

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem takzvaného fail-safe systému magnetoreologického tlumiče. V úvodní části je obsaženo shrnutí vědomostí potřebných pro vývoj takového zařízení. Dále jsou uvedeny některé současné systémy. Následuje přehled koncepčních řešení tlumiče, z nichž je vybrána varianta ke zpracování v konstrukční části. Nakonec je sestaven zjednodušený magnetický a hydraulický model tlumiče.

KLÍČOVÁ SLOVA

MR kapalina, MR tlumič, tlumící síla, permanentní magnet

ABSTRACT

This Bachelor's thesis deals with an engineering design of so-called fail-safe system applied to a magnetorheological damper. In the beginning there is mentioned an essential knowledge needed for developing of such a device. The following part shows some of the current designs. Next part consists of few concept designs. One of those concepts was chosen to be processed in the engineering part. Finally a simplified magnetic and hydraulic model of the final design is calculated.

KEY WORDS

MR fluid, MR damper, damping force, permanent magnet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAŠLÍK, I. *Konstrukční návrh „fail-safe“ magnetoreologického tlumiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Kubík.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Kubíkovi za jeho cenné rady, věcné připomínky a aktivní pomoc při řešení dané problematiky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za výraznou morální podporu.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Konstrukční návrh „fail-safe“ magnetoreologického tlumiče vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Ing. Michala Kubíka za pomoci literárních pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

.....
Datum

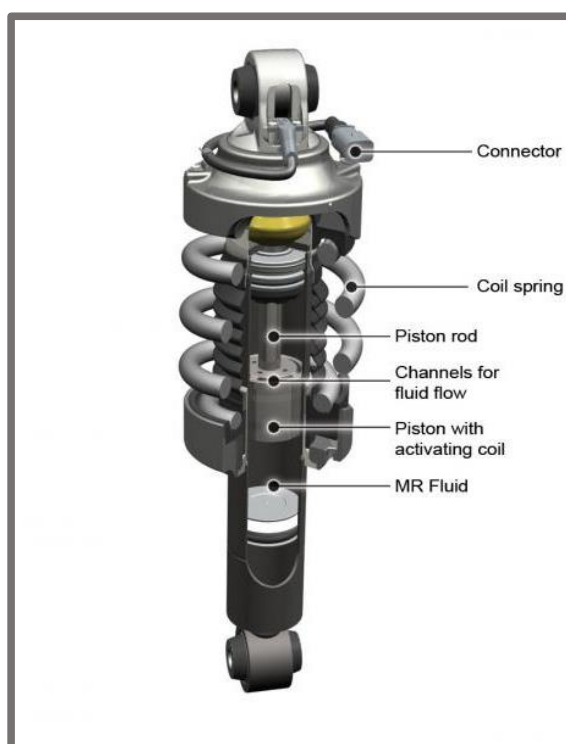
.....
Podpis

OBSAH

ÚVOD	8
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	9
1.1 Magnetoreologická kapalina	9
1.2 Tlumič kmitání	10
1.2.1 Pasivní tlumiče	10
1.2.2 Adaptivně řízené tlumiče	10
1.2.3 Semi-aktivně řízené tlumiče	10
1.2.4 Dvouplášťové tlumiče	10
1.2.5 Jednoplášťové tlumiče	10
1.3 Magnetoreologický tlumič	11
1.4 Současné fail-safe systémy	12
1.4.1 Konstrukce MR tlumiče s fail-safe opatřením (Böse, H)	12
1.4.2 MR tlumič s vnitřním bypasseem (Zhang, H)	13
1.4.3 Kombinovaný MR tlumič (Chengbin, Du)	14
1.4.4 Magnetoreologický tlumič se zlepšenou energetickou efektivitou (Ehrlich, J)	16
1.4.5 Magnetoreologický tlumič bezkontaktním těsněním (Sapiski, B)	17
1.5 Přehled permanentních magnetů	18
1.5.1 Hysterezní smyčka	18
1.5.2 Magneticky tvrdé materiály	19
1.5.3 Typy permanentních magnetů	19
1.5.4 Skládání magnetů	21
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	22
2.1 Analýza problému	22
2.2 Cíl práce	22
3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	23
3.1 Uložení magnetů okolo cívky	26
3.2 Uložení magnetů na vnitřním průměru cívky	30
3.3 Umístění magnetu mezi dvě cívky	34
3.4 Porovnání	38
3.5 Konstrukce pláště tlumiče varianty 2	38
3.6 Závislost hodnot magnetické indukce na změně rozměrů magnetu	38
4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	40
4.1 Konstrukce	40
4.2 Magnetický model	45
4.2.1 Záměna magnetoreologické kapaliny	48
4.3 Zjednodušený hydraulický model	49
4.3.1 Metodika výpočtu	49
4.3.2 Výsledky	51
DISKUZE	53
Možnosti fail-safe systému	53
Možné rozšíření práce	53
ZÁVĚR	54
BIBLIOGRAFIE	55
SEZNAM OBRÁZKŮ	57
SEZNAM TABULEK	59

ÚVOD

Kmitání je v mnoha oblastech technické praxe velmi nežádoucí jev. K jeho útlumu se proto používají tlumící zařízení. Nejrozšířenějším tlumícím zařízením je tlumič, který může být v závislosti na charakteru kmitání různých konstrukcí s odlišným principem fungování. [1] V posledních letech vzrůstá zájem různých průmyslových odvětví o semi-aktivní tlumiče, které jsou v mnoha ohledech výhodnější než dosud používané tlumiče. Mezi tyto tlumiče patří také zkoumaný magnetoreologický (MR) tlumič. Tento typ se již několik let objevuje v konstrukcích podvozků luxusních osobních automobilů s potřebou komfortní jízdy, kterou tento tlumič zajišťuje lépe než většina jiných tlumičů. [2] Tlumící vlastnosti MR tlumičů jsou však závislé na napájení elektrickou energií, jehož výpadek by v některých případech mohl být vážným problémem vedoucím přinejlepším pouze ke zničení tlumícího zařízení.



Obr. 1 Popis Magnetoreologického tlumiče [3]

Bezpečnost tlumícího zařízení by mohlo v takovém případě zajistit takzvané fail-safe opatření, což je konstrukční varianta MR tlumiče, která vykazuje dostatečnou tlumící sílu i při výpadku zdroje napájení.

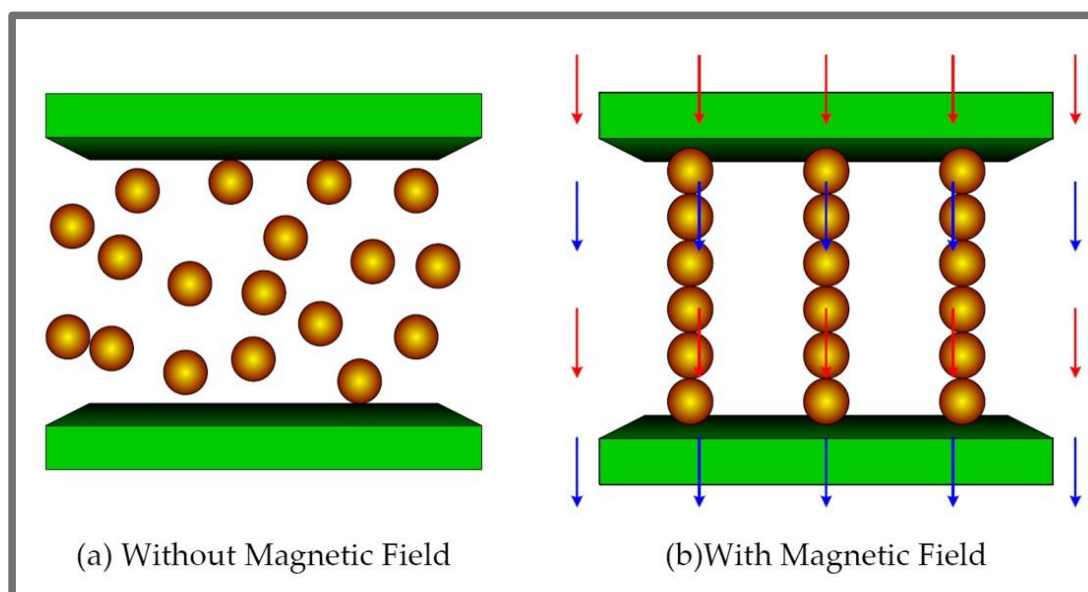
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

1.1 Magnetoreologická kapalina

1.1

Za MR kapalinu je považována suspenze, tvořená nosnou kapalinou s příměsí mikroskopických částic feromagnetické látky, která po vystavení magnetickému poli změni svou zdánlivou viskozitu. Princip, s jakým se zdánlivá viskozita kapaliny mění je znázorněn na obr. 2.



Obr. 2 Reakce částic magnetoreologické kapaliny na přítomnost magnetického pole [4]

Výběr nosné kapaliny závisí především na požadovaných reologických a tribologických vlastnostech. Mezi typické nosné kapaliny patří voda, olej, silikonové a minerální oleje. Volba materiálu feromagnetických částic závisí na hodnotě jeho nasycení magnetickým polem. Nejčastěji se proto jako materiál volí čisté železo nebo karbonylové železo, které dosahují nejvyššího nasycení magnetickým polem. Přidávané částice mají tvar koule o velikosti 10^{-7} až 10^{-5} m. Objemové zastoupení částic v MR kapalině se obvykle pohybuje v rozmezí 10 až 50 %. [5]

Reologické chování MR kapaliny lze vyjádřit Binghamovou rovnicí (1). [5]

$$\tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma}, \tau \geq \tau_y \quad (1)$$

kde:

τ	Pa	je celkové smykové napětí
τ_y	Pa	- mez kluzu závislá na intenzitě magnetického pole
η	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$	- viskozita při nulové intenzitě magnetického pole
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	- smykový spád v kapalině

Pod mezí kluzu se materiál chová viskoelasticky podle rovnice (2). [5]

$$\tau = G\gamma, \tau < \tau_y \quad (2)$$

kde:

G Pa je modul pružnosti ve smyku

1.2 Tlumič kmitání

Tlumič kmitů je mechanické zařízení, ve kterém probíhá pomocí smykového nebo viskózního tření přeměna kinetické energie na teplo, které poté odevzdává tlumič okolí. Existují různé typy tlumičů, které mohou fungovat na různých principech, například deformační, třecí nebo kapalinové. Dále se mohou tlumiče dělit dle způsobu řízení na pasivní, adaptivní a semi-aktivní nebo dle konstrukce na dvouplášťové a jednoplášťové. [1]

1.2.1 Pasivní tlumiče

Pasivní tlumiče nemají možnost změny charakteristiky tlumení během provozu. Míra disipace energie u těchto tlumičů je dána vlastnostmi kapaliny a konstrukcí tlumiče. Tyto tlumiče jsou kvůli jednoduchosti a ceně používány nejčastěji. [1]

1.2.2 Adaptivně řízené tlumiče

Tlumení adaptivních tlumičů lze měnit v průběhu provozu, většinou je možnost navolit dva nebo více stupňů tlumení. V osobních automobilech se tyto stupně často volí tlačítky. Režimy tlumení bývají obvykle označovány jako sportovní a komfortní. Různých tlumících sil je možné docílit díky otevírání nebo přivírání ventilů v pístové soustavě tlumiče. [1]

1.2.3 Semi-aktivně řízené tlumiče

Tlumící síla semiaktivních tlumičů je ovládána řídicí jednotkou v průběhu provozu za účelem dosažení co možná nejefektivnějšího průběhu tlumení. Mezi semiaktivně řízené tlumiče patří také magnetoreologický tlumič. [1]

1.2.4 Dvouplášťové tlumiče

Pracovní válec tlumiče obsahuje píst s průtokovými ventily, který se pohybuje kapalinou. Kapalina se protlačuje průtokovými ventily z jednoho pracovního prostoru do druhého, přičemž hydraulický odpor vznikající při škrčení průtoku je závislý na rychlosti pohybu pístu. Mezi pracovním a vnějším pístem se nachází vyrovnávací prostor, který je z části naplněn kapalinou. Pracovní prostor je s vyrovnávacím prostorem propojen vyrovnávacím ventilem ve spodní části tlumiče. Objem kapaliny, která odtéká při pohybu pístu tímto ventilem, je roven objemu části pístnice, která se vysune do pracovního válce. Při zasunování pístnice se objem kapaliny v pracovním válci opět zvýší. [1]

1.2.5 Jednoplášťové tlumiče

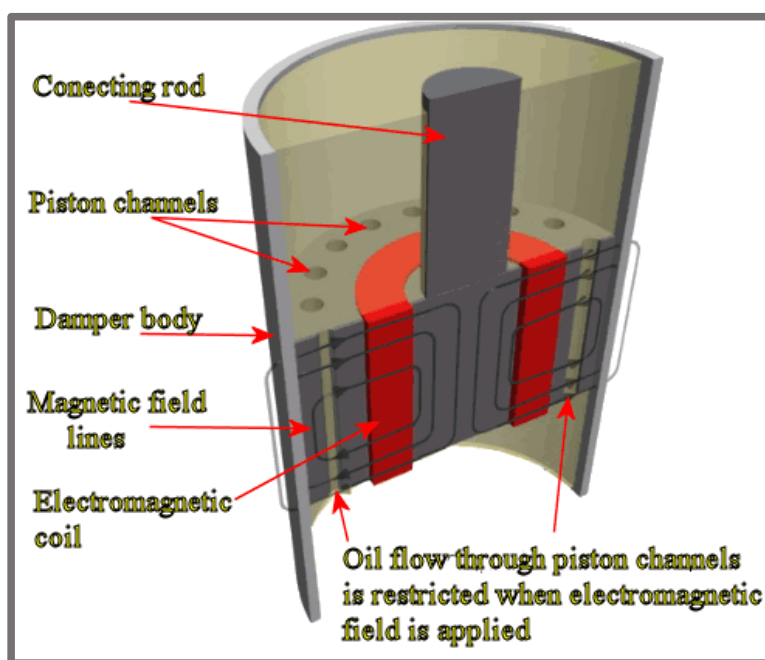
Tento typ tlumiče byl vyvinut zejména kvůli zabránění pění kapaliny při průchodu ventily. Místo vyrovnávacího prostoru obsahuje tlumič plynovou náplň, oddělenou od kapaliny volně posuvným pístem. Při pohybu pracovního pístu směrem nahoru se

snížení tlaku pod pístem kompenzuje tlakem plynové náplně a tím je zabráněno pění kapaliny. [1]

1.3 Magnetoreologický tlumič

1.3

Magnetoreologický (MR) tlumič vychází z konstrukce klasického hydraulického tlumiče. Na rozdíl od něj obsahuje píst MR tlumiče cívku, která generuje při průchodu proudem magnetický indukční tok aktivní zónou. Velikost průchozího proudy a tím i intenzitu magnetického pole reguluje v reálném čase řídicí jednotka v závislosti na daném řídicím algoritmu. V pístové skupině se nachází štěrbina, jíž protéká při pohybu pístu MR kapalina. Ta v důsledku přítomnosti magnetického pole zvyšuje svou zdánlivou viskozitu a tím zvyšuje míru disipace kinetické energie. [6]



Obr. 3 Řez magnetoreologickým tlumičem [7]

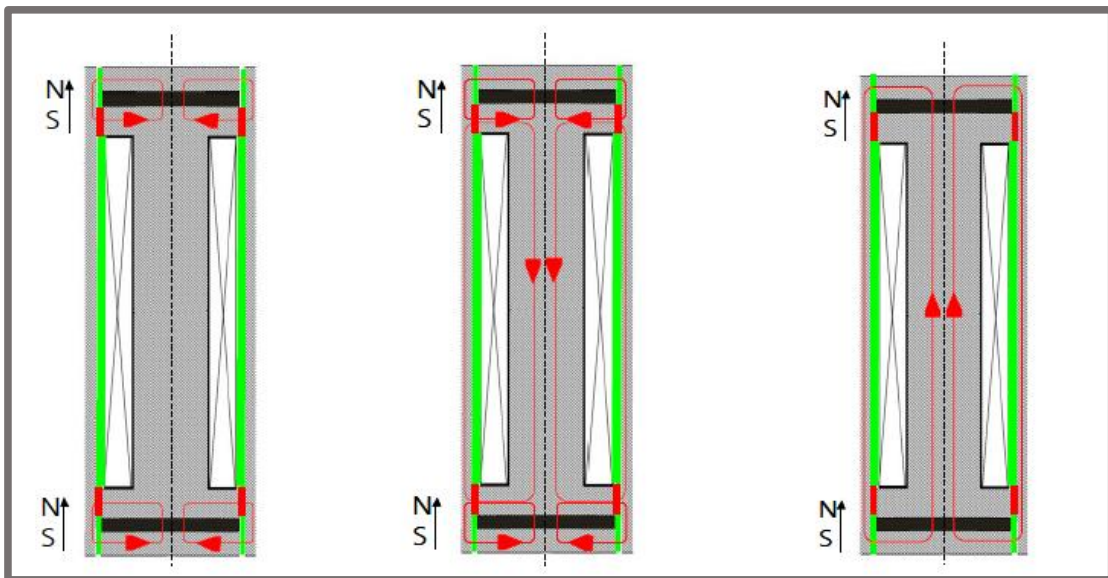
Výhodou MR tlumiče oproti hydraulickým tlumičům je možnost ovlivňovat jeho tlumení pomocí přivedeného elektrického proudy na cívku. Při přerušení elektrického obvodu se z magnetoreologického tlumiče stane pasivní tlumič s minimálním tlumením. V této situaci by například u automobilu došlo k výraznému zhoršení jízdních vlastností a tím bezpečnosti v krizových situacích. Proto je nutné opatřit takové tlumiče takzvaným fail-safe opatřením, které zabraňuje ztrátě tlumících schopností i při nulové hodnotě průchozího proudy cívku. Nejvhodnějším fail-safe opatřením se jeví vložení permanentního magnetu do konstrukce pístu tak, aby vytvořil vhodný magnetický obvod, který by zaručoval průchod magnetického indukčního toku aktivní zónou i v případě výpadku proudy v tlumiči.

1.4 Současné fail-safe systémy

Fail-safe opatření MR tlumičů je v současné době v rané fázi vývoje. První nápady na použití magnetů v MR tlumiči vedly zejména k energetické efektivitě nebo zlepšení jiných vlastností tlumiče. Později byla však již brána do úvahy potřeba zajištění bezpečnosti při přerušení dodávky elektrického proudu do tlumiče. V dostupných zdrojích lze vyčíst následující varianty účelných i neúčelných fail-safe systémů.

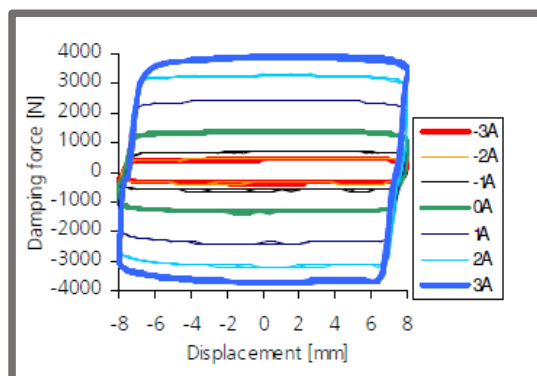
1.4.1 Konstrukce MR tlumiče s fail-safe opatřením (Böse, H)

Toto jednodušší konstrukční řešení obsahuje dva permanentní magnety tvaru disku s polarizací ve směru osy. Při průtoku proudu cívkou v pozitivním směru dojde k posílení magnetického pole magnetů. Při napájení negativním proudem se magnetické pole magnetů naopak odstíní.



Obr. 4 Možné podoby magnetického obvodu v tlumiči v závislosti na napájení cívky [8]

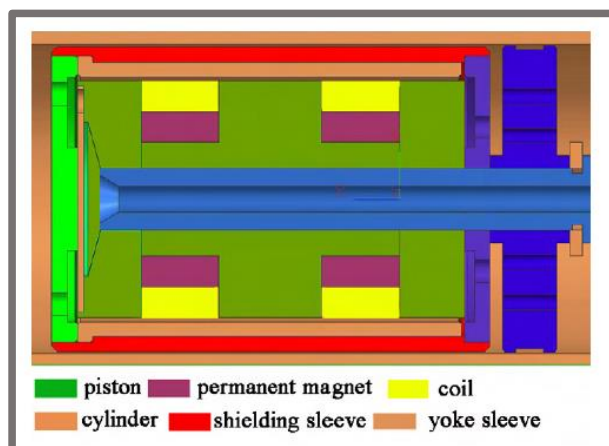
Test byl proveden při harmonickém kmitání s amplitudou 8 mm, frekvencí 1 Hz a magnetoreologická kapalina obsahovala 36 vol.% železných částic. [8] Průběh tlumící síly je vyobrazen na obr. 5.



Obr. 5 Závislost tlumící síly na zdvihu tlumiče při různých proudech [8]

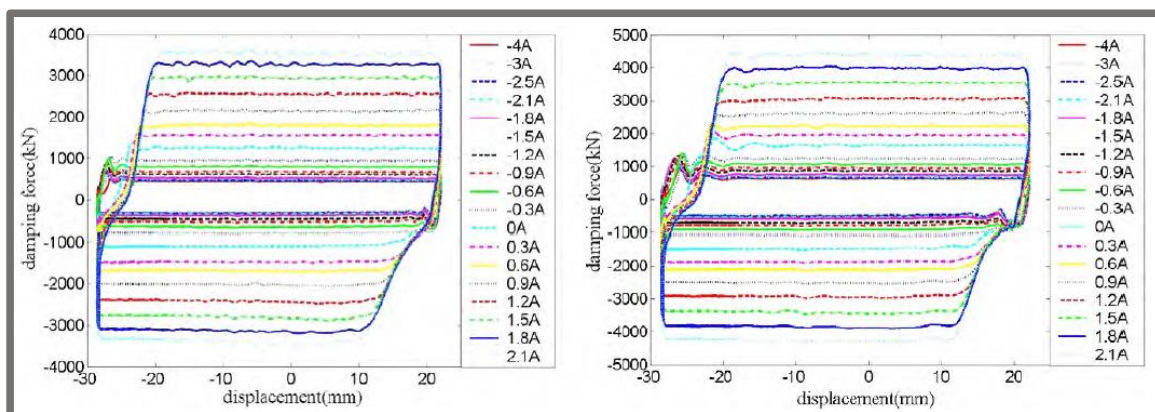
1.4.2 MR tlumič s vnitřním bypassem (Zhang, H)

V tomto řešení protéká MR kapalina dvěma typy štěrbin. První se nachází na vnější straně pístu tlumiče a magnetické pole je zde odstíněno pláštěm pístu. Druhý průchod kapaliny vede přes zónu, v níž je buzeno magnetické pole permanentními magnety a cívkami.



Obr. 6 Schéma konstrukce tlumiče [9]

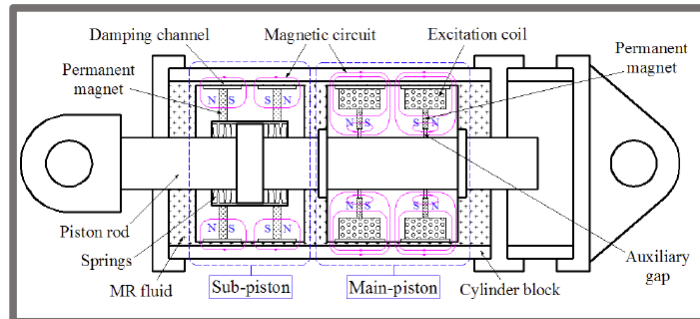
Píst tlumiče je vybaven dvojicí cívek a dvojicí neodymových prstencových magnetů. Test tlumiče proběhl při kmitání s amplitudou výchylky 25 mm a amplitudami rychlosti 0,05 a 0,1 m · s⁻¹. [9] Výsledky jsou zaznamenány na obr. 7.



Obr. 7 Závislosti tlumicí síly na výchylce pístu tlumiče při rychlostech 0,05 a 0,1 m · s⁻¹ a při různých proudech [9]

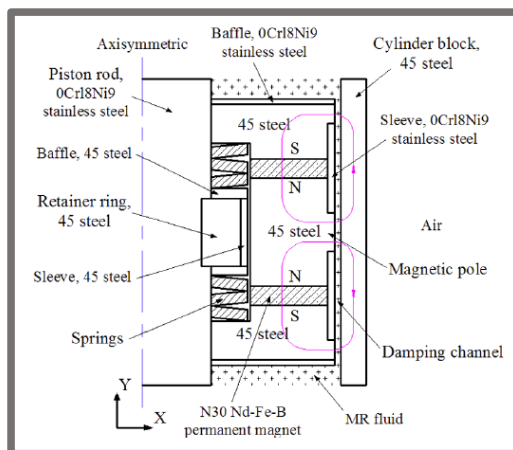
1.4.3 Kombinovaný MR tlumič (Chengbin, Du)

Tlumič obsahuje pístnici s hlavním a vedlejším pístem. Tato konstrukce byla zvolena za účelem snížení tuhosti při vysokofrekvenčních vibracích s malou amplitudou kmitání a zároveň dosažení nejvyššího tlumení při velké amplitudě kmitání.



Obr. 8 Konstruktivní schéma tlumiče s oběma písty [10]

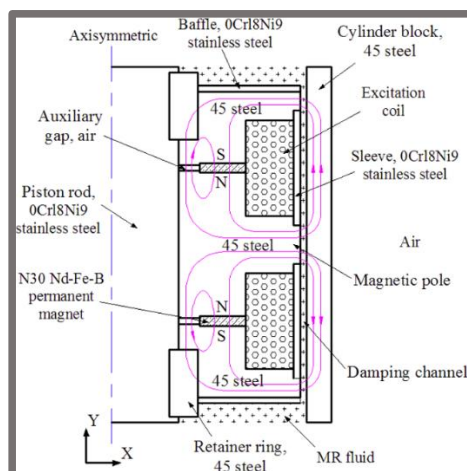
Řešení hlavního pístu využívá dvou cívek a dvou neodymových prstencových magnetů s polarizací ve směru osy.



Obr. 9 Konstrukce hlavního pístu [10]

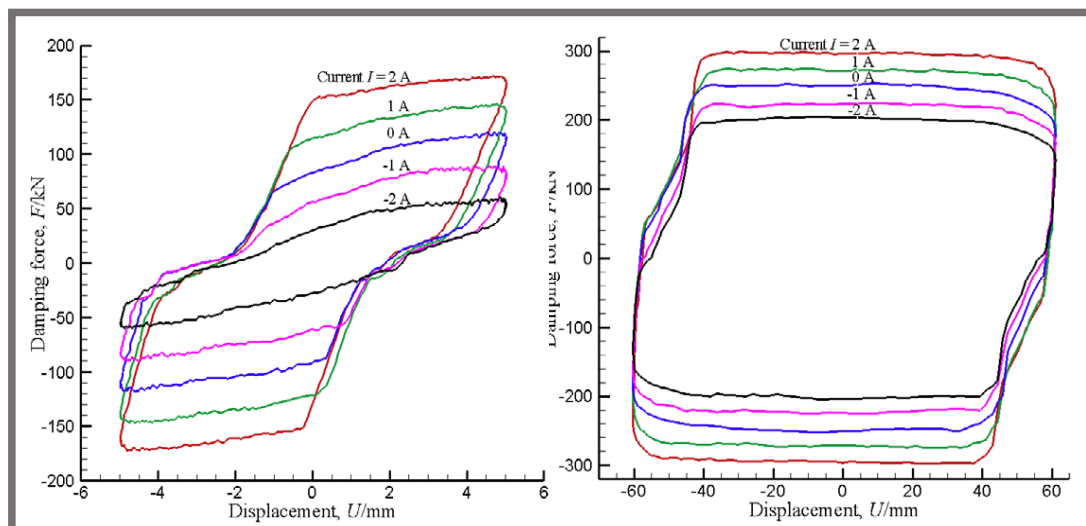
Hodnota magnetické indukce v aktivní zóně je 0,56 T při nulové hodnotě proudu, 0,98 T při hodnotě průchozího proudu 2 A a 0,04 T při průchodu proudu o hodnotě -2 A.

Vedlejší píst obsahuje dva prstencové magnety a s pístnicí je provázán dvojicí pružin.



Obr. 10 Konstrukce vedlejšího pístu [10]

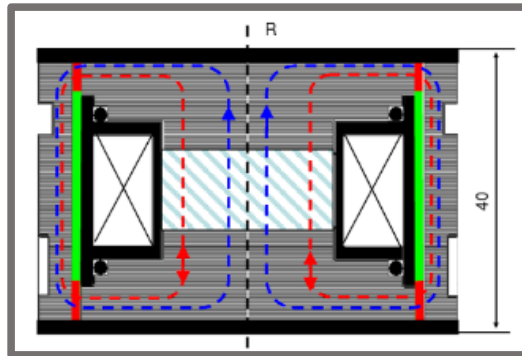
Test tlumiče proběhl při harmonickém zatěžování silou 300 kN při maximální amplitudě výchylky 75 mm a frekvenci 0,1 až 20 Hz. Zaznamenán byl test při frekvenci 0,1 Hz a amplitudách 60 mm a 5 mm, přičemž nižší amplituda způsobuje, že tlumení kvůli tuhosti dané pružiny závisí pouze na hlavním pístu. [10] Obr. 11 zobrazuje výsledky testu.



Obr. 11 Závislosti tlumicí síly na výchylce při amplitudách 60 a 5 mm [10]

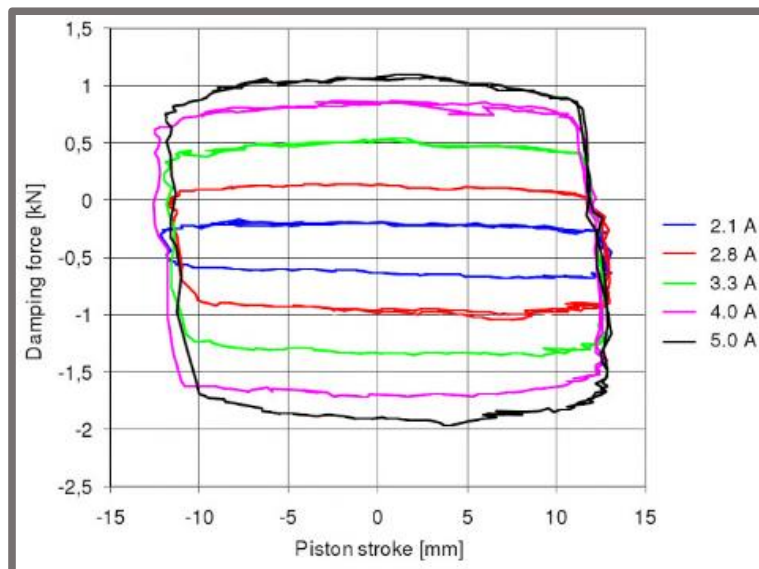
1.4.4 Magnetoreologický tlumič se zlepšenou energetickou efektivitou (Ehrlich, J)

Tento tlumič obsahuje cívku a Alnico magnet tvaru disku s nízkou hodnotou koercivity. Ta umožňuje opětovné zmagnetování magnetu s požadovanou polaritou za pomoci cívky. V kombinaci s cívkou tak lze dosáhnout různých variací hodnot magnetické indukce v aktivní zóně. Hlavním účelem této konstrukce je snížení energetické náročnosti tlumiče kombinací magnetických polí magnetu a cívky v aktivní zóně.



Obr. 12 Konstrukce pístu daného tlumiče [11]

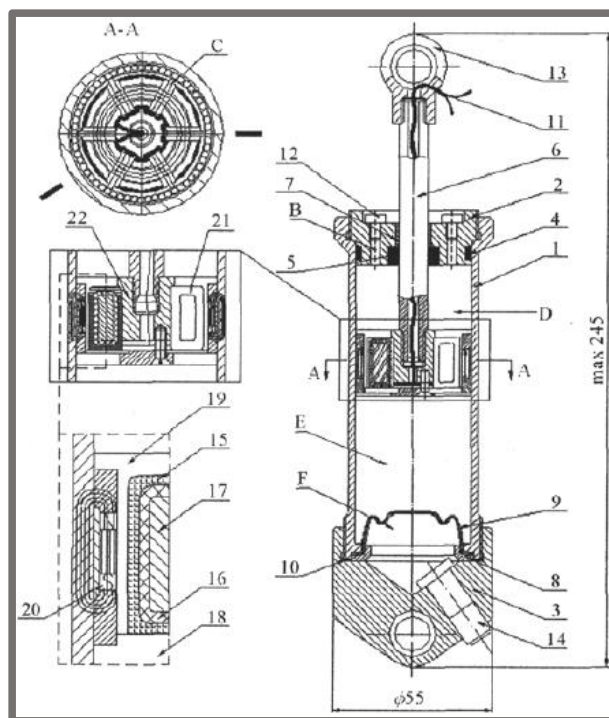
Maximální hodnota magnetické indukce dosažená pouze magnetem dosahuje v aktivní zóně hodnoty 590 mT. Při testu byla použita magnetická kapalina s 25 vol.% železných částic. Test byl proveden harmonickým kmitáním s amplitudou výchylky 12,5 mm a frekvencí 1 Hz. [11] Výsledek testu zobrazuje obr. 13.



Obr. 13 Závislost tlumicí síly na výchylce pístu tlumiče při daných proudech [11]

1.4.5 Magnetoreologický tlumič bezkontaktním těsněním (Sapiski, B)

Ačkoliv se primárně nejedná o fail-safe systém, jde zřejmě o první případ konstrukce MR tlumiče obsahující permanentní magnet. Magnetické pole je v tomto případě buzeno magnety na vnějším okraji pístu tlumiče a zvýšením zdánlivé viskozity MR kapaliny v tomto místě zaručuje bezkontaktní těsnění mezi pístem a pláštěm.



Obr. 14 Detaily konstrukce daného tlumiče [12]

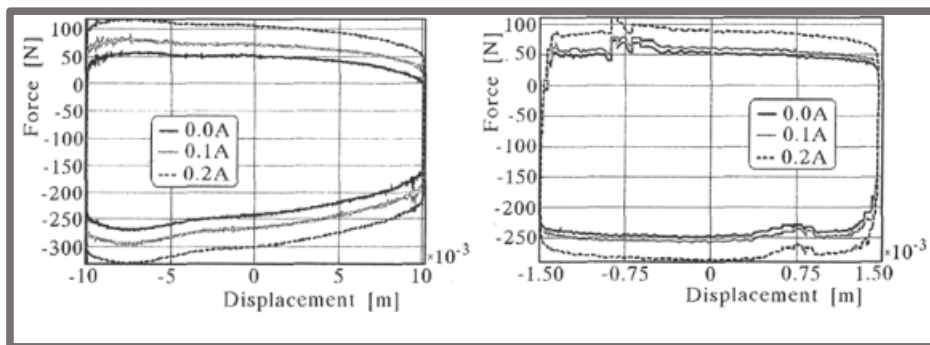
Píst tlumiče obsahuje 6 cívek rozložených po kružnici a sérii 51 tyčových permanentních magnetů, s polarizací ve směru osy, uložených po obvodu.



Obr. 15 Umístění cívek a magnetů v pístu tlumiče [12]

Byla použita magnetoreologická kapalina se 32 vol.% železných částic. Tlumivá síla se liší v závislosti na směru pohybu pístu. Test byl proveden kmitáním tlumiče při frekvenci 1 Hz a amplitudě výchylky 10 mm a při frekvenci 4 Hz a amplitudě 1,5 mm. [12]

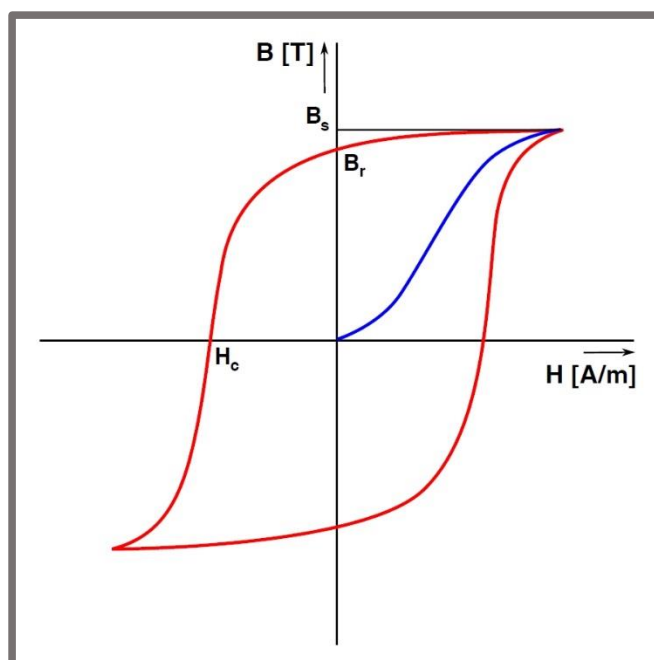
Výsledky testu tlumicí síly znázorňuje obr. 16.



Obr. 16 Závislosti tlumicí síly na výchylce pístu tlumiče při amplitudách výchylky 10 a 1,5 mm [12]

1.5 Přehled permanentních magnetů

Důležitou součástí magnetického obvodu fail-safe tlumiče je permanentní magnet. Permanentní magnety jsou tělesa, která ve svém okolí vytváří magnetická pole. K řešení fail-safe opatření je třeba uvážit volbu permanentního magnetu. Proto je nutné znát do podrobnosti jeho vlastnosti a možnosti. O vlastnostech magnetu nejvíc vypovídá jeho hysterezní smyčka.



Obr. 17 Hysterezní smyčka [13]

1.5.1 Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčka neboli BH charakteristika má pro různé materiály různý tvar. Slouží k určení závislosti intenzity vnějšího magnetického pole na magnetické indukci

magnetu. Při počátečním buzení magnetu magnetickým polem dojde k jeho nasycení. Poté, při snižování hodnoty intenzity vnějšího pole až na nulovou hodnotu, se hodnota magnetické indukce ustálí na hodnotě remanence daného magnetu. Při působení vnějšího magnetického pole opačného k poli buzenému magnetem se hodnota magnetické indukce magnetu stále snižuje. Tato demagnetizační část se nachází ve druhém kvadrantu grafu hysterezní smyčky a na ní vyjadřujeme pracovní bod permanentního magnetu. Z hysterezní smyčky lze vyčíst hodnotu remanence B_r , koercivity H_c a maximální energetický součin $(BH)_{max}$. Koercivita udává míru odolnosti magnetu proti odmagnetování vnějším polem i vlastní demagnetizací. Remanence je hodnota magnetické indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném obvodu magnetu bez působení vnějšího pole. Maximální energetický součin je úměrný magnetické energii uložené v magnetu optimálního tvaru. [14]

Procesem vedoucím k nasycení magnetu je magnetizace. Nejefektivnější a nejpoužívanější metodou magnetizace je vložení magneticky tvrdé látky do magnetického pole buzeného cívkou. [15]

1.5.2 Magneticky tvrdé materiály

1.5.2

Pro výrobu trvalých magnetů se používají magneticky tvrdé materiály, jejichž základní magnetickou vlastností je schopnost zachovat značnou magnetizační polarizaci J i po ukončení působení vnějšího magnetického pole. [14]

Velikost polarizace je dána rovnicí (3).

$$J = \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) \cdot H \quad (3)$$

kde

μ_0	H	je permeabilita vakua
μ_r	-	- relativní permeabilita materiálu
H	$A \cdot m^{-1}$	- intenzita magnetického pole

1.5.3 Typy permanentních magnetů

1.5.3

Na trhu existuje obrovské množství polotovarů různých tvarů, velikostí a směrů zmagnetování. Nejčastějšími tvary polotovarů jsou hranoly, koule, disky, tyče, prstence nebo segmenty prstenců. Velikosti nabízených polotovarů se pohybují většinou v rozmezí 10 až 150 mm. Ceny se liší v závislosti na velikosti a materiálu od jednotek Kč za malé feritové magnety, po několik tisíc Kč za velké neodymové magnety. Lze najít kvádrové magnety zmagnetované ve směru kolmém na plochu, ve směru délky nebo ve směru šířky, válcové a prstencové zmagnetované rovnoběžně s osou nebo kolmo na ni a segmenty zmagnetované ve směru kolmém k ploše magnetu. U prstencových magnetů je možnost nalézt radiálně zmagnetované polotovary. Ty mohou být tvořeny celistvou trubicí, která je zmagnetována jednoduše nebo sintrovanými segmenty, které mají střídavý směr polarizace.

Podle materiálu, kterým je magnet tvořen, se dají permanentní magnety dělit na:

Feritové (keramické) magnety

Feritové magnety tvoří většinu světové produkce magnetů a jedná se o nejlevnější variantu. Magnety jsou tvořené zejména oxidem železitým s příměsí uhličitanu barnatého nebo strontnatého. Směs se při výrobě vylisuje do požadovaného tvaru a poté sintruje. Kvůli tomuto postupu je výsledná struktura velmi křehká.

Alnico magnety

Magnety tvořené slitinou hliníku a niklu. Díky způsobu výroby odléváním je možno dosáhnout vysoké tvarové přesnosti. Vysoká teplotní odolnost umožňuje použití v tepelně náročných podmínkách.

Plastické magnety

Vyrábí se zejména kvůli tvarové přesnosti. Skládají se ze 60-80 % magnetického prášku a zbytek směsi tvoří pojivo. Tato směs se teplotně vytvrzuje nebo přímo vstříkuje do forem, což se kvůli vysokým nákladům na přípravu vyplatí teprve při velkém výrobním objemu. Kvůli nižšímu podílu magnetického prášku mají nižší energetickou hustotu a přítomnost pojiva způsobuje náchylnost na vyšší pracovní teploty.

Pryžové magnety

Podobně jako plastické magnety jsou pryžové magnety tvořeny magnetickým práškem a elastoplastickým pojivem, které dodává magnetům velkou pružnost a ohebnost. Vyrábí se v tenkých foliích. Omezení jsou však podobná jako u plastických magnetů.

Samarium-kobaltové magnety

Vyrábí se sintrováním směsi samaria a kobaltu v poměru 1:5 nebo 2:17. Podobně jako feritové magnety jsou velmi křehké. Mají nižší teplotní odolnost, ale mnohem vyšší energetickou hustotu.

Neodymové magnety

Obsahují příměsí vzácných prvků, zejména neodym, dysprosium nebo praseodym, které se spolu se železem a borem v poměru $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ sintrují. Jsou opět velmi křehké, ale dosahují nejvyšší hustoty magnetické energie.

Tab. 1 Vlastnosti magnetů [14]

Magnet	$(BH)_{max}$ [kJ · m ⁻³]	T_c [°C]	H_{cB} [kA · m ⁻¹]	B_r [mT]	σ [MPa]	μ
Feritový	6 ÷ 32	450	128 ÷ 275	200 ÷ 420	700	1,05 ÷ 1,2
Alnico	12 ÷ 72	870	45 ÷ 112	720 ÷ 1350	400	1,8 ÷ 4,4
Plastický	6 ÷ 72	-	120 ÷ 480	200 ÷ 760	-	-
Pryžový	3 ÷ 12	-	80 ÷ 180	140 ÷ 250	-	-
Samarium- kobaltový	127 ÷ 220	300	620 ÷ 796	650 ÷ 1000	800	1,05 ÷ 1,2
Neodymový	223 ÷ 414	200	804 ÷ 923	1080 ÷ 1470	900	1,05 ÷ 1,2

1.5.4 Skládání magnetů

1.5.4

Pokud se shodné magnety skládají do série, přírůstek magnetické indukce v daném místě s každým dalším magnetem nepatrně klesá. Toto skládání je efektivní pouze u magnetů s dostatečně velkým průřezem. Skládáním shodných magnetů paralelně vedle sebe magnetickou indukci v daném místě nezvýšíme, ale magnetické pole se rozšíří a poskládáním magnetů do kružnice lze dosáhnout téměř homogenního magnetického pole po kružnici. [16]

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

V současné době existuje celá řada konstrukcí MR tlumičů. Hlavním požadavkem pro jejich správnou funkci je aktivní napájení jejich cívek. Problém nastává při výpadku napájení, kdy je tlumení minimální a tlumič by mohl být kmitáním při nízkém tlumení poškozen. Tomuto stavu se snaží zabránit fail-safe opatření. S přihlédnutím ke konstrukčním řešením dosavadních fail-safe MR tlumičů lze říci, že variant, které by splňovaly tento účel, je příliš málo a není možné určit, která z konstrukcí nabízí nejvýhodnější řešení. Při uvážení možností magnetických obvodů je zřejmé, že k požadovanému efektu lze dojít mnoha kombinacemi cívek a magnetů. Pro optimální fungování tlumiče je třeba získat homogenní magnetické pole po celém obvodu jeho pístu. Proto je vhodné vytvořit magnetický obvod pomocí cívky a rotačních magnetů, které jsou zmagnetované ve směru osy nebo radiálně. Nejvhodnějším tvarem magnetů se zdá být prstenec nebo disk, ale také je zde možnost použít paralelní sestavení tyčových magnetů nebo prstencových segmentů rovnoměrně po kružnici

2.2 Cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce je konstrukční návrh fail-safe magnetoreologického tlumiče s ohledem na magnetické a hydraulické modely.

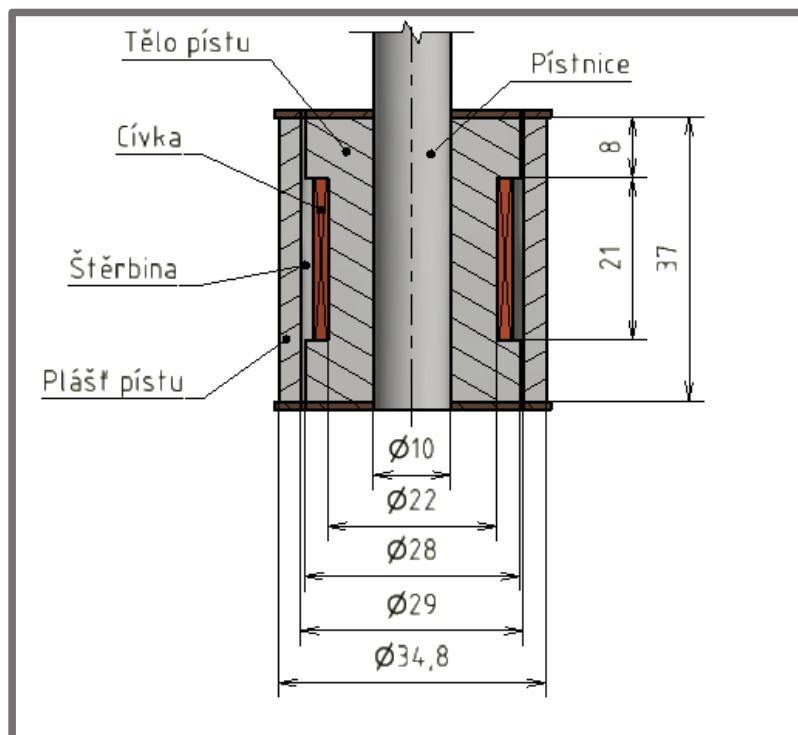
Dílní cíle bakalářské práce:

- přehled současného stavu poznání fail-safe MR tlumičů,
- sestavení zjednodušeného magnetického a hydraulického modelu,
- návrh konstrukčních řešení.

3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

3

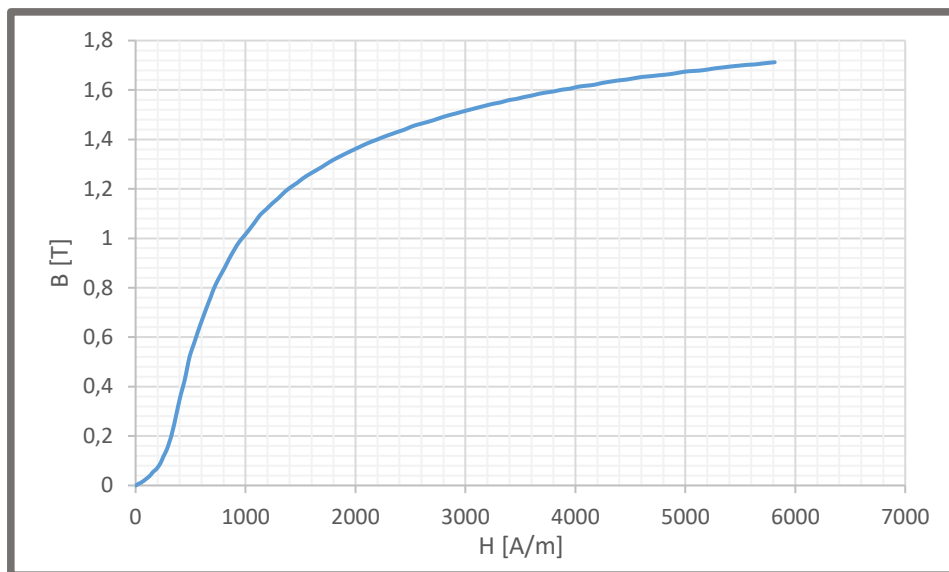
Koncepční řešení fail-safe opatření bude aplikováno na koncepci tlumiče, který je standardně vyráběn pro použití v automobilovém průmyslu pístu.



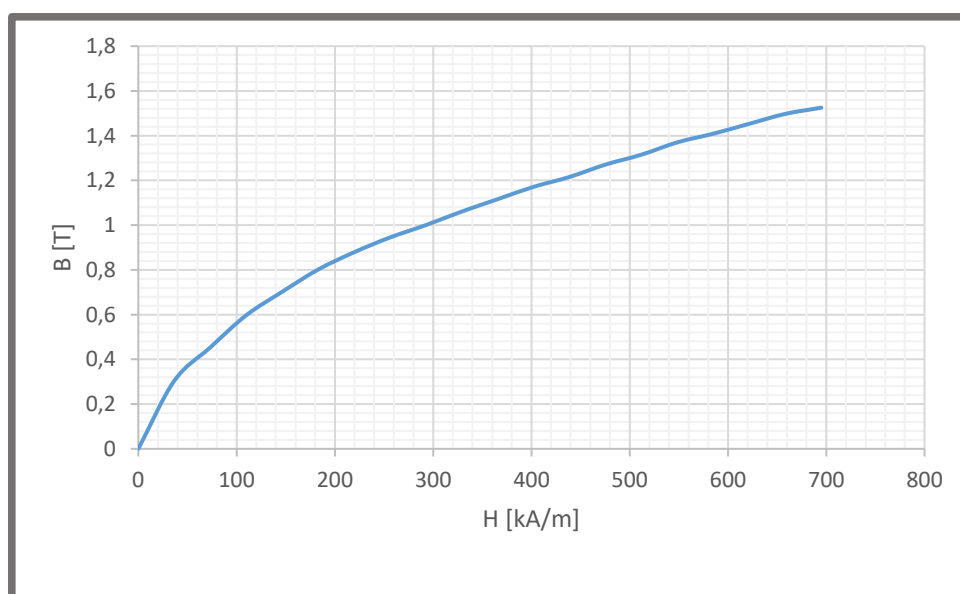
Obr. 18 Konstrukce výchozího tlumiče

V tomto tlumiči je cívka tvořena 120 závitů a maximální pracovní proud je 2 A.

Hodnoty magnetické indukce v průběhu aktivní zóny s uvažovanou magnetoreologickou kapalinou byly určeny pomocí simulace v programu ANSYS Electronics Desktop. Síť modelu obsahuje 1015 prvků o velikosti 10^{-3} mm. Použity byly BH křivky pro ocel 11 109 (obr. 19) a magnetoreologickou kapalinu MRF-132DG (obr. 20).

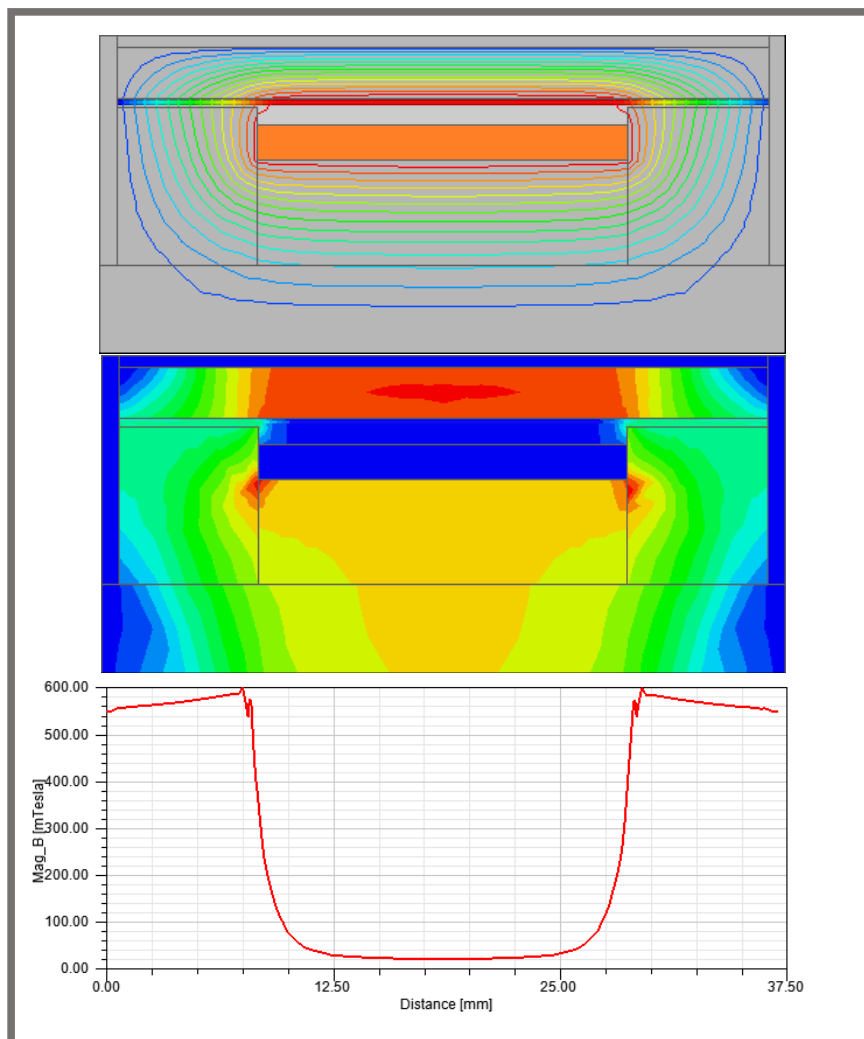


Obr. 19 B-H křivka pro ocel 11 109 byla experimentálně určena na ÚK VUT



Obr. 20 B-H křivka pro magnetoreologickou kapalinu MRF-132DG [17]

Nejvyšší hodnota magnetické indukce v aktivní zóně při napájení cívky proudem 2 A je 599 mT. Průběh magnetického toku a magnetické indukce v tlumiči znázorňuje obr. 21.

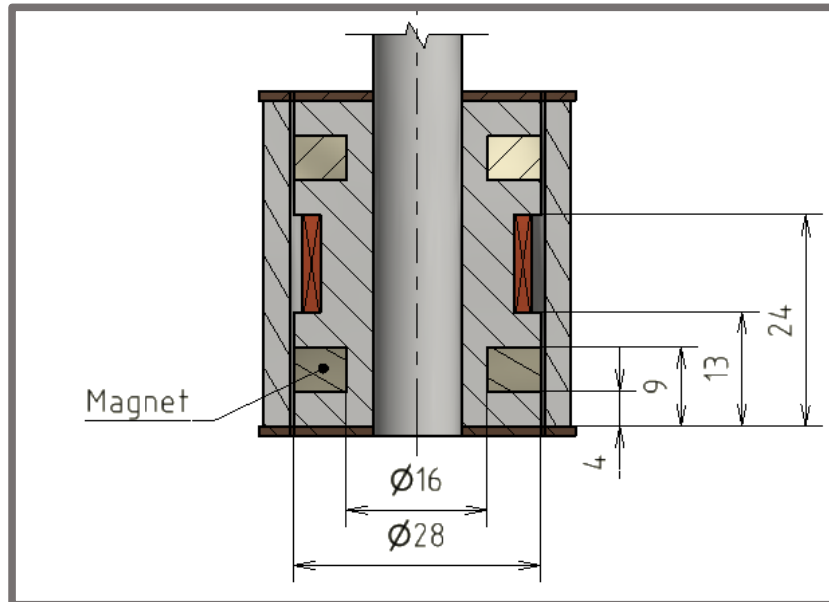


Obr. 21 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A

Na uvedené konstrukční provedení tlumiče budou použity různé koncepce magnetického obvodu spolu s permanentním toroidním magnetem. Vhodnost koncepcí bude posuzována zejména z hlediska hodnoty magnetické indukce v aktivní zóně vytvořené pouze permanentními magnety a dále z hlediska maximální a minimální hodnoty magnetické indukce způsobené kombinací elektromagnetické cívky a magnetů. Aby bylo možno návrhy posuzovat rovnocenně, budou pro konstrukce voleny neodymové magnety s co možná nejmenším rozdílem objemu. Aktivní zóna šterbiny bude mít ve všech případech stejnou délku. Dále jsou popsána koncepční uspořádání obvodu.

3.1 Uložení magnetů okolo cívky

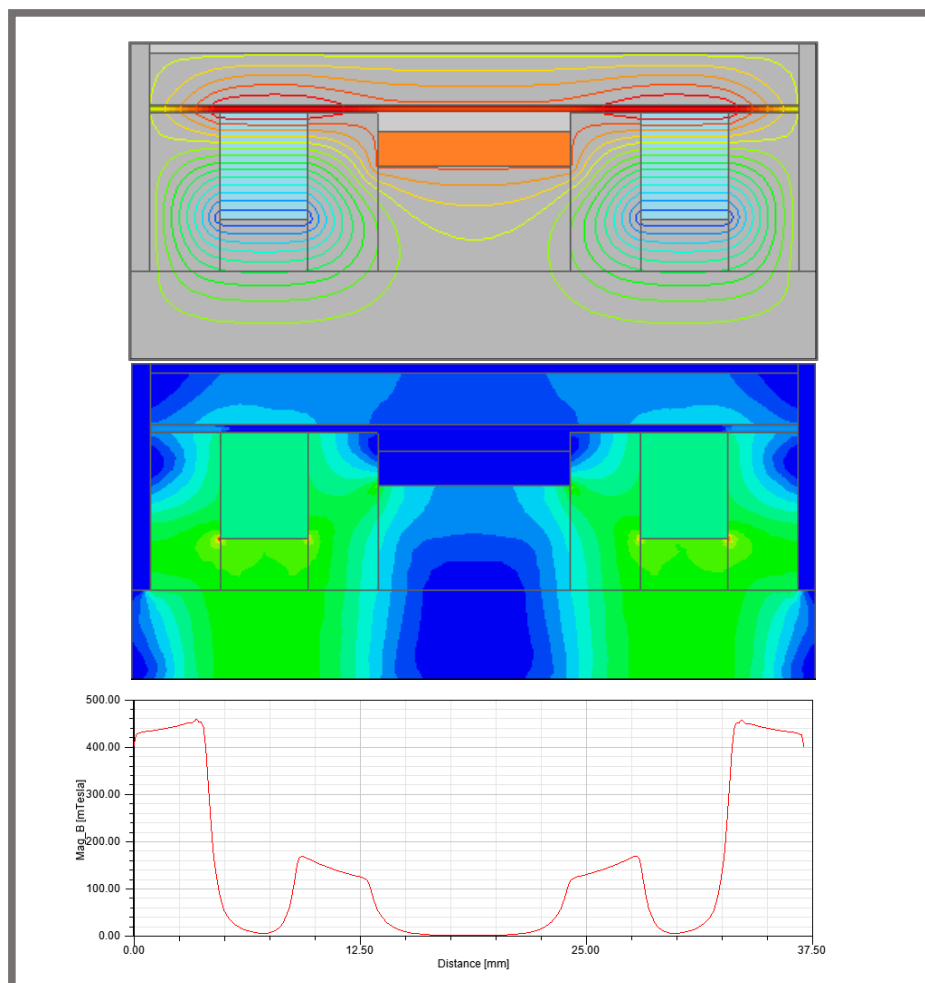
Koncepční řešení vychází z první studované práce v rešeršní části. Jsou použity dva permanentní magnety. Aby bylo dosaženo protékání velké části magnetického indukčního toku šterbinou, je třeba zvolit horizontální polohu magnetů v její těsné blízkosti. Vertikální poloha magnetů bude zvolena uprostřed mezi podstavou cívky a podstavou těla pístu.



Obr. 22 Koncepční řešení uložení magnetů okolo cívky

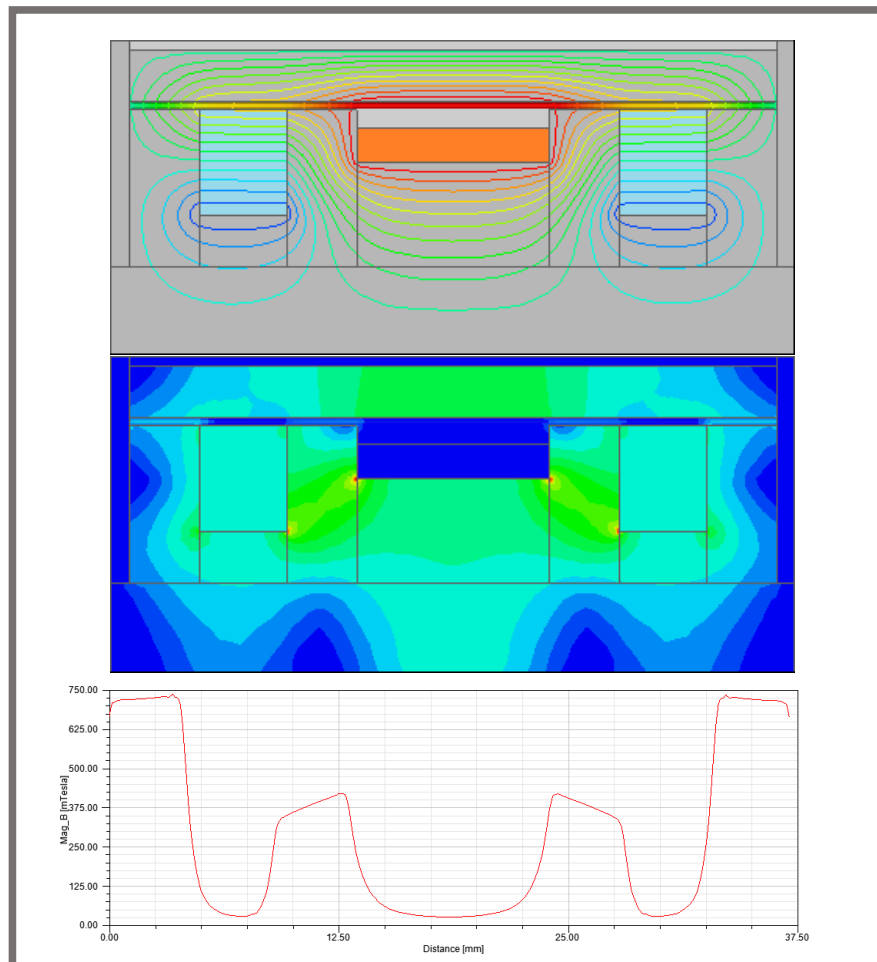
Byl zvolen magnet tvaru prstence s vnějším poloměrem 28 mm, vnitřním poloměrem 16 mm a šířkou 5 mm. Celkový objem použitých magnetů je 4147 mm³.

Průběh magnetické indukce ve šterbině je znázorněn v obrázcích 23, 24 a 25, dále jsou zde vykresleny křivky magnetického indukčního toku a průběh magnetické indukce v průřezu tlumiče.



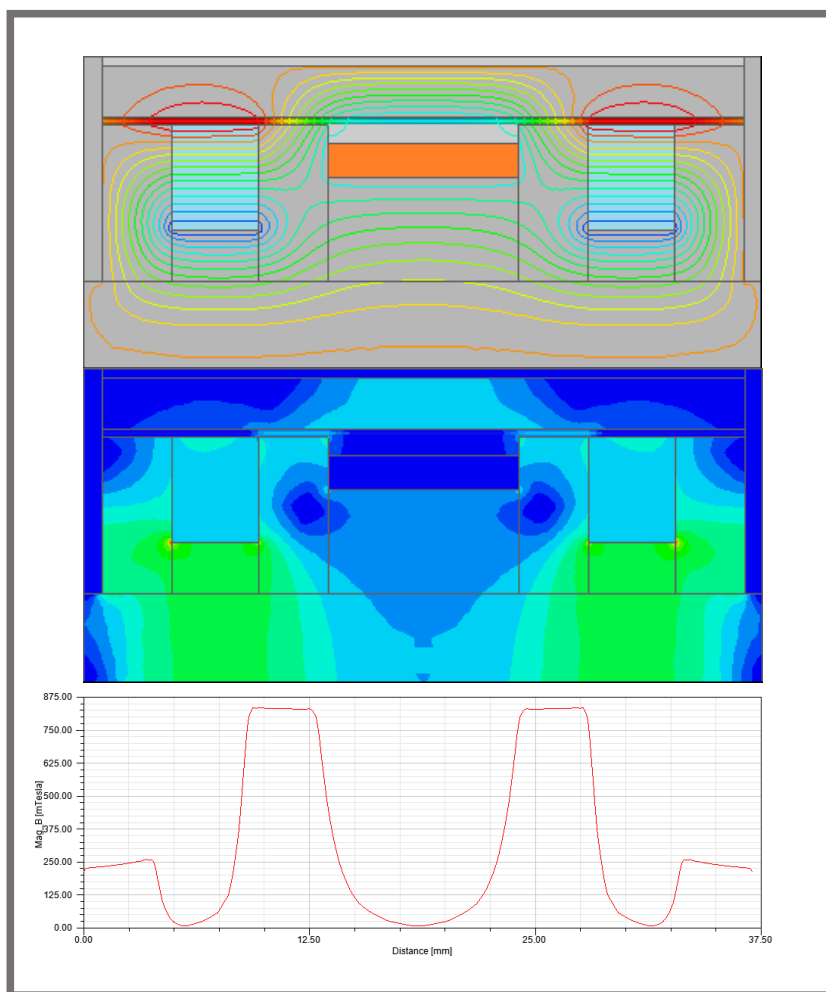
Obr. 23 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 0 A

Maximální hodnota magnetické indukce v aktivní zóně při proudu 0 A je 460 mT. Větší část magnetického indukčního toku protéká vnější částí aktivní zóny.



Obr. 24 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A

Maximální hodnota magnetické indukce při napájení proudem o hodnotě 2 A je 739 mT. Magnetický indukční tok opět nejintenzivněji protéká vnějšími částmi aktivní zóny.



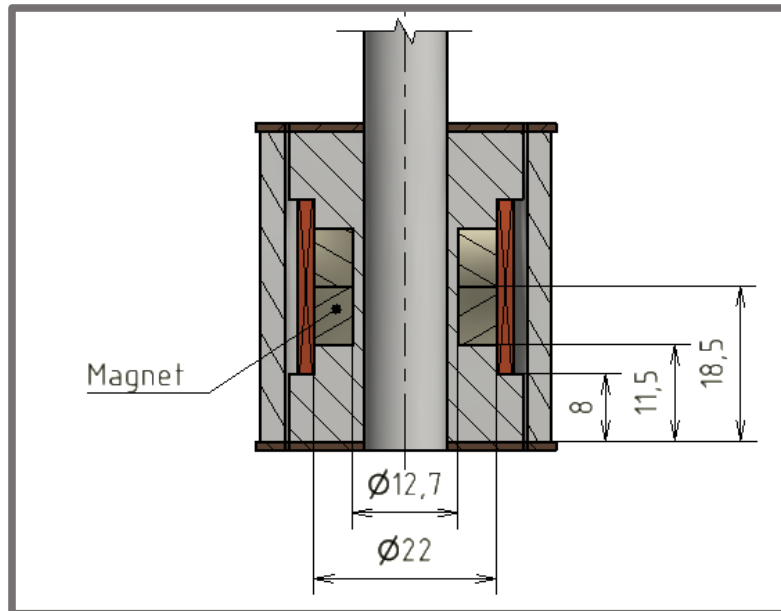
Obr. 25 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení negativním proudem 2 A

Maximální hodnota magnetické indukce dosažená při napájení negativním proudem o hodnotě 2 A je 834 mT. Při této hodnotě proudu magnetický tok protéká především střední částí tlumiče.

Tato varianta uložení magnetů je výhodná zejména kvůli vysokým hodnotám magnetické indukce v aktivní zóně i při odpojení napájení cívky. Hodnotu indukce však není možné příliš snížit, což je značnou nevýhodou. Dále je také zřejmé, že není možno tento typ konstrukce příliš objektivně posoudit, protože při jakékoliv malé změně umístění magnetů v podélném směru se budou výsledky výrazně lišit v závislosti na poměru velikostí částí aktivní zóny na vnější a vnitřní straně magnetu.

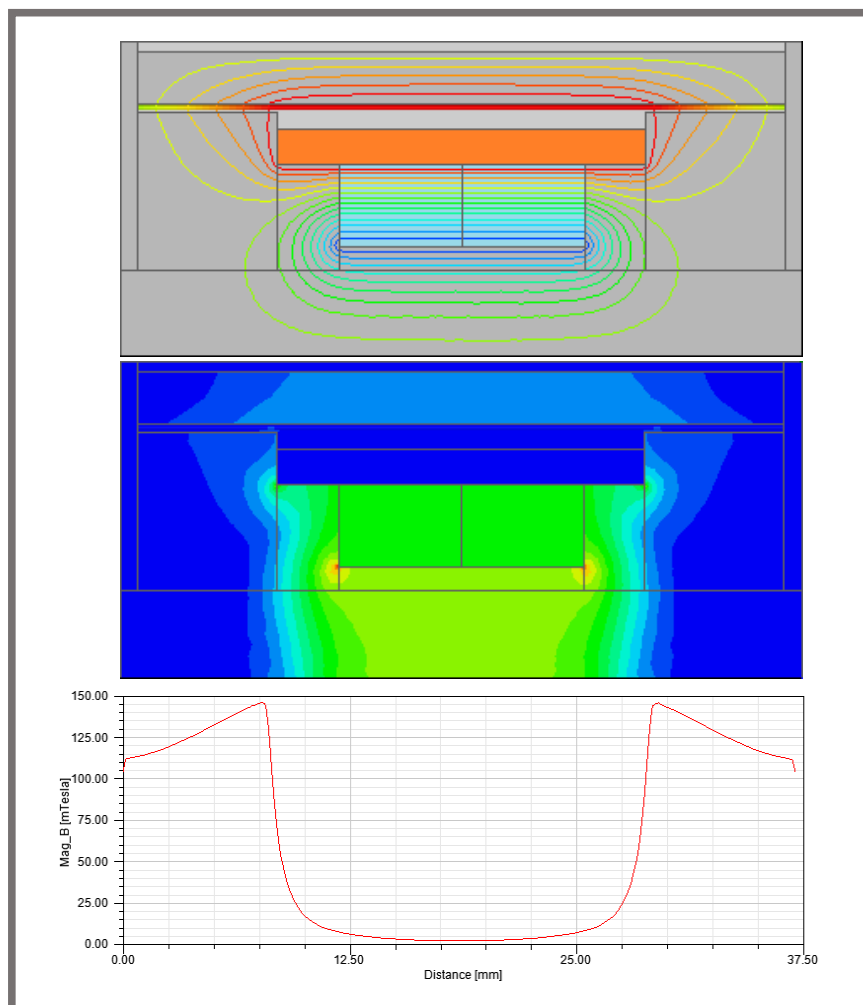
3.2 Uložení magnetů na vnitřním průměru cívk

Pro získání co nejvyšší hustoty magnetického indukčního toku v aktivní zóně je třeba zvolit polohu magnetů v těsné blízkosti cívk.



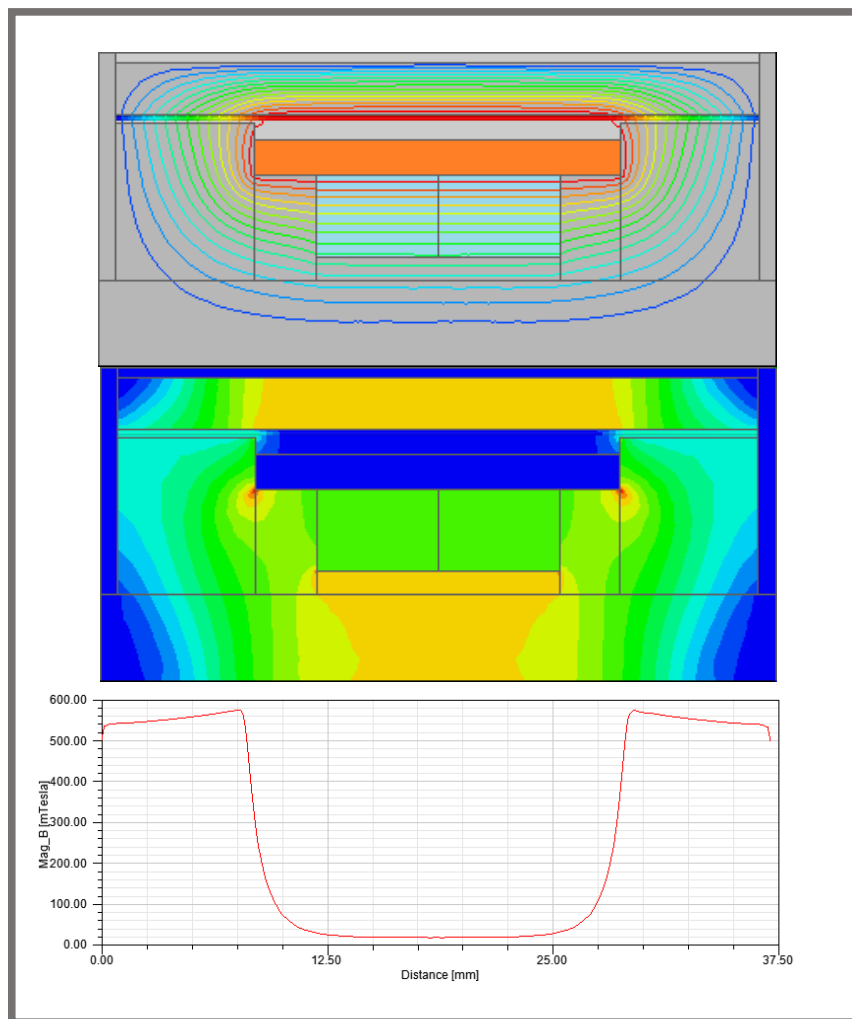
Obr. 26 Konceptní řešení uložení magnetů na vnitřním průměru cívk

V simulaci byly za účelem získání podobného objemu jako v předchozí variantě použity dva dostupné prstencové magnety s vnějším průměrem 22 mm, vnitřním průměrem 12,7 mm a tloušťkou 7 mm. Celkový objem magnetů je tedy 3548 mm^3 . Následují výsledky simulace na obrázcích 27, 28 a 29.



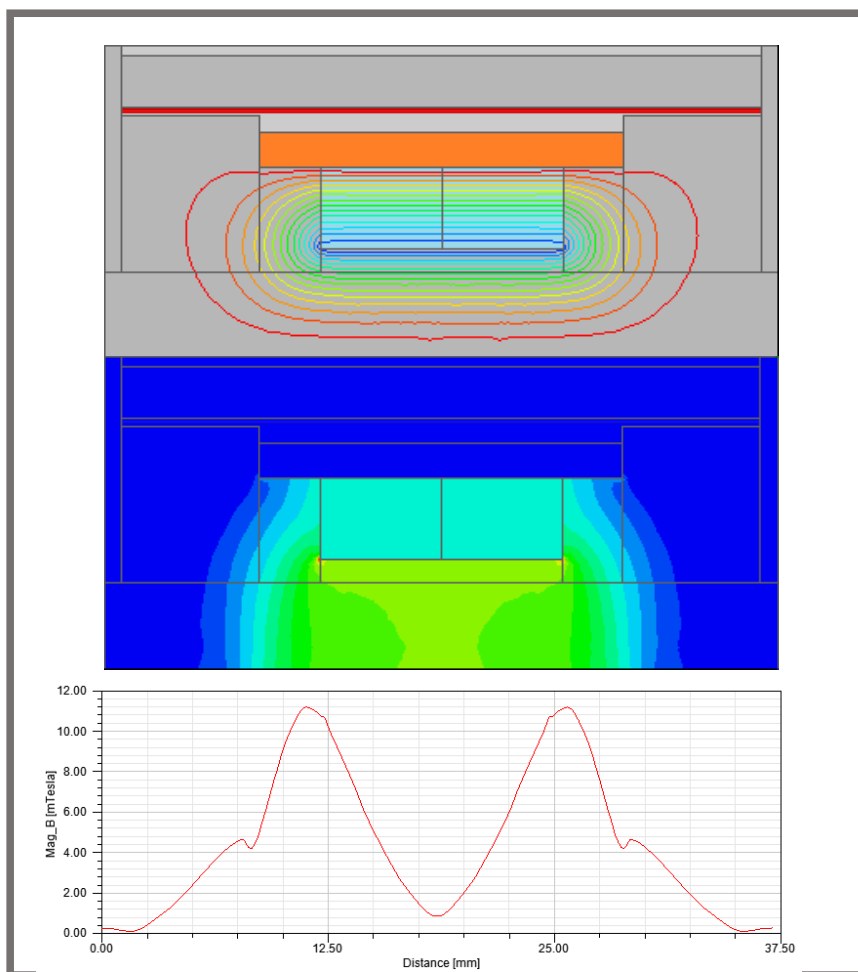
Obr. 27 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 0 A

Maximální hodnota magnetické indukce ve štěrbině způsobená pouze magnety je 146 mT.



Obr. 28 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A

Při napájení cívky proudem 2 A je maximální hodnota magnetické indukce ve šterbině 575 mT.



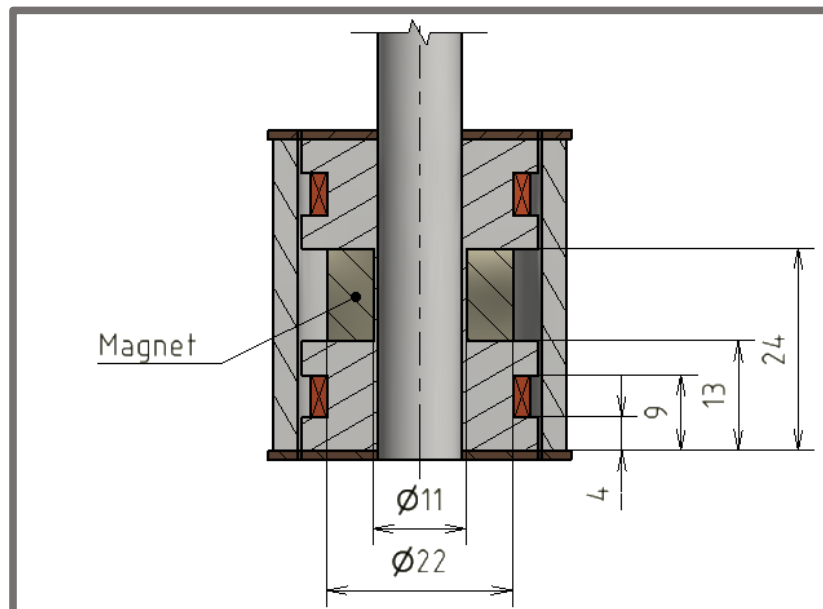
Obr. 29 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení negativním proudem 2 A

Nejnižší hodnota magnetické indukce 11,2 mT je dosažena při napájení cívky negativním proudem 2 A.

Ze simulace vyplývá, že tato varianta umožňuje dosažení velké škály hodnot magnetické indukce a zároveň lze dosáhnout velmi nízké minimální hodnoty magnetické indukce v aktivní zóně. Hodnota magnetické indukce způsobené pouze magnety je poměrně malá, což je zapříčiněno protékáním velké části magnetického toku střední částí tlumiče.

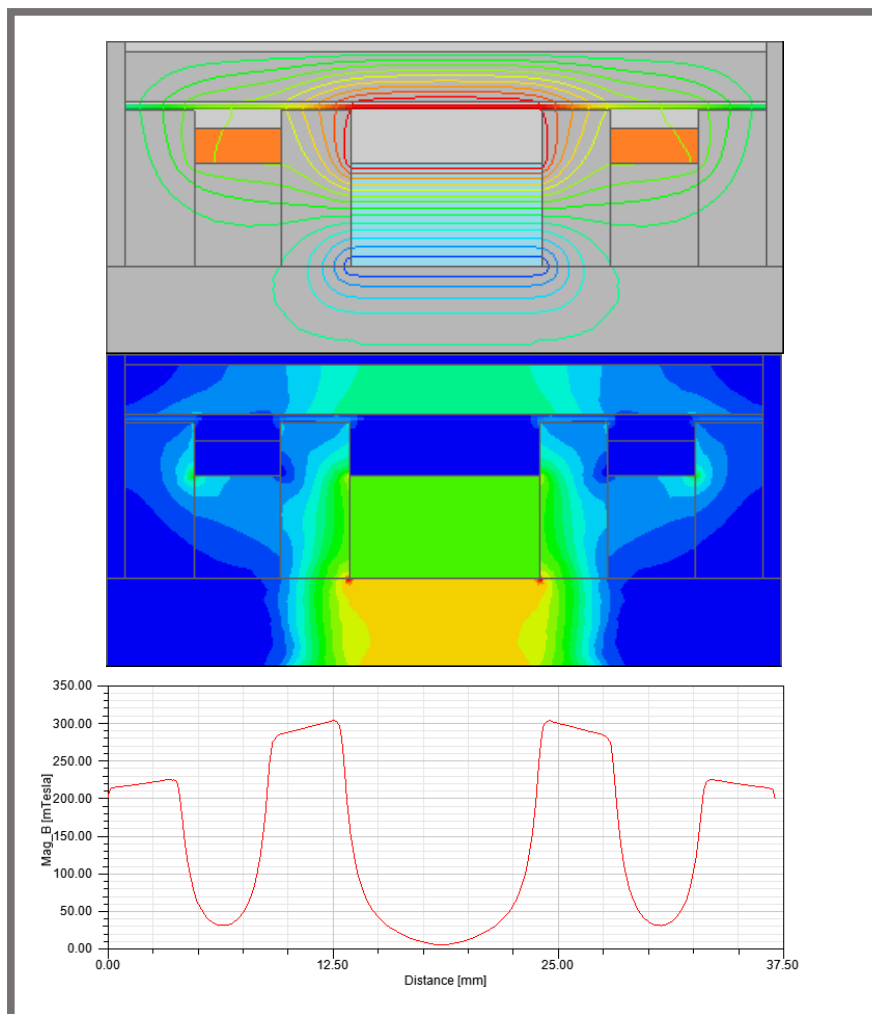
3.3 Umístění magnetu mezi dvě cívky

Původní cívka je zde rozdělena na dvě kratší cívky. Magnet je umístěn uprostřed mezi cívkami. Tato konstrukce vychází z první varianty. Umístění cívek okolo magnetu bylo zvoleno za účelem odstínění silného magnetického pole ve vnějších okrajích štěrbin. To se v první variantě nedalo příliš ovlivnit cívkou.



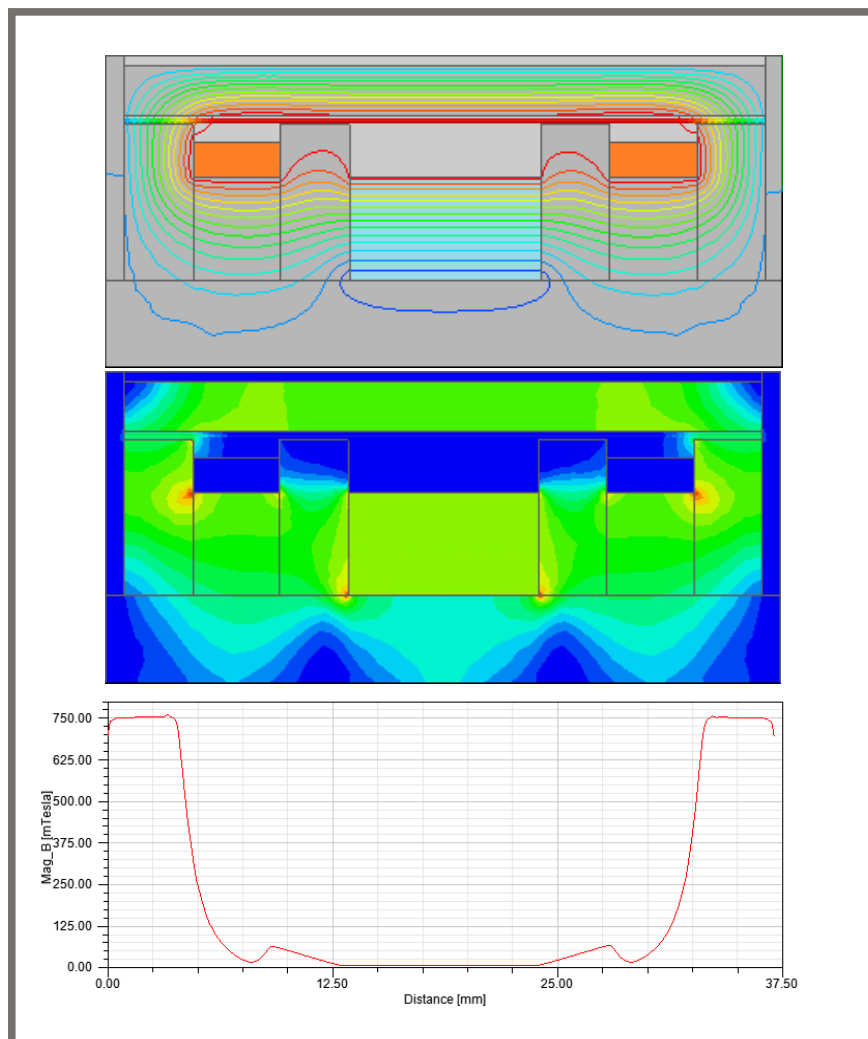
Obr. 30 Konceptní řešení uložení magnetu mezi dvě cívky

Byl opět volen prstencový magnet, tentokrát s vnějším průměrem 22 mm, vnitřním průměrem 11 mm a tloušťkou 11 mm. Jeho objem je 3318 mm^3 . Obrázky 31, 32 a 33 zobrazují výsledky simulace.



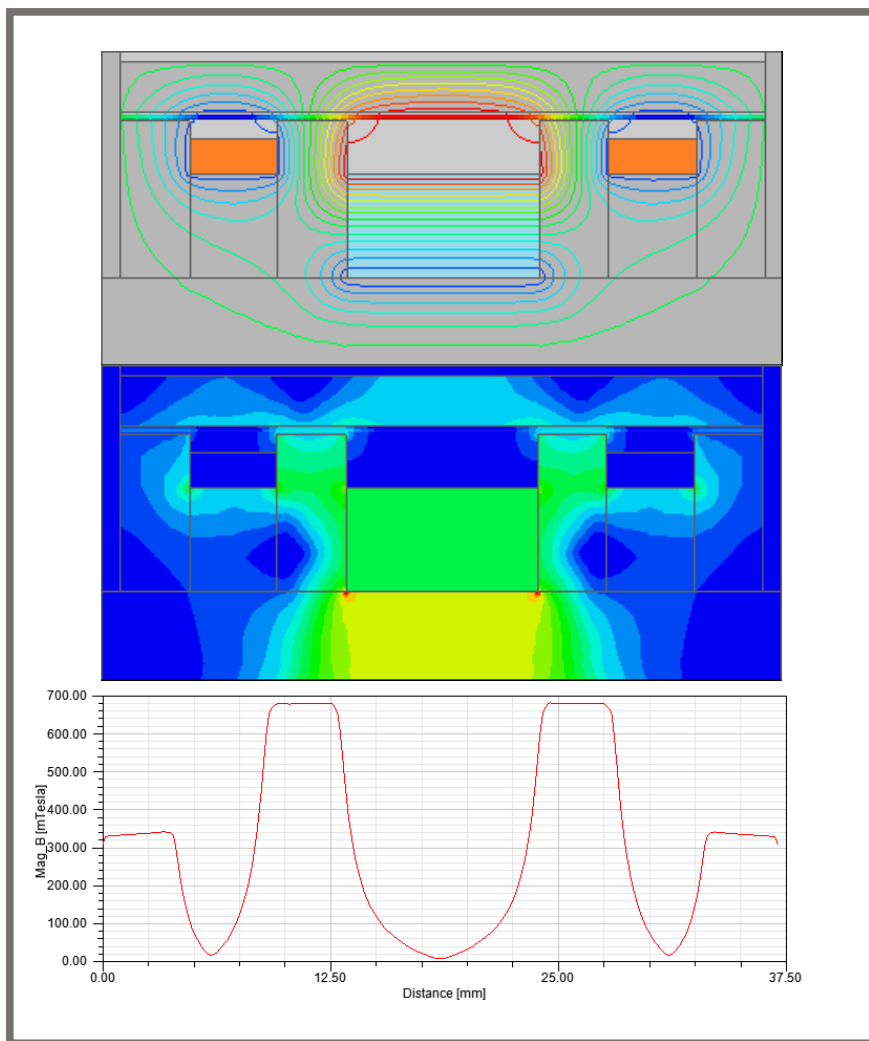
Obr. 31 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 0 A

Hodnota maximální magnetické indukce ve štěrbině dosažená pouze magnety je 304 mT.



Obr. 32 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A

Maximální hodnota indukce ve štěrbině 760 mT je dosažena při napájení cívek proudem 2 A. Magnetický indukční tok má nejvyšší koncentraci ve vnější části pístu.



Obr. 33 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení negativním proudem 2 A

Maximální hodnota indukce při napájení negativním proudem 2 A je 681 mT. Při tomto proudu magnetický indukční tok protéká výrazněji střední částí aktivní zóny.

Umístění magnetu mezi dvě cívky zajišťuje větší škálu dosažitelných hodnot magnetické indukce v aktivní zóně, než je v první variantě při zachování vysoké hodnoty indukce při výpadku napájení cívky. Stejně jako u první varianty však tento typ konstrukce není možno objektivně posoudit, protože jakákoliv změna polohy cívek v axiálním směru by zapříčinila výrazně odlišné výsledky.

3.4 Porovnání

Tabulka 2 obsahuje hodnoty magnetické indukce v jednotlivých případech.

Tab. 2 Hodnoty magnetické indukce u jednotlivých koncepčních řešení

	Proud 2 A	Proud 0 A	Proud -2 A
Varianta 1	739 mT	460 mT	834 mT
Varianta 2	575 mT	146 mT	11,2 mT
Varianta 3	760 mT	304 mT	681 mT

Nejvýhodnější variantou pro dané rozměry pístu se zdá být varianta 2. Její výhodou je vysoká škála dosažitelných hodnot magnetické indukce v aktivní zóně a výrazně lepší možnost odstínění magnetického pole magnetů pomocí cívky oproti ostatním variantám. Je zřejmé, že se při případných úpravách rozměrů příliš nezmění charakter závislosti magnetické indukce na procházejícím proudu.

3.5 Konstrukce pláště tlumiče varianty 2

Z výsledků simulací v předchozí kapitole lze vypožorovat, že v centrální části pláště dochází k nasycení magnetického obvodu. Je tedy třeba zjistit, jak změna tloušťky pláště ovlivní magnetické vlastnosti tlumiče. Provedeny byly simulace při tloušťkách pláště od 1 do 4 mm. Maximální tloušťka je omezena konstrukcí pouzdra tlumiče. Výsledky simulací jsou obsaženy v tabulce 3.

Tab. 3 Hodnoty magnetické indukce pro různé tloušťky pláště

Tloušťka pláště	Proud 2 A	Proud 0 A	Proud -2 A
1 mm	313 mT	118 mT	5,03 mT
2 mm	484 mT	131 mT	6,85 mT
3 mm	567 mT	152 mT	9,46 mT
4 mm	636 mT	154 mT	13,2 mT

Ze simulace vyplývá, že zvětšování tloušťky pláště vede k nárůstu maximální hodnoty magnetické indukce v aktivní zóně ve všech případech. Tloušťka pláště tedy bude zvolena 4 mm.

3.6 Závislost hodnot magnetické indukce na změně rozměrů magnetu

Aby bylo možno určit nejvýhodnější konstrukci, je třeba určit, jak se budou měnit vlastnosti při změně rozměru magnetu. Pro simulaci bude použito postupně 6 magnetických prstenců různých tlouštěk, přičemž se bude měnit pouze vnitřní průměr magnetu. Výška magnetu je zvolena stejně jako v předchozí variantě 2, což je 14 mm.

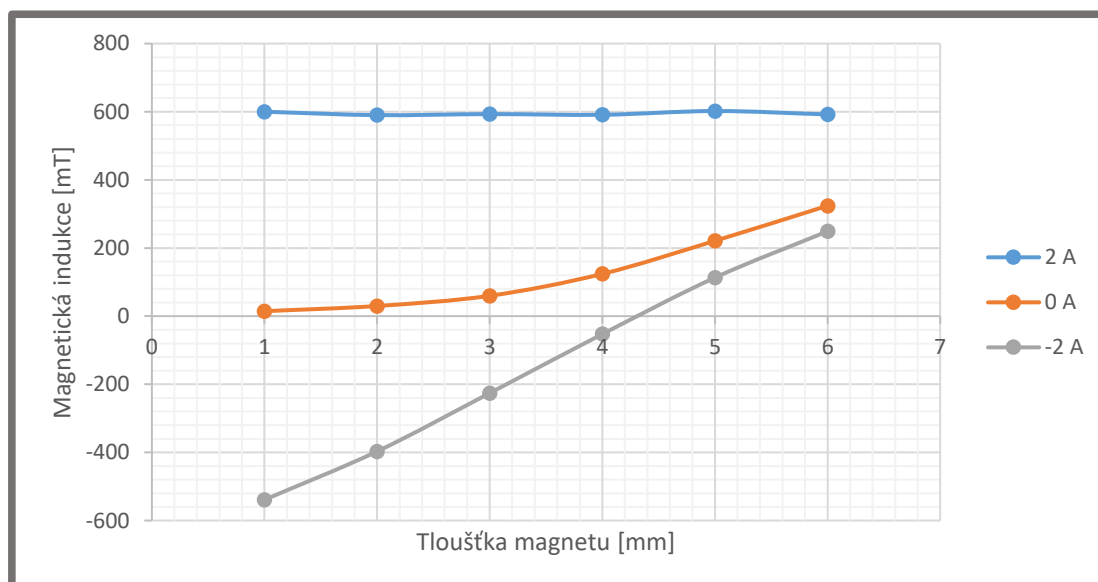
Hodnoty magnetické indukce pro jednotlivé vnitřní průměry jsou zapsány v tabulce 4.

Tab. 4 Hodnoty magnetické indukce pro různé tloušťky magnetu

Tloušťka magnetu	Proud 2 A	Proud 0 A	Proud -2 A
1 mm	600 mT	14,5 mT	539 mT
2 mm	590 mT	29,8 mT	397 mT
3 mm	593 mT	59,7 mT	226 mT
4 mm	591 mT	124 mT	52,7 mT
5 mm	602 mT	221 mT	113 mT
6 mm	592 mT	324 mT	249 mT

Z tabulky lze vyčíst, že maximální hodnota magnetické indukce při napájení proudem 2 A se při změně tloušťky téměř nemění. S rostoucí tloušťkou však roste hodnota magnetické indukce způsobené pouze magnety. Při napájení proudem negativním lze nejprve až do tloušťky 4 mm dosáhnout při určité hodnotě negativního proudu nulové hodnoty magnetické indukce v aktivní zóně, při tloušťce 5 mm již cívka není schopna při dovoleném pracovním proudu odstínit magnetické pole magnetu. Aby bylo dosaženo vysoké hodnoty magnetické indukce při výpadku napájení a zároveň co možná nejvyšší škály hodnot, je třeba použít při dané výšce magnetu tloušťku mezi 4 a 5 mm, kdy lze dosáhnout nulové hodnoty magnetické indukce při maximálním negativním proudu. Tomuto případu přibližně odpovídá výše zmíněná varianta 2, která obsahovala magnet tloušťky 4,65 mm.

Pro lepší představu lze sestavit diagram pro tabulku 4. Záporná hodnota magnetické indukce zde představuje maximální hodnotu magnetické indukce při opačně orientovaném magnetickém indukčním toku aktivní zónou.



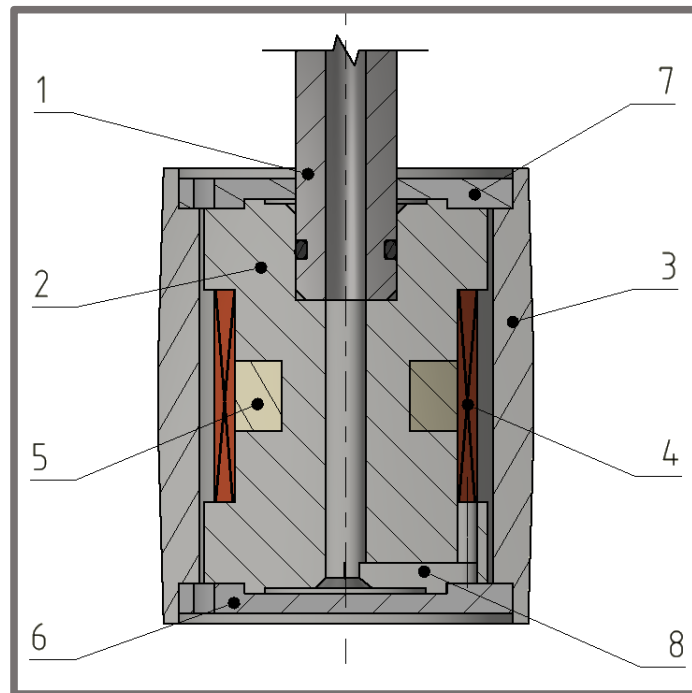
Obr. 34 Závislost magnetické indukce na tloušťce při různých napájecích proudech

Z obr. 34 lze vyčíst onu nulovou hodnotu magnetické indukce při maximálním negativním proudu v oblasti mezi tloušťkami 4 a 5 mm.

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

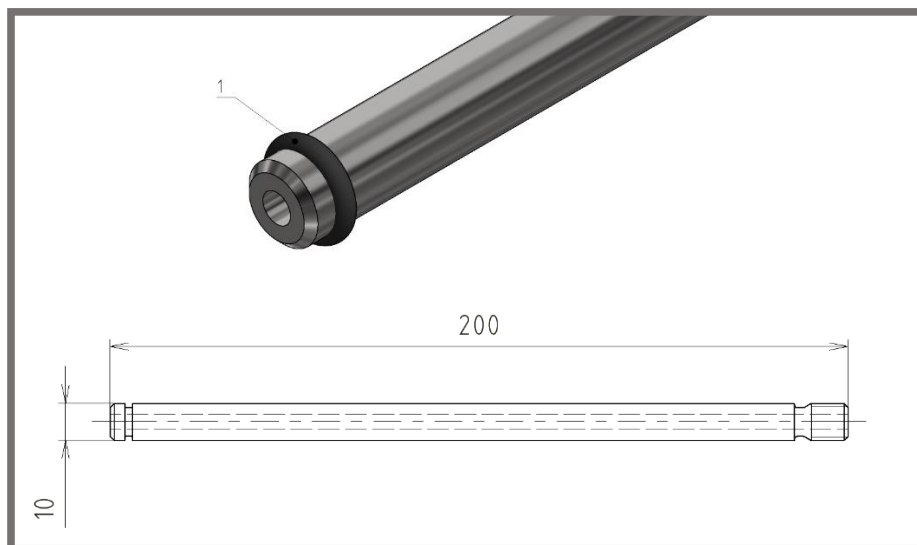
4.1 Konstrukce

Konečné konstrukční řešení obr. 35 obsahuje pístnici (1), která je zalisována do těla pístu (2). V něm je usazen prstencový magnet (5), okolo něhož je navinuta cívka (4). Napájecí drát cívky je odveden kanálkem (8). Horní víko (7) je nasazeno na pístnici a stejně jako spodní víko [8] upevněno pomocí pláště. Výška pístu je 45 mm a průměr podstav je 37 mm.



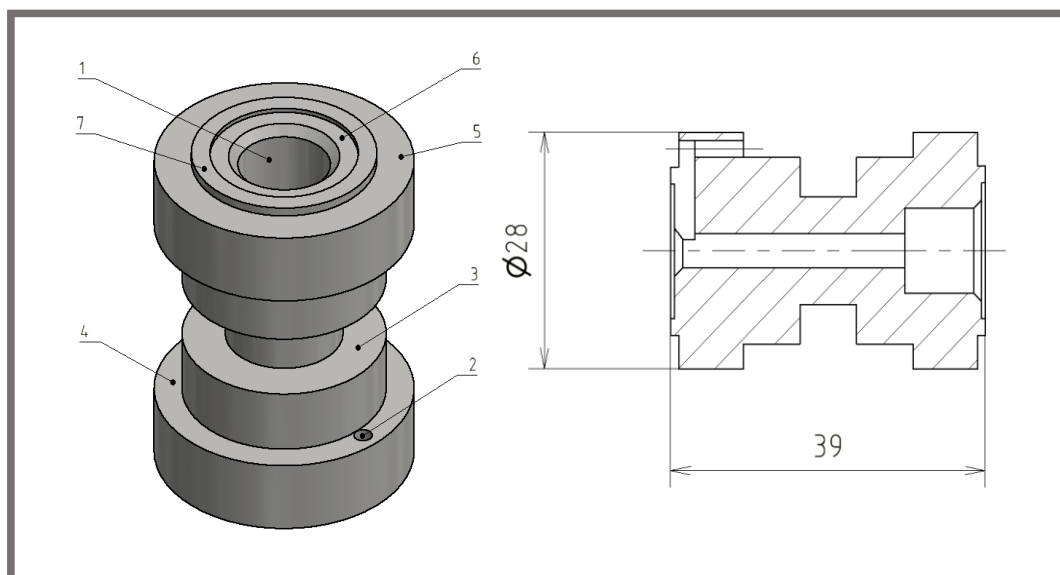
Obr. 35 Konstrukční řešení konečné varianty magnetoreologického tlumiče

Pístnice, která je zobrazena na obr. 37 bude vyrobena z chromované duté tyče o vnějším poloměru 10 mm s tolerancí $f7$ a vnitřním poloměru 4 mm [18]. Materiálem pístnice bude ocel ST52 BK+S s vysokou hodnotou tvrdosti. Uložení pístnice je voleno s přesahem kvůli upevnění pístu ve vertikální poloze. Do pístnice bude z důvodu utěsnění obrobena drážka pro pojistný O – kroužek 10x2,5 (1) [19].



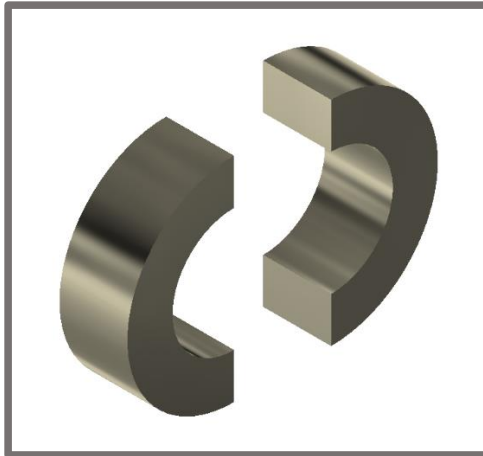
Obr. 37 Detail konce pístnice, který bude zalisován do těla pístu a základní rozměry pístnice

Tělo pístu na obr. 36 bude obrobena z kulatiny o průměru 30 mm z automatové oceli 11 109, která bude nejprve obrobena na 28 mm. Díra pro pístnici (1) a kanálek pro napájecí drát (2) budou vyvrtány. Ostatní prvky (3, 4, 5, 6) budou soustruženy a plochy pro dosednutí víček (7) budou navíc broušeny. Soustružení bude pro požadavek na centrování prováděno najednou při upnutí mezi hroty, z nichž jeden bude unášecí.



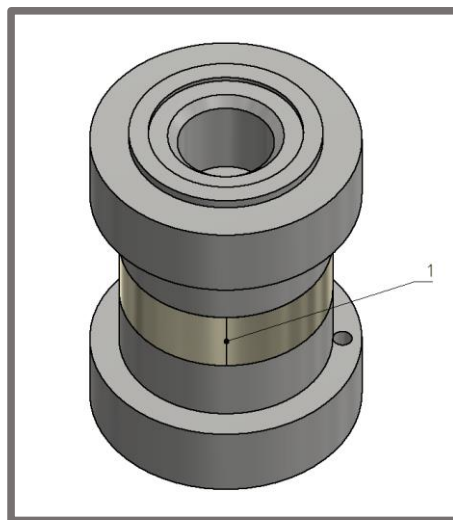
Obr. 36 Tělo pístu a jeho základní rozměry

Aby bylo možno do těla usadit magnet, je nutné jej nejdříve rozdělit na dva prstencové segmenty, jak je ukázáno na obr. 38.



Obr. 38 Tělo pístu a jeho základní rozměry

Protože je struktura magnetu podobná struktuře keramiky, bude velmi obtížné magnety dělit. Dělení magnetů probíhá, zejména před jejich magnetizací, diamantovými nástroji. Pokud je magnet již zmagnetován, je třeba jej při dělení intenzivně chladit, aby nedosáhl Curieovy teploty demagnetizace a zároveň odvádět magnetický prach, který je hořlavý. Vhodným způsobem se jeví řezání diamantovou pilou takzvaným mokrým řezem, kdy se přivádí do řezu chladicí voda. [20] Po rozdělení budou segmenty vestavěny do těla pístu, jak je ukázáno na obr. 39, tak, aby se řezané plochy co nejvíce přiblížily (1).



Obr. 39 Tělo pístu s vloženými segmenty magnetů

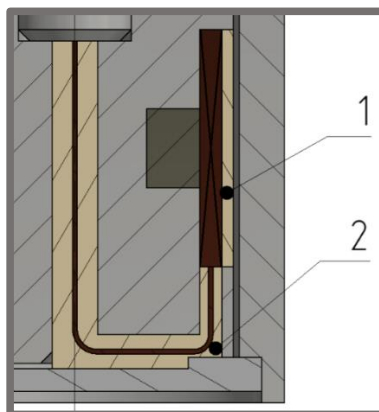
Pro ustavení budou sestavené magnety zality tenkou vrstvou plastu. Nad takto upevněné magnety se navine cívka s 220 závity. Průměr drátu cívky je 0,4 mm a při maximální proudové hustotě drátu $9 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ je maximální přípustný proud podle vzorce (4)

$$I = \frac{\pi \cdot d_d^2}{4} \cdot J = 1,13 \text{ A} \quad (4)$$

kde

d_d mm je průměr drátu
 J A·mm⁻² - přípustná proudová hustota

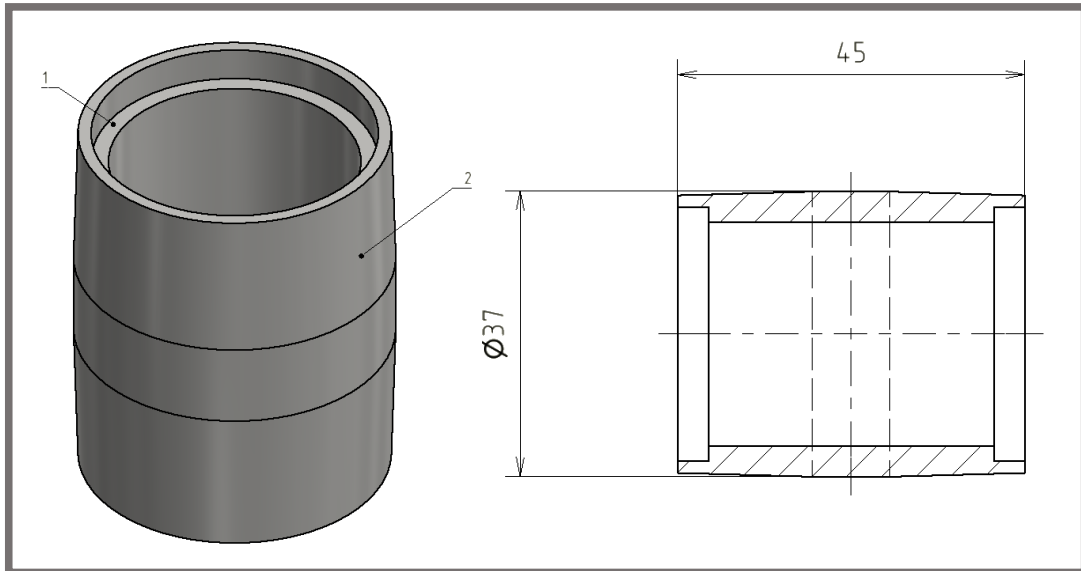
Maximální použitý proud bude tedy zvolen 1 A a magnetomotorické napětí bude při tomto proudu 220 Az.



Obr. 40 Provedení napájecího drátu tělem pístu

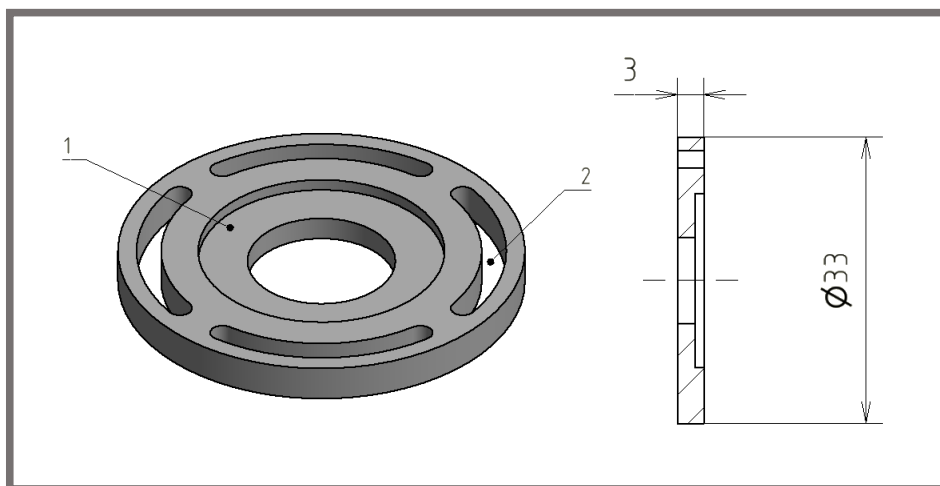
Napájecí drát se přivede otvorem v pístnici na jejímž konci k němu bude připájen drát cívky podle obr. 40. Ten se provede k cívce kanálkem v těle pístu. Tento kanálek bude z důvodu izolace, stejně jako cívka, zalit izolační hmotou (1, 2). Vhodnou hmotou se jeví například epoxydová pryskyřice ER1426, která odolává otěrům a udržuje si stabilitu a dobré mechanické vlastnosti i při teplotách od -40 do 120 °C [21].

Plášť pístu na obr. 41 bude zhotoven z kulatiny o průměru 38 mm z oceli 11 109. Ta se nejprve obrobí na 37 mm a dále se bude její průměr od středu k podstavám mírně zmenšovat do kuželového tvaru (2) kvůli lepšímu vedení pístu ve válci tlumiče. Poté bude v materiálu vyvrtán otvor, který bude tvořit vnější plochu aktivní zóny. Z důvodu vložení víček do pláště je třeba z obou stran pláště vytvořit drážky (1). Aby byly drážky na obou stranách vycentrovány, bude drážka z jedné strany soustružena a při stálém upnutí z druhé strany zpětně zahlubena. Předejde se tím možnému vyosení součásti při sestavení.



Obr. 41 Plášť pístu a jeho základní rozměry

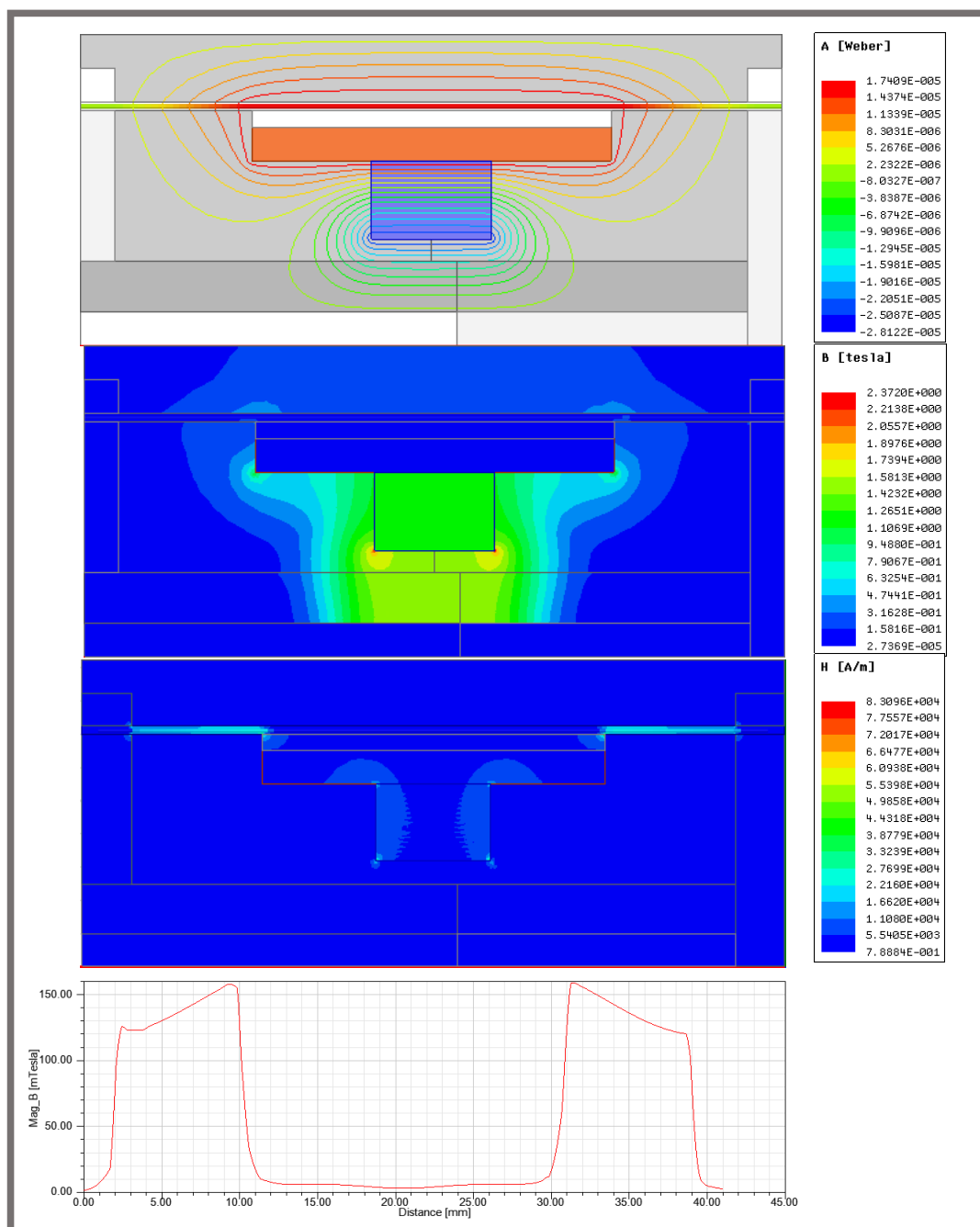
Konstantní tloušťka šterbiny po celé délce je zajištěna centrovanými víky obr. 42. Ta budou zhotovena z duralové kulatiny o průměru 35 mm, která bude obrobena na průměr 33 mm. Kvůli upevnění na výběžek z těla pístu je třeba jejich tloušťku uprostřed zmenšit vybroušením (1). Materiálem pro výrobu víka je zvolen dural vzhledem k jeho nízké relativní permeabilitě. Magnetoreologická kapalina bude protékat čtyřmi obloukovými otvory (2), které mají zejména kvůli obrobitelnosti větší šířku než samotná šterbina. Otvory budou vyfrézovány. Centrování pláště se uskuteční pomocí přechodného uložení pláště a vík. Kvůli axiálnímu pojištění vík musí být plášť zaválcován okolo jejich hran.



Obr. 42 Víko pístu a jeho základní rozměry

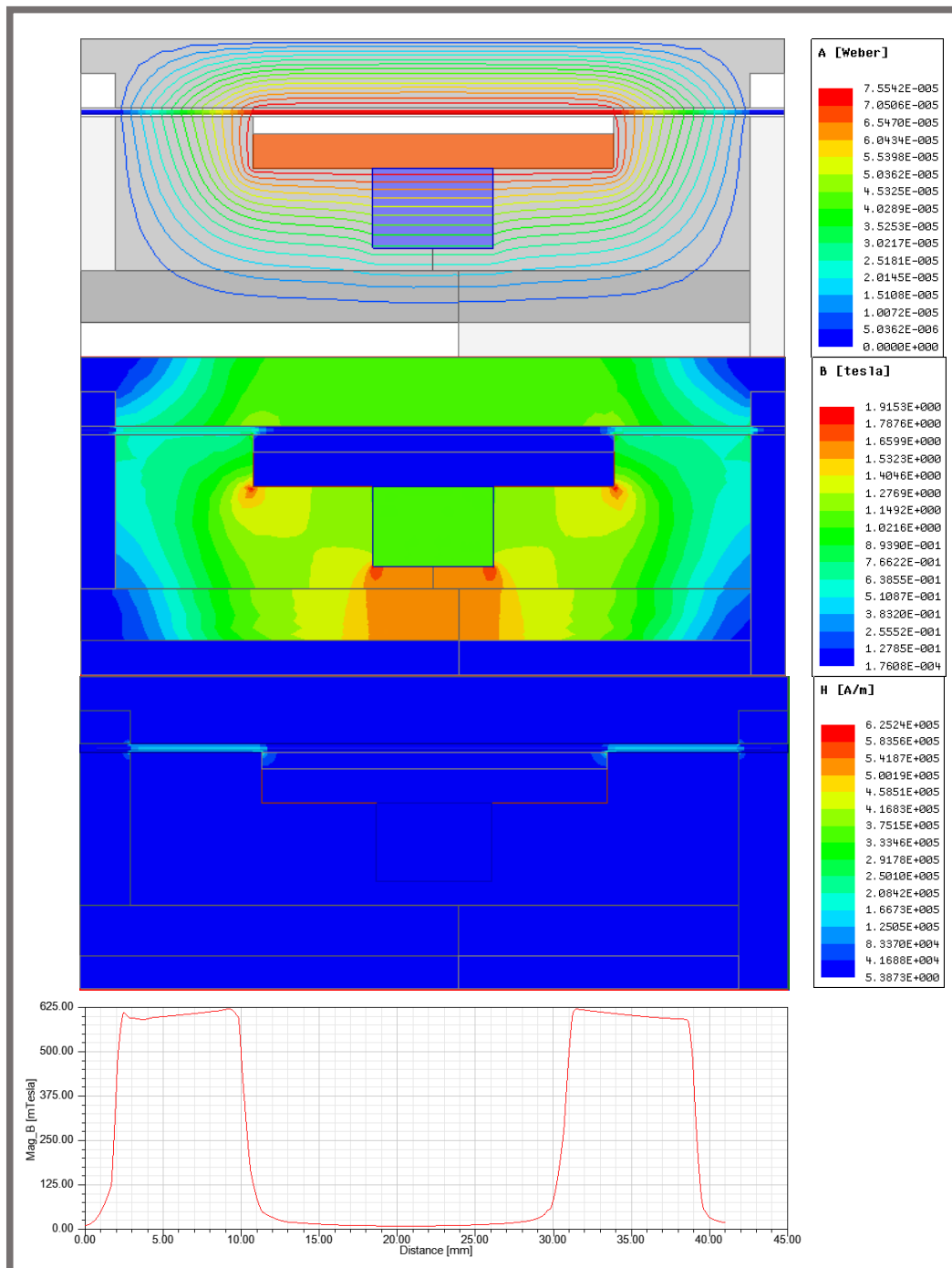
4.2 Magnetický model

Simulací tohoto tlumiče v softwaru Maxwell byly určeny maximální hodnoty magnetické indukce při maximálním pozitivním, maximálním negativním a nulovém napájecím proudu. Následují diagramy pro průběh magnetického indukčního toku, intenzity magnetického pole a magnetické indukce. Diagramy intenzity magnetického pole nejsou příliš názorné, protože se nejvyšší intenzita koncentruje na malých oblastech na rozhraní kovu a štěrbině.



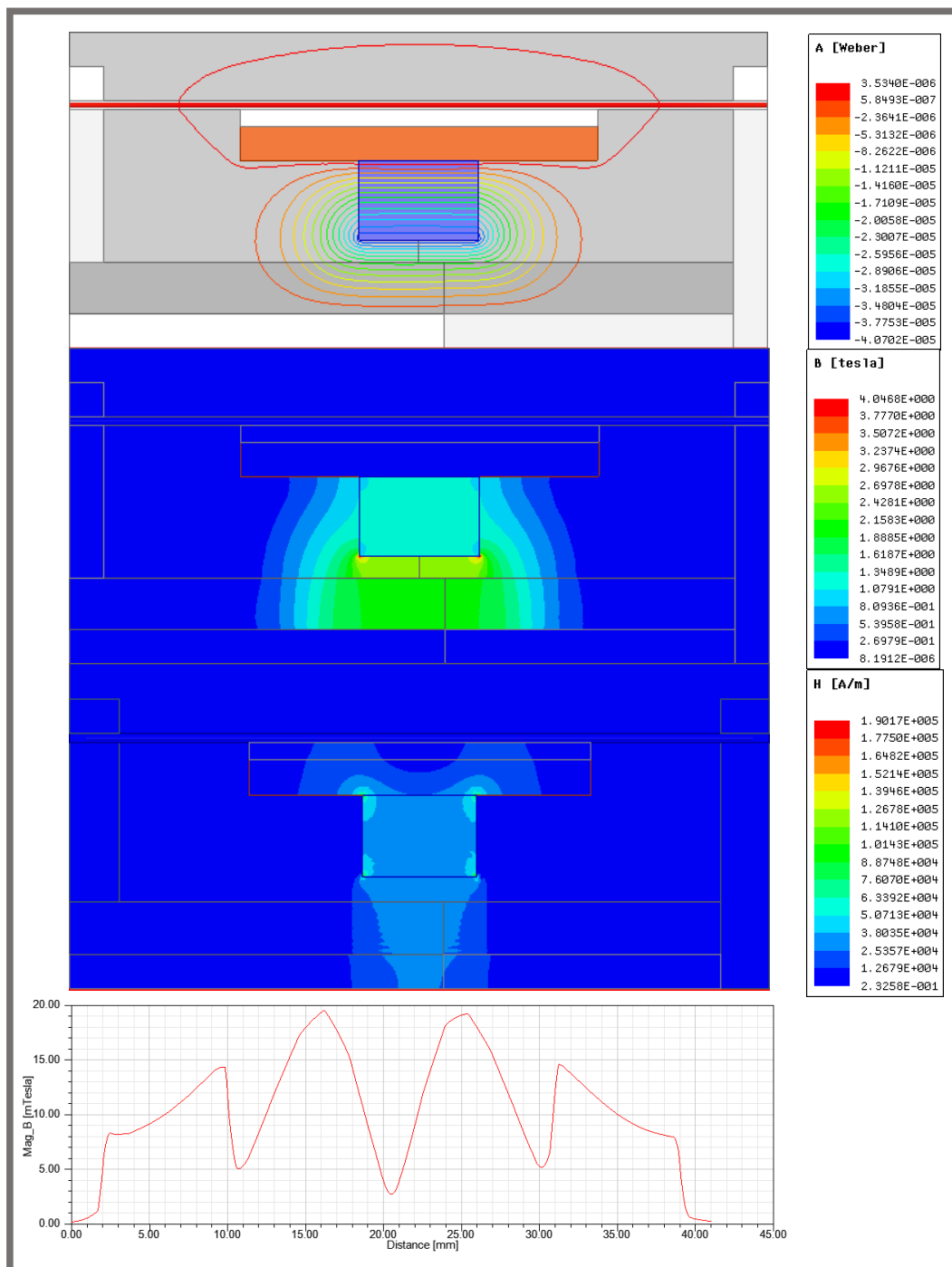
Obr. 43 Rozložení magnetického indukčního toku, magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pistu tlumiče a rozložení magnetické indukce v aktivní zóně tlumiče při napájení proudem 0 A

Maximální hodnota magnetické indukce při nulovém napájecím proudu je 160 mT. Podstatná část magnetického indukčního toku přitom protéká smyčkou ve střední části pistu. Magnetické pole má největší intenzitu v aktivní zóně.



Obr. 44 Rozložení magnetického indukčního toku, magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pistu tlumiče a rozložení magnetické indukce v aktivní zóně tlumiče při napájení proudem 1 A

Při napájení proudem 1 A bylo dosaženo maximální hodnoty magnetické indukce 617 mT. Magnetický obvod nyní tvoří jednu smyčku a podstatná část magnetických siločar prochází aktivní zónou. Magnetické pole je opět nejintenzivnější ve štěrbině.



Obr. 45 Rozložení magnetického indukčního toku, magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pístu tlumiče a rozložení magnetické indukce v aktivní zóně tlumiče při napájení negativním proudem 1 A

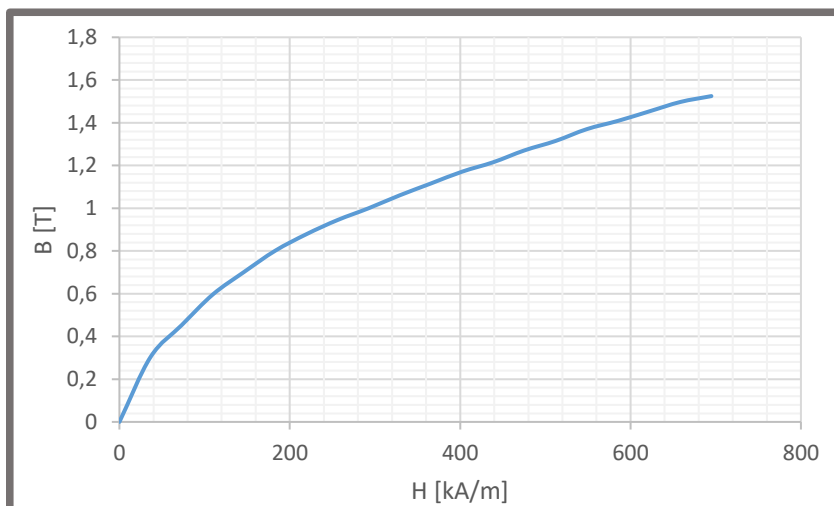
Při napájení negativním proudem 1 A dosahuje magnetická indukce v aktivní zóně nejvyšší hodnoty 19,3 mT. Téměř všechen magnetický tok proudí smyčkou ve střední části pístu. Oproti předchozím simulacím lze pozorovat pokles intenzity magnetického pole v aktivní zóně.

Výsledky magnetického modelu konstrukční varianty odpovídají výsledkům vybrané varianty v koncepčním řešení.

4.2.1 Záměna magnetoreologické kapaliny

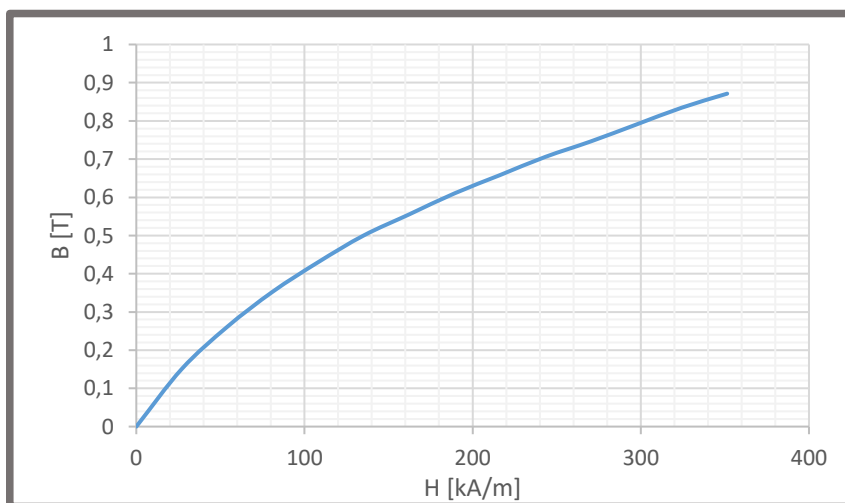
Rozhodující podíl na výsledné tlumící síle má také výběr magnetoreologické kapaliny. Proto budou postupně simulovány výsledky magnetického modelu při použití dalších dvou dostupných kapalin.

Nejprve bude simulována záměna kapaliny MRF-132DG za kapalinu MRF-140CG.



Obr. 46 B-H křivka kapaliny MRF-140CG [24]

Poté bude ještě zaměněna za kapalinu MRF-122EG.



Obr. 47 B-H křivka kapaliny MRF-122EG [25]

Protože B-H křivka kapaliny 140CG má díky vyššímu obsahu kovových částic větší gradient růstu magnetické indukce, lze očekávat vyšší hodnoty magnetické indukce než u kapaliny 132DG. U B-H křivky kapaliny 122EG, která obsahuje méně kovových částic, je naopak gradient růstu menší, a lze proto očekávat nižší hodnoty magnetické indukce.

Výsledky simulací jsou obsaženy v tabulce:

Tab. 5 Hodnoty magnetické indukce při použití různých magnetoreologických kapalin

Napájecí proud cívky I [A]	MRF-132DG B [mT]	MRF-140CG B [mT]	MRF-122EG B [mT]
1	617	653	541
0	160	171	140
- 1	19,3	19,4	19,1

Podle očekávání jsou maximální hodnoty magnetické indukce při použití kapaliny 140CG u všech simulovaných proudů vyšší a při použití kapaliny 122EG naopak nižší. Nejmenší a téměř nepatrná změna nastává při maximálním záporném proudu, což značí velkou výhodu použití kapaliny MRF-140CG. Ta má však vzhledem k ostatním kapalinám příliš vysokou viskozitu, což by způsobilo značné pasivní tlumení. Proto bude použita kapalina MRF-132DG.

4.3 Zjednodušený hydraulický model

4.3

Další část bude věnována zjednodušenému výpočtu tlumící síly tlumiče. V metodice výpočtu není uvažována třecí síla těsnících manžet a je uvažováno rovnoměrné rozložení magnetické indukce v aktivní zóně.

4.3.1 Metodika výpočtu

4.3.1

Tlumící sílu je možno vyjádřit ze vzorce (5). [22]

$$F_{\tau} = c \cdot \frac{\tau_0 \cdot L \cdot A_p}{h} \quad (5)$$

kde

A_p	m	je plocha podstavy pístu
τ_0	Pa	- mez toku
h	m	- tloušťka štěrbin dána konstrukcí:
L	m	- délka aktivní zóny dána konstrukcí:
c	-	- veličina daná vztahem (6) [22]

$$c = 2,07 + \frac{1}{1 + 0,4 \cdot \frac{w \cdot h^2 \cdot \tau_0}{12 \cdot A_p \cdot v_0 \cdot \eta}} \quad (6)$$

kde

w m je obvod štěrbiny
 v_0 m·s⁻¹ - rychlost pohybu pístu tlumiče
 η Pa·s - viskozita kapaliny

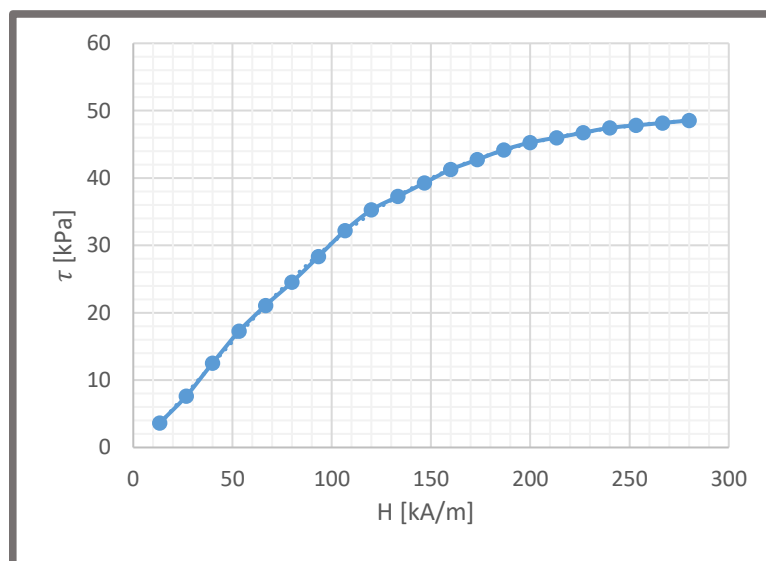
Protože je uvažovaný tlumič jednoplášťový, tlak pod pístem je při pohybu vyrovnáván plynovou náplní a pro výpočet tlumení je tedy uvažována plocha horní podstavy (7). [23]

$$A_p = \frac{\pi \cdot (d_o^2 - d_p^2)}{4} = 962 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

kde

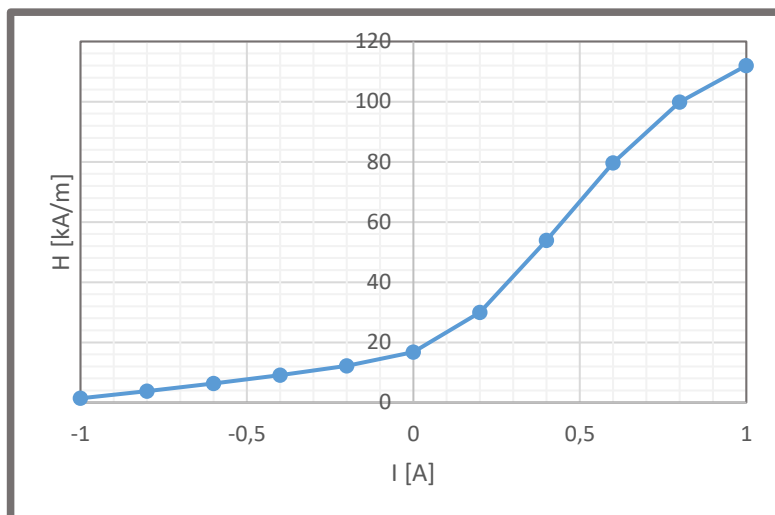
d_o m je vnější průměr pístu
 d_p m - průměr pístnice

Mez toku τ_0 magnetoreologické kapaliny je závislá na magnetickém indukčním toku podle následující charakteristiky na obr. 48.



Obr. 48 Závislost meze toku kapaliny na intenzitě magnetického pole [17]

Potřebné hodnoty magnetického indukčního toku lze určit ze simulace. Charakteristika má následující podobu dle obr. 49.



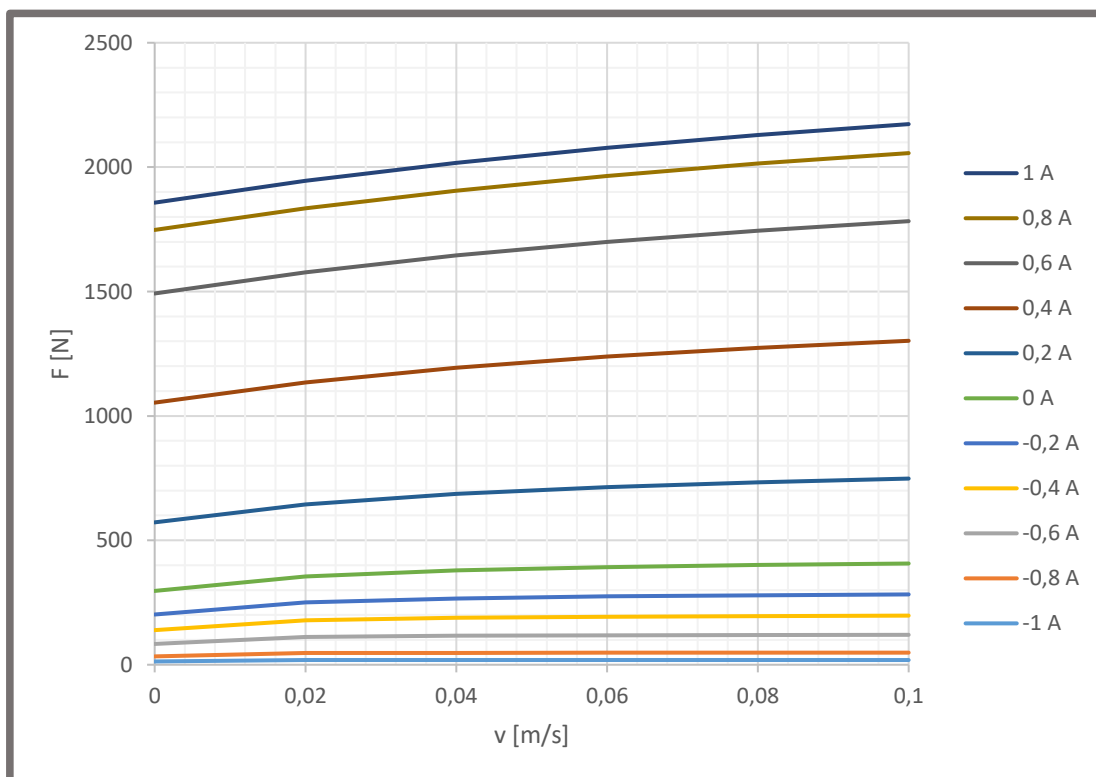
Obr. 49 Závislost intenzity magnetického pole na napájecím proudu

Zpětně lze tedy určit závislost tlumicí síly na rychlosti pístu při různém napájení cívky.

4.3.2 Výsledky

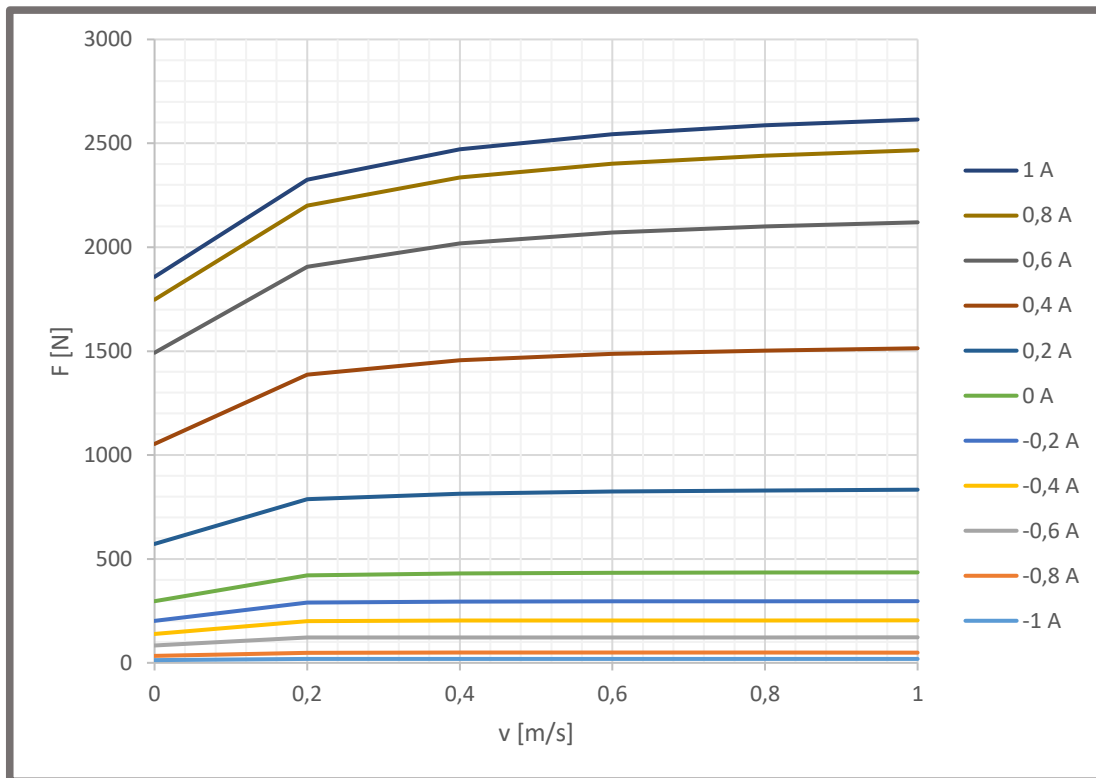
4.3.2

Graf této závislosti při amplitudě rychlosti pístu do $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je vyobrazen na obr. 50.



Obr. 50 Závislost tlumicí síly na rychlosti pohybu tlumiče v rozsahu proudu -1 a 1 A s maximální rychlostí $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Při amplitudě rychlosti pístu do $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je podoba charakteristiky následující:



Obr. 51 Závislost tlumící síly na rychlosti pohybu tlumiče v rozsahu proudu -1 a 1 A s maximální rychlostí $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tabulka 6 dále obsahuje hodnoty tlumící síly v závislosti na proudu při rychlostech pístu $0,1$ a $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tab. 6 Hodnoty tlumící síly v závislosti na rychlosti pístu a napájecího proudu

Napájecí proud I [A]	Tlumící síla při dané rychlosti pístu F_t [N]	
	$v = 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
-1,0	19	19
-0,8	49	49
-0,6	120	123
-0,4	197	205
-0,2	283	297
0,0	407	435
0,2	748	833
0,4	1302	1514
0,6	1783	2120
0,8	2056	2467
1,0	2173	2615

DISKUZE

Možnosti fail-safe systému

Cílem práce bylo zhodnotit stav současného poznání, navrhnout konstrukční řešení a vypracovat zjednodušený magnetický a hydraulický model magnetoreologického tlumiče s fail-safe opatřením. Jak bylo během práce zjištěno, hlavním úkolem konstruktéra, který se fail-safe opatřením zabývá, je vytvořit vhodný magnetický obvod v pístu tlumiče. Ten by měl být koncipován tak, aby bylo dosaženo v aktivní zóně vysoké hodnoty intenzity magnetického pole magnetů a zároveň zde byla možnost magnetické pole magnetů odstínit vhodným umístěním cívky. Možností, jak toho dosáhnout, je několik. Konstrukční řešení této práce je založeno na docela jednoduché variantě, která dosahuje značné tlumící síly při výpadku napájení. Zároveň také poskytuje prostor pro konstrukční úpravy pístu tlumiče, aniž by se jeho magnetické vlastnosti příliš změnily. Pokud by bylo třeba dosáhnout vyšších hodnot tlumící síly při výpadku napájení, byla by zřejmě vhodnější některá ze zavrnutých koncepčních variant. Konstrukce by poté musela být velmi důkladně vyladěna tak, aby bylo možné magnetické pole magnetů odstínit. Jakkoliv malá konstrukční změna totiž může v těchto variantách výsledné magnetické vlastnosti velmi negativně ovlivnit. Kvůli konstrukci výchozího tlumiče, na který bylo fail-safe opatření aplikováno nebyla prozkoumána jiná zajímavá možnost. Pokud by měl plášť pístu větší tloušťku, mohl by být magnet umístěn v něm, což by poskytovalo další možné konstrukční varianty.

Možné rozšíření práce

Pro vyšší přesnost výsledku by bylo třeba změnit metodiky výpočtů. Magnetický a hydraulický model, který byl sestaven, je zjednodušený. Pro simulaci magnetického modelu byl použit píst, který nepočítá s kanálkem pro napájecí drát. Při výpočtu hydraulického modelu byl použit zjednodušený výpočet, který nepočítá s tvarovými prvky podstav tlumiče. Pro výpočet tlumící síly by bylo jistě výhodnější použití výpočetního softwaru. Tyto úpravy metodik by sice zvýšily přesnost, obecně se ale zjednodušené řešení od reality příliš neliší.

ZÁVĚR

V bakalářské práci byl podle osnovy nejprve shrnut stav současného poznání v oblasti fail-safe systémů MR tlumičů. Bylo nalezeno pět současných variant tlumičů obsahujících permanentní magnety a z těch byly odvozeny koncepční varianty tlumiče. Použitými permanentními magnety pro konstrukci byly zvoleny neodymové magnety s vysokou hodnotou maximálního energetického součinu. Sestaveny byly zjednodušené magnetické modely koncepčních návrhů. Podle výsledků softwarové analýzy metodou konečných prvků byla vybrána varianta, která se zdála být nejvhodnější. Vhodnost byla posuzována z hlediska nejvyšší hodnoty magnetické indukce dosažené v aktivní zóně tlumiče pomocí magnetů a zároveň dle možnosti odstínit magnetické pole magnetů pomocí napájení cívky tlumiče. Varianta postoupená ke konstrukční části byla rozdělena na jednotlivé součásti s ohledem zejména na sestavitelnost, vycentrování pláště a centrální části pístu a upevnění pístnice v pístu. Součásti také musely být zkonstruovány tak, aby ve výsledném pístu vznikl magnetický obvod shodný s magnetickým obvodem v koncepční variantě. Porovnány byly výsledky analýzy magnetického modelu při použití různých kapalin, aby byla vybrána nejvhodnější z nich. Poté již byl sestaven zjednodušený hydraulický model a F-v charakteristika tlumiče při různých napájecích proudech cívky. Hlavní cíl byl splněn, protože bylo dosaženo značné tlumicí síly při nulovém napájecím proudu cívky.

BIBLIOGRAFIE

- [1] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přeprac., rozš., aktualiz. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006, 464 s. : il. ISBN 802396464X.
- [2] SAJDL, Jan. Dynamic Chassis Controll. *Autolexicon* [online]. autolexicon.net, 2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/dcc-dynamic-chassis-control/>
- [3] *Magnetoreologický tlumič* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://img.auto.cz/autofun_cz/img/galleries/01_4bb43cf2e412f.jpg
- [4] *Magnetoreologická kapalina* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/source/html/39980/media/image2.jpeg>
- [5] CARLSON, J. a Mark JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*. Lord Drice, Cary, NC, 27511-7900, USA: Lord Corporation, Material Division, 2000, **2000**(10), 555-569.
- [6] LAZAR, J. *Magnetoreologický tlumič kmitání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011, 57 s. Diplmová práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [7] *Řez magnetoreologickým tlumičem* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/Images/damper_magnetorheological_piston_coil.gif
- [8] BÖSE, H., J. EHRILICH a A.-M. TRENDLER. Performance of Magnetorheological Fluids in a Novel Damper With Excellent Fail-Safe Behavior. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. IOP Publishing Ltd, 2009, **149**(1) [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/149/1/012039/pdf>
- [9] ZHANG, H., C. LIAO, M. YU a S. HUANG. A study of an inner bypass magneto-rheological damper with magnetic bias. *Smart Materials and Structures* [online]. IOP Publishing Ltd, 2007, **16**(5) [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/16/5/N03/pdf>
- [10] CHENGBIN, Du, Wan FAXUE a Yu GUOJUN. A magnetic flux leakage study of a self-decoupling magnetorheological damper. *Smart Materials and Structures* [online]. IOP Publishing Ltd, 2011, **20**(6) [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/20/6/065019/pdf>
- [11] EHRILICH, J., J. VRBATA a H. BÖSE. Novel magnetorheological damper with improved energy efficiency. *ACTUATOR: International Conference on New Actuators: International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems* [online]. Bremen: WFB Wirtschaftsförderung, 2007, **12**(6), 545-548 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: https://www.tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20110100299/Novel-magnetorheological-damper-with-improved-energy/?tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn
- [12] SAPINSKI, Bogdan. MAGNETORHEOLOGICAL FLUID DAMPERS WITH RADIALY-SHAPED GAP AND CONTACT-LESS SEALING. *JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS* [online]. Warsaw, 2005,

- 43(2), 223-240 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://www.ptmts.org.pl/2005-2-sapinski.pdf>
- [13] *BH křivka* [online]. In: . b.r. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://media1.britannica.com/eb-media/60/2260-004-3BB1D523.jpg>
- [14] *ABC Magnet* [online]. Praha: ABC MAGNET s.r.o., 2012 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/>
- [15] STUPAK, Joseph. *Methods of Magnetizing Permanent Magnets* [online]. Oersted Technology, 2000 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <http://oersted.com/magnetizing.PDF>
- [16] Magnets & Magnetic part II. *MEDER electronic group* [online]. Standex-Meder Electronics, Inc., 2009 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: https://standexelectronics.com/wp-content/uploads/Reed_Academy_Magnets_part_II.pdf
- [17] *MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid: LORD TECHNICAL DATA*. 2011. Dostupné také z: http://www.lord.com/sites/default/files/Documents/TechnicalDataSheet/DS7015_MRF-132DGMRFfluid.pdf
- [18] Katalog hutního materiálu. *Hydraulics* [online]. 2011 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://www.hydraulics.cz/katalog_hutniho_materialu.pdf#page=8
- [19] O-kroužky: Seznam forem. *Hennlich těsnění* [online]. 2017 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://tesneni.hennlich.cz/uploads/Rozm%C4%9Brov%C3%A9_%C5%99ady_OR.pdf
- [20] Magnet basics. *First 4 magnets* [online]. Magnet Expert Ltd., b.r. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.first4magnets.com/tech-centre-i61/frequently-asked-questions-i69#anchor14>
- [21] Encapsulation Resins. *Electrolube* [online]. 2015 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: http://www.electrolube.com/products/polyurethane-epoxy-resins/er1426/resins_epoxy/
- [22] YANG, G., B.F. SPENCER JR., J.D. CARLSON a M.K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*. 2002, (24), 309-323.
- [23] DIXON, John. *The Shock Absorber Handbook*. 1. vyd. Warrendale: SAE Society of automotive Engineers, 1999, 495 s. ISBN 0768000505.
- [24] *MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid: LORD TECHNICAL DATA*. 2008. Dostupné také z: <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7012.pdf>
- [25] *MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid: LORD TECHNICAL DATA*. 2008. Dostupné také z: http://www.lordmrstore.com/_literature_231216/Data_Sheet_-_MRF-122EG_Magneto-Rheological_Fluid

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Popis Magnetoreologického tlumiče [23]	8
Obr. 2 Reakce částic magnetoreologické kapaliny na přítomnost magnetického pole [1]	9
Obr. 3 Řez magnetoreologickým tlumičem [5]	11
Obr. 4 Možné podoby magnetického obvodu tlumičem v závislosti na napájení cívky [6]	12
Obr. 5 Závislost tlumící síly na výchylce pístu tlumiče při různých proudech [6]	12
Obr. 6 Schéma konstrukce tlumiče [7]	13
Obr. 7 Závislosti tlumící síly na výchylce pístu tlumiče při rychlostech 0,05 a 0,1 m · s ⁻¹ a při různých proudech [7].....	13
Obr. 8 Konstrukční schéma tlumiče s oběma písty [8]	14
Obr. 9 Konstrukce hlavního pístu [8]	14
Obr. 10 Konstrukce vedlejšího pístu [8]	15
Obr. 11 Závislosti tlumící síly na výchylce při amplitudách 60 a 5 mm [8].....	15
Obr. 12 Konstrukce pístu daného tlumiče [9].....	16
Obr. 13 Závislost tlumící síly na výchylce pístu tlumiče při daných proudech [9]...	16
Obr. 14 Detaily konstrukce daného tlumiče [10]	17
Obr. 15 Umístění cívek a magnetů v pístu tlumiče [10].....	17
Obr. 16 Závislosti tlumící síly na výchylce pístu tlumiče při amplitudách výchylky 10 a 1,5 mm [10]	18
Obr. 17 Hysterezní smyčka [11].....	18
Obr. 18 Konstrukce výchozího tlumiče	23
Obr. 19 B-H křivka pro ocel 11 109 byla poskytnuta vedoucím práce	24
Obr. 20 B-H křivka pro magnetoreologickou kapalinu MRF-132DG [15].....	24
Obr. 21 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A	25
Obr. 22 Konceptní řešení uložení magnetů okolo cívky.....	26
Obr. 23 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 0 A	27
Obr. 24 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A	28
Obr. 25 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení negativním proudem 2 A ...	29
Obr. 26 Konceptní řešení uložení magnetů na vnitřním průměru cívky.....	30
Obr. 27 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 0 A	31
Obr. 28 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A	32
Obr. 29 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení negativním proudem 2 A ...	33
Obr. 30 Konceptní řešení uložení magnetu mezi dvě cívky	34
Obr. 31 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 0 A	35
Obr. 32 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení proudem 2 A	36
Obr. 33 Průběh magnetického indukčního toku a magnetické indukce v tlumiči a průběh magnetické indukce v aktivní zóně při napájení negativním proudem 2 A ...	37

Obr. 34 Závislost magnetické indukce na tloušťce při různých napájecích proudech	39
Obr. 35 Konstrukční řešení konečné varianty magnetoreologického tlumiče.....	40
Obr. 36 Tělo pístu a jeho základní rozměry.....	41
Obr. 37 Detail konce pístnice, který bude zalisován do těla pístu a základní rozměry pístnice	41
Obr. 38 Tělo pístu a jeho základní rozměry.....	42
Obr. 39 Tělo pístu s vloženými segmenty magnetů.....	42
Obr. 40 Provedení napájecího drátu tělem pístu.....	43
Obr. 41 Plášť pístu a jeho základní rozměry.....	44
Obr. 42 Víko pístu a jeho základní rozměry	44
Obr. 43 Rozložení magnetického indukčního toku, magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pístu tlumiče a rozložení magnetické indukce v aktivní zóně tlumiče při napájení proudem 0 A	45
Obr. 44 Rozložení magnetického indukčního toku, magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pístu tlumiče a rozložení magnetické indukce v aktivní zóně tlumiče při napájení proudem 1 A	46
Obr. 45 Rozložení magnetického indukčního toku, magnetické indukce a intenzity magnetického pole v pístu tlumiče a rozložení magnetické indukce v aktivní zóně tlumiče při napájení negativním proudem 1 A	47
Obr. 46 B-H křivka kapaliny MRF-140CG [20]	48
Obr. 47 B-H křivka kapaliny MRF-122EG [21].....	48
Obr. 48 Závislost meze toku kapaliny na intenzitě magnetického pole [15].....	50
Obr. 49 Závislost intenzity magnetického pole na napájecím proudu.....	51
Obr. 50 Závislost tlumící síly na rychlosti pohybu tlumiče v rozsahu proudu -1 a 1 A s maximální rychlostí $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	51
Obr. 51 Závislost tlumící síly na rychlosti pohybu tlumiče v rozsahu proudu -1 a 1 A s maximální rychlostí $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti magnetů [12]	21
Tab. 2 Hodnoty magnetické indukce u jednotlivých koncepčních řešení	38
Tab. 3 Hodnoty magnetické indukce pro různé tloušťky pláště	38
Tab. 4 Hodnoty magnetické indukce pro různé tloušťky magnetu	39
Tab. 5 Hodnoty magnetické indukce při použití různých magnetoreologických kapalin	49
Tab. 6 Hodnoty tlumící síly v závislosti na rychlosti pístu a napájecího proudu.....	52