšieho MR ventilu (8). Zároveň vzniká podtlak v spodnej komore a spätný ventil (6) sa začne otvárať. Tým preteká MR kvapalina z vonkajšej (3) nádrže do vnútornej nádrže (2). Vonkajšia nádrž (3) obsahuje určité množstvo vzduchu a určité množstvo MR kvapaliny. [5]

Pri týchto pohyboch preteká MR zariadením namiešaná MR kvapalina s 30% objemovým podielom z čistočiek prachu karbonylového železa o priemere cca 6 μm (CN, BASF, Germany) so silikónovým olejom (H201, Sinopharm Chemical Reagent Co. Ltd., China; viskozita približne 20mPa.s) s pridaním kyseliny steaovej (2wt%). [5]



Obr. 3 Pracovný princíp tlmenia MR tlmiča s vonkajším MR ventilom [5] (upravené)

Počas týchto pohybov stlačovaní a nasávaní MR kvapalina preteká jednosmerne celým hydraulickým tlmičom aj MR ventilom, čo zabezpečuje symetrickosť tlmiacich síl. Z vnútornej nádrže (2) preteká MR kvapalina cez vtokový kanálik do MR ventilu. V MR ventilu sa kvapalina rozvetvuje do dvoch radiálnych štrbín, ďalej cez prstencovú oblasť a nakoniec sa zbieha cez radiálne štrbiny do výtokového kanáliku a opäť do vonkajšej nádrže (3) cez spojovaciu trubicu (7). Magnetické pole je kolmé na prúdenie MR kvapaliny. Obr. 4 zobrazuje schematické znázornenie toku MR kvapaliny vo vonkajšom MR ventilu pomocou šípok prechádzajúce tmavomodrou oblasťou, čo znázorňuje MR kvapalinu. Šípky tvoriace slučku znázorňujú smer magnetického toku. Bledomodrou farbou sú označené cievky a ostatné farby označujú súčiastky z elektricky čistého železa (MKP- #DT3). [5]

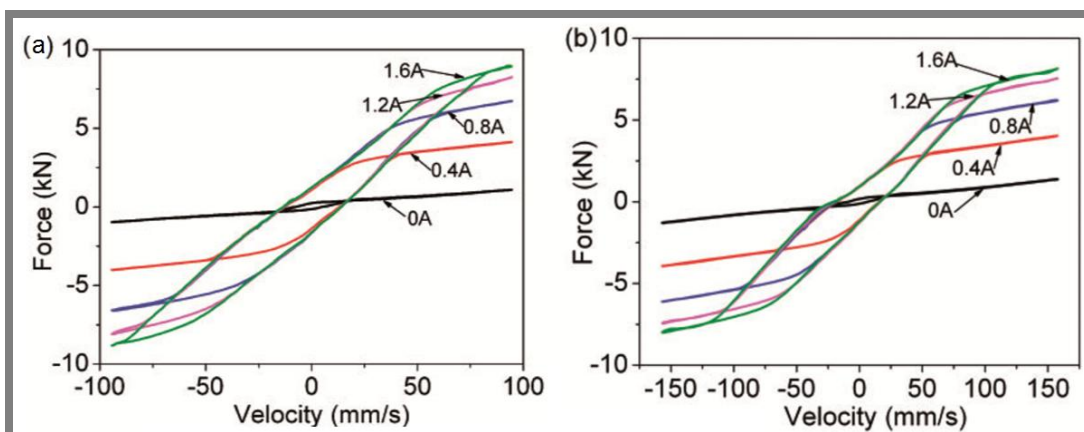


Obr. 4 Prúdenie MR kvapaliny vonkajším MR ventilom

2.1.3 Charakteristiky

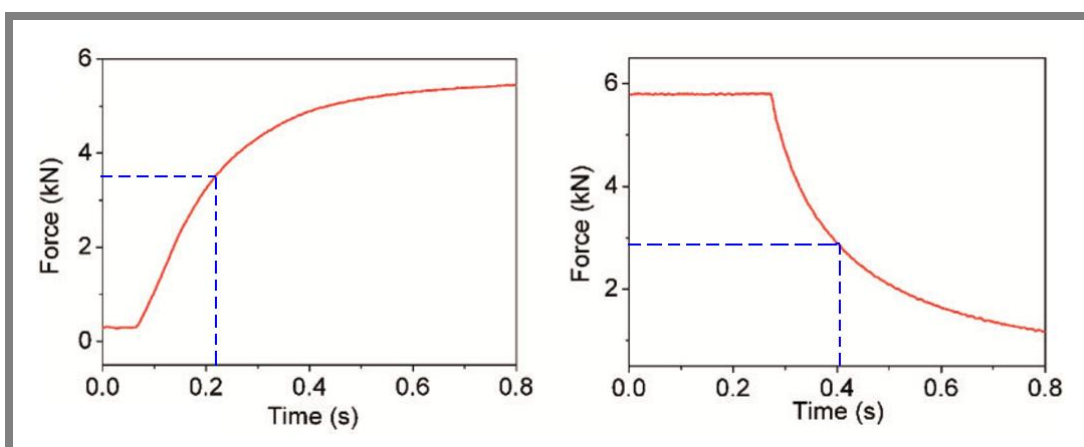
Z výpočtového modelu v programe Ansys 13.0 dosahuje magnetická indukcia v štrbinách hodnotu 0,8 T pri 1,75 A s počtom vinutí 450 a odporom použitej cievky 8 Ω . Pri tomto prúde je magnetická indukcia jednotná okrem časti s vtokovým a výtokovým kanálikom.

Na základe výpočtového modelu bol skonštruovaný a experimentálne testovaný MR tlmič. Závislosť tlmiacej sily na rýchlosti je znázornená na obr. 5. Graf tohto obrázku popisuje experimentálne výsledky MR tlmiča pre dve rýchlosti 0,126m/s a 0,094 m/s. Dynamický rozsah určený pre koleno krivky dosahuje hodnotu 9 s piestovou rýchlosťou 0,094 m/s a maximálnou tlmiacou silou 9 kN aplikáciou 1,6A prúdu. Od kolena ďalej, dynamický rozsah klesá. [5]



Obr. 5 Grafy závislosti tlmiacej sily na rýchlosti tlmiča obsahujúci vonkajší MR ventil

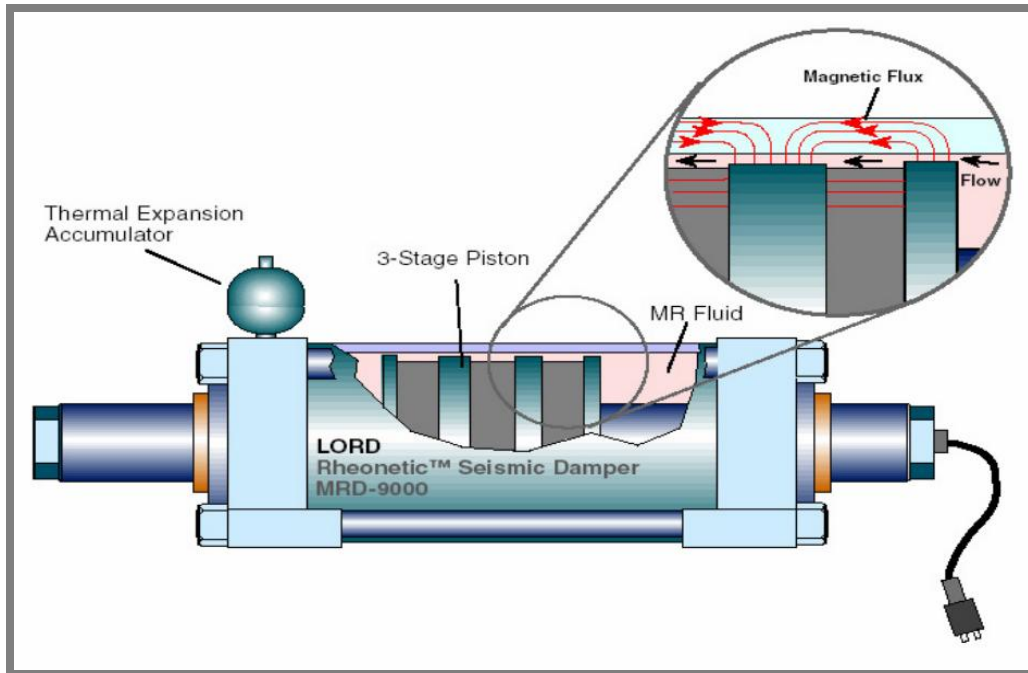
Zmeranú časovú odozvu ukazuje graf na obr. 6 pre 15mm amplitúdu s frekvenciou 0,5Hz ($v=0,047\text{m/s}$) z 0A na 1A, pričom sila rastie z 300 na 5440N. Pre tieto podmienky je časová odozva pri náraste sily 158ms. Časová odozva pri poklese sily z 5790 na 1200N je 133ms. Kvôli zvyškovému magnetizmu (remanencia) tlmiaca sila neklesne z maximálnej hodnoty na pôvodných 300N. [5]



Obr. 6 Časová odozva tlmiča s vonkajším MR ventilom pri náraste a poklese tlmiacej sily [5] (upravené)

2.2 G.Yang, B.F. Spencer Jr., J.D. Carlson, M.K. Sain Large- scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance consideration

Tlmič je navrhnutý pre stavebné inžinierstvo, kde sa využíva pri tlmení seizmických aktivít. Vid' obr. 7. [3]



Obr. 7 Large- scale damper [3]

2.2.1 Konštrukcia

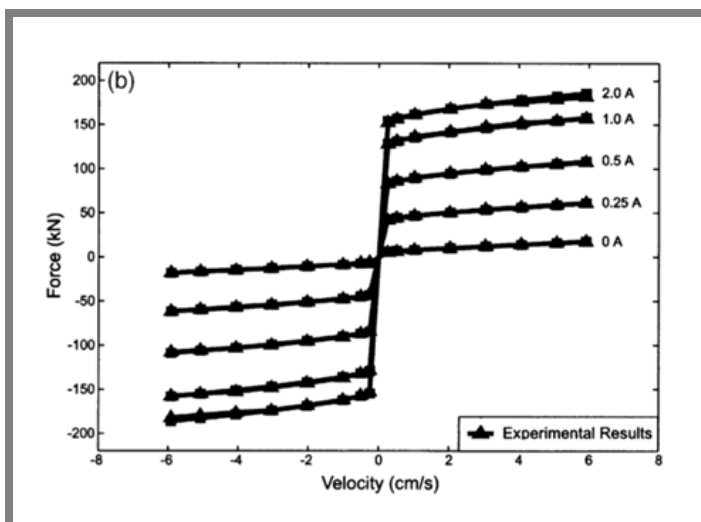
Tlmič patrí svojou konštrukciou medzi obojstranné tlmiče, tzn. piest vyčnieva z oboch koncov hydraulického valca obr. 7. Pri zdvihu sa tak kompenzuje objemová zmena MR kvapaliny. Je čiastočne jednoduchej konštrukcie, v ktorej je vonkajší plášť súčasťou magnetického obvodu. Efektívna štrbina MR tlmiča má prstencový tvar a nachádza sa medzi vonkajším priemerom piestu a vnútorným priemerom hydraulického valca. Výhodou tohto obojstranného tlmiča je, že nepotrebuje žiadny objemový akumulátor zabudovaný do tlmiča. Napriek tomu má malý tlakový akumulátor pre uskladnenie termálnej expanzie kvapaliny. Elektromagnetické cievky sú vinuté v troch sekciách piestu, ktorým pri budení prúdu odpovedajú 4 oblasti ovplyvňujúce MR kvapalinu. Celková dĺžka tlmiča je približne 1m a váži cca 250 kg. Objem MR kvapaliny je 6l, pričom objem ovplyvnenej MR kvapaliny je 90 cm³. Hlavné konštrukčné parametre MR tlmiča sú zhrnuté v tab. 2. [3]

tab. 2 Rozmery Large- scale tlmiča

parameter	hodnota
dĺžka tlmiča	1000 mm
šírka štrbiny	2 mm
efektívna axiálna dĺžka tyče	84 mm
vnútorný priemer hydraulického valca	203,2 mm
pracovný zdvih	±80 mm

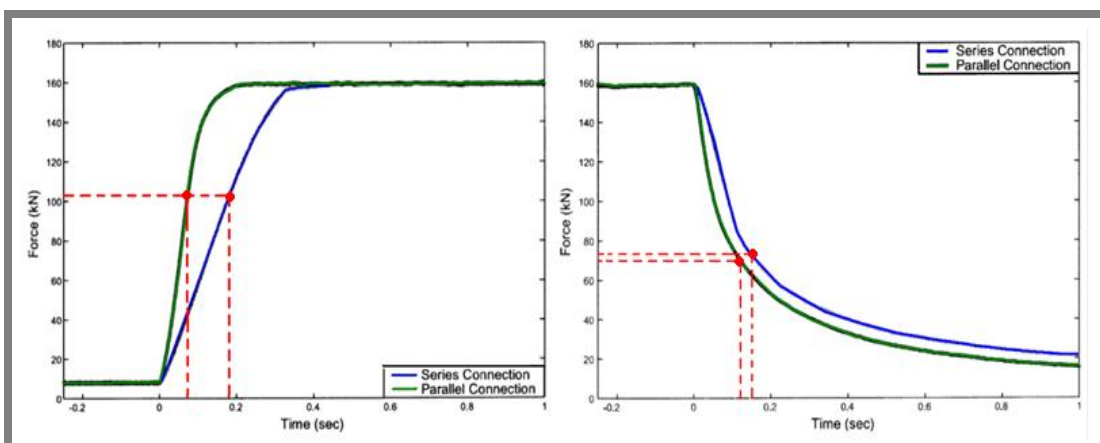
2.2.2 Elektrické hľadisko, F-v závislosť a časová odozva

Cievky sú vinuté v troch sekciách každá má 1050 vinutí; spolu to odpovedá približne 1,5km medeného drôtu. Indukcia a odpor cievky sú 6,6H a $7,3\Omega$ v tomto poradí. Prevedené experimentálne testy pri rýchlosti 5,92cm/s ukazuje obr. 8, graf závislosti tlmiacej sily na rýchlosti. Maximálny prúd 2A pretekaný cievkou, odpovedá maximálne vyvinutej tlmiacej sile o veľkosti 182,1 kN. Pre nulové magnetické pole dosahuje tlmiaca sila 17,7 kN. Dynamický rozsah tlmiča je 10,29 pri rýchlosti cca 0,1m/s. [3]



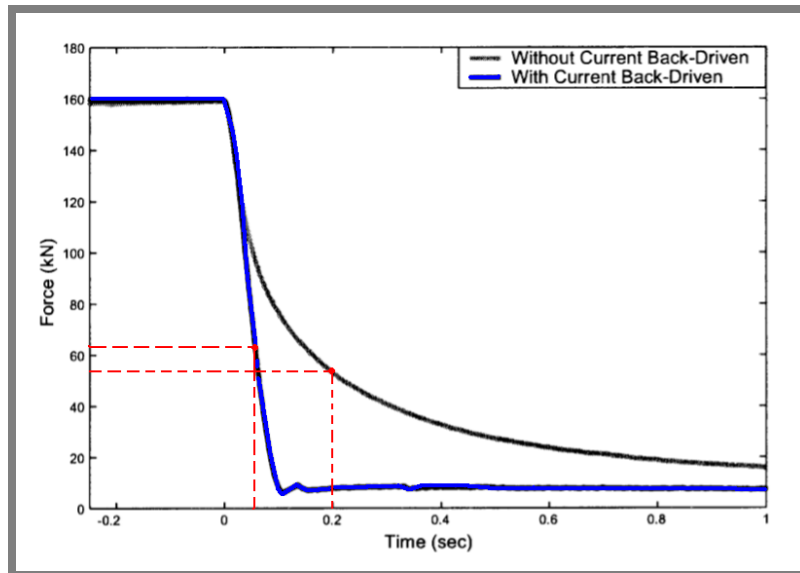
Obr. 8 F-v charakteristika Large- scale tlmiča

Charakteristika časovej odozvy pri nábehu a poklese sily meranú pre sériové a paralelné zapojenie cievok ukazuje obr. 9. Je zrejme, že paralelné zapojenie cievok vykazuje kratšiu časovú odozvu, ako sériové zapojenie. Pre dosiahnutie rýchlejšej odozvy používa zariadenie tlmiča prúdový regulátor. Pri nábehu sily pre sériové zapojenie je časová odozva 182ms a pre paralelné zapojenie 73ms. Z dôvodu pozostatkovej magnetizácie (remanencia) v magnetickom obvode pokles sily na hodnotu pri nulovom prúde trvá dlhšie v porovnaní s nárastom sily aj pre sériové (153ms) aj pre paralelné (124ms) zapojenie. [3]



Obr. 9 Časová odozva nábehu a poklesu tlmiacej sily pre paralelné a sériové zapojenie cievok large-scale tlmiča [3] (upravené)

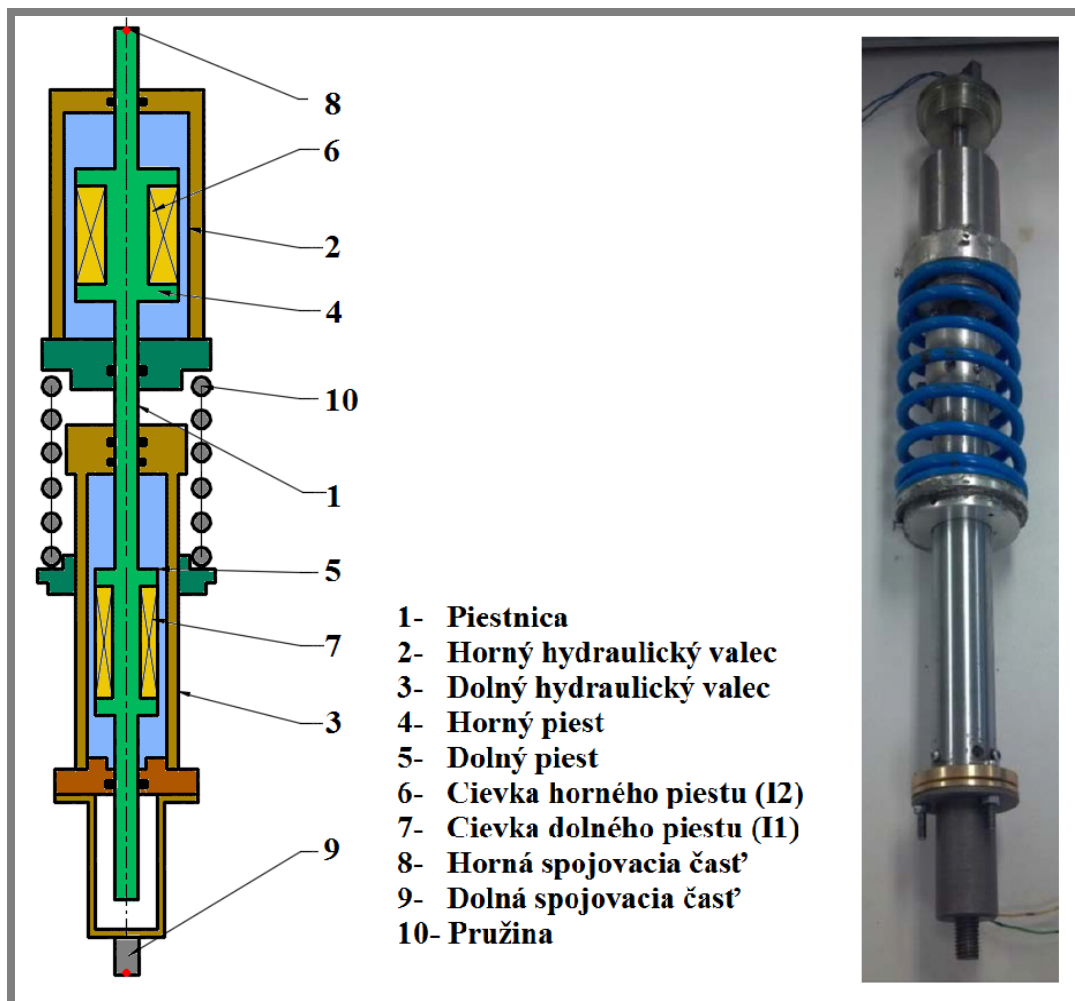
Zariadenie tlmiča predchádza problému pozostatkovej magnetizácie využitím spätného riadenia a to tak, že do cievok sa pustí záporný prúd na maximálnu hodnotu -6A (pre paralelné zapojenie -2A pre každú cievku). Graf na obr. 10 porovnáva časovú odozvu poklesu tlmiacej sily s využitím spätne riadeného prúdu a bez využitia spätného riadenia prúdu. Spätne riadený prúd má časovú odozvu približne 57ms. [3]



Obr. 10 Časová odozva poklesu sily spätne riadeného prúdu a bez spätného riadenia prúdom [3] (upravené)

2.3 Shaishuai Sun, Jian Yang, Weihua Li, Huaxia Deng, Haiping Du, Gursel Alici, Development of novel variable stiffness and damping magnetorheological dumper

Zaujímavosťou tohto tlmiča je, že v spojení s pružinou môže meniť svoju tuhosť a zároveň aj tlenie v závislosti meniacom prúde. Na obr. 11 je tento tlmič schematicky znázornený s popisom jednotlivých častí spolu s reálnym prototypom tohto MR tlmiča. [6]

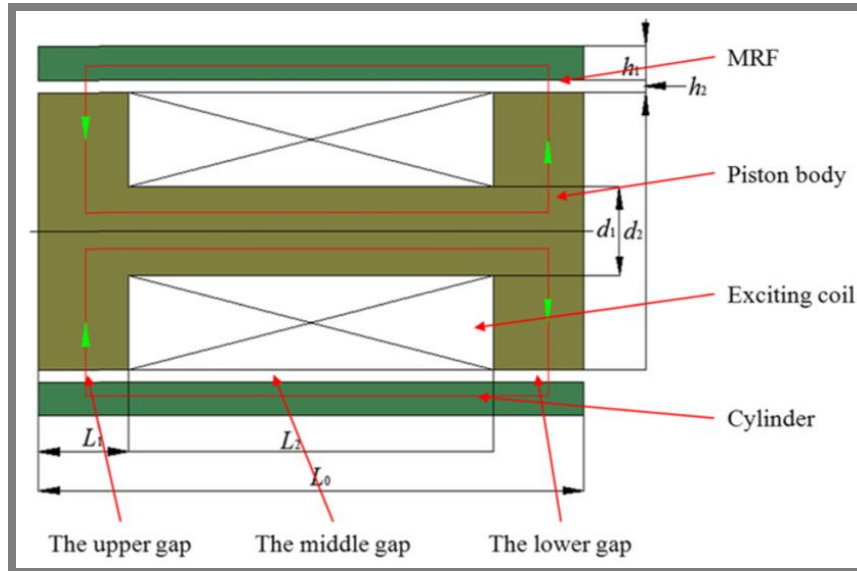


Obr. 11 Schematický náčrt tlmiča s popisom častí; prototyp (vpravo) [6]

2.3.1 Konštrukcia

Objemovú zmenu zachytáva priechodzia piestnica, ktorá prechádza cez dva hydraulické valce MR tlmiča. V oboch valcoch sú piesty, na ktoré sú namotané elektromagnetické cievky. Medzi horným valcom a spodným hydraulickým valcom sa nachádza pružina, ktorá vymedzuje vonkajší priestor medzi nimi. Ďalej obsahuje tesnenia, spojovacie súčiastky a je upravený tak, aby sa dal uchytiť do testovacieho zariadenia na oboch koncoch. V tab. 3 sú parametre magnetického obvodu zo zakótovaného obr. 12.

2.3.1



Obr. 12 Zakótovaná časť magnetického obvodu

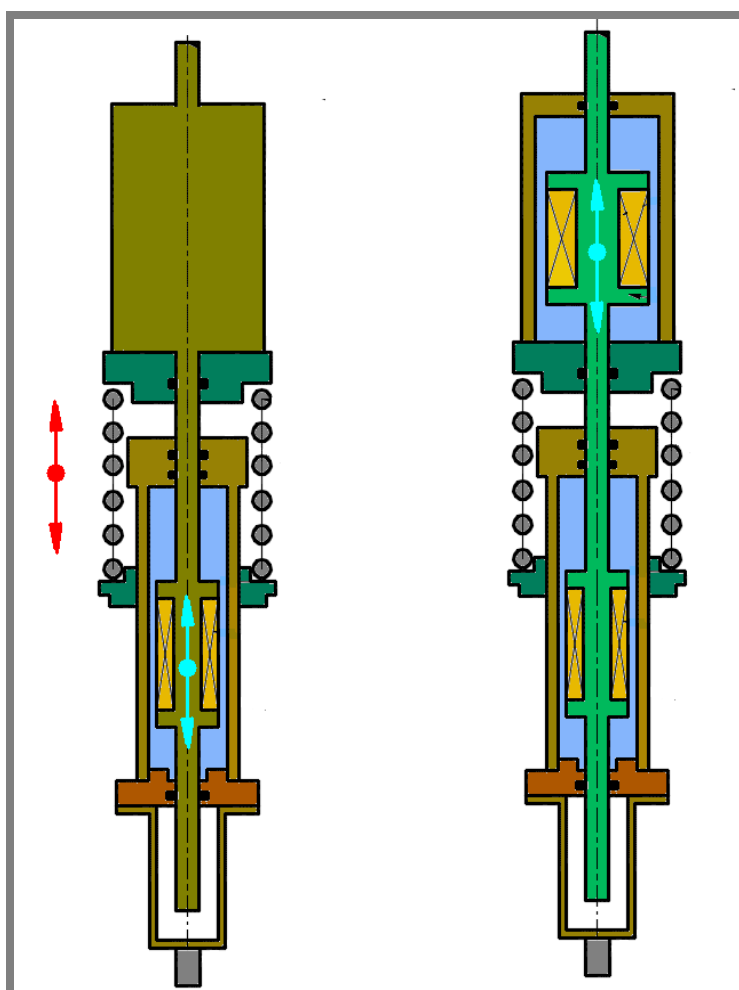
tab. 3 Rozmery tlmiča s nastaviteľnou tuhosťou

Horná tlmiaca jednotka (všetky rozmery sú v mm)		
šírka štrbiny	h_2	1
dĺžka piestu	L_0	47
dĺžka medzere cievky	L_2	35
priemer jadra	d_1	15
priemer piestu	d_2	30
hrúbka hydraulického valca	h_1	4
Šírka lemu jadra (kotúča)	L_1	6
Počet vinutí		800
Dolná tlmiaca jednotka		
šírka štrbiny	h_2	1
dĺžka piestu	L_0	52
dĺžka medzere cievky	L_2	40
priemer jadra	d_1	10
priemer piestu	d_2	22
hrúbka hydraulického valca	h_1	3
Šírka lemu jadra (kotúča)	L_1	6
Počet vinutí		500

2.3.2 Pracovný princíp, silový priebeh a prúdenie kvapaliny

Prúdy prechádzajúce hornou a dolnou cievkou sú samostatne riadené. Premenné tlmiace charakteristiky závisia na dolnej tlmiacej jednotke. Premenná tuhosť je nastaviteľná pomocou horného valca spolu s pružinou (horná pružiacia jednotka). Horný valec s pružinou pracujú za sebou zapojené v sérii. Silová analýza alebo priebeh rozložených síl pri aplikovaní jednotlivých prúdov je znázornený pomocou šípok na schematickom obrázku obr. 13. [6]

- Pri vzrastajúcom prúde pretekaným hornou cievkou klesá relatívny pohyb piestu medzi valcom a piestom v hornej pružiackej jednotke a tým sa deformuje, čiže stláča pružina. Čím väčší je prúd, tým je väčšia deformácia pružiny. V spodnej tlmiacej jednotke sa piest pohybuje relatívne voči hydraulickému valcu iba s prekonávaním odporu kvapaliny obr. 13 vľavo.
- Aplikáciou prúdu do spodnej cievky sa zaktivizuje MR kvapalina v dolnej tlmiacej jednotke a tak tlmič pracuje ako bežný MR tlmič bez nastaviteľnej tuhosti, pričom sa piest v hornej pružiackej jednotke pohybuje relatívne voči valcu s prekonávaním odporu kvapaliny. Čím väčší prúd prechádza spodnou cievkou, tým väčšie sily tlmí obr. 13 vpravo. [6]



Obr. 13 Pracovný princíp aplikáciou jednotlivých prúdov. Prúd pretekaný hornou cievkou (vľavo), prúd pretekaný spodnou cievkou (vpravo).

Zaktivizovaná MR kvapalina prechádza prstencovou oblasťou, ktorú vymedzuje vonkajší priemer piestu a vnútorný priemer hydraulického valca, v oboch tlmiacich jednotkách. Smer magnetického toku je kolmý na smer prúdenia kvapaliny v prstencových oblastiach oboch tlmiacich jednotkách. [6]

2.3.3 Charakteristiky

Z MKP modelu dosahuje magnetická indukcia v štrbine hornej pružiackej jednotke 302mT aplikáciou 1A prúdu. Hustota magnetického toku v štrbine spodnej tlmiacej

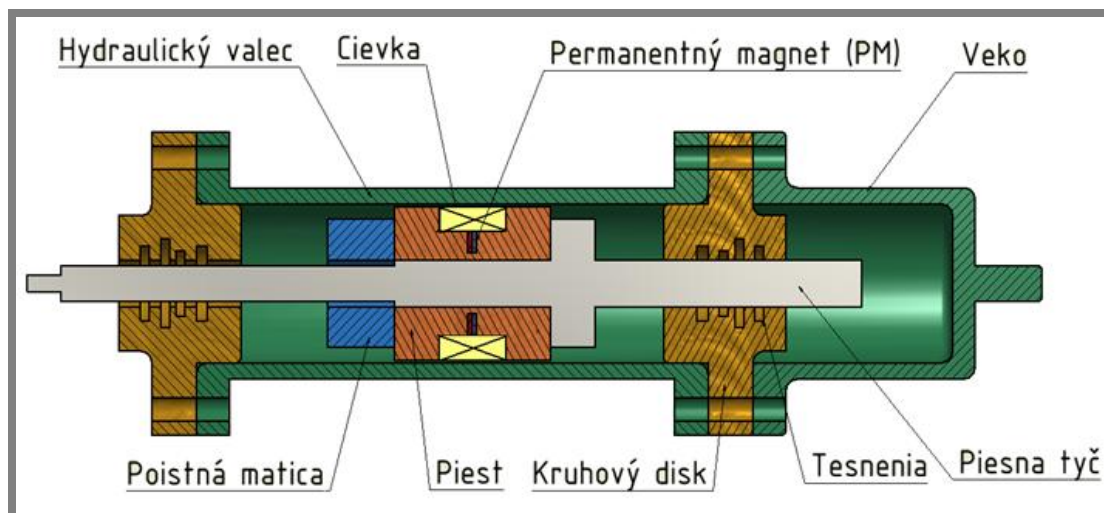
jednotky dosahuje svoje maximum ako 196mT s aplikovaným prúdom 2A. Tab. 4 ukazuje kombináciu rôznych aplikovaných prúdov v závislosti na tuhosti a tlmenia tmiča z experimentálnych testov. Prúdom I_1 je regulovateľný prúd v spodnej cievke a I_2 je prúd pretekajúci cievkou v hornom pieste. Dynamický rozsah z hodnôt v tab. 1 je 2,2. Použitá MR kvapalina je MRF 132DG. [6]

tab. 4 Tlmiace a tuhostné charakteristiky odpovedajúce prúdom v hornej a dolnej cievke

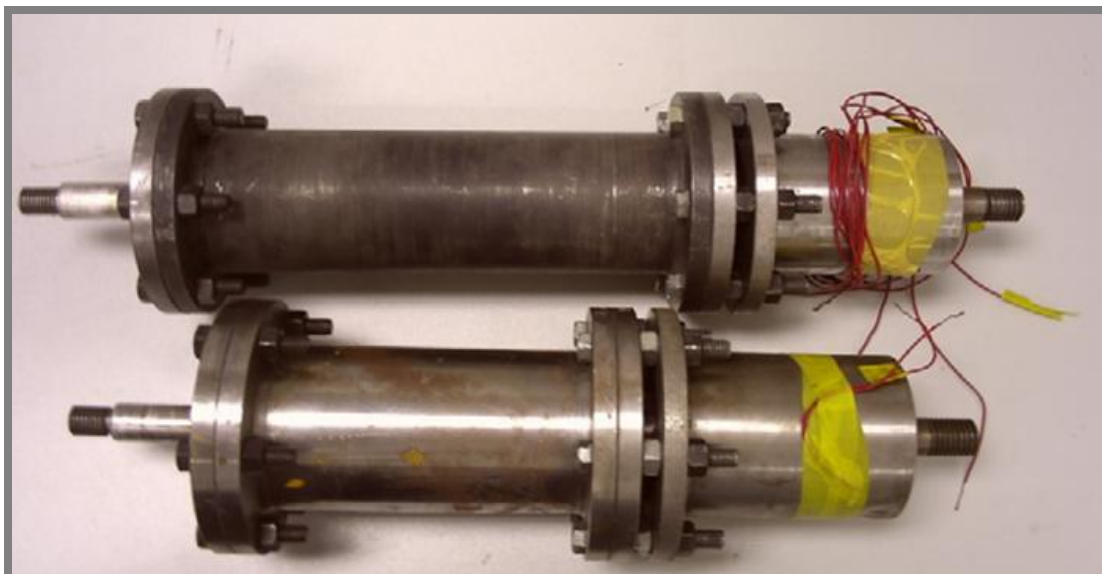
Prúd I_1 [A]	Prúd I_2 [A]	Tuhost' [kN/m]	Tlmenie [kN s/m]	Tlmiaca sila [N]
0	0	11,3	-	-
0	1	30,5	-	-
0	0	-	21,55	75
1	0	-	45,5	175
2	0	-	54,21	180

2.4 Yang Ding, Lu Zhang, Hai- Tao zhu, Zhong- Xian Li A new magneto- rheological damper for seismic control

Zaujímavosťou a hlavnou výhodou tohto tmiča je, že obsahuje permanentný magnet (PM) umiestnený v pieste spolu s cievkami. Využitím permanentného magnetu zabezpečuje, že aj v prípade vyradenia prúdu z obehu, môže tmič tlmiť stredne veľké sily. Schematický obr. 14 znázorňuje tmič s popisom hlavných častí. [7]



Obr.14 Rez tmičom s permanentným magnetom

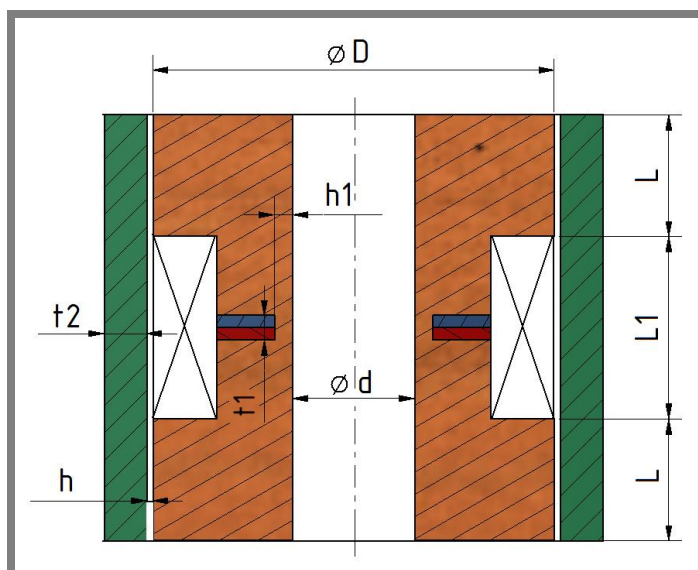


Obr. 15 Prototyp MR tmiča s permanentným magnetom

2.4.1 Konštrukcia MR tmiča

Tmič patrí medzi tmiče s priechodnou piestnicou. Je celkom jednoduchou konštrukciou. Na piest sú nasadené permanentné magnety (PM) a namotané cievky. Ďalej obsahuje hydraulický valec a veká, ktoré sú spolu spojené skrutkami. Oba konce sú upravené pre uchopenie do testovacieho zariadenia obr.15. Hlavné konštrukčné rozmery sú zhrnuté v tab. 5 podľa zakótovaného rezu na obr. 16.

2.4.1



Obr. 16 Zakótovaný rez v oblasti piestu

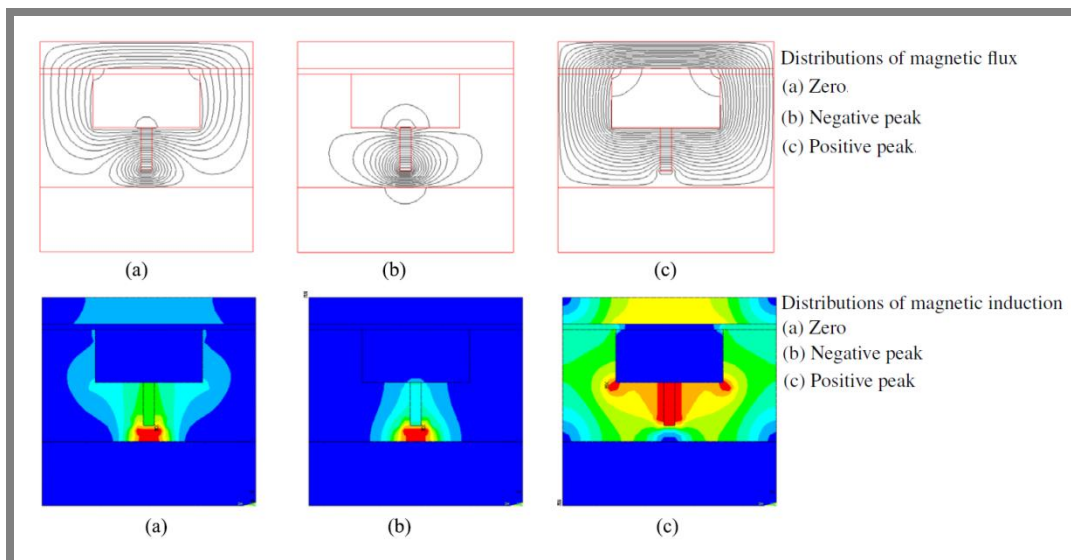
Parametry h_1 a t_1 majú významný vplyv pri navrhovaní magnetického obvodu. Hrúbka magnetického jadra h_1 má vplyv na remanenciu v štrbine pri nepretekajúcom prúde cievkou. Hrúbka permanentného magnetu t_1 súvisí s medznými hodnotami demagnetizačného prúdu, ktorý má vplyv na magnetické pole permanentného magnetu. Parameter B_r v tab. 5 určuje remanentný magnetizmus PM. [7]

tab. 5 Premenné a nepremenné konštrukčné rozmery MR tlmiča s PM

Nemenné sa konštrukčné parametre								
h	h1	D	d	T	t1	H	L	L1
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	-	66	20	5	2	-	20	-
Premenné konštrukčné parametre								
Sériové číslo tlmiča	n	h1	Br					
	[-]	[mm]	[T]					
MR-B1	1	3	1,26					
MR-B2	1	1,5	1,37					
MR-B3	3	3	1,26					
MR-B4	3	1,5	1,37					

2.4.2 Princíp práce tlmiča

Tlmič využíva PM na zabezpečenie stáleho prúdenia magnetického toku magnetickým obvodom aj keď práve nepreteká cievkami prúd. Štrbina tvoriaca prstencovú oblasť MR tlmiča sa nachádza medzi vonkajším priemerom piestu a vnútorným priemerom hydraulického valca. Tok magnetického poľa PM prechádza zo severného pólu na južný pól cez magnetický obvod a uvažovanú štrbinu MR tlmiča. Vplyv magnetického poľa PM sa zníži, alebo odstráni aplikovaním záporného prúdu, ktorý vytvorí magnetický tok opačného smeru ako je magnetický tok PM. Väčšie tlmiace sily tlmič dosiahne aplikovaním kladného prúdu, ktorého smer magnetického toku sa stotožňuje so smerom magnetického poľa PM. Obr. 17 ukazuje distribúciu magnetickej indukcie a magnetického toku magnetickým obvodom. [7]

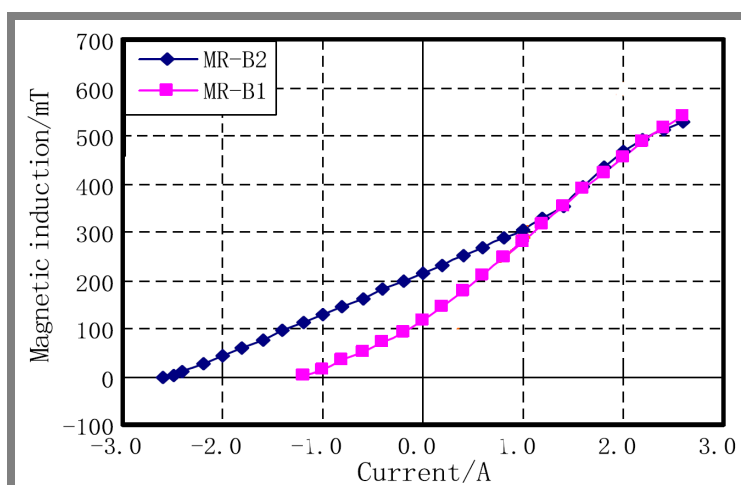


Obr. 17 Distribúcia magnetického toku (hore) a magnetickej indukcie (dole) [7]

2.4.3 Charakteristiky MR tlmiča

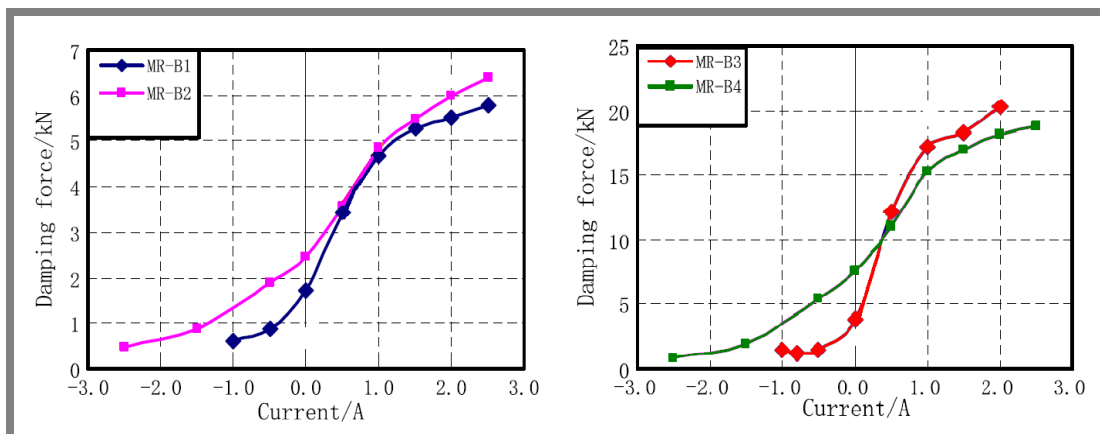
Aby PM predišiel magnetickej deklinácii po opakovanej magnetizácii a demagnetizácii musí mať magnet ideálne lineárne demagnetizačné vlastnosti, tým sa eliminuje možnosť permanentnej demagnetizácie. Pre tento dôvod je navrhnutý PM z materiálu Nd-Fe-B. Na obr. 18 je graf závislosti magnetickej indukcie na

aplikovanom prúde pre tlmíče s jednou cievkou. Je vidieť že aplikovaním záporného prúdu sa stráca magnetická indukcia v štrbine. Pre tlmíče s 3 cievkami neboli odmerané indukcie z dôvodu obmedzenej dĺžky hallovej sondy. [7]



Obr. 18 Závislosť magnetickej indukcie na aplikovanom prúde [7]

Tlmiace sily závislé na vstupnom prúde cievky sú zobrazené na obr. 19. Tab. 6 zahrnuje tlmiace sily, dynamické rozsahy a im odpovedajúce prúdy, kde F_0 je tlmiaca sila pri nulovom prúde kedy preteká cez štrbinu len tok magnetického pola PM. F_{\min} je minimálna hodnota tlmiacej sily pri aplikácii záporného prúdu, kedy sa celkom vyruší tok magnetického pola PM. F_{\max} je maximálna tlmiaca sila s aplikovaným pozitívnym prúdom, ktorý znásobí účinok PM. Použitá MR kvapalina z Chongqing Instrument Materials Research Institute of China, denoted MR-J a jej saturačná hodnota je 500mT. [7]

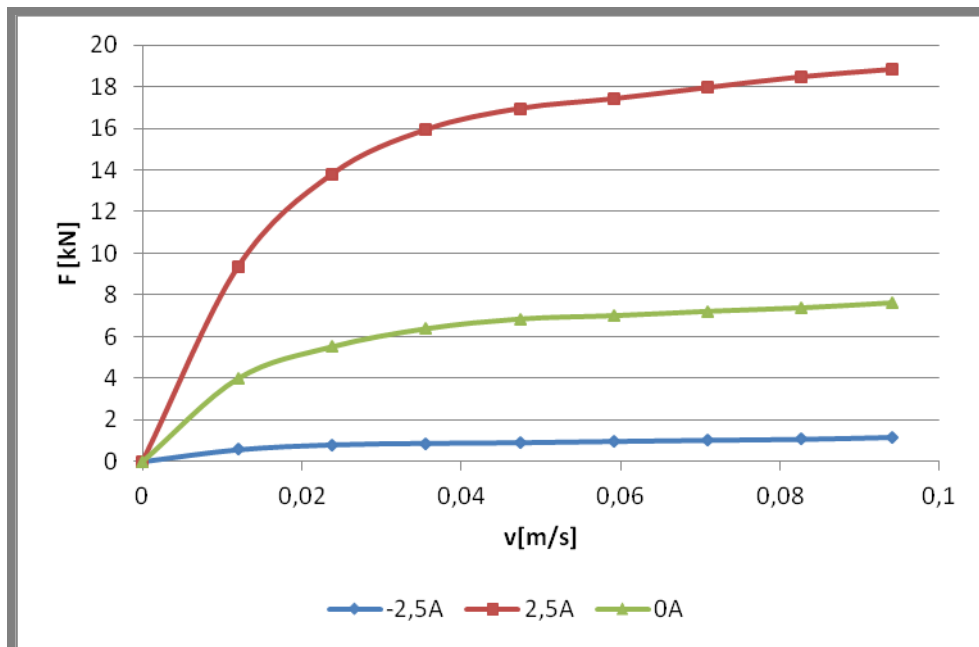


Obr. 19 Zvislosť tlmiacej sily na aplikácii prúdu prechádzajúceho cievkou [7]

tab. 6 Tlmiace sily a dynamické rozsahy MR tlmičov s PM

Seriové číslo tlmiča	MR-B1	MR-B2	MR-B3	MR-B4
F_0 [kN]	1,729	2,465	3,893	7,593
I_0 [A]	0	0	0	0
F_{\min} [kN]	0,591	0,484	1,171	0,882
I_{\min} [A]	-1	-2,5	-1	-2,5
F_{\max} [kN]	5,789	6,382	20,295	18,721
I_{\max} [A]	2,5	2,5	2	2,5
Dynamický rozsah	9,8	13,1	17,3	21,2

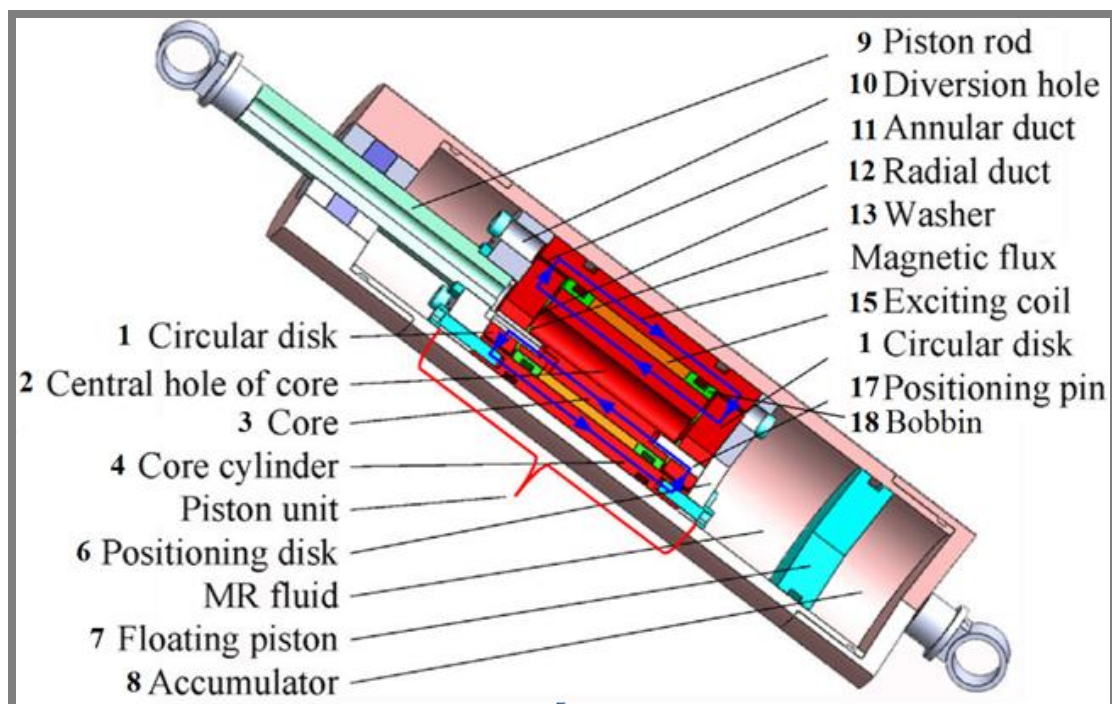
Z článku uvedené hodnoty v tab. 6 odpovedajú rýchlosti tlmiacej sily 0,094 m/s.[7] Pre tlmič MR-B4 s tromi ciavkami je na obr. 20 aproximovaná hysteréza F - v charakteristiky. Nulovému prúdu odpovedá stredne veľká tlmiaca sila vďaka magnetickej indukcie PM. Červená krivka odpovedá maximálnemu prúdu I_{\max} , ktorý posilňuje účinok PM a modrej krivke odpovedá I_{\min} , ktorý ruší magnetické pole PM.



Obr. 20 Závislosť tlmiacej sily na rýchlosti tlmiča MR-B4 (aproximovaná hysteréza [7])

2.5 Xian- Xu Bai, Dai- Hua Wang, Hang Fu, Radial and annular duct MR damper

Tlmič využíva dva druhy štrbín a to prstencovú, ako väčšina komerčných MR tlmičov, a na viac osadenú z čela (radiálnu). Využitím tejto konštrukcie štrbín sa zväčší efektívna zóna MR kvapaliny. Na obr. 21 je znázornený tento MR tlmič s popisom hlavných častí. [8]

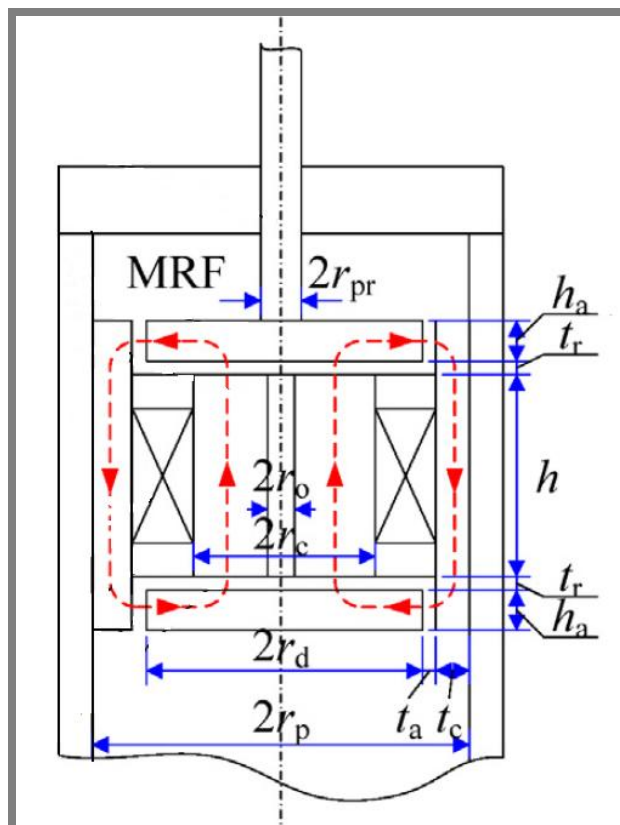


Obr. 21 MR tlmič s prstencovou a radiálnou štrbinou [8]

2.5.1 Konštrukcia a materiály

Typ tohto tlmiča patrí medzi jednoplášťové. Nerovnosť objemov v spodnej a hornej komore zachytáva plávajúci piest (7), na ktorý tlačí stlačený plyn. Piest obsahuje magnetické jadro (3), dva kruhové magnetické disky (1), nemagnetický kotúč (18), na ktorý je navinutá cievka (15), magnetické valcové jadro (4), nemagnetické podložky (13) a polohovacie kolíky (17). Dva identické kruhové disky (1) sú spojené na oboch koncoch jadra pomocou kolíkov (17) a tým sa vytvorí radiálne štrbina (12). Podložky (13), ktoré sú súbežne nasadené na kolíky (17) vymedzujú hrúbku radiálnej štrbiny. Jadro (4), ktoré je umiestnené v kotúči a spojené s dvoma kruhovými platňami (1) je súosovo umiestnené vo valcovom jadre (4). Prstencová štrbina (11) je tvorená medzi vnútorným obvodom valcového jadra (4) a vonkajším obvodom kruhových platní (1). Konštrukcia jednotlivých častí je v tab.7 zo zakótovaného obr. 22. Uvedené magnetické časti sú z ocele 20# steel a nemagnetické časti z ocele 304# steel z MKP modelu. [8]

2.5.1



Obr. 22 Zakótované časť hydraulického valca MR tlmiča [8]

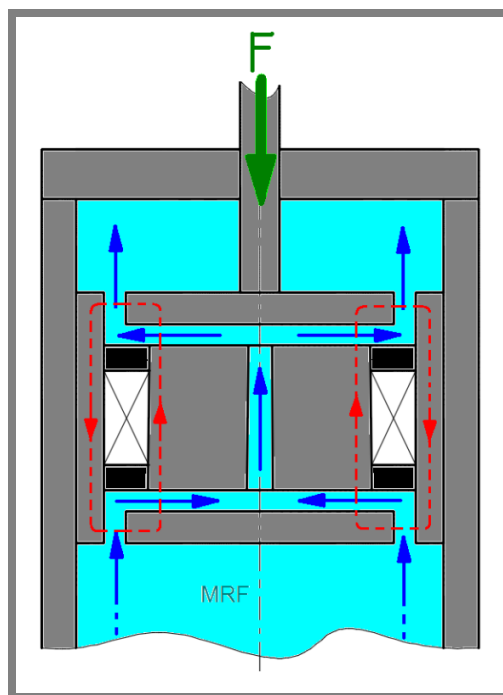
tab. 7 Rozmery MR tlmiča s radiálnou a medzikruhovou štrbinou

Parameter	Označenie	Hodnota
Dĺžka tlmiča	l_D	185mm
polomer tlmiča	R_D	24mm
polomer piestnej tyče	r_{pr}	5mm
polomer piestu	r_p	20mm
polomer kruhovej platničky	R_d	12,84mm
polomer jarda	r_c	10,54mm
polomer diery v jarde	r_o	3,5mm
výška prstencovej štrbiny	h_a	8,6mm
hrbka radialnej štrbiny	t_r	1mm
hrúbka prstensovej štrbiny	t_a	1mm
výška jadra	h	30mm
zdvih		50m
Hrúbka jadrovho valca	t_c	6,36mm

2.5.2 Pracovný princíp piestu a prúdenie kvapaliny

Pri stlačovaní piestu MR kvapalina prechádza najprv cez prstencovú oblasť v dolnej časti piestu, potom preteká cez radiálnu štrbinu do centrálného otvoru v jadre, pokračuje do hornej oblasti radiálnej štrbiny potom prstencovej štrbiny a nakoniec MR kvapalina prúdi von z štrbín piestu. Tok kvapaliny sa opakuje rovnako pri pohybe piestu do hornej úvrate. Tok magnetického pola budený cievkou je kolmý na prstencovú oblasť rovnako ako aj na radiálnu oblasť štrbiny tak, ako je znázornené

na obr. 22. Prúdenie kvapaliny je znázornené pomocou modrých šípok a tok magnetického pola červenou prerušovanou slučkou. Použitá MR kvapalina je MRF-132DG.[8]

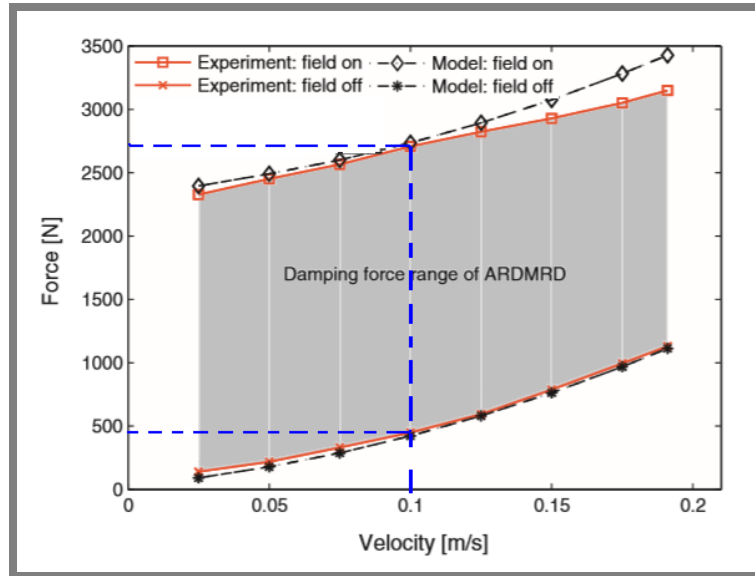


Obr. 23 Prúdenie MR kvapaliny MR tmičom

2.5.3 Charakteristiky MR tmiča

Analýzou MKP hodnoty magnetických indukcií v oboch štrbinách dosahujú rozdielne hodnoty. Pre prstencovú štrbinu dosahuje magnetická indukcia 0,45T a v radiálnej štrbine je magnetická indukcia 1T aplikovaním prúdu 2A s počtom vinutí 280. Podľa experimentálnych testov závislosti tlmiacej sily na rýchlosti, obr. 24 sa krivka z nameraných hodnôt pri maximálnom magnetickom poli láme a začína výrazne líšiť od teoretickej predikcie pri 0,1 m/s, z dôvodu nedostatočného tlaku plynu pod plávajúcim piestom. Pre rýchlosť 0,1m/s má dynamický rozsah hodnotu 6. [8]

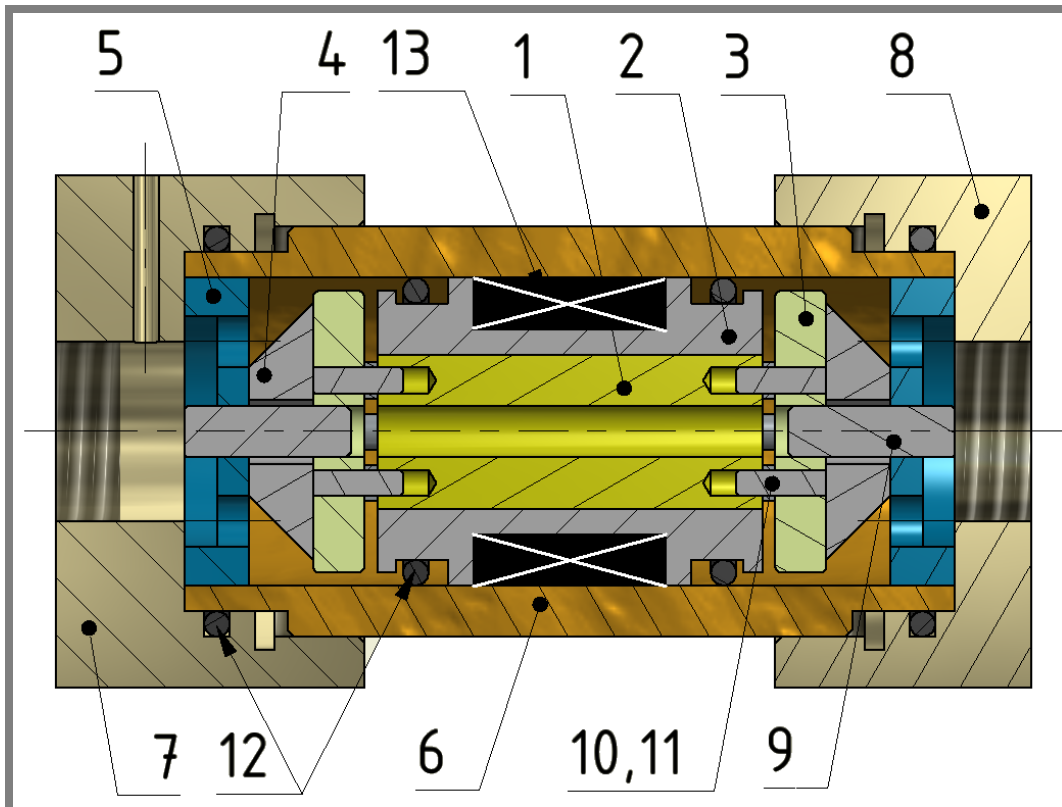
2.5.3



Obr. 24 F-v charakteristika MR tlmiča [8] (upravené)

2.6 D H Wang, H X Ai and W H Liao, A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps

Tento MR ventil využíva rovnaký tok kvapaliny ako predošlý MR tlmič s podobnou konštrukciou. Aktívna zóna je teda medzikruhová a na viac z čela (radiálna). Na obr.25 je znázornený MR ventil v reze, ktorý bol experimentálne testovaný.



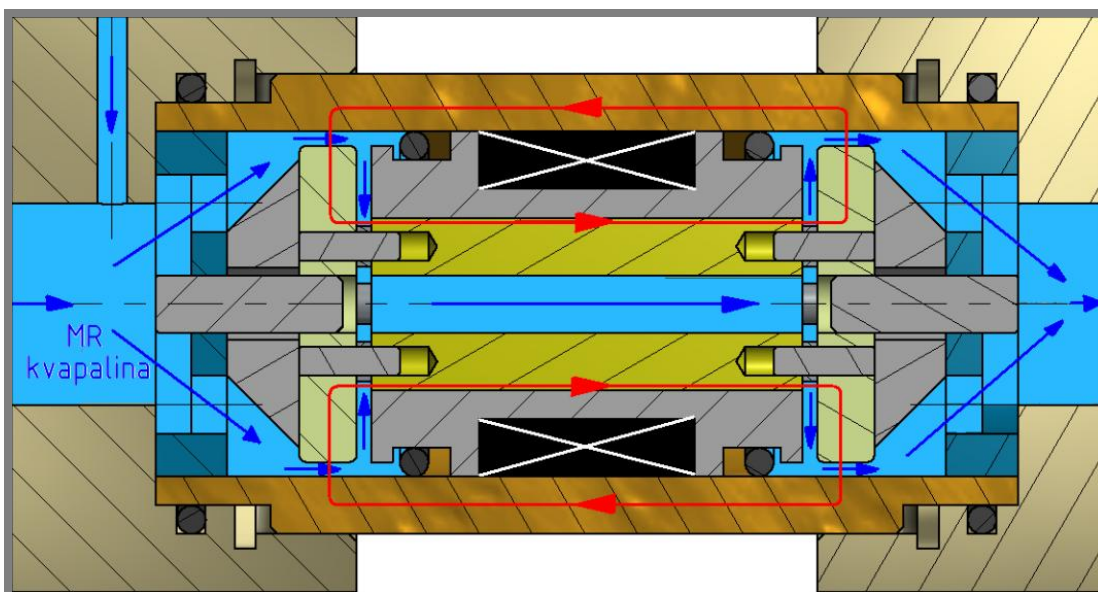
Obr.25 MR ventil s radiálnou a medzikruhovou štrbinou

2.6.1 Konštrukcia

MR ventil obsahuje dve hlavné časti, ventilové jadro a ventilový plášť. Ventilové jadro obsahuje samostatné magnetické jadro (1) s otvorom pre prietok MR kvapaliny, na ktoré sa nasunie nemagnetický kotúč (2) a na kotúč sa namotá budiaca cievka (13). Ďalej sú spojené na oboch koncoch jadra dve magnetické kruhové platničky (3) pomocou polohovacích kolíkov (10) a medzera vytvárajúca radiálnu štrbinu medzi koncami jadra (1) a platničkami (3) sa vymedzí pomocou nemagnetických podložiek (11). Na kruhové platničky (3) do otvoru sa nasunú dlhšie kolíky (9) a na ten ešte dva kužele (4), každý z jednej strany. Na tieto kužele cez ktoré prechádzajú dlhšie kolíky (9) sa nasadia polohovacie kruhové platničky (5) a tak spolu s kuželíkmi(4) vytvoria dráhu pre prietok MR kvapaliny. Ventilové jadro ja nasunutú na magnetický valec (6) a tým sa vytvorí prstencová štrbina. Tú vymedzuje práve vnútorný priemer valce (6) a vonkajší priemer magnetickej platničky (3). Veka s vstupným (7) a výstupným kanálkom (8) z oboch strán sú spojené naskrutkovaním k vonkajšiemu valčeku (6). Tesnenia (12) zabraňujú pretekaniu MR kvapaliny do oblasti cievky. [9] Tab.8 zahrňuje hlavné konštrukčné rozmery MR ventilu. Prúdenie MR kvapaliny vo ventile znázorňuje obr. 25. Červené slučky znázorňujú magnetický tok.

tab. 8 Rozmery MR ventilu s dvoma štrbinami

Parameter	hodnota
Vonkajší priemer	40 mm
Priemer kotúč	25,4mm
Priemer magnetickej platničky	30,4mm
Priemer hlavnej diery jadra	4mm
Dĺžka kotúča	30mm
Dĺžka prstencovej štrbiny	4mm
Šírka štrbiny	0,8mm
Vonkajší priemer jadra	22,4mm



Obr. 26 Prúdenie MR kvapaliny v MR ventile

2.6.2 Charakteristiky MR ventilu

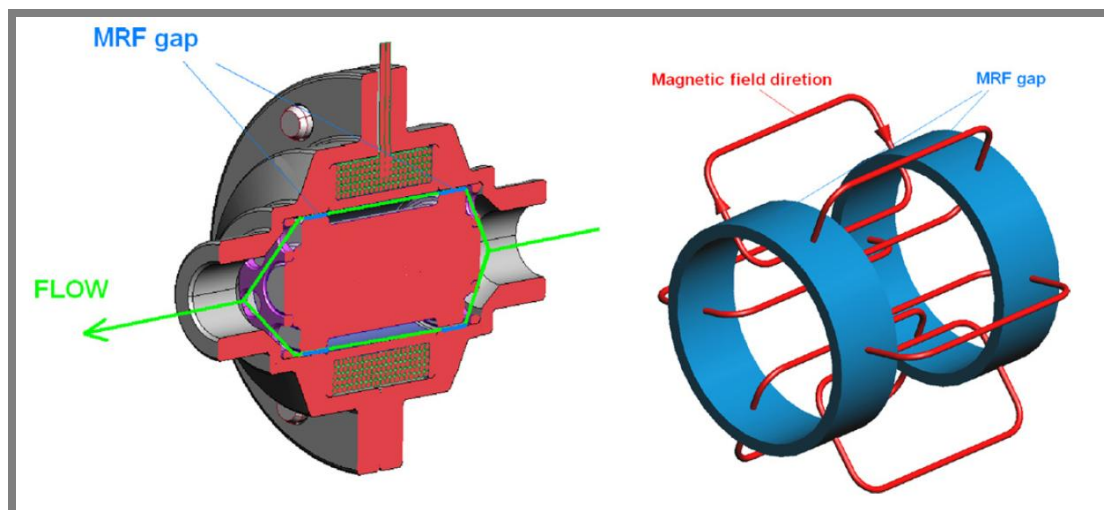
Podľa MKP modlu je materiál magnetických platničiek, jadra, plášťa, kotúča, z steel no10 (Ansys/ Emag). Hodnoty indukcie v medzikruhovej a radiálnej štrbine sú 0,3T a 0,45T v uvedenom poradí, aplikáciou 1,8A prúdu. Experimentálne overený MR ventil dosahuje maximálny tlakový rozdiel 2,6MPa s prúdom 1,6A. Experiment nezahrňuje meranie tlakového rozdielu pri nulovom magnetickom poli, ale uvažuje ako minimálnu hodnotu prúdu 0,2A. S týmto prúdom dosahuje MR ventil tlakový rozdiel 0,3MPa. Z uvedených tlakových rozdielov je dynamický rozsah 8,7 pri 0,015m/s. Použitá MR kvapalina je MRF-J01 (Chongqing Instrument Material Reaserch Institute in China). [9]

2.7 A. Grunwald, A.G. Olabi, Design of magneto- rheological valve

Článok porovnáva dve konštrukčné prevedenia MR ventilov s rozdielnou konštrukciou štrbín. MR ventil s medzikruhovým otvorom obr.27 a MR ventil s valcovým otvorom obr.29. Oba MR ventile boli zhotovené a experimentálne otestované s MRF 336-AG, ktorá v porovnaní s MRF 132-AD bola považovaná za menej uspokojivú a menej predikovatelnú. Vo všeobecnosti sú MR kvapaliny na báze silikónového oleja ťažšie tesnitelné v porovnaní MR kvapalín na báze uhl'ovodíku. Na druhej strane sú menej senzitivne na teplotné zmeny. [10]

2.7.1 MR ventil s medzikruhovou štrbinou

Tento MR ventil využíva medzikruhovú štrbinu na magnetoreologický efekt zret'azenia feromagnetických častíc. Prúdenie MR kvapaliny je kolmé na vonkajšie magnetické pole. MR ventil sa skladá z prírub, jadra, budiacej cievky a spojovacích súčiastok. Jeho hmotnosť je 475g a objem MR kvapaliny je 70mm³. Na obr.27 je znázornený MR ventil s medzikruhovou štrbinou v reze a tvar štrbiny na ktorý pôsobia magnetické indukčné čiary znázornené pomocou červených slučiek. Zelená šípka prechádzajúce ventilom znázorňuje prúdenie kvapaliny. V tab.9 sú zahrnuté hlavné konštrukčné rozmery tohto MR ventilu. [10]



Obr. 27 MR ventil s medzikruhovou štrbinou [10]

tab.9 Rozmery MR ventila

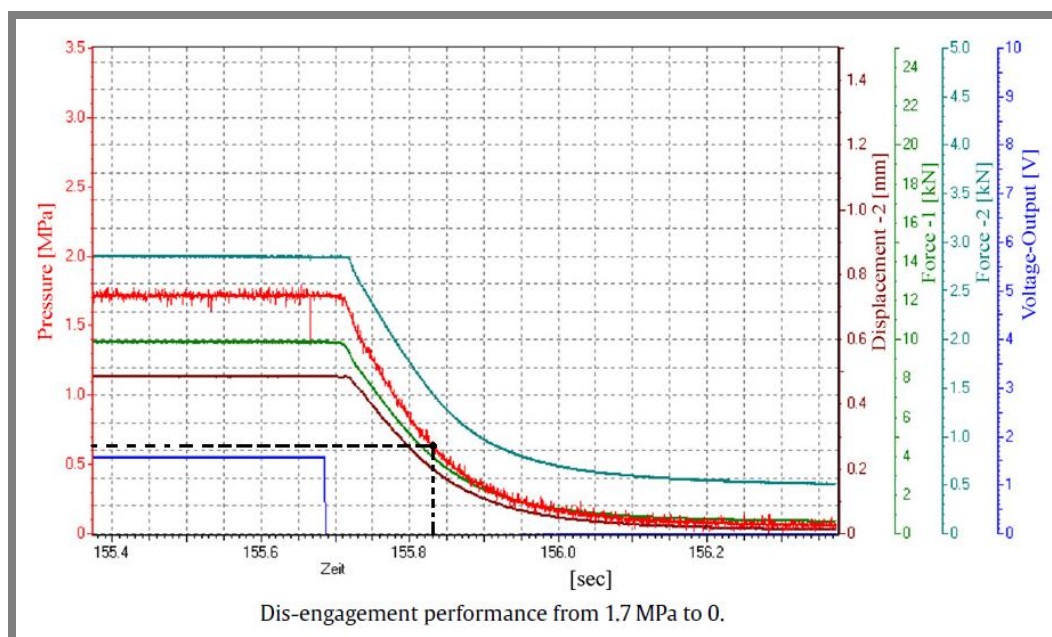
Parameter	Hodnota
Dĺžka kotúča	24 mm
Vnútorňy priemer kotúča	21 mm
Vonkajší priemer kotúča	35 mm
Šírka štrbiny	0,5 mm
Dĺžka efekívnej oblasti (štrbiny)	2x6 mm

2.7.1.1 Charakteristiky

Plášť alebo príruby sú z nízkouhlíkovej ocele Ck15. Na základe výpočtového modelu pomocou MKP dosahuje maximálna magnetická indukcia v štrbine 0,85T aplikáciou prúdu 3A. To odpovedá intenzite magnetického pola o veľkosti 200kA/m. Počet vinutí cievky je 120 s odporom 0,3Ω a priemerom drôtu cievky 0,9mm. Nominálny prúd pretekaný cievkou je 6,2A s indukciou cievky 1mH. Prúdením MR kvapaliny s objemovým tokom 5cm³/s bez ovplyvnenia magnetického pola dosahuje tlakový rozdiel 0,05MPa. Pri aplikácii prúdu 4,5A dokáže MR ventilu udržať tlak 1,5MPa bez značného vytekania MR kvapaliny. Použitá kvapalina je MRF-132AD. [10]

Časová odozva odmeraná v spojení s experimentálnym zariadením, meraná pre pokles tlaku z 1,7MPa na 0MPa je 130ms obr. 28 (čiernou prerušovanou čiarou).

2.7.1.1

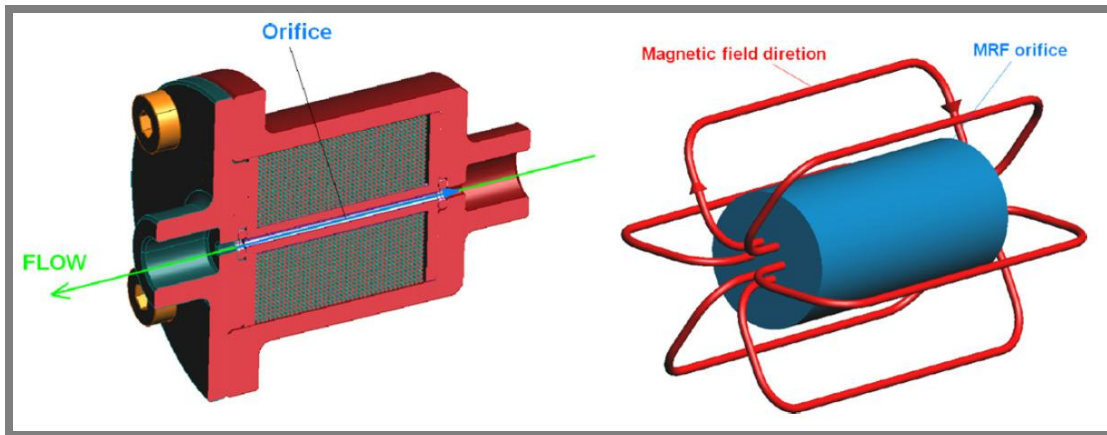


Obr. 28 Časová odozva pri poklese tlaku [10] (upravené)

2.7.2 MR ventil s valcovým otvorom

Ventil využíva valcový otvor, na ovplyvnenie MR kvapaliny, prechádzajúci osou kotúča (jadra). Magnetický indukčný tok je v tomto prípade súbežný s prúdením MR kvapaliny. Je zložený z jednej príruby, kotúča, na ktorý je namotaná elektromagnetická cievka a spojovacie súčiastky. Celková hmotnosť MR ventilu je 530g a objem MR kvapaliny je 75mm³. Obr. 29 znázorňuje rez ventilom, kde zelená šípka znázorňuje prúdenie kvapaliny a červené slučky znázorňujú magnetické indukčné siločiarly. V tab. 10 môžeme vidieť rozmery konštrukčného prevedenia MR ventilu s valcovým otvorom. [10]

2.7.2



Obr. 29 MR ventil s valcovým otvorom [10]

tab. 10 Rozmery MR vetnila s valcovym otvorom

Parameter	Hodnota
Dĺžka kotúča	36 mm
Vnútorňý priemer kotúča	5 mm
Vonkajší priemer kotúča	32,4 mm
Priemer valcového otvoru (štrbiny)	1,5 mm
Dĺžka valcového otvoru (štrbiny)	40 mm

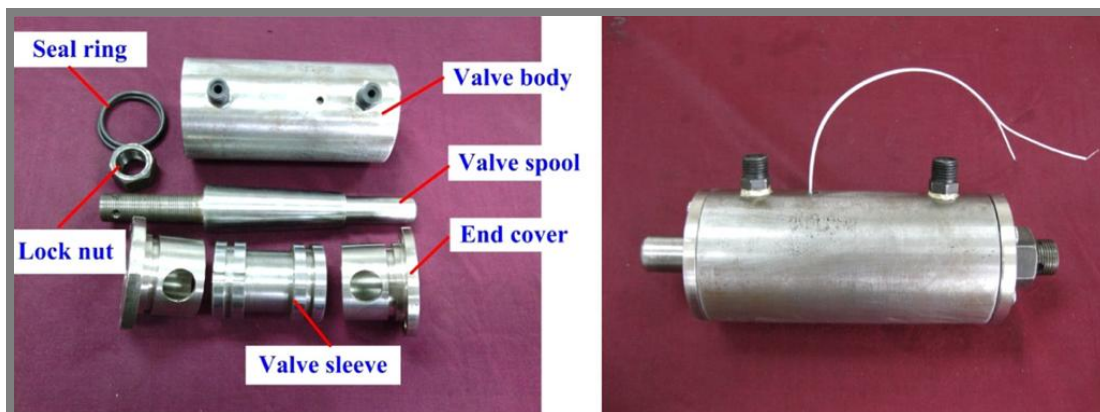
2.7.2.1 Charakteristiky

Príruba je z nízokuhlíkovej ocele (Ck15). Na základe výpočtového modelu pomocou MKP dosahuje maximálna magnetická indukcia 0,57T vo valcovom otvore aplikáciou prúdu 6A. To odpovedá intenzite magnetického pola o veľkosti 21kA/m. Počet vinutí cievky je 490 s odporom 0,84 Ω a priemerom drôtu cievky 0,9mm. Pri objemovom toku kvapaliny 5cm³/s bez ovplyvnenia magnetického pola dosahuje tlakový rozdiel 0,2MPa. Aplikáciou prúdu 4,5A je tlaková únosnosť 0,6MPa. Použitá MR kvapalina je MRF-132AD. [10]

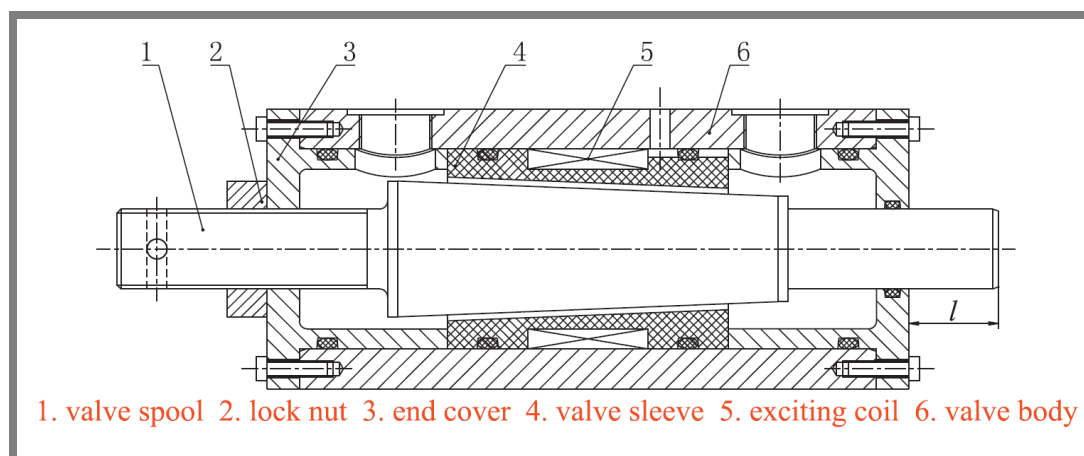
2.8 Guoliang Hu, Ming Long, Lifan Yu, Weihua Li

Design and performance evaluation of a novel magnetorheological valve with tunable resistance gap

Hlavnou výhodou tohto MR ventilu je jeho nastaviteľnosť šírky štrbiny, takže ventil môže byť použitý pre rôzne účely. Na obr. 30 je reálny prototyp MR ventilu s popisom časti a na obr. 31 je jeho pozdĺžny prierez.



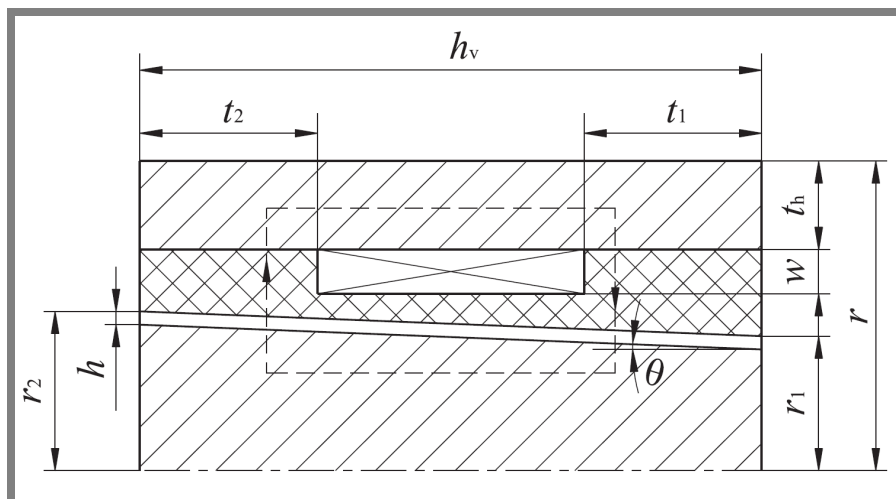
Obr. 30 Prototyp MR ventilu s nastaviteľnou štrbinou s popisom častí [11]



Obr. 31 Rez MR ventilom s popisom častí [11]

2.8.1 Konštrukcia

Hlavnou časťou je kuželový hriadeľ (1) na ktorý sa nasunie puzdro (4) s namotanou budiacou cievkou (5). Medzera medzi kuželovým hriadeľom a puzdrom sa môže nastavovať v závislosti na otáčaní kuželového hriadeľa (1) tzn. môžeme meniť šírku pracovnej štrbiny. Na ľavom konci hriadeľa sú vyvrtané dve dierky jedna cez druhú. Pomocou vloženého imbusu do vyvrtanej dierky môžeme jeho otáčaním, čím sa otáča hriadeľ (1) pozdĺž osi, nastavovať šírku štrbiny. Ďalej obsahuje plášť (6) a dve veka (3). Jedno veko sa nasunie na jeden koniec a druhé na ľavý koniec hriadeľa (1) a priskrutkuje o plášť (6). Ľavý koniec hriadeľa je poistený poistnou maticou (2) proti posunu hriadeľa, čím by sa zmenila šírka štrbiny. V tab. 11 sú zhrnuté hlavné konštrukčné rozmery MR ventilu, ktoré sú zakótované na obr. 32. [11]



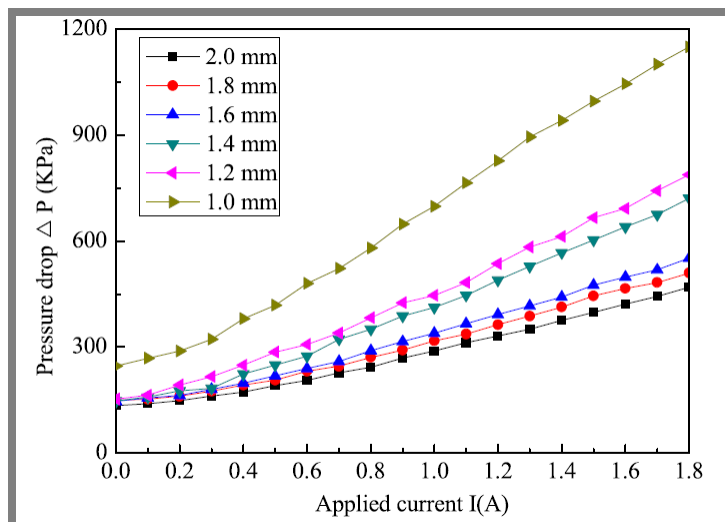
Obr. 32 Zakótované časti magnetického obvodu MR ventilu[11]

tab. 11 Rozmery MR ventilu s nastaviteľnou štrbinou

parameter	označenie	hodnota
Dĺžka jadra	h_v	70 mm
Dĺžka osadenia cievky zľava	t_2	20 mm
Dĺžka osadenia cievky zprava	t_1	20 mm
Koncový poolomer	r_2	18 mm
Koncový polmer	r_1	15,2 mm
Hrúbka namotania cievky	w	5 mm
Hrúbka plášťa	t_h	10 mm
Polomer ventilu	r	35 mm
Šírka štrbiny	h	$1 \div 2$ mm

2.8.2 Charakteristiky MR ventilu s nastaviteľnou štrbinou

Z dôvodu že je štrbina sklonená pod určitým uhlom, magnetický tok nie je vo všetkých miestach štrbiny kolmý na prúdenie MR kvapaliny. Z toho vyplýva, že hustota magnetického toku je nerovnomerná pozdĺž štrbiny. V ľavej oblasti štrbiny o veľkosti 1mm je magnetická indukcia cca 0,47T a v pravej cca 0,42T aplikovaním 1A. Počet vinutí cievky je 284 s priemerom drôtu 0,6mm a prúdovou hustotou $2,5 \text{Amm}^{-2}$. Vďaka nastaviteľnosti MR ventilu dosahuje rôzne dynamické tlakové rozsahy. Maximálna nastaviteľná veľkosť štrbiny 2mm dosahuje dynamický rozsah 3,6 s maximálnym tlakovým rozdielom 470kPa aplikáciou prúdu 1,8A. Minimálna šírka štrbiny 1mm vykazuje hodnotu dynamického rozsahu 4,6 s maximálnym tlakovým rozdielom 1150kPa aplikáciou prúdu 1,8A obr. 33. Tieto uvedené hodnoty boli experimentálne namerané pri objemovom toku MR kvapaliny 0,067 l/s. Použitá MR kvapalina je MRF- J01T (Chongqing Instrument Material Reaserch Institute in China). Materiál magnetického obvodu je steel no.10 z MKP modelu (Ansys/Emag). [11]



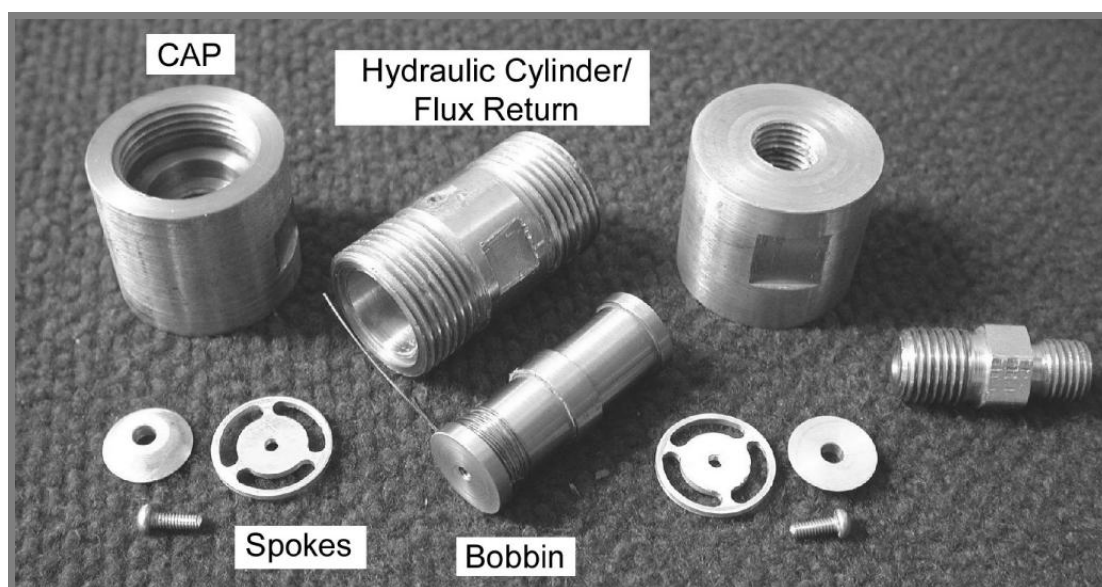
Obr. 33 Závislosť tlakového rozdielu na prúde pri rôznych šírkach štrbiny[11]

2.9 Jin- Hyeong Yoo, Norman M. Wereley

2.9

Design of a high-efficiency magnetrheological valve

Článok sa zaoberá najmä materiálovou koncepciou MR ventilu. Magnetický obvod tvorí jadro a hydraulický valec, a spolu vytvárajú medzikruhovou efektívnu oblasť. Ostané časti sú hydraulická hlavica, tesnenia a spojovacie komponenty, ktoré sú spolu s časťami magnetického obvodu znázornené na obr. 34. [12]

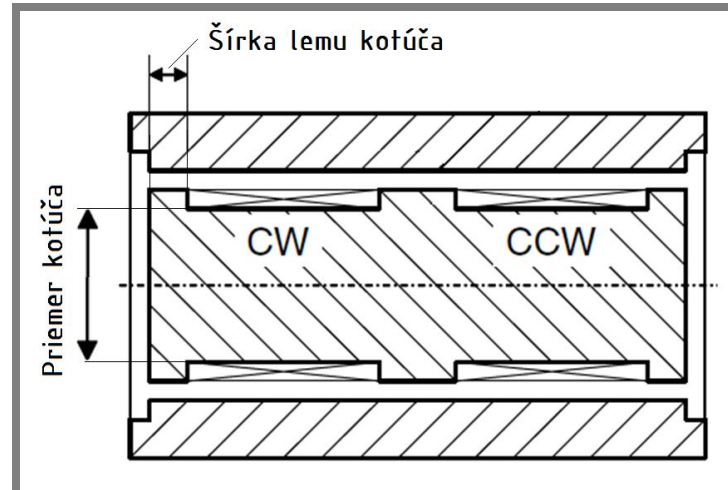


Obr. 34 Časti MR ventilu [12]

2.9.1 Konštrukčno- materiálové charakteristiky

2.9.1

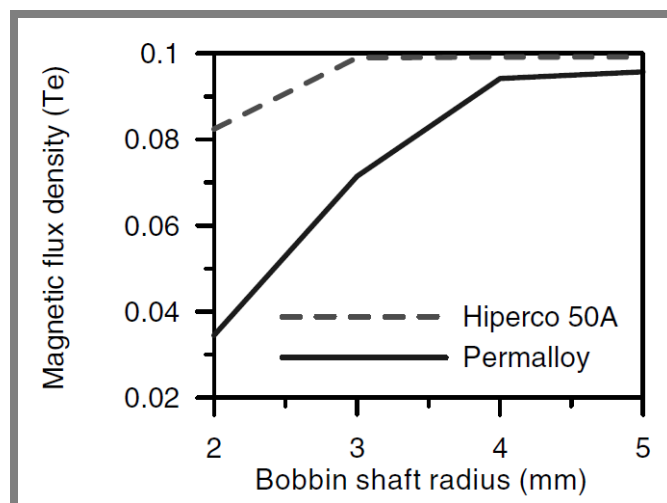
Skúmané materiály MR ventilu sú materiál permaloy a materiál hiperco 50-A. Konštrukčno- materiálové parametre MR ventilu, ktoré ovplyvňujú efektivitu magnetického obvodu sú priemer kotúča a šírka lemu kotúča obr. 35. [12]



Obr. 35 Skúmane konštrukčné parametre MR ventilu [12] (upravené)

2.9.1.1 Priemer kotúča

Závislosť geometrického parametru priemeru kotúča a materiálovej charakteristiky magnetickej indukcie v štrbine o veľkosti 0,5mm bez MR kvapaliny oboch materiálov ukazuje obr. 36. Od veľkosti polomeru 4mm dosahujú oba materiály magnetickej indukciu 0,1T. Materiál Hiperco 50-A dosahuje s minimálnym uvažovaným polomerom kotúča 2mm dosahuje hustotu magnetickeho toku cca 0,08T a v prípade permaloyu 0,035T. [12]

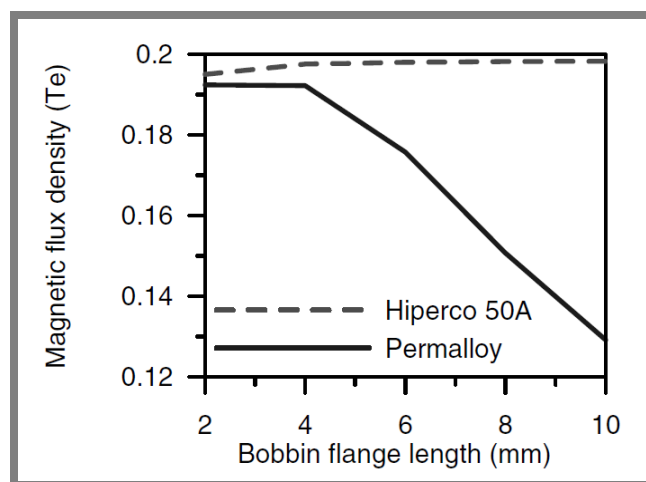


Obr. 36 Závislosť magnetickej indukcie na priemere kotúča [12]

2.9.1.2 Dĺžka lemu kotúča

Ďalším z konštrukčných parametrov ovplyvňujúce materiálú charakteristiku je dĺžka lemu kotúča. Na obr. 37 je graf závislosti tohto geometrického rozmeru na veľkosti magnetickej indukcie v štrbine s veľkosťou 0,5mm bez MR kvapaliny. Krivka pre hiperco 50-A pomaly rastie v závislosti na rastúcej dĺžke. Minimálna uvažovaná dĺžka v grafe je 2mm. Hiperco s touto hodnotou dĺžky dosahuje magnetickej indukciu 0,195T. A pre maximálnu dĺžku z grafu 10mm dosahuje cca 0,2T. V prípade permaloyu krivka závislosti magnetickej indukcie na dĺžke klesá.

Dĺžka 2mm s týmto materiálom dosahuje 0,192T a s dĺžkou 10mm dosahuje hodnotu 0,13T. [12]

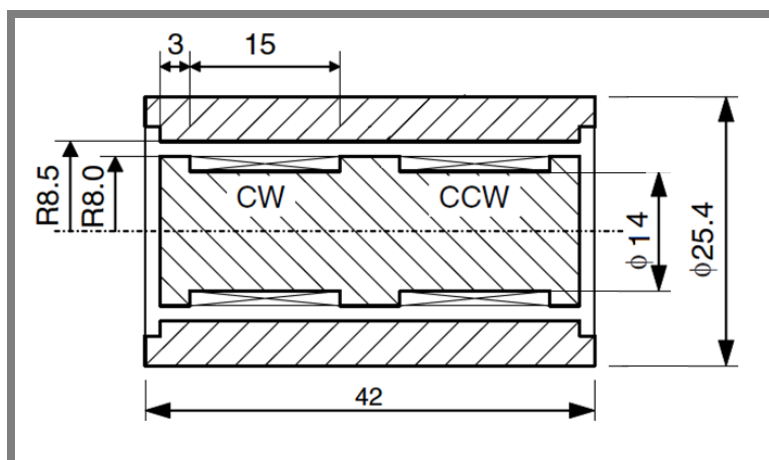


Obr. 37 Graf závislosti dĺžky na magnetickej indukčii [12]

2.9.2 Magnetické hľadisko

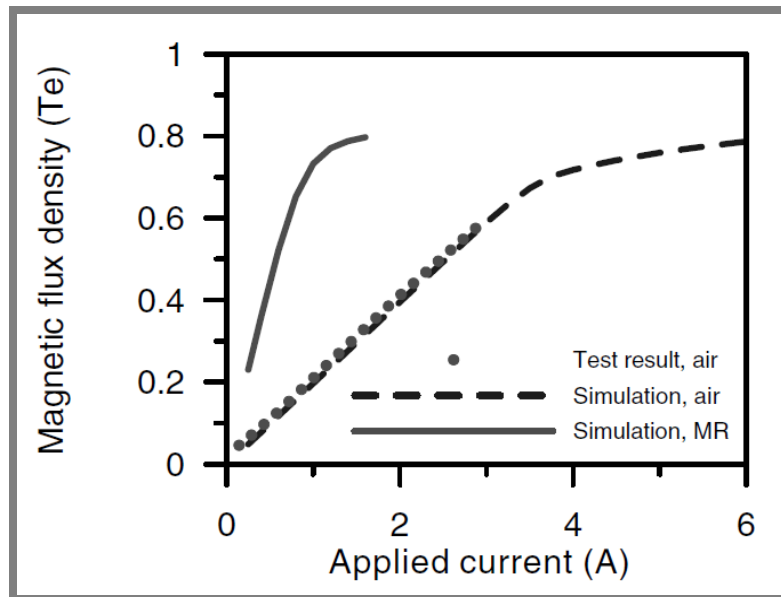
2.9.2

Vyrobený a experimentálne testovaný MR ventil z permaloyu dosahuje v štrbine s vzduchom maximálnu magnetickej indukciu 0,8T aplikovaním 1,6A prúdu a s počtom vinutí 160. [12] Rozmery testovaného MR ventilu sú zakótované na obr. 38.



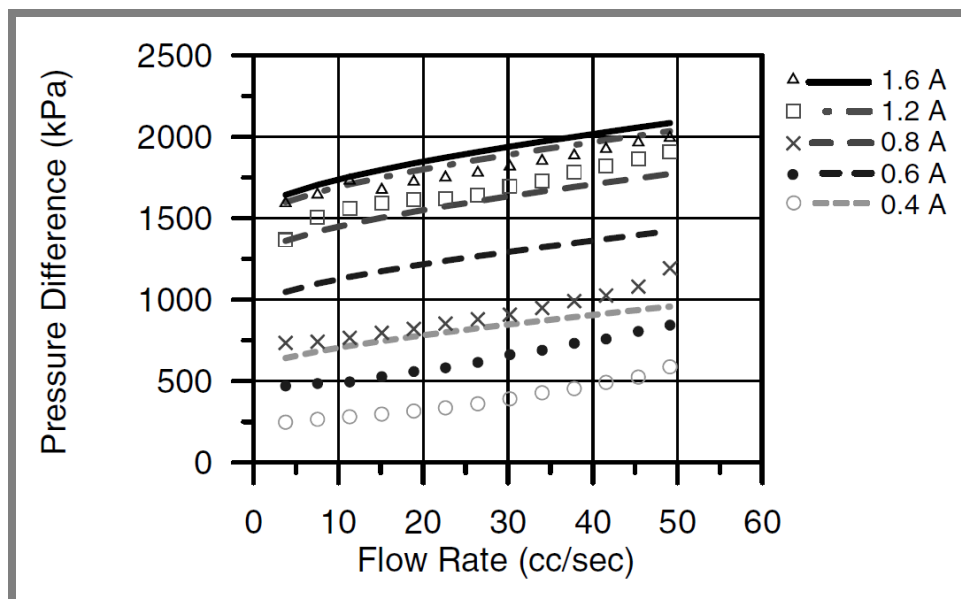
Obr. 38 Zakótovaný MR ventil [12] (upravené)

Závislosť aplikovaného prúdu na vzrastajúcej magnetickej indukčii je na obr. 39, ktorý zahrňuje experimentálne simulácie z MKP a experimentálne výsledky bez MR kvapaliny a s MR kvapalinou. MR kvapalina prúdiaca ventilom je MRF 132LD.

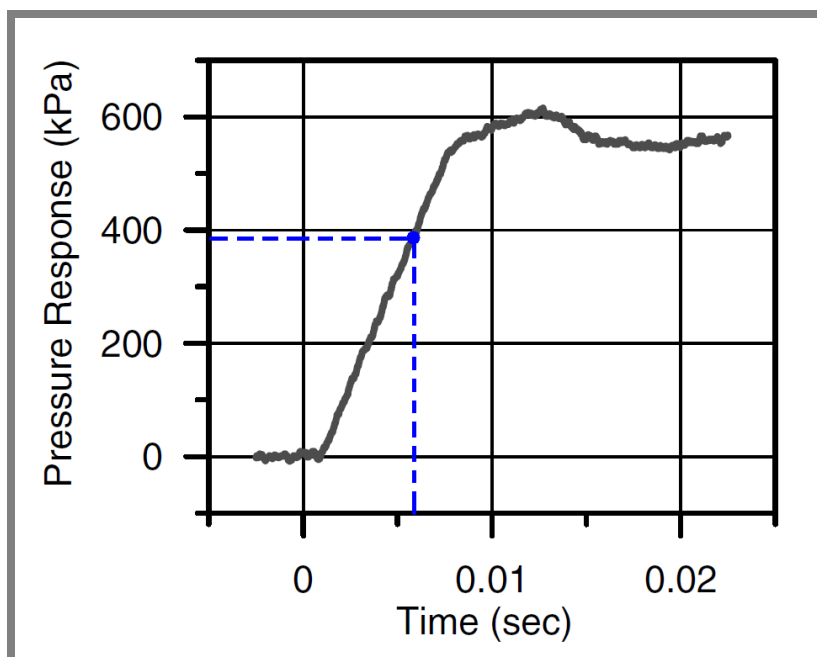


Obr. 39 Závislosť prúdu na magnetickej indukcií [12]

Závislosť tlakového rozdielu na objemovom toku znázorňuje obr.40. Uvážením minimálnej hodnoty prúdu 0,4A a prietoku kvapaliny 0,02l/s je dynamický rozsah 5,4. Časová odozva MR ventilu je 4,8ms obr. 41.



Obr. 40 Závislosť tlakového rozdielu na prietoku kvapaliny [12]

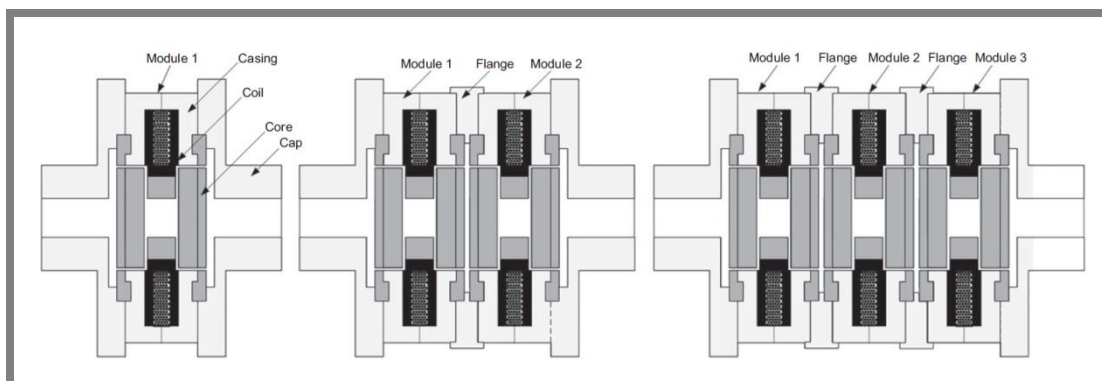


Obr. 41 Časová odozva MR ventilu z permaloyu [12] (upravené)

2.10 B Ichwan, S A Mazian, F Imadubbin, Udbaidillah, T Koga, M H Idris, Development of a modular MR valve using meander flow path structure

2.10

MR ventil vytvára efektívnu oblasť v tvare tzv. meander. Táto efektívna oblasť je v podstate medzikružová a na viac osadená z čela. Výhodou oproti ostatným MR ventilov je, že je skonštruovaný tak, aby sa na jeden MR ventil mohli pripájať ďalšie MR ventily (moduly) obr. 42. [13]

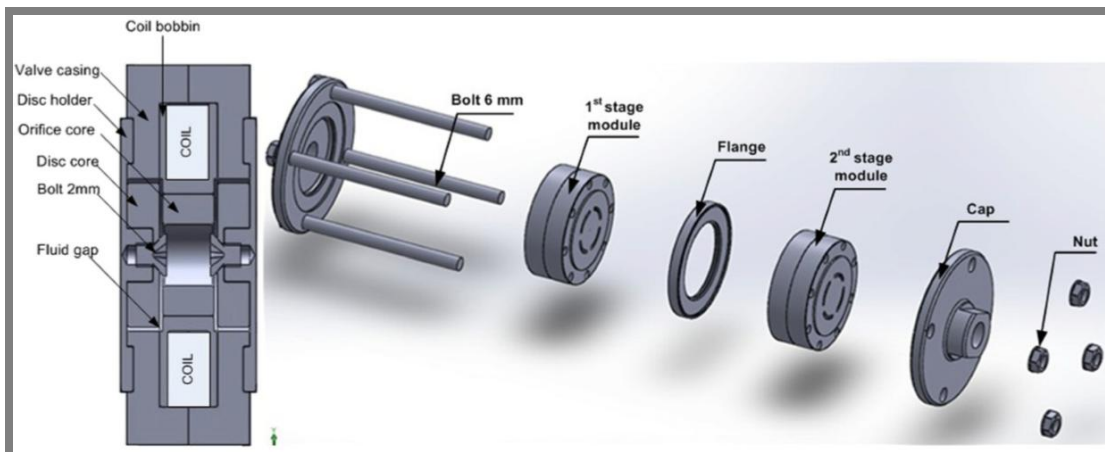


Obr. 42 MR ventil s nadstavbami modulov

2.10.1 Konštrukcia

2.10.1

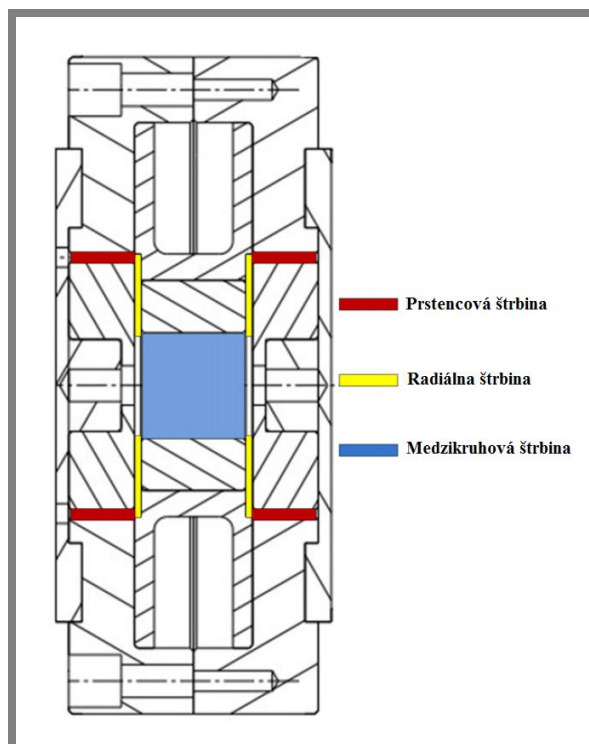
Jeden samostatný modul pozostáva z 4 hlavných častí: Dve identické veká, klietka, jadro a cievka. Do hlavice, sú navŕtané 4 diery pre spojenie celého kusu dohromady pomocou skrutiek. Klietka pozostáva z dvoch častí a to ventilová klietka a kotúčový držiak jadra. Držiak jadra je zaistený z vnútornej strany o kotúčové jadro dvojmilimetrovými skrutkami. Kotúčové jadrá z oboch strán zaistia vznik štrbiny do požadovaného tvaru. MR ventil ďalej pozostáva z kotúča, na ktorý je namotaná cievka a ten je nasunutý na jadro s valcovým otvorom obr. 43. [13]



Obr. 43 Zloženie samostatného modulu MR ventilu

2.10.2 Prúdenie kvapaliny

Na obr. 44 je zobrazený rez jedným modulom ventilu, na ktorý sa nasadí z oboch strán veko, ktoré zabezpečuje prietok kvapaliny na vstupe a výstupe. MR kvapalina prúdi cez vstupný otvor jedného veka, potom sa rozdeľuje do prstencovej oblasti, označenej červenou farbou. Prietok pokračuje cez radiálnu štrbinu žltou farbou, cez valcový otvor modrou farbou a opäť cez radiálnu a prstencovú štrbinu. Nakoniec vyteká výstupom druhým vekom. Rovnako kvapalina pridávaním ďalších modulov. Rozmery jednotlivých štrbín sú zhrnuté v tab.12. Použitá MR kvapalina je MRF 132DG. [13]



Obr. 44 Rez MR ventilom s vyznačením efektívnych oblastí [13]

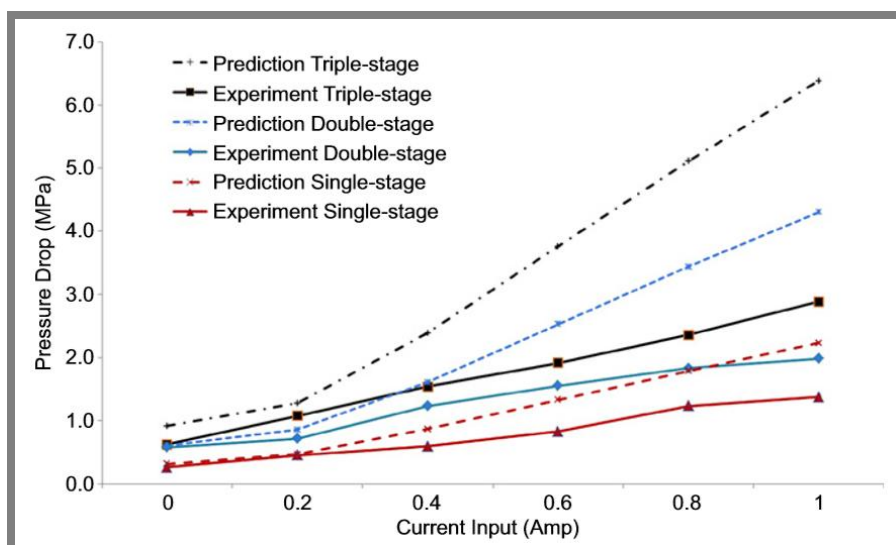
tab. 12 Rozmery MR modulárneho MR ventilu

parameter	hodnota
veľkosť prstencovej štrbiny	0,5 mm
veľkosť radiálnej štrbiny	0,5 mm
Dĺžka prstencovej štrbiny	5 mm
Priemer medzikruhovej štrbiny	5 mm
Dĺžka medzikruhovej štrbiny	7,5 mm
Outer radius radial	9,5 mm

2.10.4 Charakteristiky

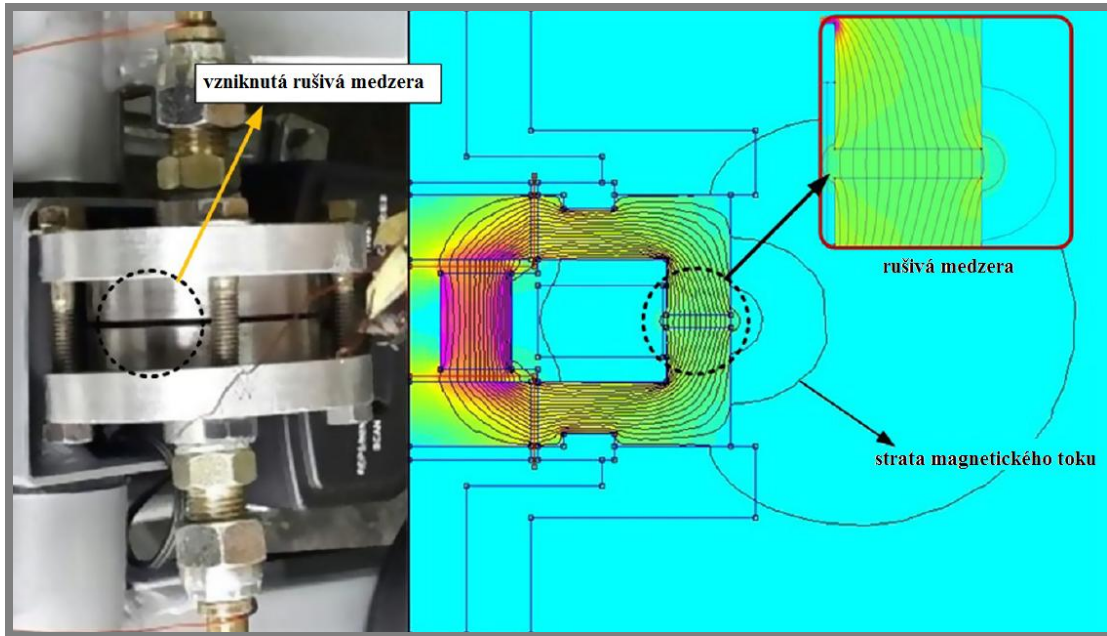
2.10.4

Hlavice a kotúčový držiak jadra sú z hliníku 1100. Klietka, kotúč aj kotúčové jadro, tvoriace magnetický obvod sú z materiálu AISI 4140. MR ventil bol experimentálne testovaný pre 1 až 3 module. U každého modulu bol do cievky pustený prúd 1A, ktorý dosahuje hodnoty magnetickej indukcie pre prstencovú štrbinu 0,19 T a pre radiálnu štrbinu 0,3 T. Test závislosti prúdu na tlakovom rozdiely bol vykonaný za konštantného prietoku 45ml/s. Samostatný modul dosiahol maximálny tlakový rozdiel 1,3 MPa s dynamickým rozsahom 4,7. S pripojeným modulom dosiahol MR ventil maximálny rozdiel tlakov 2MPa s dynamickým rozsahom 3,4. A trojmodulový MR ventil dosiahol maximálny tlakový rozdiel 2,8 MPa a dynamický rozsah 4,4. Obr. 45 porovnáva závislosť aplikovaného prúdu na tlakovom rozdiely medzi experimentálne nameranými hodnotami a hodnotami výpočtového modelu. [13]



Obr. 45 Závislosť prúdu na tlakovom rozdieli pri 45ml/s [13]

S pridávaním modulov vzniká väčšia odchýlka od nameraných hodnôt čo je spôsobené rušivou medzerou na obr. 45, z ktorej uniká magnetický indukčný tok. [13]



Obr. 46 Nepriaznivá medzera vznikajúca spájaním jednotlivých modulov [13]

3 DISKUSIA

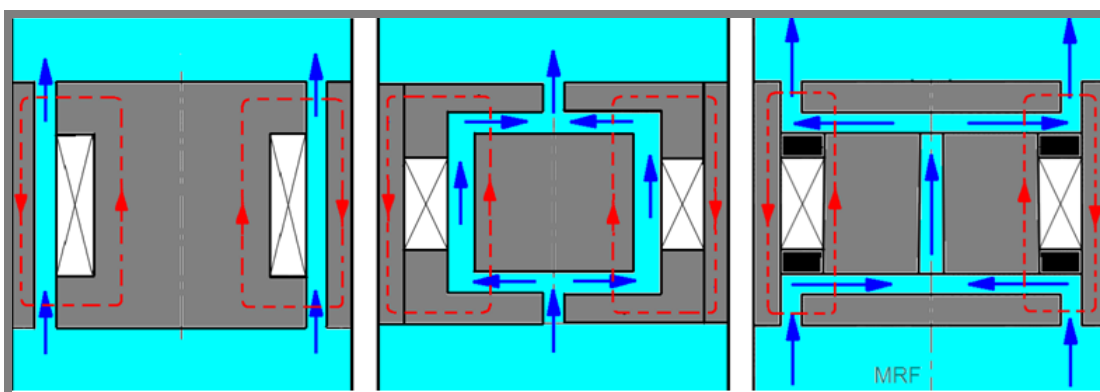
3

3.1

3.1 Konštrukcia aktívnej zóny MR tlmičov a MR ventilov

Najčastejšou geometriou aktívnej zóny je medzikruhovú štrbina. Výhodou tohto spôsobu je najmä jej jednoduchá konštrukcia. Z uvedených konštrukcií podľa MKP modelov sa magnetické indukcie v uvedenej aktívnej zóne, za prítomnosti MR kvapaliny pohybujú v rozmedzí od 0,2T až po 0,86T. Najväčšiu indukciu dosahuje MR ventil od Grunwald [10] s materiálom magnetického obvodu Ck15 a MR kvapalinou MRF-132AD. Saturačné hodnoty tohto materiálu a MR kvapaliny sú priemerné ale elektrická rezistivita Ck15 je pomerne malá. V porovnaní s ostatnými tlmičmi či ventilmi tohto typu je priemer drôtu cievky väčší (0,9mm), čím sa zväčšila prúdová hustota, a tým bolo možné aplikovať väčší prúd na vytvorenie väčšej magnetickej indukcie.

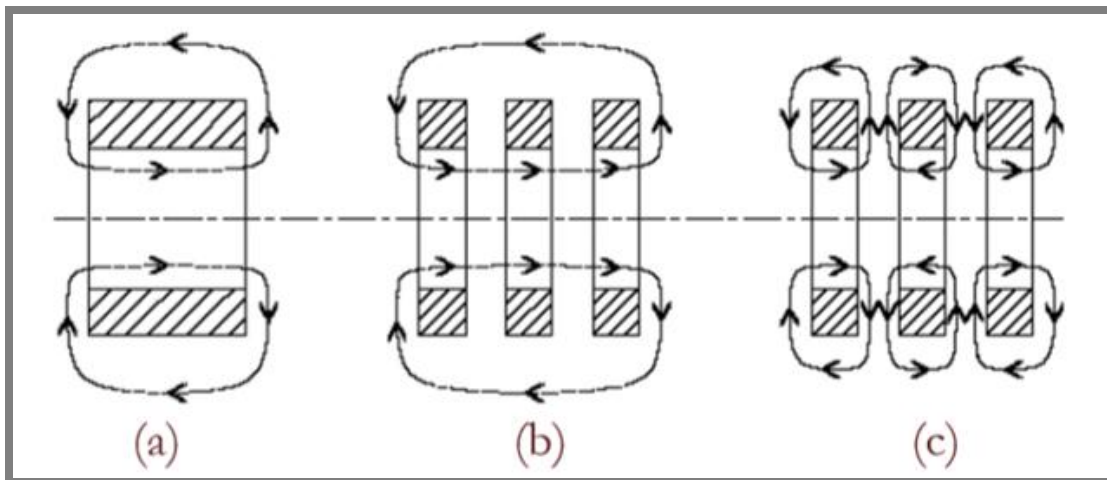
Druhým typom geometrie je medzikruhovú štrbina a na viac z čela (radiálna štrbina). Využitím tohto typu môže byť aktivizovaná buď radiálna štrbina, alebo medzikruhovú spolu s radiálnou obr. 46. Magnetické indukcie v radiálnych štrbinách sa pohybujú v rozmedzí od 0,43T po 1T. Je zrejme, že tieto hodnoty sú o niečo väčšie. Aktívna zóna sa nachádza priamo za magnetickým jadrom, v ktorom sú indukcie najväčšie, z dôvodu najväčšieho prierezu plochy prechádzajúcim magnetickým tokom. Vytvorením radiálnej a medzikruhovej štrbiny obr. 46 vpravo sa zväčšila oblasť aktivizovanej zóny, tým môžeme zvýšiť tlmiace sily prípadne dynamický rozsah zachovaním jedného vinutia cievky. Pri tejto konštrukcii je zložitejšie využiť viac cievok; vznikne tak komplikovaná konštrukcia, alebo pri konštrukcii od Ichwana [13] pri spájaní modulov sa tak stráca magnetický tok v rušivej medzere obr. 46, ktorá vzniká pri spájaní modulov. V porovnaní s ostatnými prevedeniami je táto konštrukcia zložitejšia a požaduje viac súčastí magnetického obvodu.



Obr. 47 Typy konštrukcií aktívnej zóny zľava: medzikruhovú štrbina, radiálna štrbina a medzikruhovú spolu s radiálnou

Ďalším z možných spôsobov vytvorenia zóny preskúmal Grundwal a kol. [10] vo svojej práci o MR ventiloch, kde otestoval MR ventil s valcovým otvorom. Na rozdiel od všetkých predošlých spôsobov je smer magnetického toku súbežný s prúdením kvapaliny. S touto konštrukciou dosiahol 0,57T, čo je z magnetického hľadiska porovnateľné s ostatnými konštrukciami aktívnej zóny, ale tlaková tohto MR ventilu únosnosť je v podstate nižšia.

Počet piestnych sekcií, alebo počet cievok obr. 48 sa môže meniť v závislosti na požadovaných charakteristikách.



Obr. 48 Typy využitia cievok [14]

- Je to najčastejšie usporiadanie. Cievka budí magnetické pole okolo seba. Toto usporiadanie používajú najčastejšie MR tlmiče v automobilovom priemysle. [14]
- Magnetické pole tvoria cievky rovnakým smerom. Výhodou je zníženie celkovej indukcie pri paralelnom zapojení cievok a tak zníženie časovej odozvy.
- Cievky sú buď vinuté proti sebe, alebo sa používa opačná polarita prúdov. Každá cievka si vytvorí vlastné magnetické pole. Oblasť aktivizovanej zóny sa zväčší čo môže mať vplyv na zväčšenie tlmiacich síl. Ďalšou výhodou je, že prúdy pretekané cievkami môžu byť riadené samostatne, a pozdĺž aktívnej zóny sa tvoria rôzne magnetické indukcie tzn. dobrá regulácia prietoku MR kvapaliny. [15]

V prípade samotnej konštrukcie tlmičov, má celá rada MR tlmičov priechodzu piestnicu. Výhodou je, že na vyrovnávanie objemovej zmeny pri zasúvaní piestnice nepotrebuje akumulátor, alebo vonkajšiu nádrž. A pri zasúvaní piestnice nevzniká pretlak v MR kvapaline. Možná nevýhoda je v tom že pri tesnení piestnice z oboch strán vzniknú väčšie straty pri trení ako pri jednoplášťovom alebo dvojplášťovom prevedení.

3.2 Fail- safe tlmiče

Niektoré MR tlmiče sú skonštruované tak, aby v prípade výpadku prúdu mohli stále operovať a tlmiť aj väčšie sily. Jedným z nich je aj tlmič MR-B4. [7] Tlmič využíva permanentný magnet a vďaka vysokej remanencii PM sa javí magnetické pole v štrbine aj bez aplikovania prúdu cievkou.

3.3 Materiály magnetických obvodov

Tab. 13 zahrňuje chemické zloženie nasledujúcich materiálov magnetického obvodu:

- Ck15; Grunwald a kol. [10]
- Permalloy/ Hiperco 50A; Yoo a kol. [12]
- AISI 4140; Ichwan a kol. [13]

Z dôvodu neuvedených ekvivalentov magnetických materiálov MKP modelov nie sú ostatné materiály uvedené v nasledujúcich tabuľkách.

tab. 13 Zloženie materiálov magnetického obvodu

	Ck15	(moly)permalloy	Hiperco 50A	AISI 4140
C %	0,12-0,18	0,015	0,025	0,38-0,43
Si %	0,40 max	0,30	0,15	0,15-0,30
Mn %	0,3-0,6	0,50	0,15	0,75-1,0
Mo %	-	4,40	-	0,15- 0,25
Ni %	-	80	nom. 0,25	-
P %	0,035 max	0,005 max	0,015	0,035
S %	0,035 max	0,001 max	0,010	0,040
Fe %	balance	balance	balance	97,78- 97,8
Al %	-	0,01 max	-	-
Cr %	-	0,02 max	0,15	0,80-1,10
Co %	-	-	nom. 49	-
V %	-	-	nom.1,9	-

V tab. 14 sú zahrnuté niektoré mechanické a magnetické prípadne elektrické vlastnosti týchto materiálov.

Z magnetického hľadiska má najlepšie vlastnosti zliatina na bázi cobaltu (hiperco 50A). Hiperco sa nasycuje pri 2,4T. Je vidieť že aj v mechanických vlastnostiach sa vyznačuje vyšiou hodnotou medze klzu a najvyššou medzou pevnosti. Currieho teplota je značne vyššia v porovnaní so zliatinou niklu. Medzi magnetický mäkké ocele patriaci permalloy sa nasycuje pri menších hodnotách a má veľmi úzku hysteréznu slučku, čím sa vyžaduje len malá koercívna sila. Je možné poznamenať že mechanické vlastnosti tohto materiálu sú veľmi dobré a v porovnaní s ostatnými má najvyššiu medzu pevnosti. Oceľ Ck15 (AISI 1015) má pomerne vysokú hodnotou nasýtenia. MR ventil z tohto materiálu dosiahol najväčšiu indukciu v medzikruhovej štrbine a prebehol tak všetky ostatné (hiperco nebol v štúdií experimentálne testovaný [12]). V porovnaní s ostatnými má však horšie mechanické vlastnosti. Z elektrického hľadiska ma spolu s AISI 4140 radovo väčšie rezistivity ako zliatiny kobaltu a niklu. Zliatinová oceľ AISI 4140 sa vyznačuje najmä dobrými mechanickými vlastnosťami. Oproti ostatným má najvyššiu medzu klzu a taktiež dobrou medzu pevnosti. Z elektrického hľadiska má v porovnaní s ostatnými najvyššiu rezistivitu.

tab. 14 Magnetické a mechanické vlastnosti materiálov magnetického obvodu

Materiál	Bs [T]	Re [MPa]	Rm [MPa]	E [GPa]	Rezistivita [$\mu\Omega\text{cm}$]	Currieho teplota [C°]
Hiperco 50A	2,4	365	717	207	41	940
Permalloy	0,8	338	682	220	47-59	455
Ck15	2,2	325	385	190-210	110	-
AISI 4140	-	415	655	190-210	220	-

3.4 Použité MR kvapaliny

Vo väčšine prípadoch boli využité komerčné MR kvapaliny od LORD corp. Ďalej to boli MR kvapaliny z Chongqing material instrument institute a v jednom prípade bola MR kvapalina namiešaná. Tab. 15 zahrňuje charakteristiky týchto MR kvapalín:

- MRF 132DG; Sun a kol. [6], Bai a kol. [8], Ichwan a kol. [13]
- MRF 132AD; Grunwald a kol.[10]
- MRF 132LD; Yoo a kol. [12]
- MRF J01; Wang a kol. [9]
- MRF J01T; Hu a kol. [11]
- namiešaná; Guo a kol. [5]

tab. 15 Vlastnoti použitých MR kvapalín

	Lord corp.			Chongqing institute		Namiešaná
	MRF 132DG	MRF 132AD	MRF 132LD	MRF J01	MRF J01T	
Nosné medium	Hydro carbon	Hydro carbon	Hydro carbon	-	-	Silikónový olej
Objemový podiel častíc	32%	32%	32%	-	-	30%
Hustota [g/cm^3]	2,95- 3,15	3,09	3,055	2,65	-	
Ø častíc [μm]			3	-	-	6
Prevádzková teplota [C°]	-40 ÷130	-40 ÷130	-40 ÷130	-20÷100	-40÷130	-
Saturácia [T]	1,5	1,5	1,25	1,4(0,5)	1,3	1,5
Medza toku pri 0,5T [kPa]	25	25	24	68	70	20

Komerčné LORD kvapaliny sú obdobné a majú veľmi podobné vlastnosti, s tým rozdielom že u MRF- 132AD je teplotné rozmedzie prevádzkovej teploty o niečo menšie. U MR kvapalín z materiálového inštitútu v Číne je vidieť veľmi dobré medze toku pri 0,5T. Oproti ostatným MR kvapalinám sú značne väčšie. Z dostupných zdrojov nebolo možné identifikovať ostatné parametre ako u komerčných LORD kvapalín a je možné že túto medzu klzu ovplyvňujú tieto neuvedené parametre.

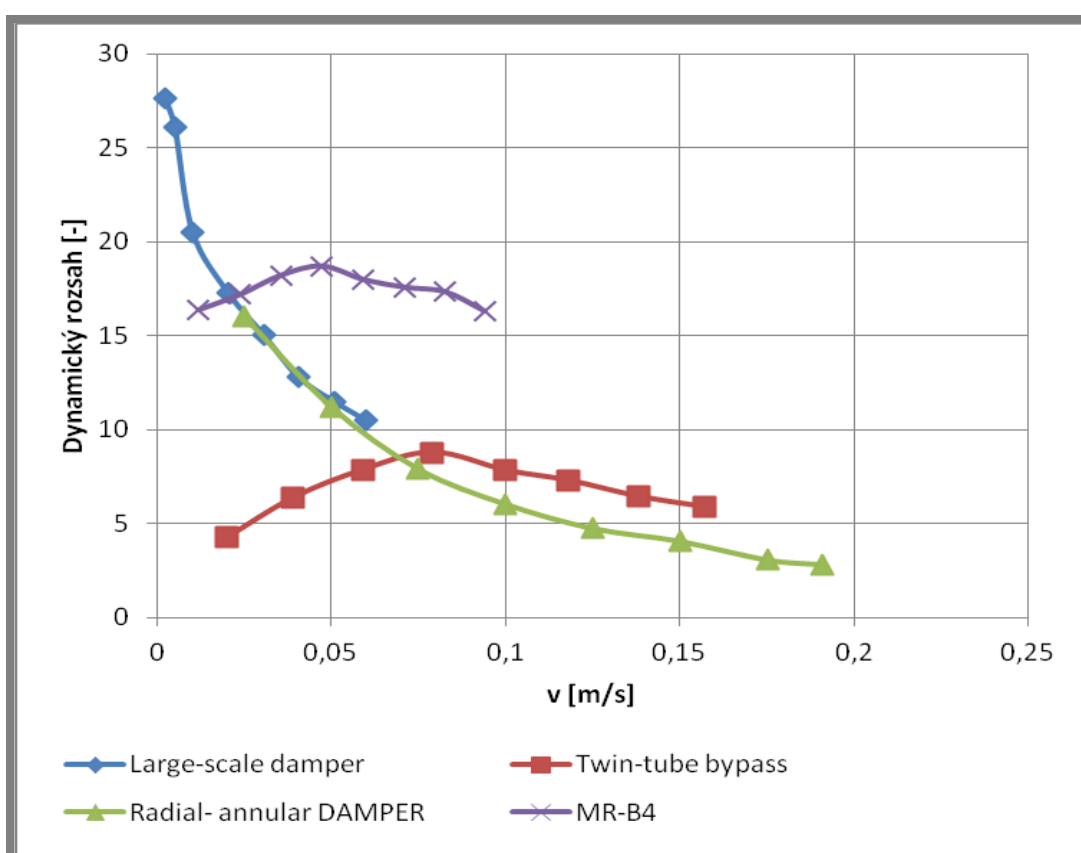
Sedimentáciu rieši iba Guo a kol [5]. Do vlastne namiešanej MR kvapaliny pridali kyselinu stearovú (2wt%). Po 6 dňoch nečinnosti tlmiča bol otestovaný pri sinusovom buzení. Výsledok ukázal že tlmiača sila značne klesla až o 1kN pri

aplikovanom prúde. Po niekoľkých záberoch sa tlmiace sily opäť obnovili na pôvodné.

3.4 Dynamický silový rozsah

3.4

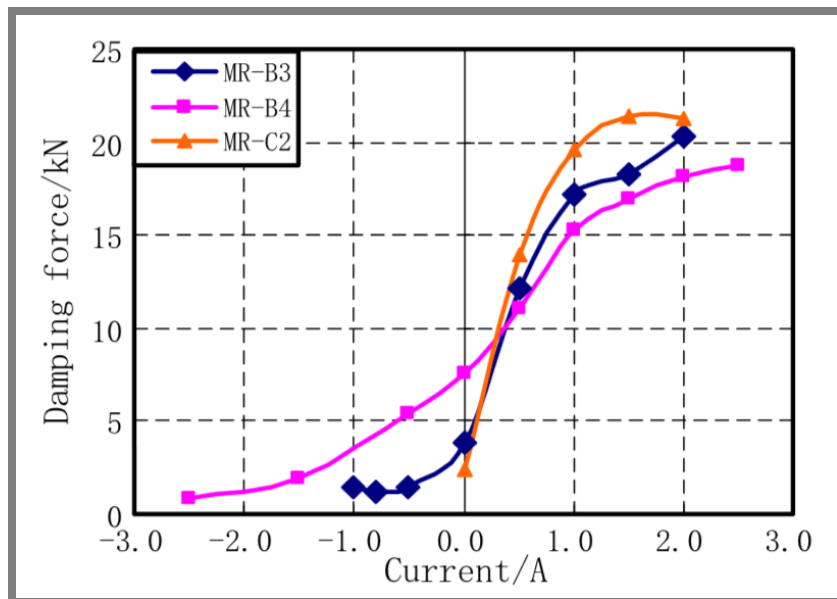
Z grafu na obr. 49 je vidieť že dynamický silový rozsah v závislosti na rýchlosti môže mať dva priebehy. V prvom prípade môže klesať a limitne sa blížiť k určitej hodnote. Je to spôsobené tým, že aplikáciou prúdu pri tlení sila narastá až do určitej hodnoty a až potom sa tlmič začne pohybovať. Tento priebeh má za následok rázy pri tlení. Druhý priebeh rastie po určité maximum a odtiaľ klesá a limitne sa blíži k určitej hodnote (u automobilov sa prejavuje na pohodlnej jazde). Tlmiče Large-scale a tlmič s vonkajším MR ventilom (Twin-tube bypass) majú približne rovnaký dynamický rozsah 9 v rýchlosti cca 0,075m/s. O niečo nižší má tlmič Radial- annular DAMPER.



Obr. 49 Porovnanie závislosti dynamického rozsahu na rýchlosti MR tlmičov

Najvyšší dynamický rozsah dosahuje tlmič s permanentným magnetom, ktorý sa výrazne líši od ostatných. Pri aproximácii hysterézy F-v obr. 20 došlo k odchýlkam od hodnôt uvedených v článku tab. 6, no aj napriek tomu sa dynamický rozsah svojou veľkosťou líši od ostatných. To je spôsobené aplikáciou záporného prúdu, kedy sa MR kvapalina chová trochu odlišne. Na obr. 50 je graf tlmiacej sily závislosti na prúde tlmiča s PM s jednou cievkou (MR-B2) v porovnaní s tlmičom rovnakej konštrukcie bez PM (MR-C1). Je vidieť že tlmiaca sila pôsobením záporného prúdu mierne klesla pri rovnakej rýchlosti. Ak by sme chceli pracovať s

týmto dynamickým rozsahom regulátor MR tlmiča by musel udržiavať stále záporný prúd.



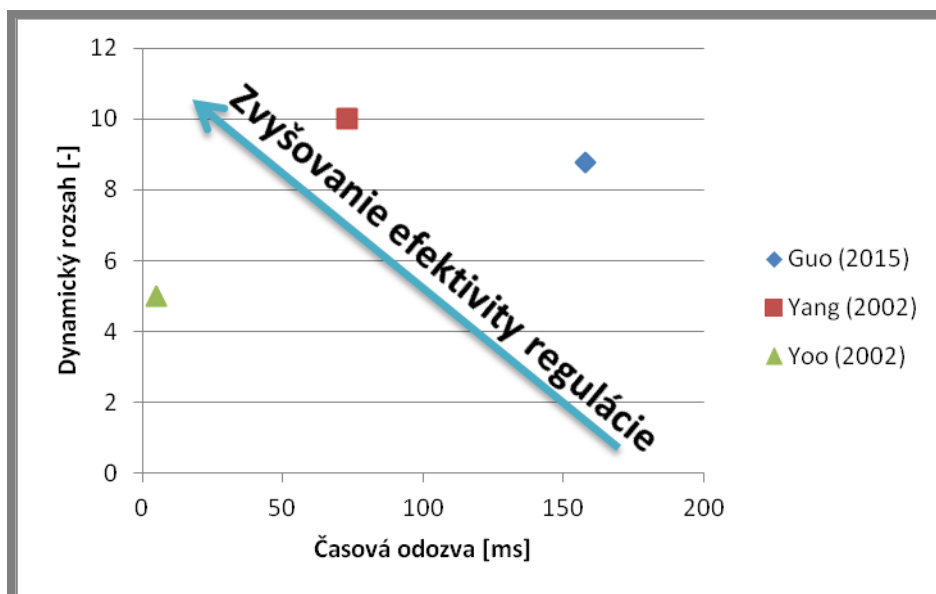
Obr. 50 Závislosť tlmiacej sily na prúde MR tlmičov s Permanentným magnetom[7]

Dynamický silový rozsah môže ovplyvňovať:

- MR kvapalina. Jej zloženie, a v konečnom dôsledku hodnoty nasýtenia a vysoká medza toku pri zachovaní nízkej hustoty. Vhodné aditíva, aby častice nesedimentovali a mohlo sa zreťaziť dostatočné množstvo aj po dlhom státi tlmiča.
- Prevádzková teplota. Pri určitej teplote strácajú feromagnetické materiály svoje magnetické schopnosti.
- Materiály magnetického obvodu. Magnetický obvod musí byť navrhnutý tak, aby dosahoval dostatočné indukcie v aktívnej zóne a tým zaktivizoval vhodné množstvo MR kvapaliny.
- Konštrukcia aktívnej zóny. Čím je štrbina širšia tým je dynamický rozsah nižší, ako ukázal Hu a kol. [11] vo svojej štúdií s MR ventilom s nastaviteľnou štrbinou. Šírka štrbiny, ale nesmie byť príliš malá napr. pre prípad zavedenia hallovej sondy do štrbiny na meranie magnetickej indukcie.
- Počet cievok. Zvyšovaním počtu cievok môžeme zvyšovať aktívnu oblasť v štrbine a tým aj tlmiace sily.
- Trenie piestnej tyče prípadne piestu. Trecie sily sú pomerne veľké a vplývajú na celkový dynamický rozsah. Kubík a kol. [16] ukázal že najväčší vplyv na trecie straty ma tesniaca manžeta. Voľbou vhodného materiálu, alebo vhodnou konštrukciou manžiet, sa dá dynamický rozsah zvýšiť.

3.5 Časová odozva

Pri zvyšovaní dynamického rozsahu vzniká problém so skracovaním časovej odozvy. Na obr. 51 je graf závislosti dynamického rozsahu na časovej odozve.



Obr. 51 Časová odozva v závislosti na dynamickom rozsahu MR tlmičov a MR ventilu

Najlepšiu z uvedených časových odoziev dosahuje Yoo a kol.[12] s pomerne malým MR ventilom z permaloyu, a to cca 5ms. Ďalšiu celkom dobrú odozvu dosahuje Yang [3] s large-scale tlmičom, ktorý využíva na skrátenie časovej odozvy prúdový regulátor. Využitím prúdového regulátora dosiahol výrazne skrátenie časovej odozvy a dosiahol cca 70ms. Guo a kol. [5] dosahuje cca 170ms čo je v porovnaní s ostatnými prevedeniami dlhá odozva.

Časovú odozvu môže teda ovplyvňovať algoritmus riadenia prúdu, indukcia elektromagnetických cievok alebo materiál magnetického obvodu. V magnetickom obvode ovplyvňujú túto skutočnosť straty výrivými prúdami vznikuté najmä v magnetickom jadre. [17]

3.6 Málo publikovaná problematika pri konštrukciách MR zariadení

3.6

Pri konštrukcii semi- aktívne riadených MR zariadení je celá rada oblastí, ktoré sú v odborných publikáciách pomerne málo zmapované. Je teda nutné viac preskúmať tieto oblasti pre návrh efektívneho MR zariadenia.

3.6.1 Problematika tesniacich manžiet

3.6.1

Trecie straty tesniacich manžiet majú veľký vplyv na dynamický rozsah, ktorý ovplyvňuje semi- aktívne riadenie. Medzi piestnicou a manžetou vzniká najväčšia časť trenia v MR tlmiči. [16] Vplyvom pohybu mikročastíc v nosnom médiu MR kvapaliny dochádza k abrazívnemu javu, ktorý nepriaznivo vplýva práve na manžety. Otázkou je, ako významný je vplyv opotrebenia tesniacich manžiet na ich životnosť a následnú životnosť MR zariadení.

3.6.2 Problematika zmeny magnetických vlastností s teplotou

3.6.2

Feromagnetické materiály pri určitej teplote strácajú svoju schopnosť sa zmagnetizovať. Táto teplota sa nazýva Curieho teplota a každá feromagnetická látka ma vlastnú Curieho teplotu. Napríklad v prípade feritov sa už pri teplote 20-100 C° znižuje ich permeabilita o cca 30%. To má vplyv na maximálne tlmiace sily. U ocelí je táto zmena nepatrná. Pri zvyšovaní alebo zachovaní dynamických charakteristík je

nutné navrhnúť materiál, ktorý je menej senzitívny na teplotné zmeny z magnetického hľadiska.

3.6.3 Problematika funkcie spätných ventilov

Výskumná skupina technickej diagnostiky má zlé skúsenosti s funkciou spätných ventilov. Pri tlmení vyšších frekvencií sa planžety spätných ventilov nestíhajú zatvárať. Doposiaľ neboli publikované žiadne práce o problematike spätných ventilov, ktoré by mohli napomôcť pri ich ďalšom vývoji. Aby boli vhodne navrhnuté MR tlmivé najmä s dvojplášťovým prevedením je nutné preskúmať problematiku spätných ventilov.

3.6.4 Sedimentácia v MR tlmivoch či MR ventiloch

Sedimentácia má významný vplyv na dynamický silový rozsah MR tlmiv. Pri dlhšej nečinnosti MR tlmiv mikročastice v nosnej kvapaline začnú sedimentovať na dne tlmiv. Zrežaním nedostatočného množstva mikročastíc v MR kvapaline dôjde k poklesu MR efektu a tým pádom aj k poklesu tlmenia pri prvých zdvihoch MR tlmiv.

4 ZÁVER

Cieľom práce bolo popísať konštrukcie MR tlmičov či MR ventilov a ich charakteristiky. V práci bola dodržaná osnova podľa ktorej bol popísaný každý MR tlmič aj MR ventil. V časti súčasného stavu poznania bolo uvedených 10 MR zariadení, MR tlmiče a MR ventile z vybraných publikácií. Najprv bolo MR zariadenie uvedené, tak že bola popísaná ich hlavná črta, prípadne kde sa používa. Ďalej bolo popísané konštrukčné usporiadanie hlavných častí a princíp prúdenia MR kvapaliny v MR zariadení. Okrem konštrukcie boli popísané aj jeho charakteristiky dosiahnuté z MKP modelov najmä v prípade magnetických indukcií magnetickým obvodom, kde materiály magnetického obvodu boli volené z daného programu; vo väčšine prípadov to bol Ansys. Uvedené magnetické indukcie spolu s maximálnymi prúdmi, priemery cievok, počet vinutí alebo indukčnosti cievok boli uvedené v jednej časti spoločne. Následne boli popísané testované charakteristiky v prípade MR tlmičov závislosť tlmiacej sily na rýchlosti a v prípade MR ventilov to bola závislosť tlakového rozdielu na prietoku. U semi-aktívne riadených MR zariadení bola uvedená časová odozva. Tiež boli uvedené použité MR kvapaliny. V diskusií boli porovnané jednotlivé konštrukcie a v ktorom prípade bola dosiahnutá najväčšia indukcia v štrbine aktívnej zóny. Pri porovnávaní materiálov magnetického obvodu nastal problém pri určovaní niektorých materiálov, keďže autor neuviedol jeho materiálový ekvivalent skonštruovaného MR zariadenia. Nebolo tak možné porovnať všetky materiály magnetických obvodov. Pri porovnávaní MR kvapalín nastal problém s určením zloženia MR kvapalín z Chongqing material instrument reaserch. Žiadne z prehľadných zdrojov neuvádzali ich zloženie. B-H charakteristiky materiálov obvodov a MR kvapalín sú uvedené v prílohách. Ostatné charakteristiky ako F-v charakteristika a časová odozva boli taktiež porovnané. Na záver boli uvedené niektoré z možných problémov, ktoré je nutné riešiť pri návrhu efektívneho MR zariadenia a ktoré sú málo publikované.

5 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] GEOFFREY, Geldhof. Semi-Active Vibration Dynamics Control of Multi-Cart Systems Using a Magnetorheological Damper. Goeteberg: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY 2013. Master's thesis, CHALMERS, Department of Applied Mechanics, Division of Mechanics.
- [2] NGUYEN, Quoc-Hung a Seung-Bok CHOI. Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension. *Smart Materials and Structures* [online]. 2009, 18(3), 11s [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/18/3/035012. ISSN 0964-1726.
- [3] YANG, G., B.F. SPENCER, J.D. CARLSON a M.K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures* [online]. Elsevier Ltd, 2002, 24(3), 309-323 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/S0141-0296(01)00097-9. ISSN 0141-0296.
- [4] XIE, Hua- Long, et.al. The bionic design and system identification of intelligent bionic leg with magneto-rheological damper. *Tehnicky vjesnik - Technical Gazette* [online]. 2015, 22(5) 1093-1098 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.17559/TV-20150731100315. ISSN 13303651
- [6] SUN, Shuaishuai, Jian YANG, Weihua LI, Huaxia DENG, Haiping DU a Gursel ALICI. Development of a novel variable stiffness and damping magnetorheological fluid damper. *Smart Materials and Structures* [online]. 2015, 24(8), 10s [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/24/8/085021. ISSN 0964-1726
- [5] GUO, Chaoyang, GONG, Xinglong, ZONG, Luhang, PENG Chao and Shouhu XUAN. Twin-tube- and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicle. *Rail And Rapid Transit* [online]. 2015, Vol. 229(1) 48–57. ISSN 0954-4097.[cit. 2016-05-13]. Dostupné z doi: 10.1177/0954409713497199
- [7] DING, Yang, Lu ZHANG, Hai-Tao ZHU a Zhong-Xian LI. A new magnetorheological damper for seismic control. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, 22(11), 12s [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/22/11/115003. ISSN 0964-1726.
- [8] BAI, Xian-Xu, Dai-Hua WANG a Hang FU. Principle, modeling, and testing of an annular-radial-duct magnetorheological damper. *Sensors & Actuators: A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2013, 201, 302-309 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.sna.2013.07.028. ISSN 0924-4247.
- [9] WANG, D H, H X AI a W H LIAO. A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps. *Smart Materials and Structures* [online]. 2009, 18(11), 16s [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/18/11/115001. ISSN 0964-1726.
- [10] GRUNWALD, A. a A.G. OLABI. Design of magneto-rheological (MR) valve. *Sensors & Actuators: A. Physical* [online]. Elsevier B.V, 2008, 148(1), 211-223 [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1016/j.sna.2008.07.028. ISSN 0924-4247.
- [11] HU, Guoliang, Ming LONG, Lifan YU a Weihua LI. Design and performance evaluation of a novel magnetorheological valve with a tunable

- resistance gap. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, 23(12), 11s [cit. 2016-05-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/23/12/127001. ISSN 0964-1726.
- [12] YOO, Jin-Hyeong, WERESLEY, Norman M. Design of a High-efficiency Magnetorheological Valve. *INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES* [online]. 2002, 13(10), 679-685. DOI: 10.1106/104538902031988. ISSN 1045-389.
- [13] B Ichwan, S A Mazlan^{2,5}, F Imaduddin, Ubaidillah, T Koga and M H Idris. Development of a modular MR valve using meandering flow path structur. *Smart Materials and Structures* [online]. 2016, 25(3), 13s. Dostupne z doi: 10.1088/0964-1726/25/3/037001. ISSN 0964-1726.
- [14] GOLINELLI, Nicola a Andrea SPAGGIARI. Design of a novel magnetorheological damper with internal pressure control. *Frattura ed Integritá Strutturale* [online]. Cassino: Gruppo Italiano Frattura, 2015, (32), 13-23 [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.32.02. E-ISSN: 19718993
- [15] HU, Guoliang, Ming LONG, Ming HUANG a Weihua LI. *Design, Analysis, Prototyping, and Experimental Evaluation of an Efficient Double Coil Magnetorheological Valve* [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2014, 2014 [cit.2016-05-13]. DOI: 10.1155/2014/403410. ISSN 1687-8132.
- [16] KUBÍK, M.; MAZUREK, I.; ROUPEC, J. Decreasing of sliding friction in hydraulic piston damper. In: *Engineering mechanics 2015*. Prague:2015. s.170-171. ISBN 978-80-86246-42- 0
- [17] STRECKER, Z.; MAZUREK, I.; ROUPEC, J. ; MACHÁČEK, O.; KUBÍK, M. Design of megnetorheological damper, withshort time response. *JOURNAL OF INTELIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*, 2015, roč.26,č.14, s.1951-1958. ISSN 1045-389X.
- [18] LORD corporation [online]. *Lord Technical Data*. ©2011 [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://www.lord.com/sites/default/files/DS7015_MRF-132DGMRFluid.pdf
- [19] GRUNWALD, Artur. DESIGN AND OPTIMIZATION OF MAGNTOSTRICTIVE ACTUATOR. Dublin: DCU 2007. Disertační práce. DCU in Dublin, School of Mechanical and Manufacturing
- [20] MCLYMAN, Colonel . Magnetic Materials and Their Characteristics. In: MCLYMAN, Colonel. Transformer and Inductor Design Handbook, Third edition: Idyllwild, California: Marcell Dekker, 2004. ISBN 0-8247-5393-3
- [21] Emetor [online] URL: <https://www.emetor.com/edit/materials/hiperco-50-015mm/?cat=6&co=15>

6 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1 Pracovný princíp MR efektu v MR tmiči (upravené) [1]	12
Obr. 2 Rez MR tmičom s popisom hlavných častí [5] (upravené)	14
Obr. 3 Pracovný princíp tlmenia MR tmiča s vonkajším MR ventilom [5]	16
Obr. 4 Prúdenie MR kvapaliny vonkajším MR ventilom	16
Obr. 5 Grafy závislosti tlmiacej sily na rýchlosti tmiča obsahujúci vonkajší MR ventil	17
Obr. 6 Časová odozva tmiča s vonkajším MR ventilom pri náraste a poklese tlmiacej sily [5] (upravené).....	17
Obr. 7 Large- scale damper [3]	18
Obr. 8 F-v charakteristika Large- scale tmiča.....	19
Obr. 9 Časová odozva nábehu a poklesu tlmiacej sily pre paralelné a sériové zapojenie cievok large-scale tmiča (upravené).....	19
Obr. 10 Časová odozva poklesu sily späťne riadeného prúdu a bez spätného riadenia prúdom (upravené).....	20
Obr. 11 Schematický náčrt tmiča s popisom častí; prototyp (vpravo) [6].....	21
Obr. 12 Zakótovaná časť magnetického obvodu	22
Obr. 13 Pracovný princíp aplikáciou jednotlivých prúdov. Prúd pretekajúci hornou cievkou (vľavo), prúd pretekajúci spodnou cievkou (vpravo).....	23
Obr.14 Rez tmičom s permanentným magnetom	24
Obr. 15 Prototyp MR tmiča s permanentným magnetom	25
Obr. 16 Zakótovaný rez v oblasti piestu	25
Obr. 17 Distribúcia magnetického toku (hore) a magnetickej indukcie (dole) [7]...	26
Obr. 18 Závislosť magnetickej indukcie na aplikovanom prúde [7] (upravené).....	27
Obr. 19 Zvislosť tlmiacej sily na aplikácii prúdu prechádzajúceho cievkou [7] (upravené).....	27
Obr. 20 Závislosť tlmiacej sily na rýchlosti tmiča MR-B4 (aproximovaná hysteréza [7])	28
Obr. 21 MR tmič s prstencovou a radiálnou štrbinou [8]	29
Obr. 22 Zakótované časť hydraulického valce MR tmiča [8]	30
Obr. 23 Prúdenie MR kvapaliny MR tmičom.....	31
Obr. 24 F-v charakteristika MR tmiča [8] (upravené).....	32
Obr.25 MR ventil s radiálnou a medzikruhovou štrbinou	32
Obr. 26 Prúdenie MR kvapaliny v MR ventile	33
Obr. 27 MR ventil s medzikruhovou štrbinou [10].....	34
Obr. 28 Časová odozva pri poklese tlaku [10] (upravené)	35
Obr. 29 MR ventil s válcovým otvorom [10]	36
Obr. 30 Prototyp MR ventilu s nastaviteľnou štrbinou s popisom častí [11].....	37
Obr. 31 Rez MR ventilom s popisom častí [11]	37
Obr. 32 Zakótované časti magnetického obvodu MR ventilu[11].....	38
Obr. 33 Závislosť tlakového rozdielu na prúde pri rôznych šírkach štrbiny[11].....	39
Obr. 34 Časti MR ventilu [12]	39
Obr. 35 Skúmané konštrukčné parametre MR ventilu [12] (upravené).....	40
Obr. 36 Závislosť magnetickej indukcie na priemere kotúča [12]	40
Obr. 37 Graf závislosti dĺžky na magnetickej indukcií [12].....	41
Obr. 38 Zakótovaný MR ventil [12] (upravené).....	41
Obr. 39 Závislosť prúdu na magnetickej indukcií [12].....	42

Obr. 40 Závislosť tlakového rozdielu na prietoku kvapaliny [12]	42
Obr. 41 Časová odozva MR ventilu z permaloyu [12] (upravené).....	43
Obr. 42 MR ventil s nadstavbami modulov	43
Obr. 43 Zloženie samostatného modulu MR ventilu.....	44
Obr. 44 Rez MR ventilom s vyznačením efektívnych oblastí [13]	44
Obr. 45 Závislosť prúdu na tlakovom rozdieli pri 45ml/s [13]	45
Obr. 46 Nepriaznivá medzera vznikajúca spájaním jednotlivých modulov [13] (upravene).....	46
Obr. 47 Typy konštrukcií aktívnej zóny zľava: medzikruhová štrbina, radiálna štrbina a medzikruhová spolu s radiálnou	47
Obr. 48 Typy využitia cievok [14]	48
Obr. 49 Porovnania závislosti dynamického rozsahu na rýchlosti MR tlmičov	51
Obr. 50 Závislosť tlmiacej sily na prúde MR tlmičov s Permanentným magnetom[7]	52
Obr. 51 Časová odozva v závislosti na dynamickom rozsahu MR tlmičov a MR ventilu	53

7 ZOZNAM TABULIEK

tab. 1 Rozmery tlmiča s vonkajším MR ventilom.....	15
tab. 2 Rozmery Large- scale tlmiča.....	18
tab. 3 Rozmery tlmiča s nastaviteľnou tuhosťou.....	22
tab. 4 Tlmiace a tuhostné charakteristiky odpovedajúce prúdom v hornej a dolnej cievke.....	24
tab. 5 Premenné a nepremenné konštrukčné rozmery MR tlmiča s PM	26
tab. 6 Tlmiace sily a dynamické rozsahy MR tlmičov s PM	28
tab. 7 Rozmery MR tlmiča s radiálnou a medzikruhovou štrbinou	30
tab. 8 Rozmery MR ventilu s dvoma štrbinami	33
tab. 9 Rozmery MR ventila	35
tab. 10 Rozmery MR vetnila s valcovým otvorom	36
tab. 11 Rozmery MR ventila s nastaviteľnou štrbinou.....	38
tab. 12 Rozmery MR modulárneho MR ventilu.....	45
tab. 13 Zloženie materiálov magnetického obvodu	49
tab. 14 Magnetické a mechanické vlastnosti materiálov magnetického obvodu	50
tab. 15 Vlastnoti použitých MR kvapalín	50

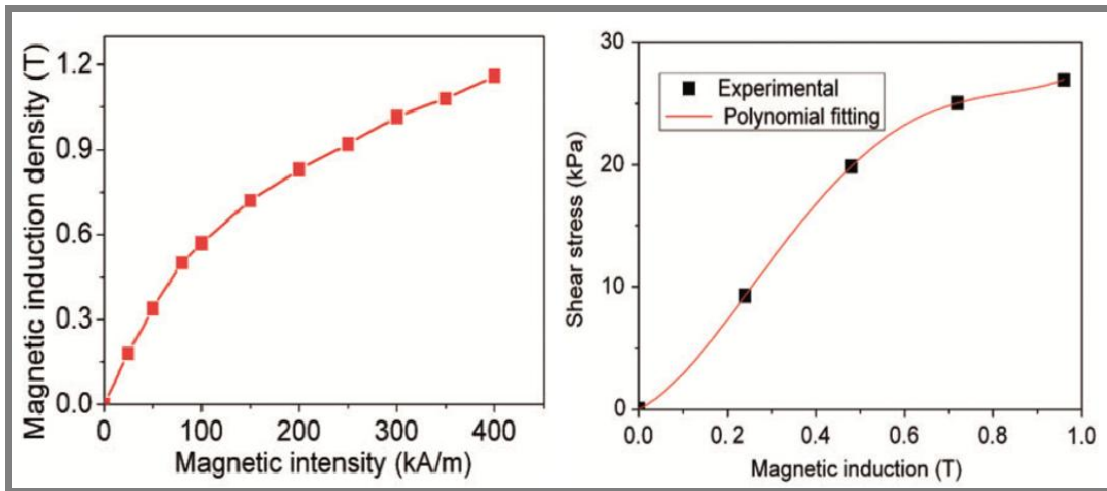
8 ZOZNAM PRÍLOH

8

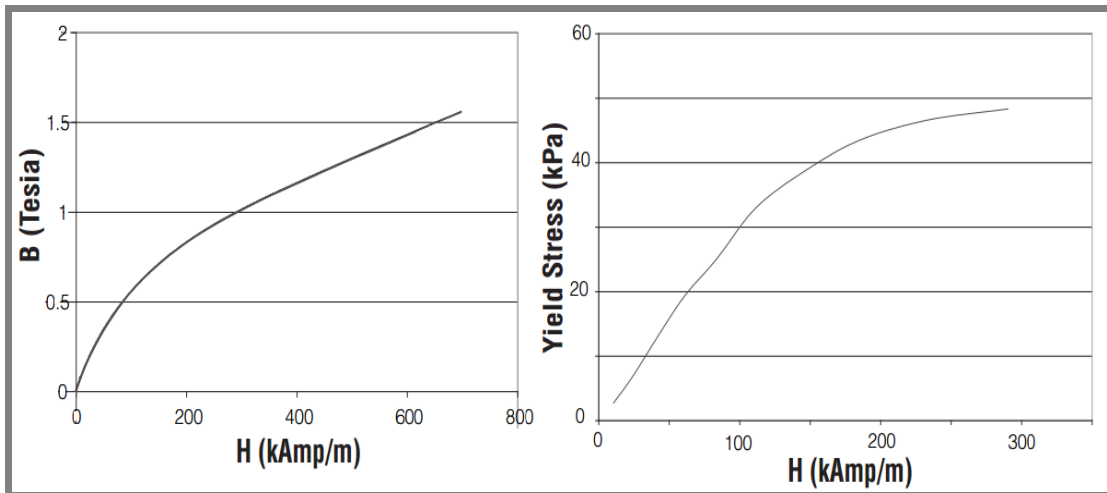
Príloha I; B-H krivky MR kvapalín a medze toku

Príloha II; B-H krivky materiálov magnetických obvodov

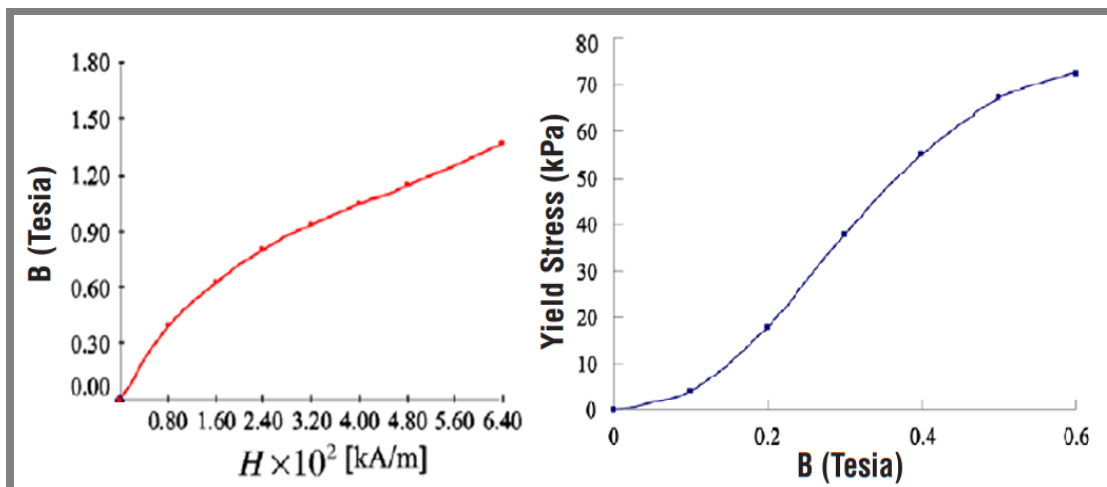
PRÍLOHA I; B-H KRIVKY MR KVAPALÍN A MEDZE TOKU



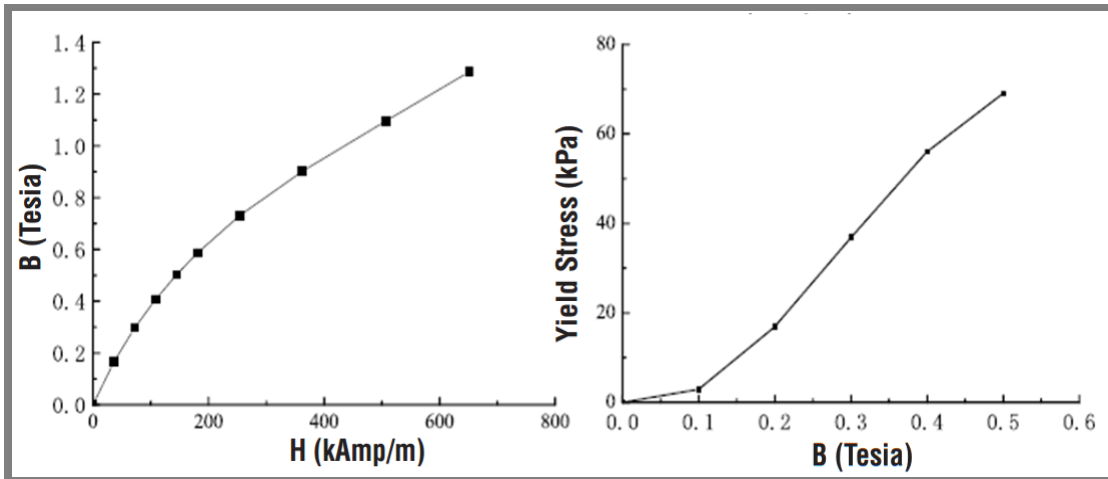
Obr.I 1 Namiešané MR kvapalina [5]



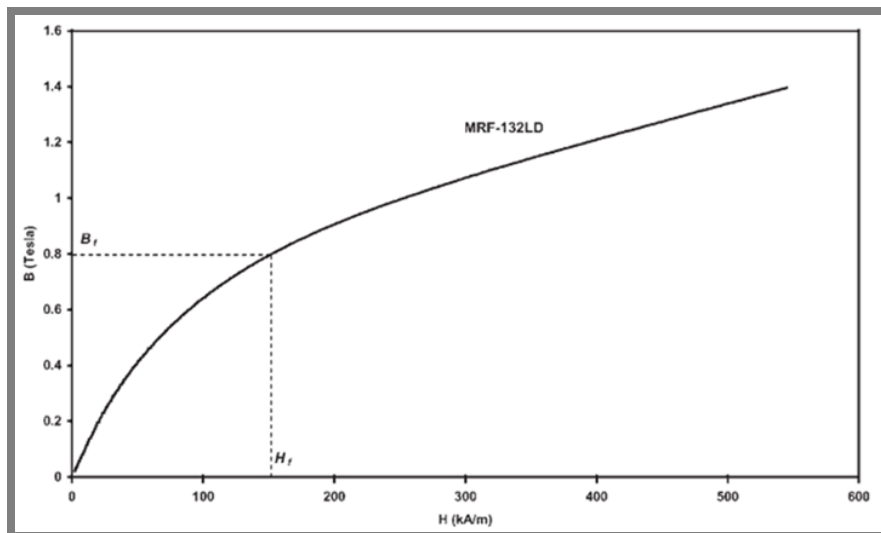
Obr.I 2 MRF-132DG [18]



Obr.I 3 MRF J01 [9]

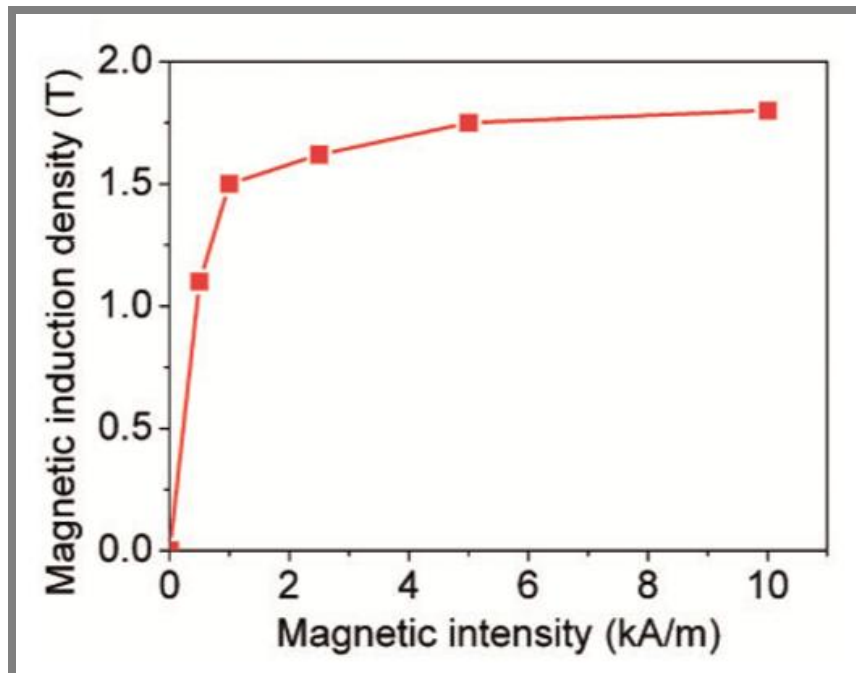


Obr.I 4 MRF J01T [11]

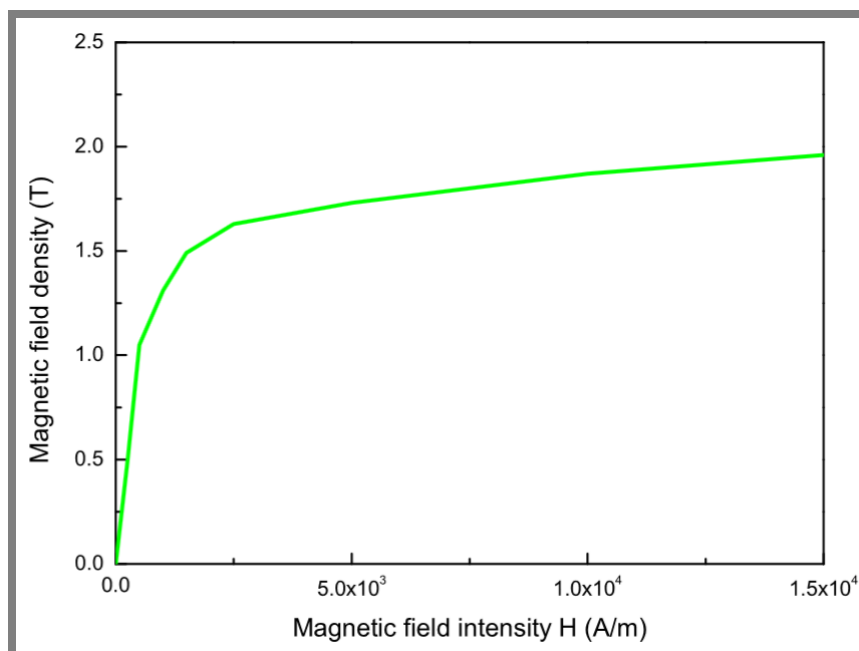


Obr.I 5 MRF 132LD

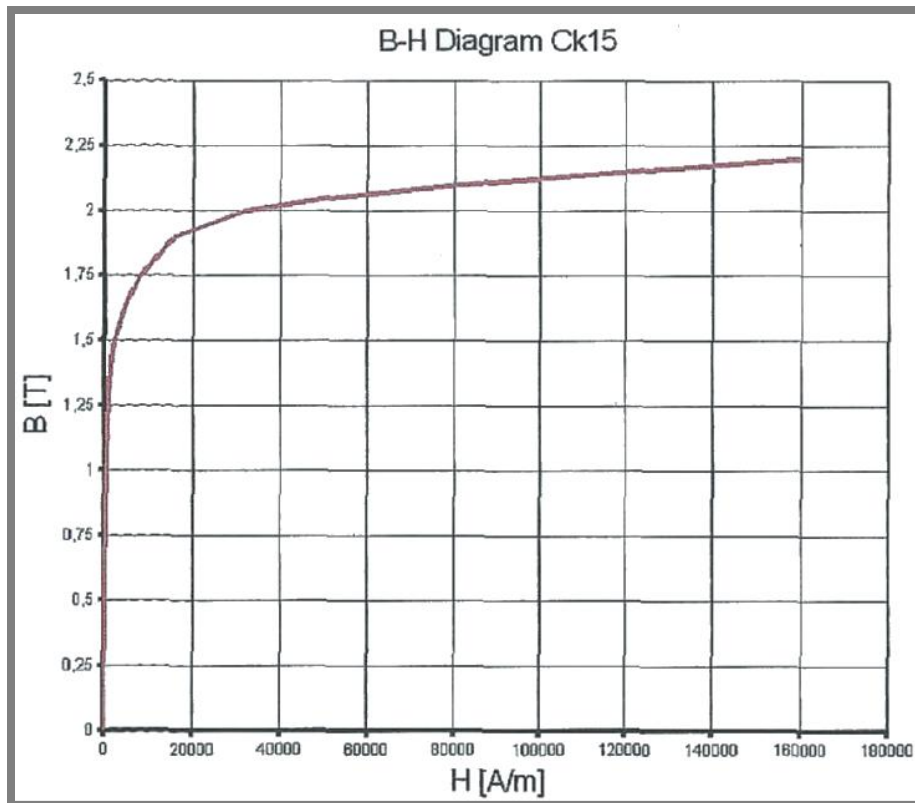
PRÍLOHA II; B-H KRIVKY MAERIÁLOV MAGNETICKÝCH OBVODOV



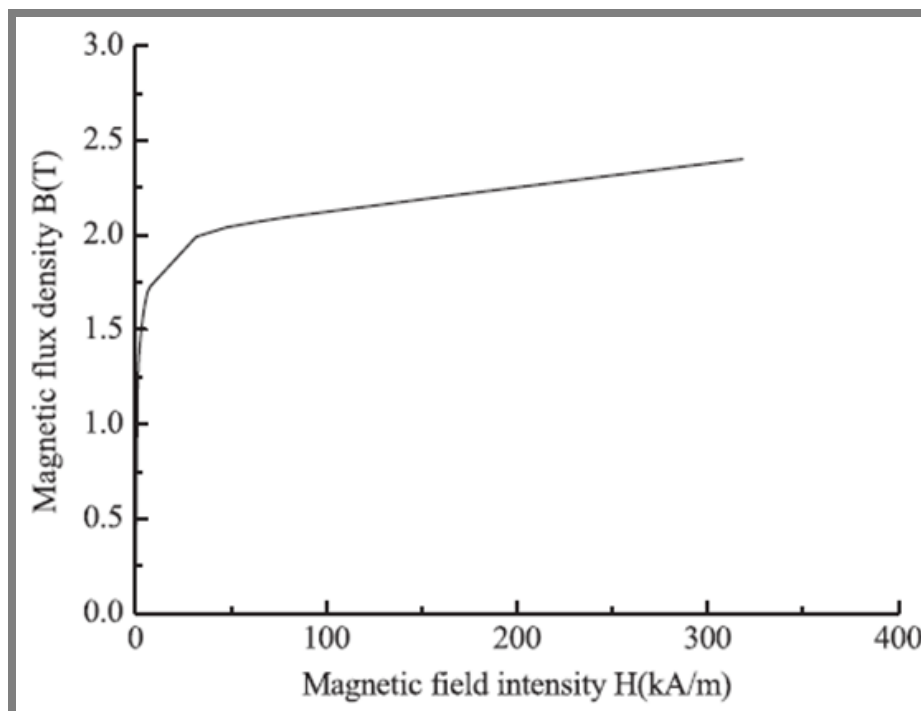
Obr.II 1 #DT3 pure iron steel (Ansys 13.0) [5]



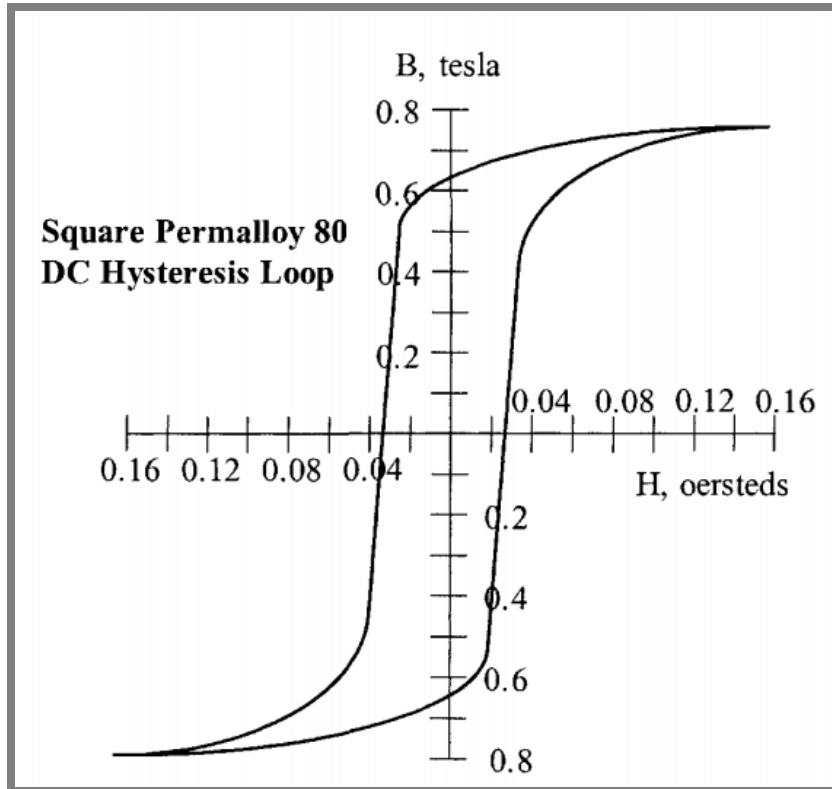
Obr.II 2 10#steel [6]



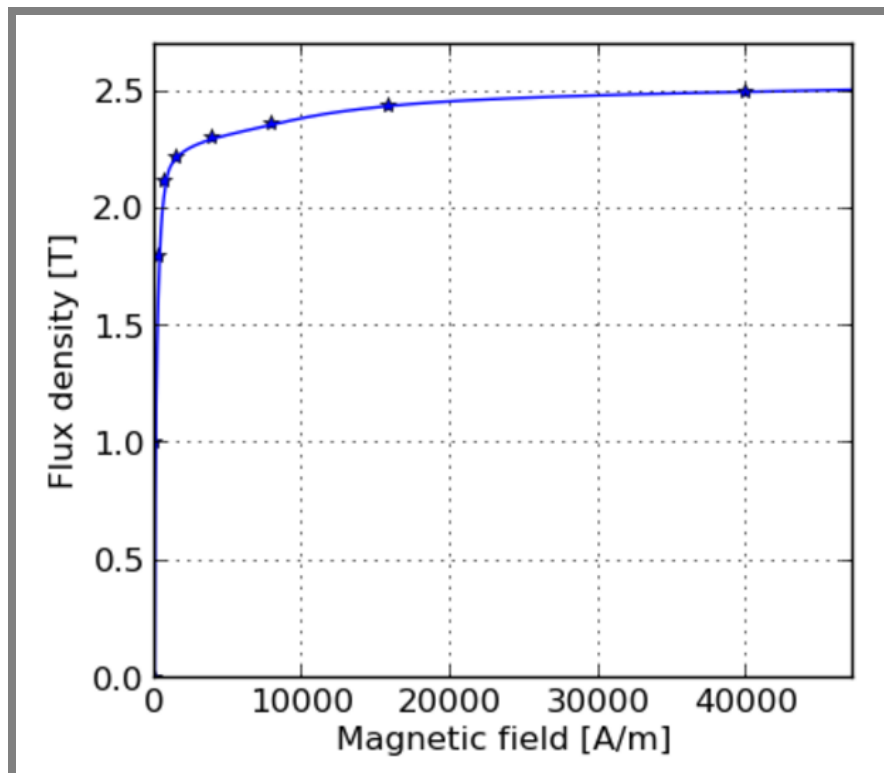
Obr.II 3 Ck15 [19]



Obr.II 4 steel material no. 10 (Ansys/ Emag softwear) [11]



Obr.II 5 B-H hystereza permaloyu [20]



Obr.II 6 Hiperco 50A [21]