



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# SEMIAKTIVNĚ ŘÍZENÝ MAGNETOREOLOGICKÝ TLUMIČ VIDLICE ELEKTROMOTORKY

SEMI-ACTIVELY CONTROLLED MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER OF ELECTRIC MOTOR FORK

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Blahuta

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Michal Kubík, Ph.D.

BRNO 2024



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Jiří Blahuta**  
Studijní program: Konstrukční inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Michal Kubík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

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 diplomové práce:

## **Semiaktivně řízený magnetoreologický tlumič vidlice elektromotorky**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Semiaktivní řízení tlumiče umožňuje dosáhnout vyšší míry izolace rázů přenášených do řídítek elektromotorky. Tyto rázy zvyšují únavu jezdce a zhoršují ovladatelnost stroje. Vidlice s magnetoreologickým tlumičem tyto rázy minimalizuje a zlepšuje tedy komfort a jízdní vlastnosti.

Typ práce: vývojová  
Výstup práce: funkční vzorek (G)  
Projekt: TAČR

### **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem práce je vývoj magnetoreologického tlumiče s krátkou časovou odezvou pro přední vidlici elektromotorky.

Dílčí cíle práce:

- tvorba potřebných simulačních modelů (magnetický, hydraulický, strukturální, atd.),
- konstrukční řešení a výroba magnetoreologického tlumiče pro vybraný typ přední vidlice,
- experimentální ověření funkce.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, výkresová dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

### **Seznam doporučené literatury:**

POYNOR, James. Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers. USA, 2002. Diplomová práce. Virginia Polytechnic Institute and State University.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Současně používané pasivní tlumiče, které fungují na bázi disipace energie pomocí olejové náplně, umožňují pouze omezené nastavení tlumící síly, které je potřeba nastavit před jízdou. Konstrukčně jsou pasivní tlumiče na svém vrcholu a další posun v komfortu jízdy se neočekává. Zde mají potenciál magnetoreologické tlumiče, které se semiaktivním řízením zvyšují komfort jízdy a zlepšují jízdní vlastnosti. Lepších výkonů dosahují díky rychlé změně tlumící síly, kterou pak lze řídit téměř okamžitě podle aktuálních jízdních podmínek. MR tlumiče se již úspěšně využívají v automotive, zatím se však komerčně neprosadily v segmentu cyklistiky. Hlavním důvodem je jejich vysoká hmotnost oproti současným pasivním tlumičům. Cílem této práce je návrh konstrukce lehkého a rychlého MR tlumiče pro vidlici elektromotorky Kuberg. Pro úspěch produktu je potřeba minimalizovat hmotnost návrhu. Pro správnou funkci tlumiče se semiaktivním řízením, je nutné dosáhnout rychlé časové odezvy tlumící síly, která je nejvíce ovlivněná vznikem vířivých proudů v magnetickém obvodu. Dalším problémem je dosažení dostatečné tlumící síly v aktivovaném stavu, proto je potřeba použít vhodný predikční model. Konstrukci tlumiče je také potřeba vyřešit tak, aby se vmístila do omezeného prostoru dané vidlice a tlumič musí být také osazen sensorikou. Výsledkem této práce jsou návrhy dvou generací MR tlumiče a vyrobený funkční vzorek. MR tlumič I. generace sloužil pro testování a verifikaci modelu. MR tlumič II. generace je pak výsledný návrh se sníženou hmotností. Hmotnost tlumiče II. generace je vyšší jen o 19 % oproti původnímu pasivnímu tlumiči. Celková hmotnost MR tlumiče je 1,6 kg. Nový MR tlumič zachovává původní rozměry a zdvih a má integrovanou sensoriku v konstrukci. Navržený MR tlumič má potenciál prosadit se v segmentu elektrocyklistiky a v dalších elektrických jednostopých vozidlech, kde je jeho implementace nejvýhodnější. Možnost jeho nasazení je však i v běžných horských kolech. Spolu se semiaktivní řídicí jednotkou umožňuje dosáhnout lepšího komfortu jízdy a lepších jízdních vlastností.

## KLÍČOVÁ SLOVA

MR technologie, magnetoreologický tlumič, semiaktivní řízení, optimalizace hmotnosti, elektromotorka

## ABSTRACT

The passive dampers used today, which work by dissipating energy using an oil fill, allow only limited damping force adjustment, which must be set before driving. Passive dampers are at their peak in terms of design and no further advances in ride comfort are expected. This is where magnetorheological dampers have the potential to increase ride comfort and improve handling with semi-active control. They achieve better performance thanks to a rapid change in damping force, which can then be controlled almost instantly according to the current driving conditions. MR dampers are already successfully used in the automotive sector but have not yet made a commercial breakthrough in the cycling segment. The main reason is their high weight compared to current passive dampers. The aim of this work is to design a lightweight and fast MR damper for the fork of a Kuberg electric motorbike. For the success of the product, the weight of the design needs to be minimized. For the proper operation of a semi-active damper, it is necessary to achieve a fast time response of the damping force, which is most affected by the occurrence of eddy currents in the magnetic circuit. Another problem is to achieve sufficient damping force in the activated state, so a suitable prediction model must be used. The design of the damper also needs to be able to fit into the limited space of the fork and the damper must be fitted with sensors. The result of this work is the design of two generations of MR damper and the fabricated working sample. Generation I MR damper was used for testing and verification of the model. Generation II MR damper is then the final design with reduced mass. The weight of the generation II damper is only 19% higher than the original passive damper. The total weight of the MR damper is 1,6 kg. The new MR damper retains the original dimensions and stroke and has integrated sensors in the design. The proposed MR damper has the potential to be successful in the electric bicycle segment and other electric single-track vehicles where its implementation is most advantageous. However, it can also be used in conventional mountain bikes. Together with a semi-active control unit, it allows for better ride comfort and handling characteristics.

## KEYWORDS

MR technology, magnetorheological damper, semiactive control, weight optimization, electric bike

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BLAHUTA, Jiří. Semiaktivně řízený magnetoreologický tlumič vidlice elektromotorky [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157837>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Michal Kubík.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Michalu Kubíkovi, Ph.D. za ochotu se mnou spolupracovat, cenné rady a čas, který mi věnoval. Také bych zde rád poděkoval mé rodině za podporu při studiu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Michala Kubíka Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ PROBLÉMU</b>	<b>16</b>
2.1	Rešeršní metody	16
2.2	Pasivní hydraulický tlumič	17
2.3	MR tlumiče pro jednostopá vozidla	17
2.4	Metody semiaktivního řízení MR tlumičů	22
2.5	Modelování chování MR tlumiče	23
2.6	Transientní chování	24
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>27</b>
3.1	Analýza současné konstrukce pasivního tlumiče	27
3.2	Analýza problému	27
3.2.1	Název a druh produktu	28
3.2.2	Zákazník	28
3.2.3	Spotřebitel	28
3.3	Cíl práce	29
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>31</b>
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	31
4.2	Technická funkční analýza	32
4.3	Návrh alternativních řešení	33
4.3.1	Koncepty elektromagnetické cívky	33
4.3.2	Koncepty magnetického jádra a pláště pístu	34
4.3.3	Koncepty vík pístu	35
4.3.4	Koncept MR ventilu se dvěma štěrbinami	35
4.3.5	Alternativní řešení	36
4.4	Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího	37
<b>5</b>	<b>PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH</b>	<b>39</b>
5.1	Matematický model	39
5.1.1	Magnetická analýza MR ventilu	39
5.1.2	CFD analýza MR ventilu	43
5.1.3	Analytická predikce F-v charakteristiky tlumiče	45

5.2	Konstrukční řešení MR tlumiče I. generace	48
5.2.1	MR ventil	49
5.2.2	Pevnostní MKP analýza válce a vík I. generace	50
5.2.3	Pevnostní MKP analýza pístnice I. generace	51
5.2.4	Těsnění pístnice	53
5.2.5	Horní víko nohy	53
5.2.6	Snímač zdvihu	54
5.3	Testování tlumiče	56
5.3.1	Rychlostní charakteristika	56
5.3.2	Časová odezva	57
5.3.3	Pasivní odpory tlumiče	59
5.3.4	Rychlostní charakteristika s novou manžetou	60
5.4	Zhodnocení MR tlumiče I. generace	60
<b>6</b>	<b>DETAILNÍ NÁVRH</b>	<b>62</b>
6.1	Pístnice	62
6.1.1	Materiály	62
6.1.2	Ocelová varianta pístnice	63
6.1.3	Hliníková varianta pístnice	65
6.2	Válec	69
6.3	Dolní víko válce	71
6.4	Horní víko nohy	71
6.5	Další komponenty	73
6.6	Konstrukční návrh	73
6.7	Hodnocení klíčových parametrů	77
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV</b>	<b>83</b>
8.1	Druh výsledku	83
8.2	Název výsledku	83
8.3	Autoři	83
8.4	Technický popis	83
8.5	Místo uložení výsledku	83
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>84</b>

<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>87</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>88</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>92</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>93</b>

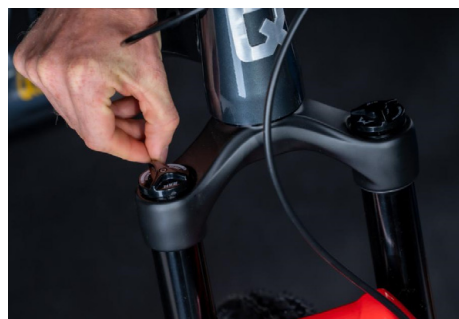
# 1 ÚVOD

U jednostopých vozidel jsou tlumiče zásadním prvkem celého odpružení. S tlumením se experimentovalo již od začátku 20. století, kdy se začínaly rozšiřovat první automobily. První formou tlumiče byly listové pružiny. Princip tlumení spočíval ve tření mezi jednotlivými listy pružiny. Po příchodu šroubovitých pružin bylo potřeba zajistit tlumení jiným způsobem. C. L. Horock tak v roce 1901 sestrojil první hydraulický tlumič, ten fungoval pouze jedním směrem (vratným, odskok) [1]. První hydraulické tlumiče v produkci se objevují až v roce 1912. BMW je prvním výrobcem motocyklů, který použil teleskopické hydraulické tlumiče, a to u motocyklů R12 touring a R17 sport v roce 1935 [2]. Stejnou technologii tlumení používají motocykly, elektromotorky a jízdní kola dodnes.

První zadní tlumič u jízdních kol se objevil na vozidle motokrosového závodníka Briana Skinnera v roce 1983 [3]. Na svém speciálu MCR Descender použil jednoduché přepákování a hydraulický tlumič. První celoodpružené jízdní kolo sestrojila americká firma Bushido Racing a představila ho v roce 1987 [3]. Jednalo se o závodní off-road jízdní kolo, ale nedostalo se do sériové výroby. První úspěšná implementace předního tlumiče pak byla firmou Manitou. Zakladatel firmy Doug Bradbury sestavil první odpruženou vidlici. Ta využívala elastomerovou pružinu s možností změny tuhosti, ale umožňovala pouze krátký zdvih [4]. Následně firma předvedla i celoodpružené MBT jízdní kolo na obr. 1-1.



obr. 1-1 Jedno z prvních celoodpružených MTB (Manitou) [4]



obr. 1-2 Ruční nastavení tlumení [5]

Současné moderní konstrukce tlumení využívají manuální nastavení tlumení pomocí ručních přepínačů, jako například na obr. 1-2. Odpružení je tedy možné před jízdou nastavit pro konkrétního jezdce. Nicméně tyto vlastnosti již nelze během jízdy měnit.

V posledních letech se objevují konstrukce odpružení, které dokážou měnit tlumení i během jízdy. Jedná se o systém Live Valve od firmy FOX (obr. 1-3). Tento systém funguje na bázi rychlých solenoidových ventilů, nejedná se tedy o MR technologii, ale o elektronicky ovládané pasivní odpružení, které se adaptuje podle aktuální situace. Systém využívá senzorku pro zjištění aktuálních jízdních podmínek a poté řídicí systém rozhodne, zda se

odpružení zůstane v tvrdém módu, nebo se přepne do měkkého módu. Řídící systém dokáže rozpoznat čtyři jízdní podmínky: rovina, stoupání, klesání a volný pád. Podle toho rozhoduje, které senzory použít pro ovládání ventilu a určuje délku časového intervalu pro opětovné zavření ventilu. Výrobce udává reakci tlumiče na nerovnosti okolo 30 ms [6]. Tento systém firma využívá nejen u horských kol, ale i pro nákladní a závodní čtyřkolky (buggy).



obr. 1-3 Systém celoodpruženého kola FOX Live Valve [7]

Dalším vývojovým stupněm je, aby odpružení reagovalo v reálném čase na dění na trati a přizpůsobovalo se téměř okamžitě. Toho je možné dosáhnout za pomoci MR tlumičů se semiaktivním řízením. Nicméně je nutné překonat celou řadu technologických problémů. Tato práce se zaměřuje právě na vývoj rychlého MR tlumiče pro odpružení přední vidlice elektromotorcky.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ PROBLÉMU

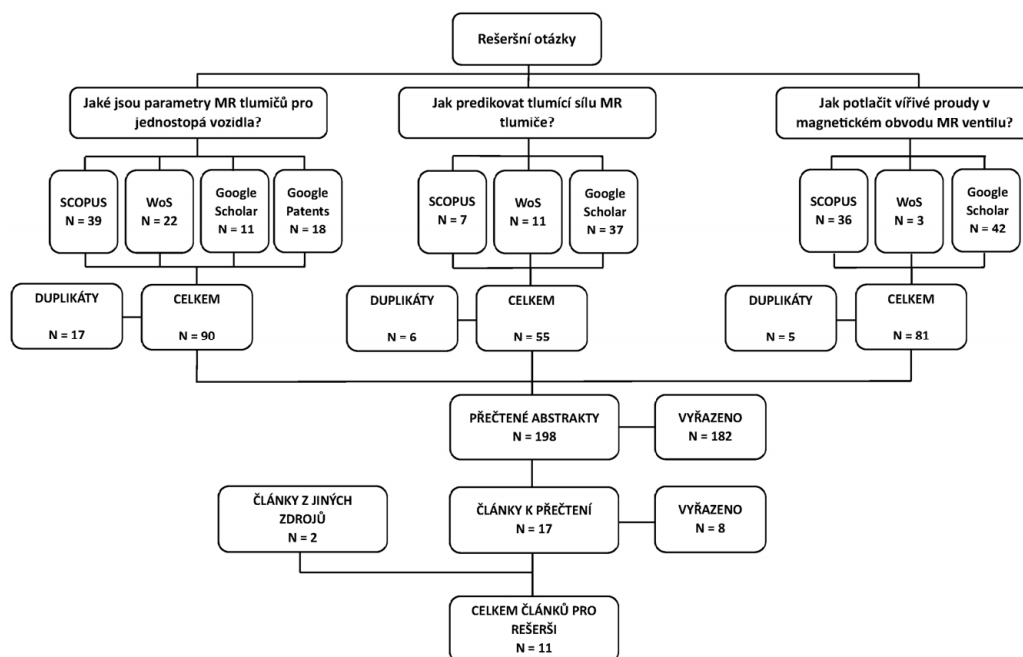
Následující rešerše je rozdělena na pět podtémat. Prvně je představen pasivní tlumič pro jednostopá vozidla a jeho funkce. V druhé části jsou uvedeny návrhy MR tlumičů pro jednostopá vozidla, kde je řešena jejich konstrukce a také jejich parametry. V třetí části jsou stručně popsány dvě nejpoužívanější metody semiaktivního řízení tlumičů. V čtvrté části jsou uvedeny a porovnány modely pro predikci chování MR tlumiče. Závěrečná část rešerše je věnována transientnímu chování MR tlumiče a metodám pro snížení jeho časové odezvy.

### 2.1 Rešeršní metody

Použité rešeršní dotazy:

- (MR OR magnetorheolog\* OR magneto-rheolog\* OR MRF) AND (damper OR "shock absorber" OR dashpot OR valve) AND (motorcycle OR bike OR bicycle OR motorbike) AND (design OR construction)
- (MR fluid OR magnetorheolog\* OR magneto-rheolog\* OR MRF) AND (damper OR "shock absorber") AND (force AND (modeling OR prediction)) AND (mono-tube OR monotube)
- (Eddy OR Foucault) AND currents AND "magnetic circuit" AND (elimination OR reduction OR decrease OR improvement) AND (MR OR MRF OR magnetorheolog\* OR magneto-rheolog\*)

Rešeršní dotazy byly dále laděny pro každou databázi (Scopus, WoS, Google Scholar a Google Patents) zvlášť, a to pro získání přibližně stejného počtu výsledků v každé databázi. Databáze Google Scholar a Google Patents měly daleko více výsledků, proto jsou rešeršní dotazy těchto databází dále zužovány. Výsledky systematické rešerše a výsledný počet článků je uveden v PRISMA diagramu na obr. 2-1.

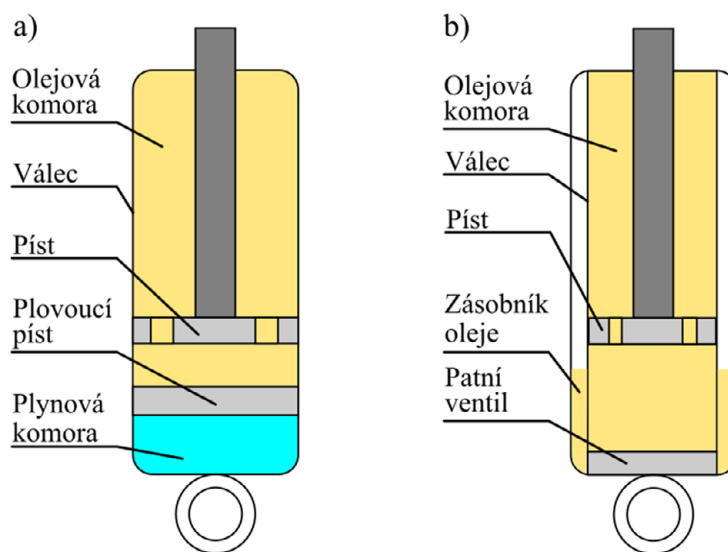


obr. 2-1 Prizma diagram



## 2.2 Pasivní hydraulický tlumič

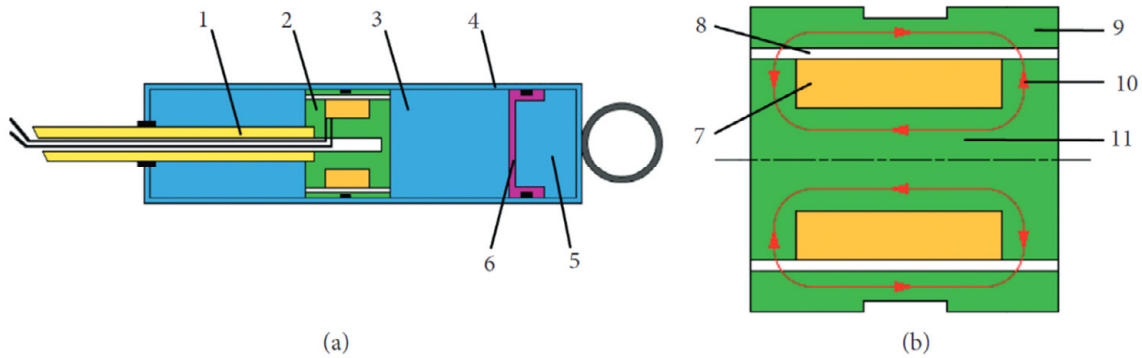
V současné době jsou ve vidlicích jednostopých vozidel používány hydraulické pasivní tlumiče. Základ těchto tlumičů tvoří píst, který se pohybuje ve válci naplněném olejem. Při pohybu pístu se olej přesouvá skrz píst z jedné části válce do druhé a vlivem hydraulických ztrát vzniká tlumící síla. Velikost této síly lze měnit změnou velikostí otvoru v pístu. Hydraulické tlumiče se dělí na jednoplášťové a dvouplášťové (viz obr. 2-2). Rozdíl spočívá v metodě kompenzace změny objemu při zdvihu. Jednoplášťová konstrukce využívá expanzní plynovou komoru a dvouplášťová konstrukce využívá zásobník oleje. Dvouplášťové tlumiče mají složitější konstrukci, která obsahuje také patní ventil mezi zásobníkem a válcem.



obr. 2-2 Pasivní hydraulický tlumič: a) jednoplášťový, b) dvouplášťový

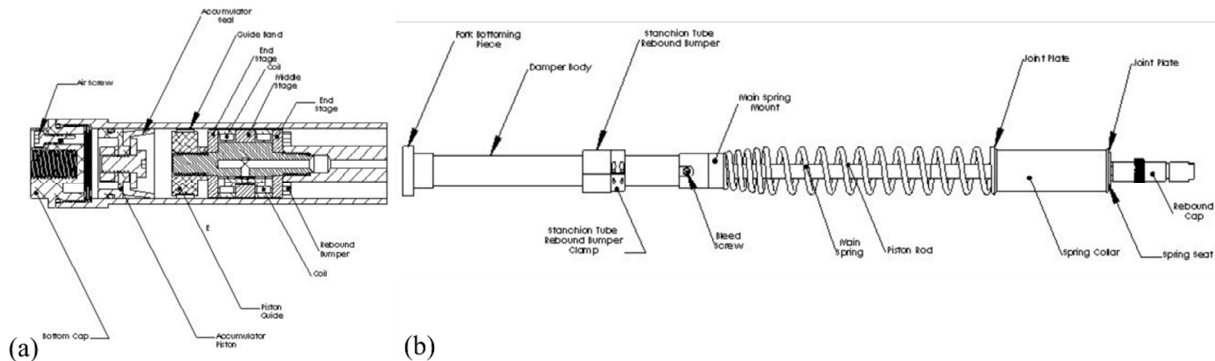
## 2.3 MR tlumiče pro jednostopá vozidla

Nejběžnější konstrukcí MR tlumiče jsou jednoplášťové tlumiče [8]. Ve své podstatě je uspořádání typického jednoplášťového MR tlumiče podobné pasivnímu jednoplášťovému tlumiči. Řez tlumičem je na obr. 2-3a. Ve válci se nachází píst, který rozděluje vnitřní objem válce na dvě komory – kompresní a odskokovou. V pístu se nachází prstencová štěrбина, která umožňuje tok MR kapaliny mezi komorami při pohybu pístu. Součástí pístu je také magnetický obvod (obr. 2-3b), který se skládá z alespoň jedné cívky, navinuté na magnetické jádro, a pláště pístu. Magnetický obvod vytváří magnetickou indukci v tzv. aktivační oblasti mezi jádrem a pláštěm. Změnou magnetické indukce pak lze ovládat velikost tlumící síly. Ve válci se také nachází plovoucí píst, který odděluje kompresní komoru od plynové komory. Plynová komora je naplněna dusíkem nebo vzduchem a slouží pro kompenzaci změny objemu při pohybu pístní tyče a zabránění kavitace.



obr. 2-3 a) jednoplášťový MR tlumič, b) magnetický obvod v pístu; 1 pístní tyč, 2 píst, 3 MR kapalina, 4 válec, 5 stlačený plyn, 6 plovoucí píst, 7 cívka, 8 štěrбина, 9 plášť pístu, 10 magnetická indukce, 11 magnetické jádro [9]

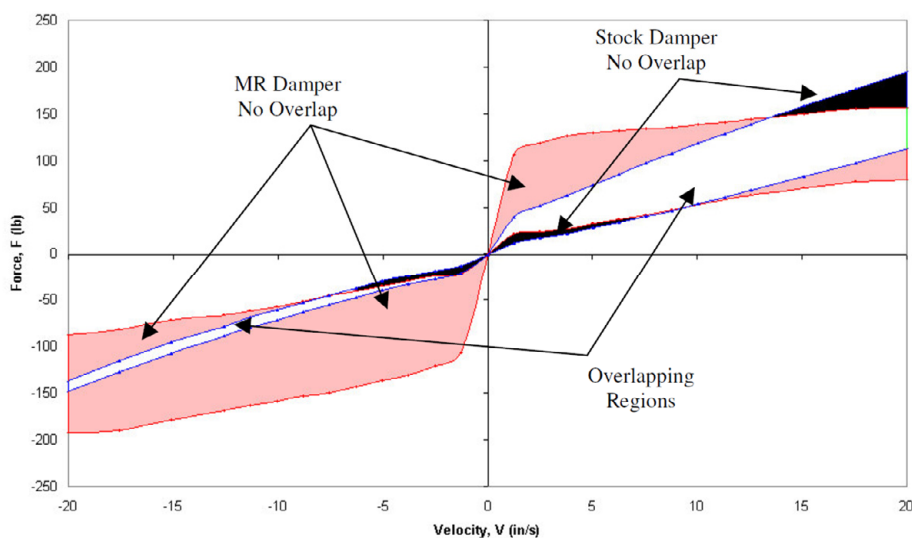
Ahmadian a Gravatt [10] navrhli MR tlumič pro silniční motocykl. Cílem návrhu bylo vytvořit MR tlumič s takovou tlumicí charakteristikou, která vytvoří „obálku“ okolo předem změřené charakteristiky továrního tlumiče. Návrh tlumiče před výrobou byl ověřen pomocí analytického výpočtu tlumicí síly ve vypnutém stavu. Návrh byl omezen zástavbovým prostorem pro tlumič a maximální hmotností. Autor proto použil pro nekritické komponenty hliníkovou slitinu a kde to bylo možné, byl materiál ubírán. Výsledná sestava vidlice s MR tlumičem má oproti tovární vidlici hmotnost vyšší pouze o 0,45 kg a spotřeba elektrické energie nepřekračuje 5 W. Navržený MR ventil a sestava tlumiče jsou zobrazeny na obr. 2-4.



obr. 2-4 a) píst s MR ventilem a plovoucí píst, b) sestava MR tlumiče [10]

Pro testování MR tlumiče autor navrhl a vyrobil tři analogové řídicí jednotky: pasivní napájecí jednotka, on-off skyhook řídicí jednotka a řídicí jednotka založená na posuvu vidlice. MR tlumič i tovární tlumič byly testovány jak v laboratoři, tak v reálných podmínkách na motocyklu. Laboratorní testy byly provedeny na hydraulickém pulsátoru s harmonickým průběhem o frekvenci 2 Hz a amplitudou posuvu od 0 do 40 mm. Naměřená tlumicí charakteristika byla podobná továrnímu tlumiči. Avšak kvůli vysokému tlaku plynu v tlumiči je celková tuhost MR tlumiče a pružiny dvakrát vyšší než u továrního tlumiče, což způsobilo razantní snížení komfortu jízdy. Komfort byl částečně vylepšen snížením hodnoty tlaku plynu nad hodnotu, při které už dochází ke kavitaci. Opětným testem tlumiče bylo zjištěno, že tlak plynu ovlivňuje také tlumicí charakteristiku. Lepším řešením je podle autorů upravit tuhost pružiny. Naměřené hodnoty pro MR tlumič se sníženým tlakem a tovární

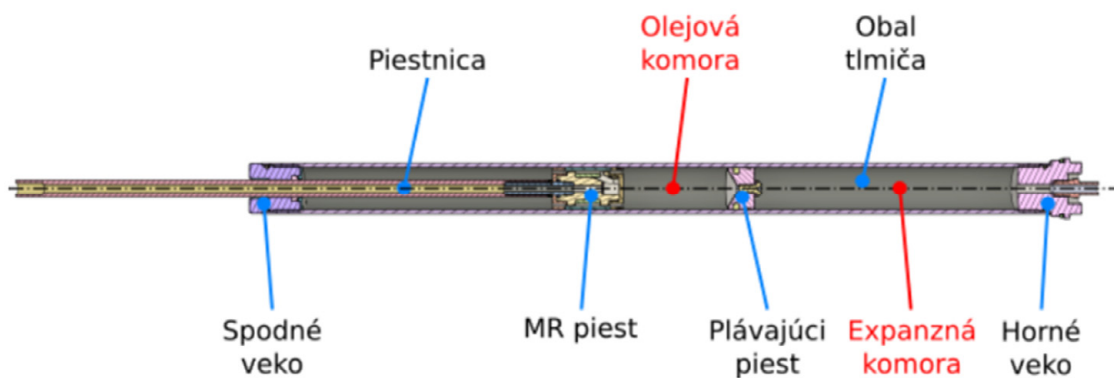
tlumič jsou na obr. 2-5. Z obrázku je patrné, že MR tlumič dokáže emulovat chování továrního tlumiče téměř ve všech oblastech.



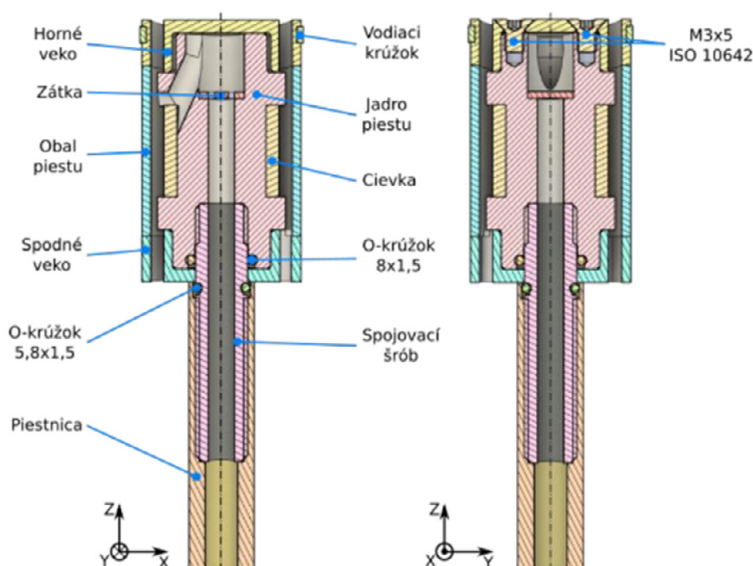
obr. 2-5 Tlumící charakteristika MR a továrního tlumiče [10]

Testování v reálných podmínkách ukázalo, že tovární tlumiče mají vyšší amplitudu posuvu vidlice (přibližně 40 mm) a delší dobu ustálení vibrací (1,25 s). Maximální zrychlení kola a karosérie motocyklu je 7 g, respektive 4 g. MR tlumič ve vypnutém stavu snížil amplitudu posuvu o polovinu a doba ustálení vibrací klesla na 0,75 s. Maximální zrychlení kola a karosérie se lehce snížilo. Z FFT analýzy vyplynulo, že se v rozsahu 7 až 8 Hz přenášely vibrace z kola do karosérie. Tento jev byl podle autora pravděpodobně zapříčiněn vysokým statickým třením v tlumiči. MR tlumič s on-off skyhook řízením dále snížil dobu ustálení na 0,6 s, ale amplituda posuvu vidlice se nezměnila. Maximální zrychlení kola narostlo o 50 %, ale zrychlení karosérie se snížilo o 55 %. Metoda řízení na bázi posuvu vidlice snížila dobu ustálení na 0,2 s. Maximální zrychlení kola i karosérie zůstalo stejné, avšak jízda přes nerovnosti nebyla podle autora komfortní. Tato metoda řízení tlumiče je vhodná pro dobré jízdny podmínky tzn. hladká silnice nebo závodní okruh.

Salva [11] navrhl jednoplášťový MR tlumič pro sjezdové kolo. Autor tlumič navrhoval pro komerčně dostupnou vidlici s malým zástavbovým prostorem s tím, že tlumič lze použít i do jiných, větších vidlic. Pro komponenty magnetického obvodu byla použita ocel 11SMn30. Pro snížení hmotnosti jsou víka z hliníkové slitiny a plovoucí píst je z polyamidu. Válec tlumiče je z konstrukční oceli, ale lze jej vyrobit z duralu pro další snížení hmotnosti. Hmotnost tlumiče včetně MR kapaliny je 1,11 kg, což je 317 % hmotnosti původního pasivního tlumiče. Hmotnost válce hraje velkou roli. Při použití duralového válce, lze hmotnost snížit o 39 %. Konstrukce MR tlumiče a MR ventilu je na obr. 2-6 a obr. 2-7.

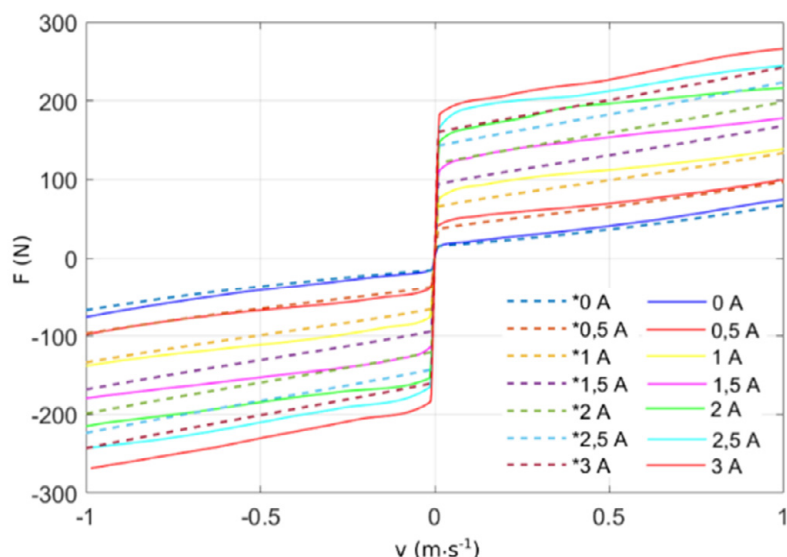


obr. 2-6 Schéma MR tlumiča [11]



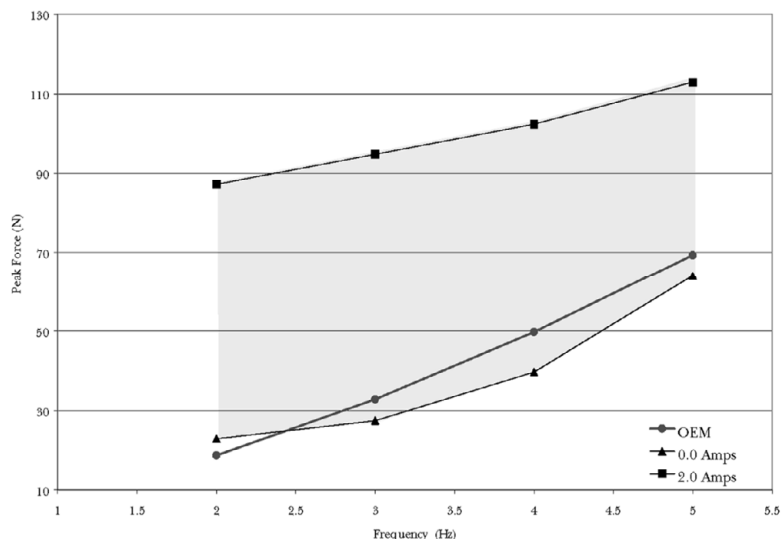
obr. 2-7 Řez pístem tlumiče s MR ventilem [11]

Testováním tlumiče na hydraulickém pulsátoru s amplitudou zdvihu 30 mm byla zjištěna tlumicí charakteristika na obr. 2-8. Při pístové rychlosti  $0,25 \text{ m s}^{-1}$  je dosažený dynamický rozsah 7,5. Autor ale dodává, že při použití magnetického jádra z Hiperco 50 může být dynamický rozsah nad 9. Pro funkci MR tlumiče je důležitá nízká tlumicí síla ve vypnutém stavu, která je u tohoto tlumiče 24 N. Při napájení cívky proudem 3 A je elektrická spotřeba 2,1 W. Časová odezva tlumiče  $\tau_{63}$  na skokovou změnu proudu na 3 A je při rychlosti pístu  $0,3 \text{ m s}^{-1}$  přibližně 17 ms. Autor uvádí, že pro semiaktivní řízení je potřeba časovou odezvu pod 20 ms. Autor předpokládá snížení časové odezvy pod 10 ms při použití magnetického jádra z materiálu Hiperco 50. Snížení časové odezvy je důležité pro optimální funkci metody řízení Skyhook. Autor porovnáním naměřené a predikované tlumicí charakteristiky zjistil, že při pístové rychlosti nad  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  je nutné pro predikci tlumicí síly zahrnout rovnice tlakových ztrát.



obr. 2-8 Naměřená F-v charakteristika MR tlumiče v porovnání s predikcí (čárkovaně) [11]

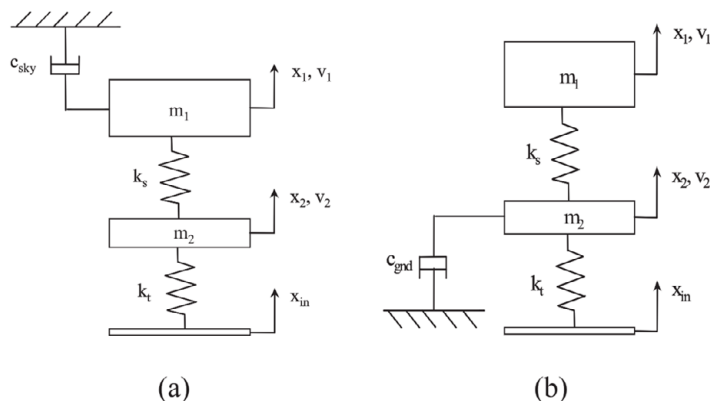
Breese a spol. [12] navrhli dvojici fail-safe MR tlumičů pro horské kolo. Funkce fail-safe zajišťuje dostatečnou tlumící sílu i v případě poruchy elektrického obvodu. Konstrukce předního MR tlumiče je typu s dvojitou pístnicí, která nemusí být vhodná pro všechny typy vidlic, tímto se však autor vyhýbá použití plynové komory. Testování ukazuje, že tlumič má při vypnutém stavu tlumící charakteristiku (obr. 2-9) podobnou továrnímu tlumiči (OEM). Testování však probíhalo při nízkých rychlostech (do 0,2 m/s), nelze tak usoudit, jak se tlumič chová při rychlostech, kterých se dosahuje při aplikaci ve vidlici horského kola (až 2 m/s). Velikost tlumící síly ve vypnutém stavu je příliš vysoká pro semiaktivní řízení a dynamický rozsah je nízký – 4,5 a při zvyšující se pístové rychlosti dále klesá.



obr. 2-9 Tlumící charakteristika pro amplitudu 20 mm [12]

## 2.4 Metody semiaktivního řízení MR tlumičů

Dvě nejčastěji používané řídicí metody pro MR systémy odpružení jsou skyhook a groundhook [13]. Obě metody jsou schematicky znázorněny na modelu čtvrtinového odpružení auta na obr. 2-10a pro skyhook a na obr. 2-10b pro groundhook.



obr. 2-10 Schémata řídicích metod odpružení: a) skyhook, b) groundhook [13]

V praxi je MR tlumič umístěn mezi odpruženou a neodpruženou hmotu a je řízen v reálném čase tak, aby napodobil síly, které vycházejí z výše uvedených řídicích metod. V případě metody skyhook je tlumič připojen k inerciálnímu bodu „na nebi“ a odpružené hmotě. Tato metoda je velmi efektivní pro izolování odpružené hmoty od vstupních vibrací neodpružené hmoty na úkor zvýšených vibrací neodpružené hmoty [13]. Metodu řízení skyhook lze pro MR tlumič dosáhnout spínacím řízením, při kterém se stav tlumiče přepíná mezi tlumeným a netlumeným podle rovnice:

$$\begin{aligned} v_1 v_{12} \geq 0 & \quad F_{sa} = c_{sky} v_1 \\ v_1 v_{12} < 0 & \quad F_{sa} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

,kde  $v_1$  je rychlost odpružené hmoty,  $v_{12}$  je relativní rychlost odpružené a neodpružené hmoty,  $F_{sa}$  je tlumící síla a  $c_{sky}$  je součinitel tlumení.

Druhá metoda řízení groundhook tlumí vibrace neodpružené hmoty. Metoda využívá spínací řízení dané rovnicí:

$$\begin{aligned} -v_2 v_{12} \geq 0 & \quad F_{sa} = c_{gnd} v_2 \\ -v_2 v_{12} < 0 & \quad F_{sa} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

,kde  $v_2$  je rychlost neodpružené hmoty a  $c_{gnd}$  je součinitel tlumení.

## 2.5 Modelování chování MR tlumiče

Gołdasz a Sapiński [14] vytvořili tři numerické modely jednoplášťových MR tlumičů, které v sobě zahrnují kromě změny meze toku také vysokorychlostní místní ztráty, hybnost kapaliny a hysterezi tlumiče. Numerické modely jsou odvozeny pro různé konstrukce tlumiče – jednoduchý tlumič bez sekundárních toků, se sekundárním tokem a s bypassem magnetického toku. Pro mou diplomovou práci je užitečný právě první numerický model. Jedná se o axisymetrický model, který používá pro popis MR kapaliny biplastický Binghamský konstitutivní model. Pro výpočet je potřeba experimentálně zjistit poměr viskozit (měnící se s magnetickým polem), poměr mezi toku biplastického Binghamského modelu a součinitel místních ztrát. Těmito podmínkami se však stává tento model nepoužitelný pro prvotní návrh tlumiče.

Wereley a spol. [15] odvodili dva numerické modely pro predikci rychlostního profilu, rozložení smykového napětí a tlumící síly. U prvního modelu je pro výpočet je zavedena bezrozměrná tloušťka zátky (plug) a Binghamovo číslo. Pro popis MR kapaliny je použit biplastický Binghamský model. Výpočet je postaven na výpočtu tloušťky zátky, pomocí kterého se pak vypočte ekvivalentní součinitel tlumení a tlumící síla. Tento výpočet je poměrně složitý a vyžaduje numerické řešení. Umožňuje však popsání rychlostního profilu při použití biplastického Binghamského profilu. Druhý analytický model využívá Binghamský model a zahrnuje také model sekundárního Newtonského toku. Ve výsledku první model lépe predikuje tlumící charakteristiku, avšak druhý model lze také považovat za poměrně přesný oproti Binghamskému modelu bez sekundárního toku. Pro výpočet je potřeba experimentálně nalézt poměr mezi toku MR kapaliny, a proto opět není vhodný pro prvotní návrh tlumiče.

Yang a spol. [16] odvodili axisymetrický, parallel-plate model jednoplášťového MR tlumiče. K popisu reologie MR kapaliny autoři používají Binghamský plastický model a uvádějí, že je dostatečně přesný pro návrh tlumičů. Prvním modelem je kvazistatický axisymetrický model, odvozený na základě Navier–Stokesovy rovnice. Model uvažuje s rozložením meze toku po poloměru, zanedbává ale setrvačnost kapaliny, jelikož se předpokládá konstantní rychlost pístu, pro výpočet oscilací se však musí vzít v úvahu. Nevýhodou tohoto modelu je nutnost počítat výsledný tlakový gradient numericky a celková složitost výpočtu.

Jelikož je poměr šířky štěrby a průměru pístu velmi malý, lze problém řešit zjednodušeně jako dvě rovnoběžné desky o šířce rovné obvodu štěrby. Tento parallel-plate model opět nelze řešit analyticky, ale lze z něj odvodit zjednodušené rovnice pro výpočet viskózní (3) a ovladatelné síly (4). Výsledná tlumící síla je pak součtem těchto složek. Výsledky modelu se shodují s daty experimentálního měření MR tlumiče, viz obr. 2-12.

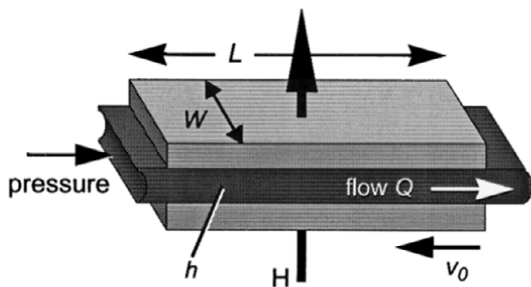
$$F_{\eta} = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right) \cdot \frac{12\eta QLA_p}{wh^3} \quad (3)$$

kde  $F_{\eta}$  je viskózní složka tlumící síly,  $w$  je obvod štěrbin,  $h$  je šířka štěrbin,  $v_0$  je pístová rychlost,  $Q$  je průtok MR ventilem,  $\eta$  je dynamická viskozita,  $L$  je délka štěrbin a  $A_p$  je plocha pístu.

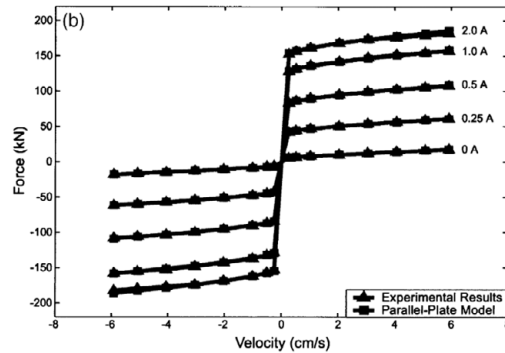
$$F_{\tau} = \left(2,07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0}\right) \cdot \frac{\tau_0 LA_p}{h} \text{sgn}(v_0) \quad (4)$$

kde  $F_{\tau}$  je ovladatelná složka tlumící síly a  $\tau_0$  je mez toku MR kapaliny.

Pro predikci tlumící síly se použijí tyto analytické vztahy z práce Yanga [16] s přidanými rovnicemi tlakových ztrát přes MR ventil, jak uvádí práce Salvy. Tlumící sílu při vypnutém stavu lze také určit pomocí CFD analýzy. Složitější modely od Gołdasze [14] a Wereleye [15] použity nebudou, jelikož vyžadují znát materiálové vlastnosti MR kapaliny, které výrobce neuvádí a bylo by potřeba provést jejich měření.



obr. 2-11 Znáornění parallel-plate modelu [16]



obr. 2-12 Porovnání modelu a experimentu [16]

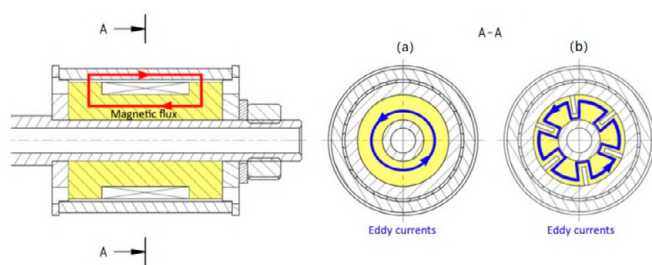
## 2.6 Transientní chování

Negativní vliv na časovou odezvu mají vířivé proudy, které vznikají v magnetickém jádru a plášti při rychlé změně magnetického pole. Tento vliv lze řešit dvěma metodami: volbou materiálu s vysokým elektrickým odporem nebo pomocí drážkování jádra a pláště [17].

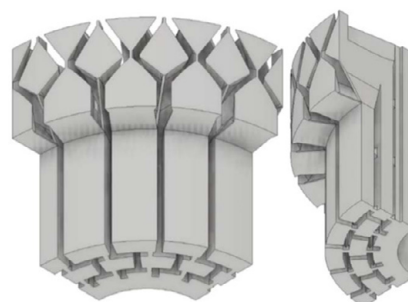
Mezi materiály s vysokým elektrickým odporem patří magneticky měkké ferity a magneticky měkké kompozity (SMC). Vysoký elektrický odpor materiálu jádra a pláště redukuje vířivé proudy v magnetického obvodu. Materiálová metoda je jednodušší na výrobu a návrh, jde ale o kompromis mezi statickou a dynamickou efektivitou magnetického obvodu. Tyto materiály mají totiž nižší permeabilitu a magnetickou saturaci, což znamená nižší dynamický rozsah tlumící síly. Dále mají horší mechanické vlastnosti a vysokou cenu. Pomocí SMC Sintex lze dosáhnout sekundární časové odezvy 1,49 ms a s feritovým magnetem 1,54 ms [17].



Druhá metoda, jak redukovat vířivý proud, je výroba drážkovaného magnetického jádra a pláště, které jsou vyrobeny z oceli s nízkým elektrickým odporem [17]. Drážky jsou vytvořeny v místě největší magnetické indukce tak, aby cesta vířivých proudů byla co nejdelší a vedla místy s malým průřezem (obr. 2-13). Velikost vířivých proudů klesá s počtem a velikostí drážek. Aby bylo zabráněno toku MR kapaliny drážkami, musí se vyplnit plastem, což se provádí vakuovým odléváním. Šířka a počet drážek musí respektovat jak technologii výroby samotné drážky, tak odlévání plastu a navrhuje se pomocí 3D MKP magnetické analýzy. Pomocí drážkovaného magnetického jádra a pláště z oceli 11SMn30 lze dosáhnout sekundární časové odezvy 2,86 ms [17]. Avšak oproti SMC Sintex a ferritovému magnetu má 11SMn30 vyšší dynamický rozsah a lepší mechanické vlastnosti.



obr. 2-13 Vířivé proudy v magnetickém jádře: a) bez drážek, b) s drážkami [17]



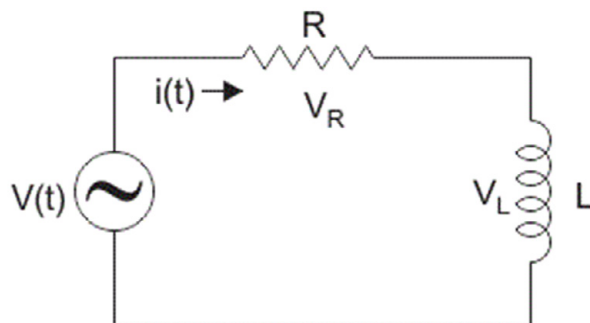
obr. 2-14 Strukturované mag. jádro [18]

Drážkované jádro lze vyrobit i pomocí technologie 3D tisku kovů SLM z čistého železa, které má dobré statické magnetické vlastnosti [18]. Kromě drážek lze vyrobit i strukturované jádro (obr. 2-14), které efektivně eliminuje vířivé proudy. Časová odezva se blíží hodnotám SMC. Nevýhodou této metody je vysoká výrobní cena. Veškeré materiály testované v práci Streckera a spol. [17] jsou v tab. 2-1, kde jsou porovnány jejich vlastnosti.

tab. 2-1 Porovnání materiálů magnetického jádra [17]

Materiál	Čas. odezva (ms)	Dynamický rozsah	Obrobitelnost	Pevnost (MPa)	Cena
Ferit N87	1,34	3,5	× ×	30	✓
SMC Sintex	1,28	4,0	×	75	× ×
Hiperco 50	3,57	6,4	✓	350	× ×
Nerez AISI 420	2,82	3,2	✓	760	✓ ✓
11SMn30	10,3	5,7	✓	470	✓ ✓
11SMn30 - 48 drážek	1,74	5,1	✓	470	×
SLM Fe - 48 drážek	2,03	5,3	✓	460	× ×
SLM Fe - strukturované	1,32	5,1	✓	460	× ×

Další metodou redukce časové odezvy magnetického pole je přidání elektrického odporu do napájecího RL obvodu [19], viz obr. 2-15. Tuto metodu lze zkombinovat s předchozí materiálovou nebo tvarovou metodou. Nevýhodou tohoto přístupu je zvýšení elektrické spotřeby tlumiče a zvýšení potřebného napětí proudového zdroje.



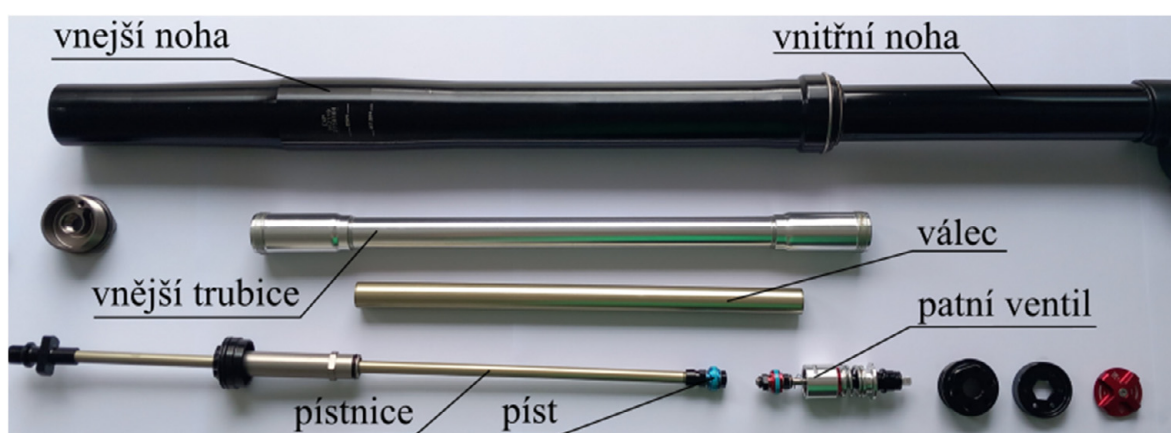
obr. 2-15 Schéma napájecího RL obvodu [19]

Ocelové magnetické jádro nedosahuje pro optimální chod semiaktivního řízení dostatečně nízké časové odezvy. Materiály SMC a ferit N87 jsou zase nevhodné kvůli jejich špatným mechanickým vlastnostem. Použití drážkovaného ocelového jádra či 3D tištěného jádra metodou SLM taktéž není vhodné, jelikož obě výrobní technologie jsou velmi nákladné a zvýšily by cenu finálního produktu. Nerezová ocel AISI 420 nedosahuje dostatečný dynamický rozsah. Dobré výsledky má však kobaltová slitina Hiperco 50. Slitina má nejvyšší dynamický rozsah z testovaných materiálů, časová odezva je nižší o 65 % oproti oceli a také má dobré mechanické vlastnosti. Nevýhodou je její vyšší cena oproti konvenční oceli. Při návrhu je také potřeba vzít v úvahu elektrický odpor napájecího obvodu, který ovlivňuje časovou odezvu a elektrickou spotřebu.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza současné konstrukce pasivního tlumiče

Současný nahrazovaný pasivní tlumič elektromotorky má dvouplášťovou konstrukci bez plynové komory. Tlumič umožňuje nezávislé nastavení kompresní a odskokové tlumicí síly v nízké i vysoké rychlosti, to však vyžaduje komplikovanou zástavbu tlumiče a mnoho komponent. Nastavení tlumení probíhá ručně pomocí otočných koleček na koncích tlumiče. Zdvih tlumiče je nastavitelný na dvě hodnoty: 180 mm nebo 203 mm. Hmotnost tlumiče včetně nohou a olejové náplně je 1,3 kg. Rozložený pasivní tlumič je na obr. 3-1. Tlumič se skládá z vnější trubice, válce, pístnice, pístu a patního ventilu.



obr. 3-1 Nahrazovaný pasivní tlumič elektromotorky

### 3.2 Analýza problému

Aby bylo možné navržený MR tlumič semiaktivně řídit, je zapotřebí, aby jeho časová odezva byla krátká – do 10 ms pro Skyhook. Snížení časové odezvy bude provedeno pomocí jedné z metod popsané v rešerši a časová odezva bude predikována transienční analýzou magnetického obvodu. Dále semiaktivně řízený tlumič ke své funkci požaduje informaci o zrychlení odpružené i neodpružené hmoty a pístovou rychlost. Současná konstrukční řešení MR tlumičů pro jednostopá vozidla sensoriku řeší externím upevněním akcelerometrů i snímače zdvihu. Toto řešení není ideální pro tlumič off-road elektromotorky z důvodu možnosti poškození snímače. Navrhované řešení bude mít snímač zdvihu integrován v konstrukci tlumiče. Jak dále vyplývá z rešerše, současná řešení MR tlumičů pro jednostopá vozidla se nesoustředily na hmotnost. Ta je u MR tlumičů vyšší i třikrát oproti řešení s pasivním tlumičem. Vyšší hmotnost MR tlumičů je jedna z nevýhod, proč se zatím neprosadily v cyklistice nebo motosportu. V cyklistice je totiž velký důraz na nízkou

hmotnost jízdního kola, což lze vidět na nabízených rámech z uhlíkových vláken či odlehčených sedlech. Hlavním důvodem, proč jsou MR tlumiče těžší než jejich pasivní alternativa, je ve vyšší hustotě MR kapaliny, která může být i více než třikrát vyšší než olej v pasivním tlumiči. Zároveň však nelze snížit objem použité MR kapaliny, jelikož je dán potřebným zdvihem a průměrem pístu, který konstrukčně nelze příliš zmenšit. Malý objem MR kapaliny by také snížil životnost náplně a byly zapotřebí častější servisní intervaly. Tudíž optimalizace hmotnosti musí být provedena na samotné konstrukci tlumiče. Posledním problémem je omezený zástavbový prostor tovární vidlice. Návrh tlumiče je omezen maximálním vnějším průměrem patrony.

### 3.2.1 Název a druh produktu

Vyvíjeným produktem je semiaktivně řízený magnetoreologický tlumič vhodný pro zástavbu do komerčně dostupné vidlice elektromotorky. Jedná se o zvláštní zboží, u kterého se očekává dlouhodobé spotřebování. Od zákazníka i spotřebitele se očekává porovnávání s ostatními konkurenčními produkty. Vyvíjený tlumič by se měl od konkurenčních pasivních řešení tlumení lišit vyšší kvalitou tlumení vibrací. Čímž se uspokojí nároky spotřebitele na vyšší komfort jízdy. Vyvíjený tlumič je produkt různorodý a kvalita uspokojení potřeb spotřebitele bude hrát velkou roli při rozhodování o nákupu. Přestože je tlumič vyvíjen tak, aby byl kompatibilní s komerčně dostupnou vidlicí a snížily se tak náklady na výrobu, vyšší cena MR kapaliny pravděpodobně způsobí vyšší koncovou cenu vidlice s MR tlumičem.

### 3.2.2 Zákazník

Vyvíjený MR tlumič je následně možné nabídnout výrobcům jízdních kol, elektrokol a elektromotorek. Zájem o tento produkt mohou mít také společnosti vyvíjející samotné systémy odpružení. Právě tyto společnosti by se podílely na konstrukci zbytku vidlice, jelikož jejich zkušenosti se systémy odpružení jsou nenahraditelné. Postaraly by se tak, aby byl výsledný produkt konkurenceschopný a našel si své zákazníky.

### 3.2.3 Spotřebitel

Spotřebiteli bude nabízen hotový systém odpružení ve formě odpružené přední vidlice právě s vyvinutým MR tlumičem. Další možností je nabízet produkt již v rámci celého stroje – jízdního kola, elektrokola či elektromotorky. Očekává se, že produkt bude vhodný pro běžného cyklistu, který je ochoten si připlatit za vyšší komfort, i pro profesionální závodní jezdce.

tab. 3-1 Přehled cílů a dalších charakteristik produktu

Charakteristika	Cíl	Omezení	Funkce	Prostředky
Vhodný pro použití v elektromotorce	✓			
Využití principu magnetoreologické kapaliny	✓			
Vhodné pro zástavbu do vidlice elektromotorky	✓			
Měření aktuálního polohy pístu	✓			
Hmotnostně optimalizovaná konstrukce tlumiče	✓			
Zdvih 180 mm		✓		
Maximální průměr patrony 32 mm		✓		
Nízká elektrická spotřeba		✓		
Nízké výrobní náklady		✓		
Krátká časová odezva tlumiče		✓		
Vysoký dynamický rozsah tlumiče		✓		
Zvýšení komfortu jezdce			✓	
Zlepšení jízdních vlastností			✓	
Cenově dostupné materiály				✓

### 3.3 Cíl práce

Hlavním cílem práce je návrh konstrukce jednovláškového magnetoreologického tlumiče s krátkou časovou odezvou, který je vhodný pro zástavbu do komerčně dostupné přední vidlice Manitou Dorado Expert elektromotorky Kuberg Freerider. Nový MR tlumič by měl zajistit vyšší komfort jízdy a lepší jízdní vlastnosti. Důležitou součástí práce bude také minimalizace pasivního odporu tlumiče, celkové hmotnosti tlumiče a zajištění zástavby potřebného senzoru zdvihu. Součástí práce je návrh, výroba a testy funkčního vzorku MR tlumiče generace I, který bude sloužit pro verifikaci modelů pro návrh tlumiče. Tyto modely budou poté použity pro konstrukční řešení MR tlumiče s nízkou hmotností – generace II. Výsledný MR tlumič by měl mít parametry obsažené v tab. 3-2.

Dílčí cíle jsou:

- Tvorba potřebných simulačních modelů
- Konstrukční návrh, výroba a montáž funkčního vzorku MR tlumiče
- Experimentální stanovení rychlostní charakteristiky, časové odezvy a pasivních odporů

tab. 3-2 Požadované parametry magnetoreologického tlumiče

<b>Název parametru</b>	<b>Hodnota</b>
Maximální zvýšení hmotnosti oproti původnímu tlumiči	40 %
Maximální vnější průměr válce patrony tlumiče	32 mm
Minimální dynamický rozsah při 0,25 m/s	7
Maximální časová odezva tlumiče	17 ms
Maximální tlumicí síla ve vypnutém stavu při 0,25 m/s	30 N
Průměrná elektrická spotřeba	3 W

Hodnota maximálního zvýšení hmotnosti vychází z porovnání hmotnosti funkčního vzorku s původní hmotností tlumiče. Maximální vnější rozměr patrony tlumiče je dán rozměry konkrétní vidlice, pro kterou je tlumič navrhován. Hodnoty požadované časové odezvy a dynamického rozsahu vychází ze systematické rešerše současných řešení MR tlumičů pro jednostopá vozidla. Požadavek na časovou odezvu a tlumicí sílu vychází z požadavku semiaktivního řízení tlumiče, přičemž se předpokládá použití řídicího algoritmu Skyhook. Elektrickou spotřebu je důležité udržet nízkou z důvodu předpokladu použití tlumiče v elektrokolech a elektromotorkách, kde by napájení tlumiče bylo přímo z vlastní baterie stroje.

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

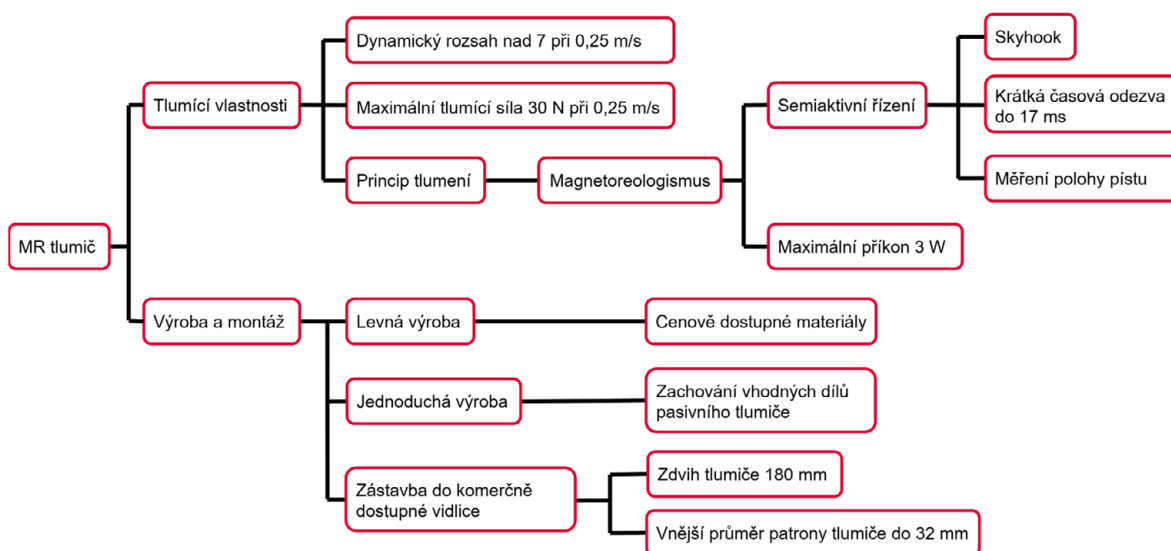
### 4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

Z přehledu cílů a dalších parametrů produktu na obr. 4-1 bylo vybráno několik cílů, které byly doplněny o další důležité faktory zaměřené na výrobu. Tento výběr v tab. 4-1 byl použit pro výběr nejlepšího koncepčního řešení. Jednotlivým parametrům byla přiřazena jejich váha podle důležitosti a byl použit systém hodnocení jednotlivých parametrů. Koncepční řešení s nejvyšším celkovým hodnocením pak bylo vybráno jako vítězné.

tab. 4-1 Výběr parametrů použitých pro hodnocení konceptů

Cíl	Dynamický rozsah	Časová odezva	Jednoduchost výroby	Cena výroby	Vhodnost pro danou vidlici
-----	------------------	---------------	---------------------	-------------	----------------------------

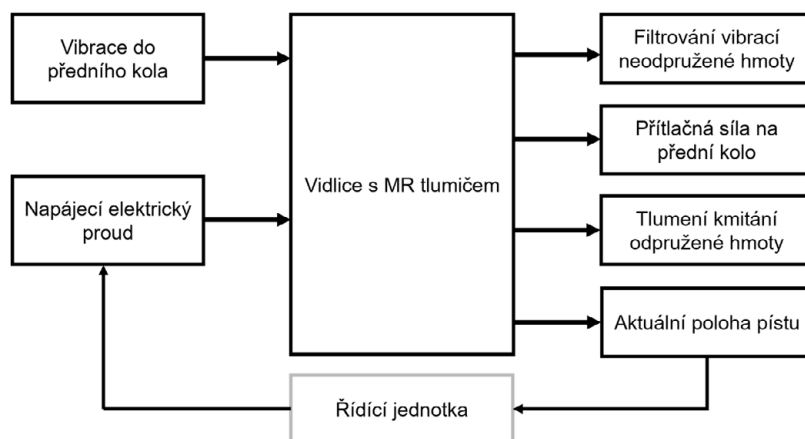
Dříve stanovené cíle a omezení byly rozděleny do dvou skupin, podle toho, zda se týkají tlumících vlastností MR tlumiče, nebo montáže a výroby. Schématické znázornění podkategorií cílů a jejich logické propojení je znázorněno na obr. 4-1. Do tohoto schématu bylo přidáno omezení tlumicí síly týkající se použité metody semiaktivního řízení Skyhook a také potřebu zachovat vhodné díly z původního pasivního tlumiče, což by mělo snížit náklady na výrobu. Tyto omezení nejsou specifikované zákazníkem, jsou však důležité pro dosažení cíle.



obr. 4-1 Hierarchická struktura cílů a omezení

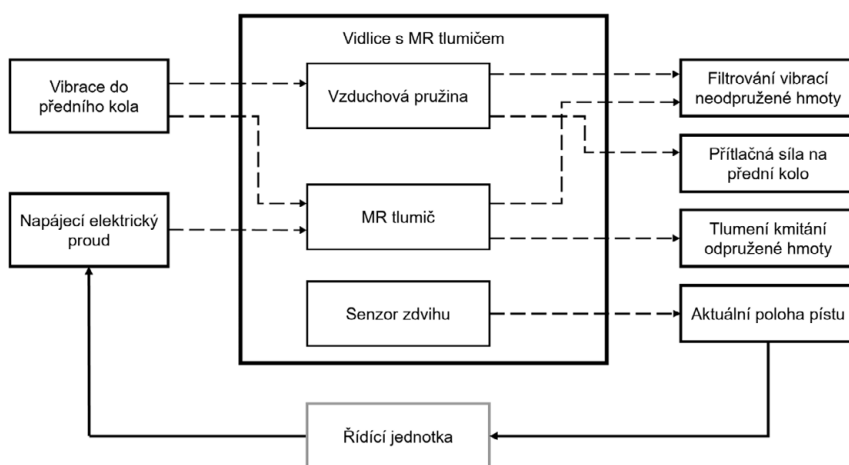
## 4.2 Technická funkční analýza

Primární úlohou odpružené vidlice v elektromotorce (elektrokole) je plnit funkce, které jsou uvedeny v tab. 3-1. Odpružená vidlice je buzena vibracemi neodpružené hmoty (předního kola), které jsou způsobeny jízdou po nerovnostech. Tyto vibrace se přenášejí do odpružené hmoty a dále k jezdcí, kterému způsobují diskomfort. Funkce odpružené vidlice je snížit přenášení těchto vibrací, utlumit vzniklé vibrace neodpružené i odpružené hmoty a zvýšit tak komfort jízdy. Další její funkcí je vyvození dostatečné přitlačné síly na přední kolo a zvýšit tak trakci. Funkce vidlice s MR tlumičem je schematicky zobrazena na obr. 4-2.



obr. 4-2 Black box vidlice s MR tlumičem

Na obr. 4-3 je pak znázorněno vnitřní rozložení vidlice, ta se skládá z pružiny (v tomto případě vzduchové), samotného MR tlumiče a senzoru zdvihu. Vzduchová pružina se stará o snížení přenosu vibrací do odpružené hmoty a přitlačnou sílu. Do MR tlumiče vstupuje kromě vibrací kola také elektrický proud, který slouží pro regulaci jeho tlumicí síly. Senzor zdvihu zde slouží pro získání aktuální polohy pístu a jeho rychlosti, což potřebuje vnější řídicí jednotka se semiaktivním řízením, která reguluje již zmíněný elektrický proud. Kromě tohoto senzoru zdvihu je potřeba k regulaci algoritmem Skyhook také akcelerometr na odpružené hmotě. Řídící jednotka není součástí vidlice a její návrh není součástí této práce.

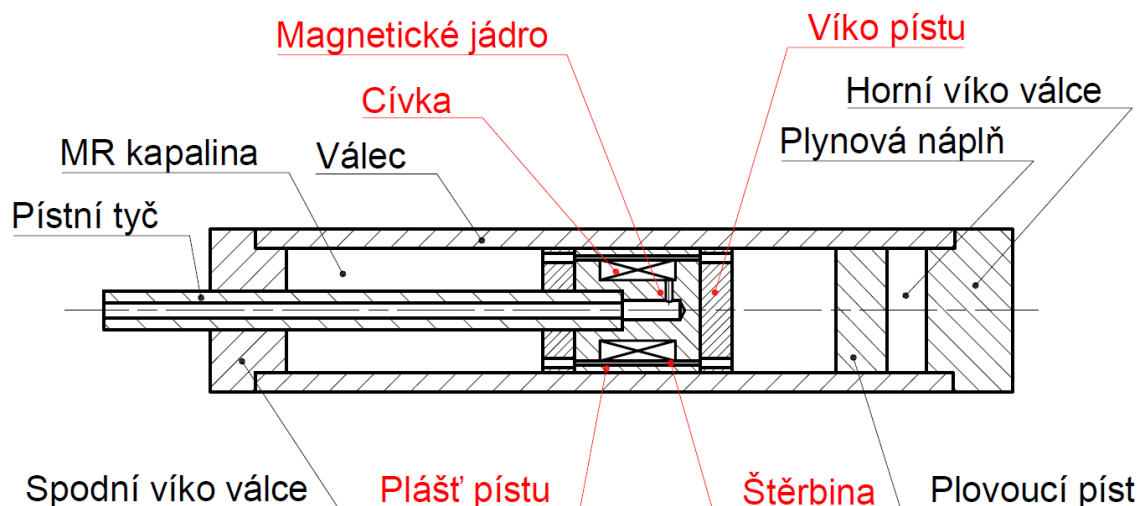


obr. 4-3 Glass box vidlice s MR tlumičem



## 4.3 Návrh alternativních řešení

Navrhovaný MR tlumič je jednoplášťový s plovoucím pístem a plynovou komorou. Koncepční návrh sestavy MR tlumiče na obr. 4-4 se skládá ze tří konstrukčních uzlů MR ventilu: magnetického jádra a pláště pístu, cívky, vík pístu a štěrbin. Při návrhu byla snaha zachovat co nejvíce komponent z původního tlumiče. Podařilo se zachovat vnitřní a vnější nohu vidlice, ve které je MR tlumič instalován a samozřejmě také zbytek vidlice.



obr. 4-4 Koncepční návrh sestavy MR tlumiče

### 4.3.1 Koncepty elektromagnetické cívky

#### Jedna cívka

Jednodušší možností je vyrobit MR ventil pouze s jednou cívkou, což zjednoduší výrobu (stačí navinout pouze jednu cívku) a zjednoduší se tvar magnetického jádra, ve kterém stačí vyrobit pouze jednu drážku. Jednodušší je také kabeláž pro přívod elektrického proudu k cívce. Nevýhodou je ale kratší délka aktivační oblasti, tudíž nižší tlumící síla v aktivovaném stavu a nižší dynamický rozsah. Magnetické jádro s jednou cívkou je na obr. 4-5a, červeně jsou naznačeny magnetické siločáry.

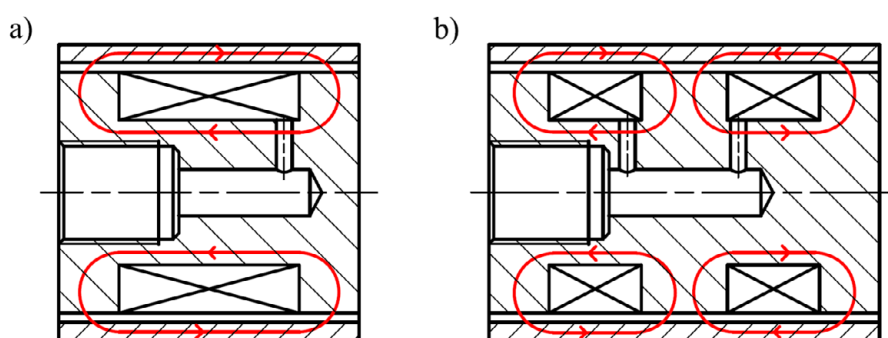
#### Dvě cívky

Oproti jedné cívce má tato varianta delší aktivační oblast, tudíž větší objem aktivované MR kapaliny a delší čas MR kapaliny v magnetickém poli. Z tohoto vyplývá vyšší dynamický rozsah i při vysokých pístních rychlostech a vyšší tlumící síla v aktivovaném stavu. Další výhodou je použití cívek s menší indukčností, což má pozitivní vliv na časovou odezvu tlumiče. Cívky musí být navinuty střídavě, aby se magnetické pole v aktivačních oblastech sčítalo. Magnetické jádro s dvěma cívkami je na obr. 4-5b.

## 4.3.2 Koncepty magnetického jádra a pláště pístu

### Plné magnetické jádro a plášť pístu

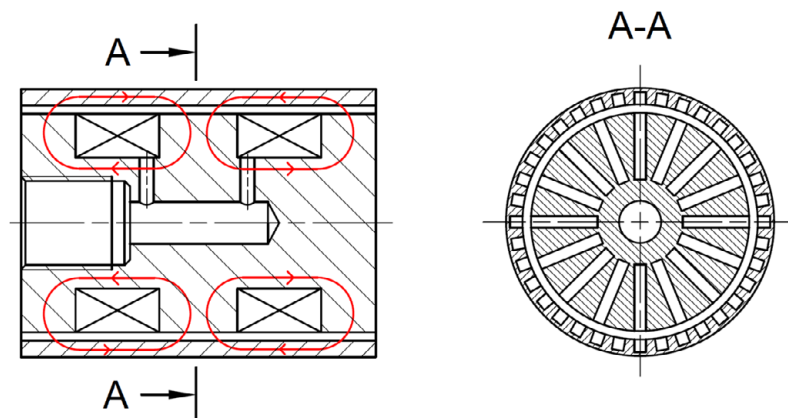
Jedna možnost, jak redukovat vířivé proudy je využít materiál s vysokým elektrickým odporem, čímž je magneticky měkký kompozit (SMC) Sintex. Jeho výhodou je dobrá obrobiteľnosť, ale veľkými nevýhodami jsou nižší permeabilita, špatné mechanické vlastnosti, vysoká křehkost, omezený výběr polotovarů a vysoká cena. Další možností je použití kobaltové slitiny Hiperco 50. Výhodou tohoto materiálu je vysoká permeabilita, díky které lze dosáhnout vysoký dynamický rozsah, vysoká magnetická saturace, dobrá obrobiteľnosť i mechanické vlastnosti. Společnou nevýhodou obou materiálů je ale vyšší cena oproti konvenční nízkouhlíkové oceli. Magnetické jádro s pláštěm pístu s jednou cívku je na obr. 4-5a, s dvěma cívkami na obr. 4-5b.



obr. 4-5 Plné magnetické jádro a plášť pístu: a) s jednou cívku, b) s dvěma cívkami

### Drážkované magnetické jádro a plášť pístu

Druhou možností je vyrobiť drážky do magnetického jádra i pláště pístu (viz obr. 4-6), které pak jsou vyrobeny z levnější automatové oceli 11SMn30. Tento materiál má oproti předchozím lepší mechanické vlastnosti, vyšší permeabilitu oproti SMC a je také dobře obrobiteľný. Nevýhodou tohoto řešení je náročná a drahá výroba drážek pomocí elektrojiskrového obrábění. Oproti předchozímu řešení je časová odezva porovnatelná, avšak při zvyšování počtu drážek by docházelo ke snížení dynamického rozsahu tlumiče vlivem úbytku objemu magnetického obvodu. Drážky také pevnostně oslabují jádro.



obr. 4-6 Drážkované magnetické jádro a plášť z oceli 11SMn30

## Strukturované magnetické jádro

Drážkované jádro lze vyrobit i pomocí technologie 3D tisku kovů SLM z čistého železa, které má dobré statické magnetické vlastnosti. Kromě drážek lze vyrobit i strukturované jádro, které efektivně eliminuje vířivé proudy. Časová odezva se blíží hodnotám SMC. Nevýhodou této metody je vysoká výrobní cena a nutnost použití specializované technologie.

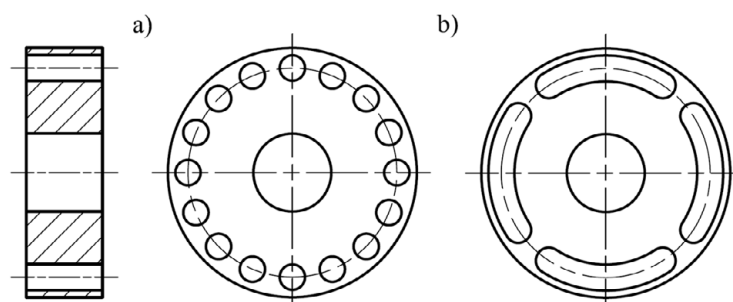
### 4.3.3 Koncepty vík pístu

#### Kruhové pole děr

Víka drží pohromadě magnetické jádro a plášť pístu, mezi kterými musí být štěrbina pro tok MR kapaliny. Ve víkách musí být otvory, kterými může MR kapalina protékat. Tyto otvory způsobují tlakovou ztrátu vlivem místních ztrát ve vtoku a výtoku. První možný tvar otvorů je kruhové pole děr (viz obr. 4-7a), které je jednodušší na výrobu, ale může způsobovat vyšší tlakové ztráty, jelikož průtočná plocha může být menší.

#### Zakřivené drážky

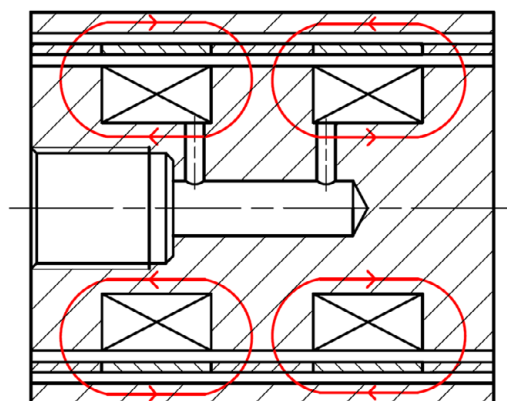
Druhým řešením je vyfrézovat několik zakřivených drážek na poloměru štěrbiny (viz obr. 4-7b). Počet těchto drážek se může lišit, pro přesný návrh drážek je potřeba provést CFD analýzu a zajistit dostatečnou pevnost materiálu mezi drážkami.



obr. 4-7 Víko pístu: a) kruhové pole děr, b) zakřivené drážky

### 4.3.4 Koncept MR ventilu se dvěma štěrbinami

Pro funkci navrhovaného tlumiče i ve vysokorychlostním režimu bude pravděpodobně nutné použít návrh ventilu s dvěma štěrbinami (viz obr. 4-8). Toto řešení lze zkombinovat se všemi předchozími koncepty jednotlivých konstrukčních uzlů. Mezi magnetické jádro a plášť pístu je vložen prstenec, který se skládá z pěti částí, kdy se střídá magnetický prstenec v aktivační oblasti a nemagnetický prstenec nad cívkou. Tento složený prstenec snižuje únik magnetického toku. Druhou možností je použít jednu štěrbinu. V porovnání těchto možností vychází lépe jedna štěrbina, a to z důvodu omezeného průměru vnitřní nohy vidlice. MR ventil s dvěma štěrbinami bude jen velmi těžké navrhnout do pístu s malým průměrem. Nevýhodu jedné štěrbiny – vyšší viskózní složka tlumící síly při vysokých rychlostech, bude potřeba minimalizovat správným návrhem geometrie štěrbiny, např. CFD analýzou.



obr. 4-8 MR ventil se dvěma štěrbinami

### 4.3.5 Alternativní řešení

Z výše uvedených konceptů jednotlivých konstrukčních uzlů byly vytvořeny alternativní řešení. Pro jejich tvorbu byla využita morfologická analýza (tab. 4-2), ve které byly z prostoru všech možných řešení vybrány 4 koncepty, které jsou dále spolu porovnány podle výše uvedených hledisek a je vybrán ten nejlepší. Koncepty jsou rozlišeny v tabulce čtyřmi barvami a jsou vždy složeny z jednotlivých alternativních řešení každého konstrukčního uzlu. Přehled konstrukčních uzlů všech čtyř konceptů je v tab. 4-3.

tab. 4-2 Morfologická analýza konceptů konstrukčních uzlů

Konstrukční uzly	Magnetické jádro	Plášť pístu	Cívka	Štěrbina	Víka pístu
1	Plné jádro z materiálu Hiperco 50	Plný plášť z 11SMn30	Jedna vinutá cívka	Jedna meziválcová štěrbina	Kruhové pole děr
2	Plné jádro z materiálu SMC	Drážkovaný plášť z 11SMn30	Dvě vinuté cívky	Dvě paralelní meziválcové štěrby	Zakřivené drážky
3	Drážkované jádro z 11SMn30	Plášť z Hiperco 50 / SMC	–	–	–
4	Strukturované 3D tištěné jádro z železa	Strukturovaný 3D tištěný plášť z železa	–	–	–

## 4.4 Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího

tab. 4-3 Přehled konstrukčních uzlů jednotlivých konceptů

Konstrukční uzel	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Magnetické jádro	Plné jádro SMC	Plné jádro Hiperco 50	Drážkované jádro 11SMn30	Strukturované 3D tištěné jádro Fe
Plášť pístu	Plášť Hiperco 50/SMC	Plný plášť 11SMn30	Drážkovaný Plášť 11SMn30	Strukturovaný 3D tištěný plášť Fe
Cívka	Dvě vinuté cívky	Jedna vinutá cívka	Jedna vinutá cívka	Dvě vinuté cívky
Štěrbina	Jedna meziválcová štěrbina	Jedna meziválcová štěrbina	Jedna meziválcová štěrbina	Dvě paralelní meziválcové štěrby
Víka pístu	Kruhové pole děr	Zakřivené drážky	Zakřivené drážky	Zakřivené drážky

Vybrané čtyři koncepty byly vzájemně porovnány podle již dříve určených parametrů v tab. 4-1. Hodnoty dynamického rozsahu a časové odezvy v tab. 4-4 vychází z rešeršní části práce. Hodnoty jsou určeny podle typu a materiálu magnetického jádra každého konceptu a jsou pouze orientační, jelikož výsledná hodnota dynamického rozsahu závisí na dalších parametrech, jako je například geometrie štěrby nebo použitá MR kapalina. Uvedené časové odezvy platí pro dané magnetické jádro a také se budou lišit při použití jiného pláště pístu.

tab. 4-4 Přehled alternativních řešení a jejich hodnocení

Parametry	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Dynamický rozsah	4,0	6,4	5,1	5,1
Časová odezva	1,28 ms	3,57 ms	1,74 ms	1,32 ms
Jednoduchost výroby	Složitá	Snadná	Složitá	Složitá
Cena výroby	Střední	Nižší	Vyšší	Vyšší
Vhodné pro danou vidlici	Vhodné	Vhodné	Vhodné	Nevhodné

V tabulce jsou zelenou barvou vyznačené nejlepší hodnoty pro každý parametr a šedě plně nevyhovující parametr. Koncept 4 nevyhovuje z důvodu velmi omezeného průměru pístu, do kterého by bylo jen velmi obtížné zkonstruovat píst s dvěma paralelními štěrbinami. Koncepty jsou dále hodnoceny bodově podle vážených kritérií v tab. 4-5. Hodnocení probíhá v rozsahu 0 – 100 podle úspěšnosti plnění parametrů. U prvních dvou parametrů byly body přiděleny poměrově podle číselné hodnoty parametru. Nejvíce bodů získal koncept 2 s magnetickým jádrem z Hiperco 50, plného pláště z oceli 11SMn30, jednou cívkou a štěrbinou a zakřivenými drážky ve víku. Tento koncept má nejvyšší dynamický rozsah, a hlavně se levně a jednoduše vyrábí, na což byla dána velká váha, jelikož součástí práce musí vzniknout také fyzický funkční vzorek.

tab. 4-5 Hodnocení konceptů

Parametry	Koncept	Váha parametru	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Dynamický rozsah		10	62,5	100	80	80
Časová odezva		10	100	36	74	97
Jednoduchost výroby		15	80	100	80	80
Cena výroby		25	80	100	50	50
Vhodné pro danou vidlici		40	100	100	100	0
Celkem bodů			88,25	93,6	79,9	42,2

## 5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Cílem této kapitoly je prezentovat konstrukci tlumiče I. generace, která pomůže verifikovat použité matematické modely a získat zpětnou vazbu na jednotlivé konstrukční uzly. Výsledky a závěry z testů tlumiče I. generace pak budou použity při návrhu finálního konstrukčního řešení odlehčeného tlumiče II. generace. V první části je proveden návrh samotného MR ventilu tlumiče, následně je popsána konstrukce celého tlumiče, výsledky testů a zhodnocení návrhu.

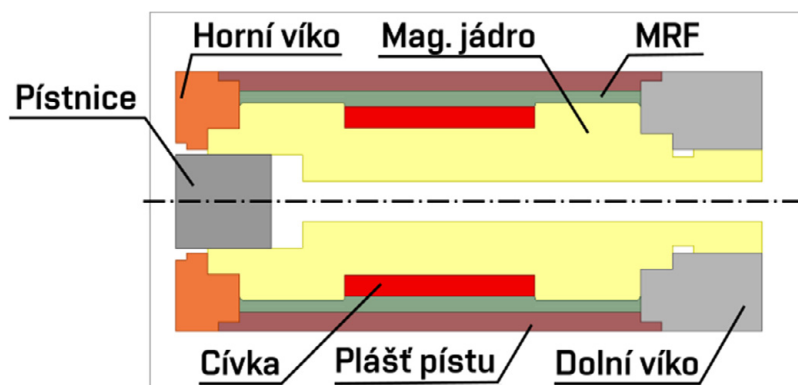
Po vybrání vítězného konceptu MR ventilu následoval návrh jeho geometrie a rozměrů tak, aby byla zajištěna funkce tlumiče podle kritérií určených v kapitole 4 a byly splněny všechny cíle návrhu. Pro správný návrh MR ventilu bylo zapotřebí sestavit matematický model pro predikci F-v charakteristiky tlumiče. Charakteristika MR tlumiče by se měla podobat F-v charakteristice původního pasivního tlumiče v jeho měkkém a tvrdém nastavení, což umožní MR tlumiči tuto charakteristiku emulovat.

### 5.1 Matematický model

Aby bylo možné získat predikci tlumících sil ve vypnutém i aktivovaném stavu, bylo potřeba zjistit velikost a rozložení intenzity magnetického pole ve šterbině, hodnoty meze toku MR kapaliny pro výslednou geometrii v závislosti na napájecím proudu a tlakové ztráty přes ventil. Následovat bude popis tří matematických modelů: magnetostatická a transientní magnetická MKP analýza, CFD analýza MR ventilu a analytický model pro predikci F-v charakteristiky.

#### 5.1.1 Magnetická analýza MR ventilu

Prvním krokem bylo vytvoření 2D magnetostatické analýzy MR ventilu pro návrh geometrie a rozměrů MR ventilu. Analýza byla provedena v softwaru ANSYS Electronics 2022 R2. Vstupní 2D geometrie byla převzata z modelu konceptu v Autodesk Inventor 2023, kde byla nejprve vyřešena konstrukce a přípojovací rozměry MR ventilu. Výsledné rozměry funkčních rozměrů – průměry magnetického jádra, šířka šterbiny, průměry pláště pístu, cívka atd. však byly upřesněny na základě této analýzy. Na obr. 5-1 je zobrazena tato vstupní geometrie.



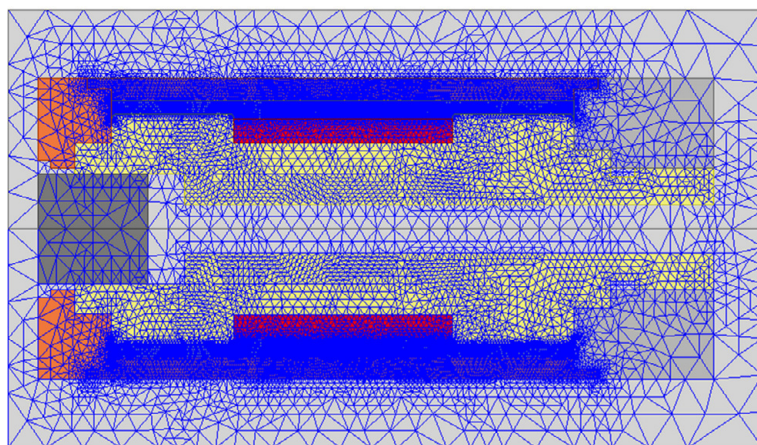
obr. 5-1 Použitá geometrie MR ventilu

Dalším vstupem jsou materiály jednotlivých dílů. Kromě MR kapaliny, magnetického jádra a pláště pístu byly použity materiálové modely z knihovny softwaru. U vyjmenovaných dílů byly materiálové modely definovány podle jejich datasheetů. Přiřazení materiálů je v tab. 5-1.

tab. 5-1 Materiály magnetické analýzy

Komponent	Pístnice	Horní víko	Dolní víko	Plášť pístu	Cívka	MR kapalina	Magnetické jádro
Materiál	AISI 1010	Hliník	Polyamid	11SMn30	Měď	MRF 122EG	Vacoflux 50

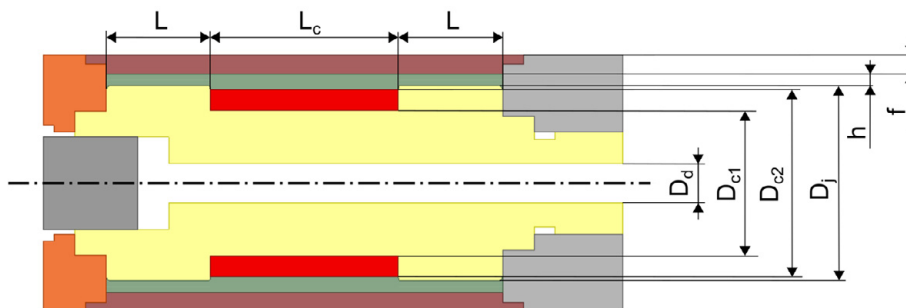
Analýza byla nastavena jako axisymetrická, jako okrajová podmínka pro izolování systému byl použit balloon. Výsledná cívka má pak 148 závitů drátu o průměru 0,45 mm a je buzena napájecím proudem o hodnotě 0,25 až 2 A. Velikost elementů konečnoprvkové sítě byla nastavena na 0,2 mm pro MR kapalinu, 0,3 mm pro plášť pístu a 1 mm pro magnetické jádro a cívku. Zbytek dílů byl nastaven na automatickou výchozí hodnotu.



obr. 5-2 Konečnoprvková síť

Výsledné funkční rozměry MR ventilu byly získány pomocí parametrické optimalizace, jejíž cílem byla maximalizace intenzity magnetického pole ve středu aktivační zóny MR ventilu. Zároveň však muselo být respektováno omezení dané zástavbovým prostorem vidlice. Výsledné parametry jsou zobrazeny na obr. 5-3 a jejich hodnoty v tab. 5-2.



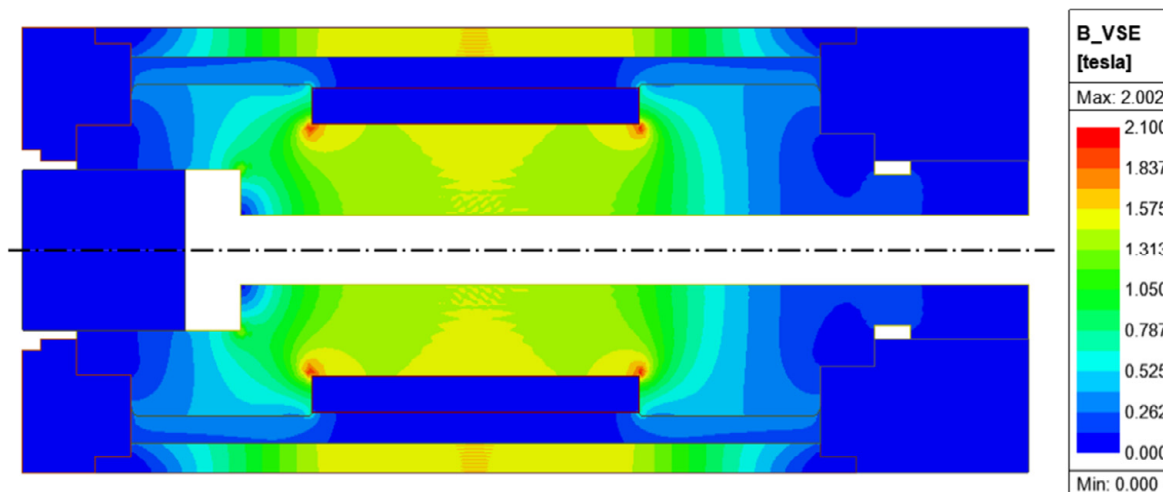


obr. 5-3 Výsledné rozměry MR ventilu

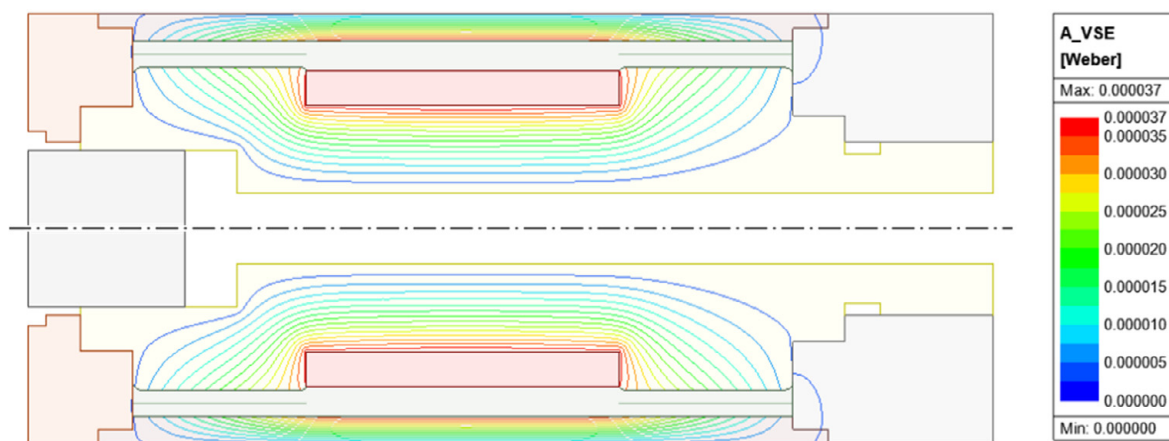
tab. 5-2 Tabulka rozměrů MR ventilu

Parametr	$D_d$	$D_{c1}$	$D_{c2}$	$D_j$	$h$	$f$	$L$	$L_c$
Hodnota (mm)	4	14,1	18,1	18,5	1,5	1,6	10	18

Na obr. 5-4 je výsledné rozložení magnetické indukce pro excitaci proudem 2 A. Nejvyšší hodnota indukce je pod cívku, největším problémem však bylo nepřekročit hodnotu saturace v plášti pístu (1,9 T pro 11SMn30 [20]). Magnetické jádro je zde totiž oslabeno drážkou pro cívku a otvorem pro napájecí kabely. Ideálním stavem je, když je hodnota magnetické indukce konstantní skrz celý magnetický obvod a nedochází k zužování magnetického toku. V magnetickém jádře se nacházejí lokální maxima v okolí ostré hrany drážky cívky, toto je však způsobeno výpočtovou metodou a není potřeba brát v úvahu. Na obr. 5-5 jsou zobrazeny siločáry magnetického toku.

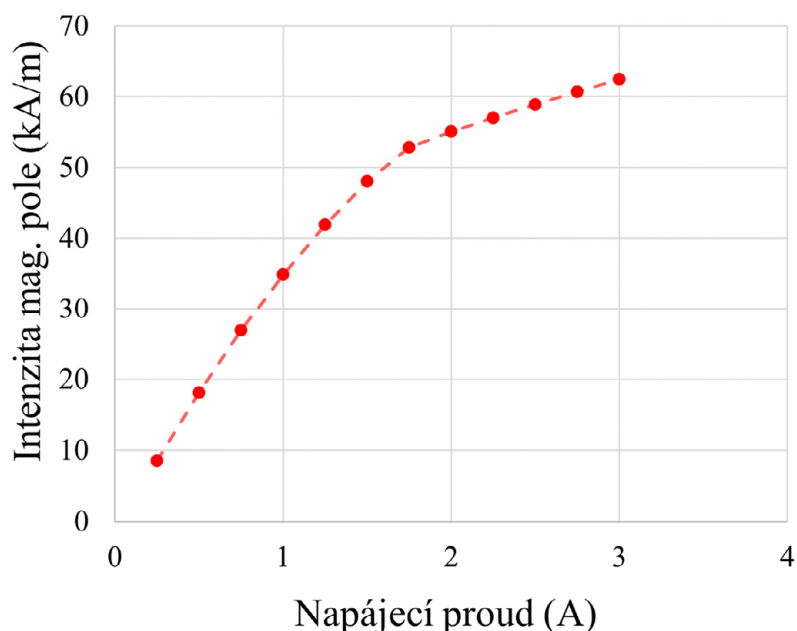


obr. 5-4 Magnetická indukce pro proud 2 A



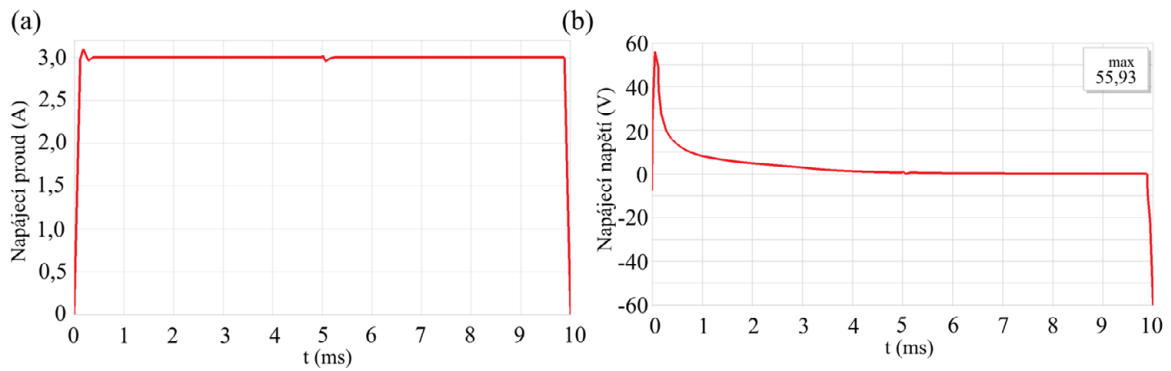
obr. 5-5 Magnetický tok pro proud 2 A

Výsledkem magnetostatické analýzy je závislost intenzity magnetického pole v aktivační oblasti na napájecím proudu cívky. Tyto data jsou potřebná pro výpočet meze toku MR kapaliny pro jednotlivé napájecí proudy. Graf je na obr. 5-6.



obr. 5-6 Závislost průměrné intenzity magnetického pole ve štěrbině na napájecím proudu

Následně byla provedena transienční analýza pro zjištění časové odezvy magnetického obvodu. Excitace cívky byla nastavena na lichoběžníkový průběh s rychlým nárůstem proudu na 3 A (obr. 5-7a). Kvůli omezení maximálního proudového regulátoru na 60 V bylo potřeba zajistit, aby tato hodnota nebyla překročena. Maximální potřebné napětí je 56 V (viz obr. 5-7b).

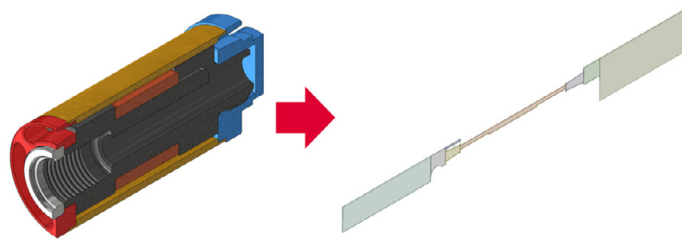


obr. 5-7 (a) Časový průběh napájecího proudu, (b) Potřebné napájecí napětí

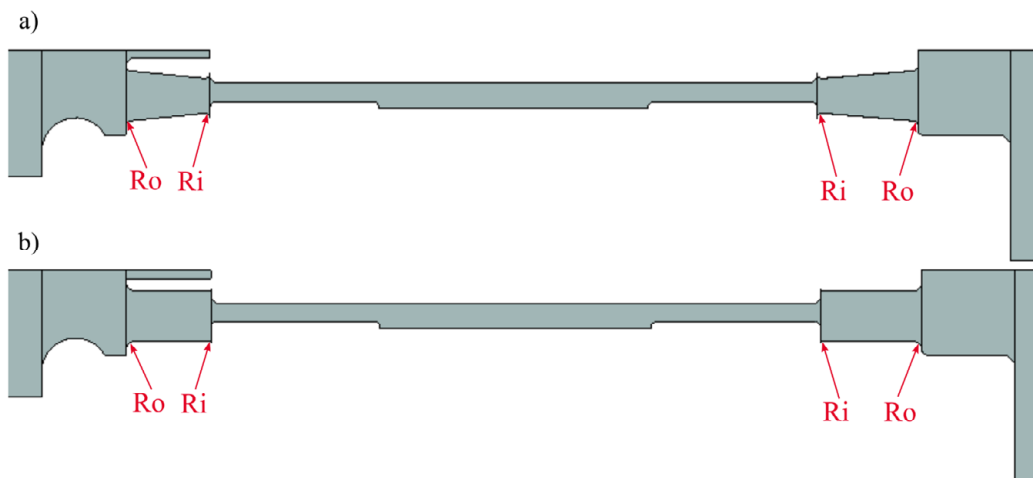
### 5.1.2 CFD analýza MR ventilu

Druhým krokem byla analýza tlakové ztráty skrz MR ventil ve vypnutém stavu tlumiče a najít tak vhodný tvar vstupních a výstupních otvorů ventilu pro minimalizaci této tlakové ztráty. Tlakovou ztrátu je potřeba minimalizovat, aby byla dosažena co nejnižší tlumící síla. Analyzovány byly dva tvary štěrbin, se zúžením (obr. 5-9a) a bez zúžení (obr. 5-9b) a různé radii  $R_i$  a  $R_o$  hran štěrbin ve víkách pístu.

Jako vstup do CFD analýzy byla použita 3D axisymetrická geometrie MR kapaliny ve formě tenké 1° výseče. Model MR kapaliny byl vytvořen dle modelu MR ventilu (obr. 5-8). Geometrie byla zjednodušena odstraněním sražení hran a ostatních detailů v nekritických místech a rozdělena na 8 částí pro možnost různých nastavení sítě pro jednotlivé segmenty.

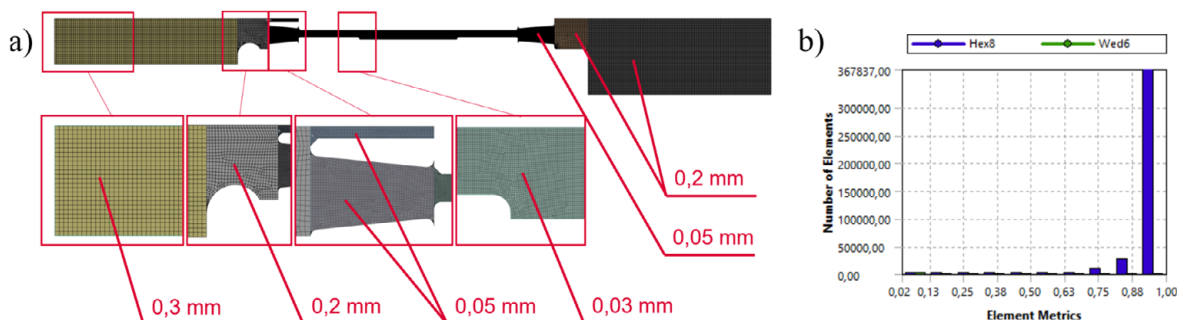


obr. 5-8 Vytvoření axisymetrické geometrie



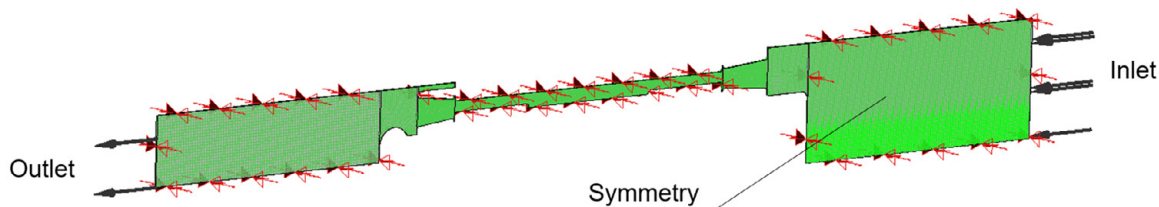
obr. 5-9 a) geometrie štěrbin se zúžením b) geometrie štěrbin bez zúžení

Jako metoda tvorby sítě byla použita MultiZone s nastavením na hexahedrony a na hexahedrony/prismy v tvarově složitější části s klínem. Menší velikost elementů byla nastavena v užších částech šterbiny, naopak v nekritických a širších částech byla nastavena větší velikost (viz obr. 5-10a). Velikost elementů byla omezena maximálním počtem elementů studentské verze programu ANSYS CFX, proto se zde stále nachází elementy se špatnou kvalitou (viz obr. 5-10b).



obr. 5-10 a) nastavení velikosti elementů sítě b) graf kvality elementů

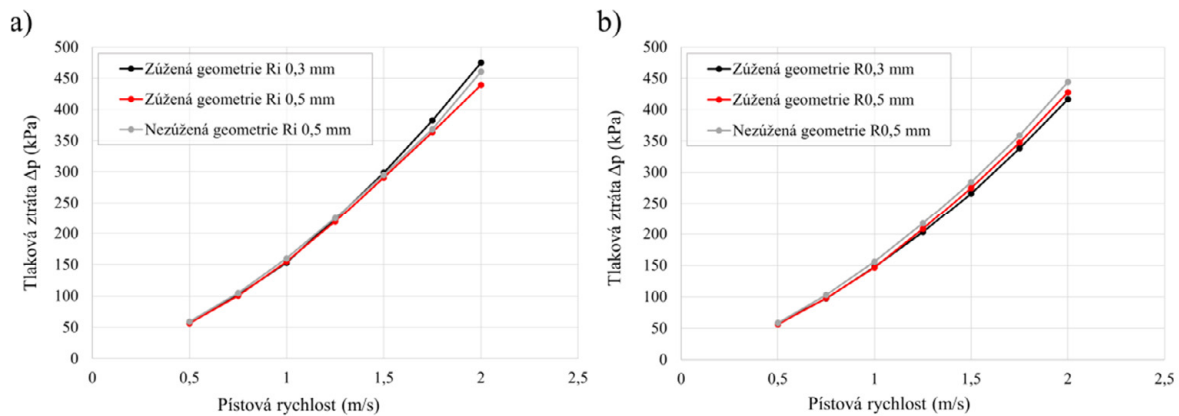
Simulace byla nastavena pro ustálený stav proudění, bez tepelných účinků a pro laminární proudění. Jako kapalina byla nastavena MRF 122EG s hodnotami hustoty a viskozity dle datového listu výrobce Lord. Okrajové podmínky se liší pro kompresi a odskok tlumiče orientací i rychlostí proudění. Rychlost je odlišná z důvodu zachování konstantního průtoku, ale jiné průtočné plochy. Na vstupu je okrajová podmínka rychlosti proudění v hodnotách od 0,5 m/s do 2 m/s v krocích po 0,25 m/s. Na výstupu je nastaven statický tlak 0 Pa a stěny jsou nastaveny jako no-slip. Na stranách řezu výseče byla nastavena symetrická vazba, jelikož se jedná o axisymetrickou geometrii. Okrajové podmínky pro kompresi jsou zobrazeny na obr. 5-11, změna pro odskok spočívá v záměně vstupu s výstupem.



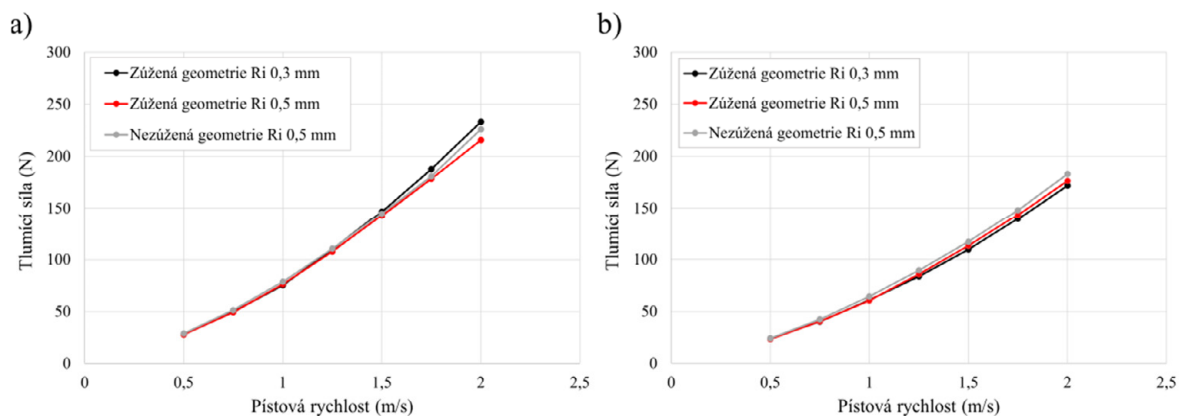
obr. 5-11 Okrajové podmínky pro kompresi

První byla provedena optimalizace rádiusů  $R_o$  a  $R_i$  pro kompresi. Byly použity kombinace hodnot od 0,1 mm po 0,8 mm. Bylo zjištěno, že maximální vliv rádiusů na tlumící sílu je 2,7% snížení tlumící síly pro  $R_i$  0,5 mm a  $R_o$  0,3 mm. Ostatní kombinace měly vliv menší.

Dále byl proveden kompletní výpočet tlumící charakteristiky pro tři případy: 1. zúžená geometrie s  $R_i$  0,3 mm a  $R_o$  0,3 mm, 2. zúžená geometrie s  $R_i$  0,5 mm a  $R_o$  0,3 mm a 3. nezúžená geometrie s  $R_i$  0,5 mm a  $R_o$  0,3 mm. Vyhodnocována byla tlaková ztráta přes ventil (obr. 5-12), z které se pak dopočítala tlumící síla (obr. 5-13).



obr. 5-12 Tlaková ztráta: a) při kompresi, b) při odskoku



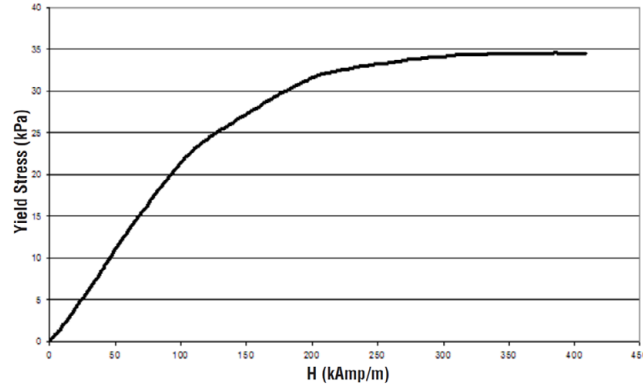
obr. 5-13 F-v charakteristika: a) komprese, b) odskok

Jelikož z grafu na obr. 5-13 vyplývá, že změna rádiusů a zúžení šterbiny má jen velmi malý vliv na tlumicí sílu, bylo rozhodnuto vyrobit víka bez zúžení, čímž se výrazně zjednoduší jejich výroba. Rádiusy byly ponechány na hodnotách Ri 0,5 mm a Ro 0,3 mm a jelikož jejich velikost nemá zásadní vliv, nebyla požadována vyšší přesnost jejich výroby.

### 5.1.3 Analytická predikce F-v charakteristiky tlumiče

Třetím krokem bylo vytvoření predikce F-v charakteristiky MR tlumiče v celém jeho dynamickém rozsahu od nulové pístové rychlosti až do vysokorychlostního režimu. Z výsledných hodnot magnetické intenzity v závislosti na napájecím proudu (obr. 5-6), bylo pomocí grafu meze toku z datasheetu výrobce MR kapaliny MRF 122EG (obr. 5-14) vyčteny jednotlivé meze toku pro všechny proudy. Tato MR kapalina byla vybrána z důvodu její malé dynamické viskozity, jelikož viskozita zvyšuje tlumicí sílu v neaktivovaném stavu, která by měla být co nejnižší.

**Yield Stress vs. Magnetic Field Strength**



obr. 5-14 Závislost meze toku MRF122EG na intenzitě magnetického pole [21]

Hodnoty meze toku společně s výslednými parametry geometrie získané magnetostatickou analýzou byly použity jako vstup do analytického výpočtu F-v charakteristik podle Yanga [22]. Analytický model popisuje tok Binghamské kapaliny v režimu proudění. Model je popsán rovnicemi:

$$F_{\eta} = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right) \cdot \frac{12\eta QLA_p}{wh^3}, \quad (5)$$

$$F_{\tau} = \left(2,07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.4wh^2\tau_0}\right) \cdot \frac{\tau_0 LA_p}{h} \operatorname{sgn}(v_0), \quad (6)$$

kde  $F_{\tau}$  je ovladatelná složka tlumící síly (N),  $\tau_0$  je mez toku MR kapaliny (Pa),  $F_{\eta}$  je viskózní složka tlumící síly (N),  $w$  je obvod štěrbin (m),  $h$  je šířka štěrbin (m),  $v_0$  je pístová rychlost ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $Q$  je průtok MR ventilem ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $\eta$  je dynamická viskozita ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),  $L$  je délka štěrbin (m) a  $A_p$  je plocha pístu ( $\text{m}^2$ ).

Celková tlumící síla je pak součet těchto dvou složek, celkových pasivních odporů tlumiče  $F_t$  a hydraulických ztrát  $F_H$ . Pasivní odpory byly v této fázi návrhu odhadnuty jako konstantní hodnota 25 N.

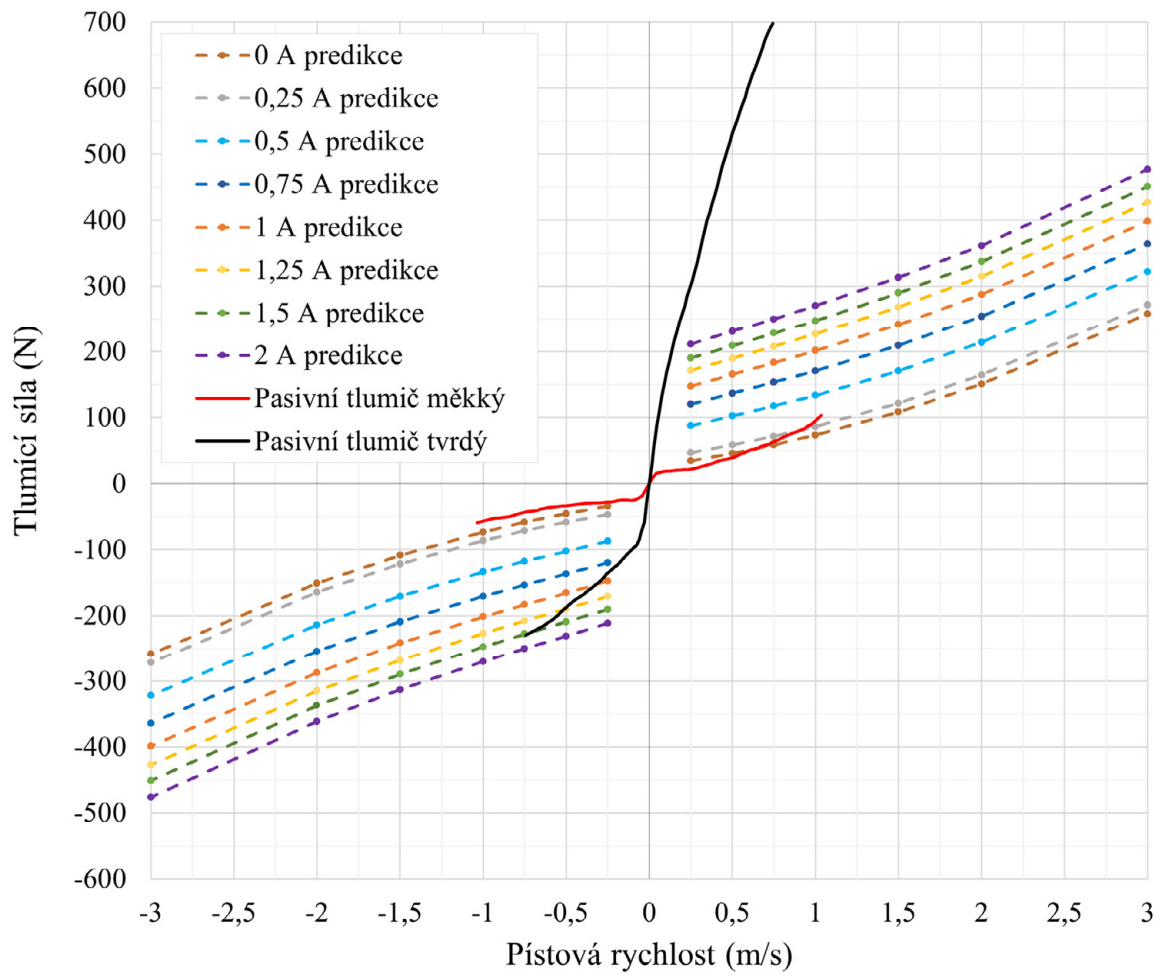
$$F = F_{\eta} + F_{\tau} + F_t + F_H \quad (7)$$

Hydraulické tlakové ztráty byly vypočteny na základě následující rovnice:

$$F_H = \frac{K_L \rho v^2}{2} \cdot A_p, \quad (8)$$

kde  $K_L$  je ztrátový součinitel (-),  $\rho$  je hustota MRF ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $v$  je střední rychlost proudění ( $\text{m/s}$ ) a  $A_p$  je plocha pístu ( $\text{m}^2$ ).

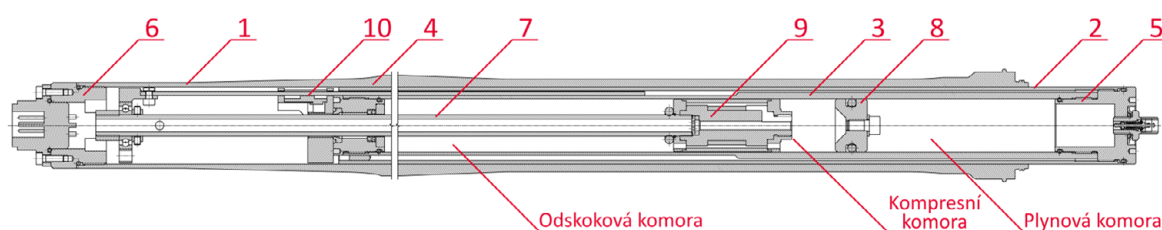
Výsledkem tohoto modelu je celá F-v charakteristika MR tlumiče. Na obr. 5-15 lze vidět, že charakteristika MR tlumiče pokrývá většinu plochy charakteristiky pasivního tlumiče. Pasivní tlumič má možnost úplného uzavření ventilu a tím zamknutí vidlice proti pohybu, což je právě oblast, kterou MR tlumič nepokrývá. Avšak tato funkce není podmínkou pro správnou funkci tlumiče a tuto nepokrytou oblast nemusíme uvažovat.



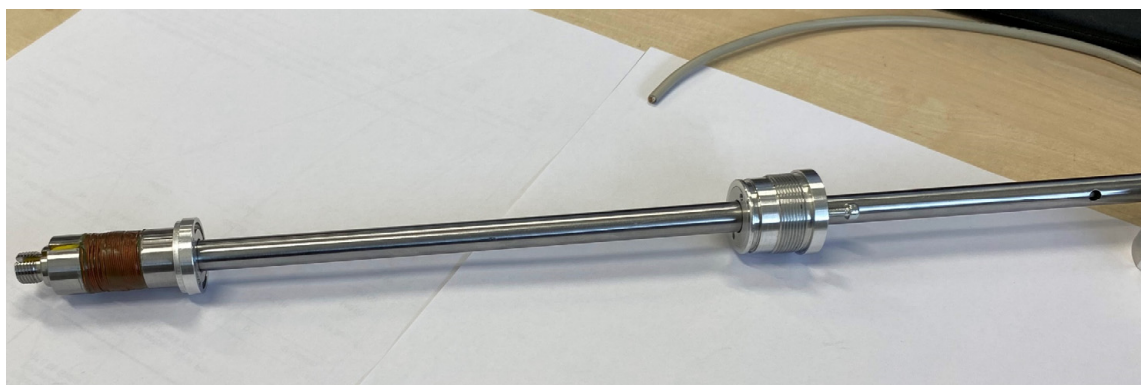
obr. 5-15 Predikce F-v charakteristiky a porovnání s původním pasivním tlumičem

## 5.2 Konstrukční řešení MR tlumiče I. generace

Navržený MR tlumič I. generace na obr. 5-16 má jednoplášťovou konstrukci a skládá se z: (1) vnější nohy, (2) vnitřní nohy, (3) válce, (4) horního víka válce, (5) spodního víka válce, (6) horního víka nohy, (7) pístnice, (8) plovoucího pístu, (9) MR ventilu a (10) magnetického snímače zdvihu. Patrona tlumiče se skládá z kompresní, odskokové a plynové komory, která slouží pro kompenzaci objemu MR kapaliny z důvodu zasouvání pístnice. Plynová komora je naplněna vzduchem o tlaku 15 bar, tlak nesmí být nižší než je nejvyšší tlak MR kapaliny při provozu. Vzduch se plní pomocí autoventilku, který je velmi častý u duší jízdních kol. Z důvodu vysokého tlaku se plynová komora projevuje jako tuhá pružina, a proto je zapotřebí snížit tuhost původní vzduchové pružiny v druhé noze vypuštěním vzduchu. Plynová komora je od kompresní komory oddělena plovoucím pístem. Skrz něj je vytvořen otvor se závitem, pomocí kterého se odvzdušňuje MR kapalina při montáži. Odvzdušňovací otvor se uzavírá šroubem a USIT kroužkem.



obr. 5-16 Konstrukce MR tlumiče I. generace



obr. 5-17 Sestava pístu, pístnice a horního víka válce



obr. 5-18 Fotografie sestavené patrony tlumiče

Pro snížení hmotnosti tlumiče byla jako materiál všech vík vybrána hliníková slitina EN AW-6082. Pístnice o největším průměru 10 mm je vyrobena z oceli ST52 BK+S. Povrch je obráběn a má povrchovou úpravu TENIFER QPQ pro zvýšení tvrdosti povrchu a zlepšení



drsnosti povrchu. Pístnice byla vybrána z katalogu firmy Hydraulics a byla upravena přidáním závitů a zvětšením vnitřního otvoru na 6 mm pro další snížení hmotnosti a umožnění prostrčení napájecího kabelu. Válec tlumiče byl vybrán také z firmy Hydraulics a dále upraven pro snížení hmotnosti a zakomponování snímače zdvihu. Je vyroben z oceli E355SR. Plovoucí píst je vyroben z polyamidu Nylatron GS, který má dobré kluzné vlastnosti pro vedení ve válci a je také dostatečně pružný pro přitlačení těsnění k válci.

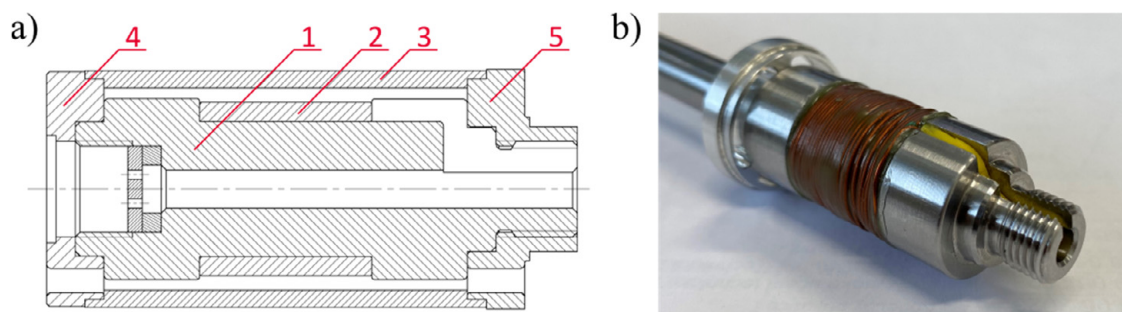
Vyrobený MR tlumič I. generace je i s úpravami a použitím lehkých materiálů těžší než původní pasivní tlumič o 63 %. Jeho celková hmotnost je 2,15 kg. Prvním důvodem je vyšší hmotnost náplně MR kapaliny oproti oleji o 42 %. Tuto hmotnost nelze minimalizovat, bez ovlivnění vlastností tlumiče. Dalším důvodem je použití tlustostěnného ocelového válce, což je aktuálně nejtěžší komponenta patrony tlumiče. Pístní tyč je také ocelová. Obě zmíněné komponenty budou v II. generaci tlumiče upraveny pro co nejnižší hmotnost, společně s dalšími komponenty v tab. 5-3.

tab. 5-3 Seznam upravitelných komponent

Název komponenty	Materiál	Hmotnost (g)
Válec	E355 SR	579
Pístní tyč	ST 52 BK+S	129
Víko vnější nohy – vnější	EN AW-6082	44
Dolní víko válce	EN AW-6082	43
Víko vnější nohy – vnitřní	EN AW-6082	30
Horní víko válce	EN AW-6082	21
Nosič senzoru	PLA	13
Podložka těsnění	E335	7
Držák mag. pásku	PLA	5

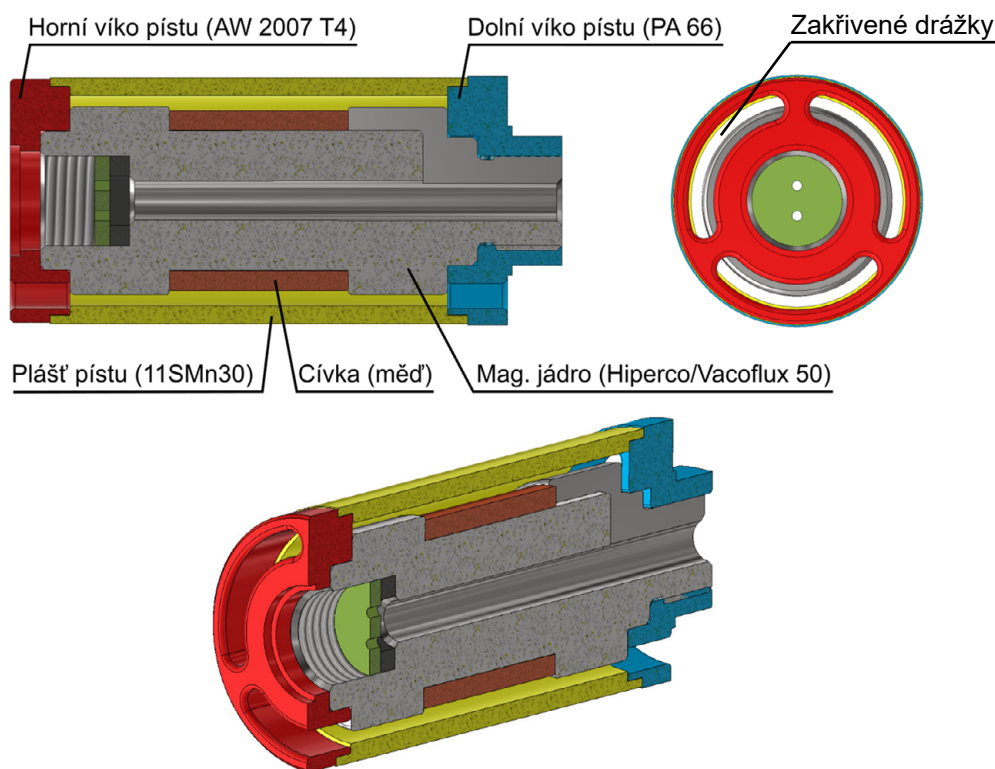
### 5.2.1 MR ventil

Samotný MR ventil (na obr. 5-19) se skládá z magnetického jádra (1) z kobaltové slitiny Hiperco 50, která má vysokou permeabilitou a magnetickou saturaci, což zajistí krátkou časovou odezvu a vysoký dynamický rozsah tlumiče. Na jádře je navinuta cívka se 148 závitů (2) s průměrem drátu 0,45 mm. Plášť pístu (3) je vyroben z oceli 11SMn30 z důvodu jednodušší a levnější výroby. MR ventil je sevřen pomocí pístnice a dvou vík pístu (4, 5). Spodní víko pístu (5) je vyrobeno z polyamidu 66 SA a slouží také k vedení pístu. Horní víko pístu (4) je vyrobeno z hliníkové slitiny EN AW-2007 T4.



obr. 5-19 a) návrh MR ventilu b) fotografie částečně složeného MR ventilu

Navržený MR ventil má šterbinu o šířce 1,5 mm, jeho vnější průměr 25 mm je dán zvoleným válcem. Ve víkách pístu jsou vytvořeny tři zakřivené drážky jejichž geometrie byla optimalizována pomocí CFD analýzy. Skrz jádro je vytvořena díra pro vedení napájecích kabelů pro cívku a dále je kabel veden úzkou drážkou skrz magnetický pól. Po navinutí cívky je tento prostor vyplněn vytvrditelnou plastickou hmotou, aby nedocházelo k průniku MR kapaliny. K těsnění pístnice pak slouží konektor a ploché pryžové těsnění. Výsledný návrh je zrekapitulován na obr. 5-20.



obr. 5-20 Výsledný návrh MR ventilu

### 5.2.2 Pevnostní MKP analýza válce a vík I. generace

U podstavy válce a obou vík válce byla provedena pevnostní MKP analýza v softwaru ANSYS Workbench, podrobnosti o analýze jsou v Příloze 1. Použité materiály a jejich mechanické vlastnosti jsou vypsány v tab. 5-4. Materiál vík je hliníková slitina, válec

je ocelový. Podstava byla zatížena vnitřním tlakem působící normálově na všechny vnitřní plochy komory. Velikost tlaku vychází z predikce tlumící síly, avšak pro zaručení bezpečnosti byla navýšena na dvojnásobek, tj. 4,8 MPa. Pevná vazba na závitě dolního víka byla přidána pro znehybnění podstavy. Připojení vík bylo zajištěno pomocí rough kontaktu na plochy závitů a dosedací čelní plochy.

tab. 5-4 Použité materiály pro pevnostní analýzu

Materiál	E (GPa)	R <sub>e</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	ν (-)
EN AW-6082 T6	69	240	310	0,33
E355SR (ST52.3 BK+S)	210	450	590	0,3

H: Static Structural Válec 1  
Static Structural  
Time: 1, s

A Fixed Support  
B Pressure: 4,8 MPa



obr. 5-21 Okrajové podmínky pevnostní analýzy válce

Maximální napětí se nachází na vnitřní ploše válce a jeho velikost je 45 MPa (viz Příloha 1). Součinitel bezpečnosti válce je 5,8. Sestava je tedy značně předimenzovaná, avšak v této fázi návrhu není cílem konstrukci optimalizovat.

5,8535 Min  
15 Max 5 0  
H: Static Structural Válec 1  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1

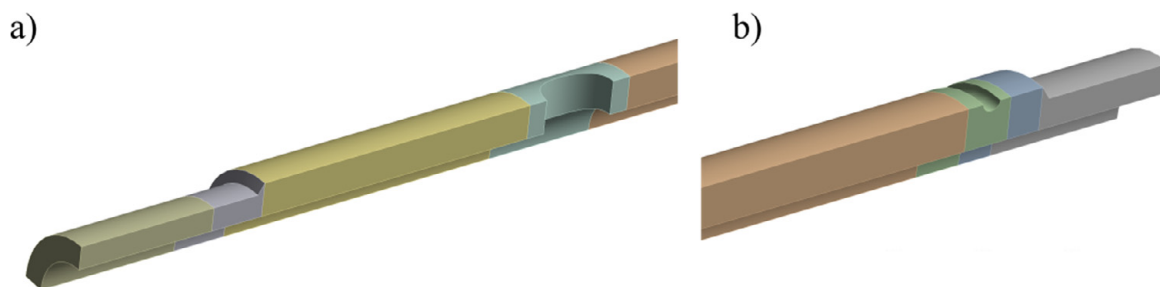


obr. 5-22 Součinitel bezpečnosti válce a vík

### 5.2.3 Pevnostní MKP analýza pístitnice I. generace

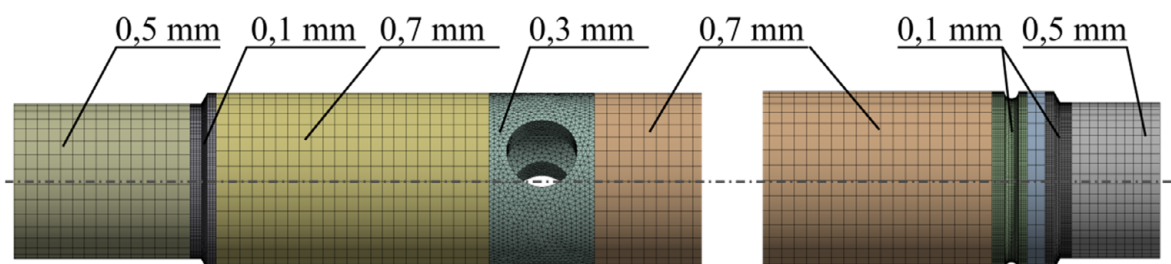
Pro posouzení současného stavu pístitnice a nalezení kritického místa byla vytvořena MKP pevnostní analýza pístitnice I. generace MR tlumiče. Materiál pístitnice je ocel ST52 BK+S a je dán polotovarem – válcovanou trubkou, kterou používá firma Hydraulics.

Geometrie pístitnice na obr. 5-23 byla upravena na čtvrtinový výřez pro snížení počtu elementů a urychlení výpočtu. Závitě na koncích pístitnice byly modelovány pouze jako jádro pro konzervativnější výsledky. Výběh závitě byl modelován jako 60° sražení hrany.



obr. 5-23 Geometrie pístnice I. generace: a) horní část, b) pístní část

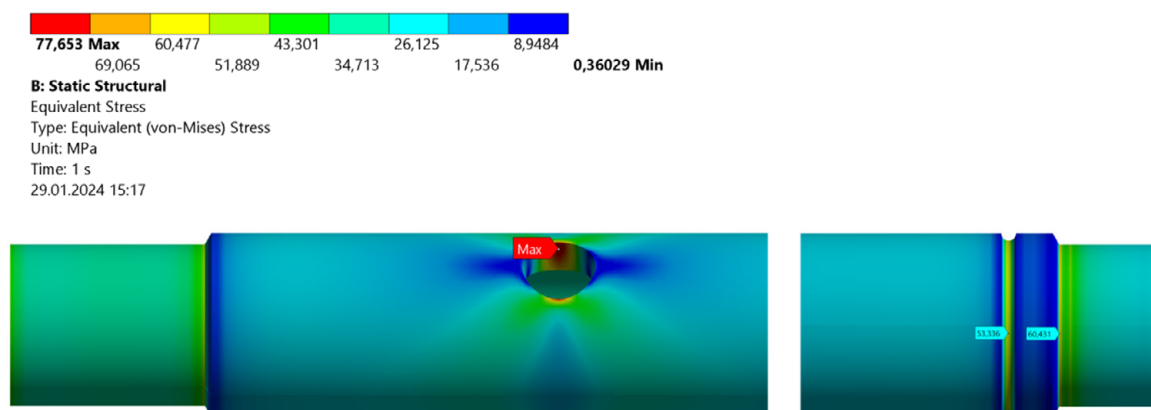
Nastavení konečnoprvkové sítě je zobrazeno na obr. 5-24. Kromě oblasti kolem příčné díry, kde byly použity kvadratické tetrahedrony, byly použity kvadratické hexahedrony. Celkově má síť 356 964 uzlů a 90 915 elementů.



obr. 5-24 Nastavení sítě MKP analýzy pístnice I. generace

V analýze byly nastaveny dvě okrajové podmínky: pevná vazba na čele závitu pro upevnění pístnice do horního víka nohy a tahová síla o velikosti 250 N působící v ose druhého závitu pro upevnění pístu (celkové zatížení je tedy 1 kN).

Nejdůležitějším výsledkem analýzy je redukované napětí a jeho pozice. Nejvyšší redukované napětí se nachází v příčném otvoru pístnice, který slouží pouze pro montáž pístu (viz obr. 5-25). Další maxima se nachází ve výběhu závitu a drážce, zde jsou hodnoty napětí menší – 60 MPa, respektive 53 MPa. Minimální součinitel bezpečnosti pístnice je 5,8. Součinitel bezpečnosti v místě výběhu a drážky je 7,7 a 8,6 respektive.



obr. 5-25 Maximální redukované napětí pístnice I. generace

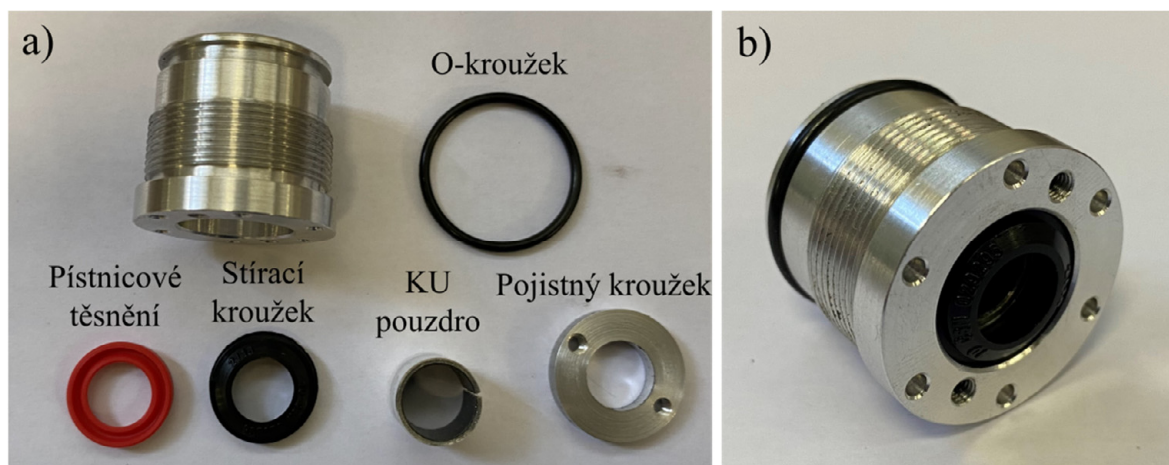
Pístnici je potřeba také kontrolovat z pohledu mezního stavu únavy. Výsledný součinitel bezpečnosti MSÚ je dán rovnicí:

$$k_u = \frac{\sigma'_{Co}}{\sigma_{a,max}} = \frac{170}{77,7} = 2,2 \quad (9)$$

kde  $\sigma_{a,max}$  je maximální amplituda napětí v pístnici (MPa) a  $\sigma'_{Co}$  je korigovaná mez únavy (MPa).

#### 5.2.4 Těsnění pístnice

Pístnice musí procházet horním víkem válce (na obr. 5-26b), toto víko těsně uzavírá válec tlumiče pomocí O-kroužku 16x1,8 NBR 70. Pístnice je ve víku vedena KU pouzdem 1012, které je do víka nalisované. Pístnice je utěsněna pístnicovým těsněním S605–10x15x4 HENNLICH. Těsnění je pojištěno proti vypadnutí při podtlaku nalisováním pojistného kroužku. Na vnější straně patrony tlumiče je stírací kroužek A37 HENNLICH 10x16x3-4, který zabraňuje vstupu nečistotám do vedení pístnice.



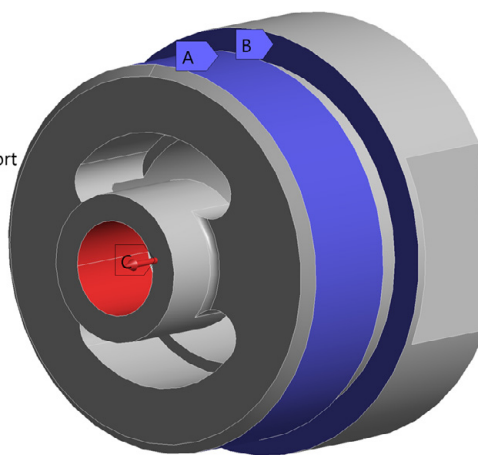
obr. 5-26 a) rozložené horní víko válce b) složené horní víko válce

#### 5.2.5 Horní víko nohy

Horní víko spojuje pístnici s vnější nohou, která je připojena ke zbytku jízdního kola. Tento díl tedy přenáší veškerou tlumící sílu a je zapotřebí zajistit jeho dostatečnou pevnost. Proto byla provedena MKP analýza tohoto dílu pro maximální zatížení 1 kN. Detaily o analýze jsou uvedeny v Příloze 1. Okrajové podmínky pro kompresi jsou na obr. 5-27, v případě odskoku je rozdíl v opačné orientaci síly. Navržený materiál víka je hliníková slitina EN AW-6082 T6, jelikož má dobrou kombinaci pevnosti a měrné hmotnosti. Mechanické vlastnosti slitiny jsou uvedeny výše v tab. 5-4. Výsledný součinitel bezpečnosti komponenty je  $k = 2,7$  pro případ komprese i odskoku (viz obr. 5-28). Vyrobené víko je na fotografii na obr. 5-29. Ve víku byly navrženy odvzdušňovací otvory dutiny vnitřní nohy, aby nedocházelo ke stlačování vzduchu. Ukázalo se však, že při stlačování dochází k nežádoucí hlučnosti, a proto byly otvory následně zalepeny.

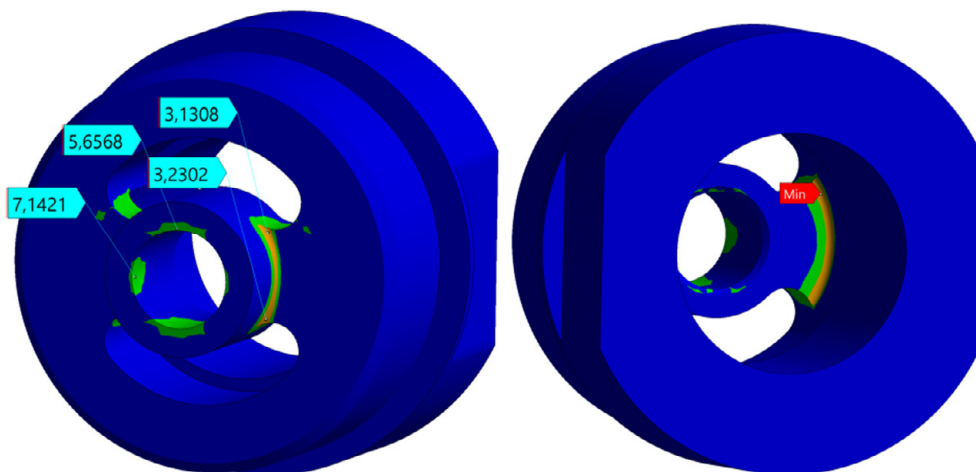
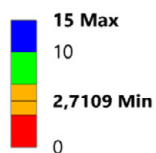
**B: Víko nohy**  
 Static Structural  
 Time: 1, s

- A** Fixed Support
- B** Compression Only Support
- C** Remote Force: 1000, N



obr. 5-27 Okrajové podmínky pevnostní analýzy horního víka nohy

**B: Víko nohy**  
 Safety Factor  
 Type: Safety Factor  
 Time: 1



obr. 5-28 Výsledek MKP - součinitel bezpečnosti horního víka nohy

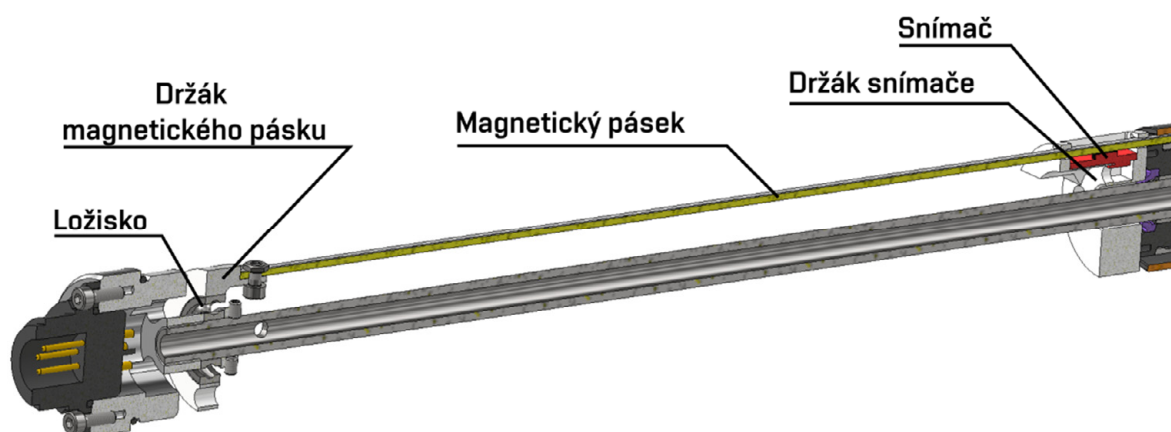


obr. 5-29 Fotografie vyrobeného víka

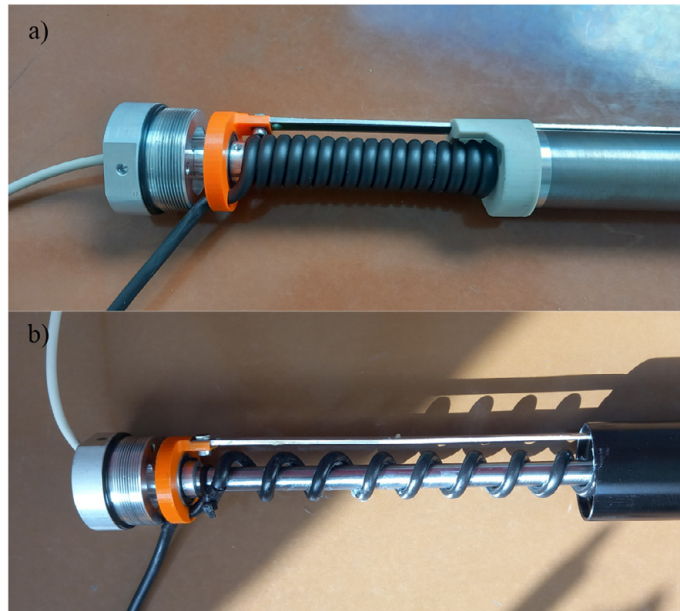
## 5.2.6 Snímač zdvihu

MR tlumič má zabudovaný magnetický snímač zdvihu ve vnitřní noze. Snímač je zobrazen v řezu na obr. 5-30. Integrací do konstrukce je snímač chráněn před poškozením, nebrání instalaci na jízdní kolo a je zachován čistý design. Magnetický pásek je nalepen na podpůrný

hliníkový profil a pevně axiálně připevněn k pístnici. Pásek se však z montážních důvodů musí protáčet kolem pístnice na ložisku. Profil s magnetickým páskem se při zdvihu zasouvá do prostoru mezi válcem a vnitřní nohou. Snímač je nalepen v 3D tištěném držáku, který je upevněn na horní víko válce. Signál ze snímače je veden v tlumiči pomocí spirálního kabelu LAPP UNITRONIC SPIRAL 5x0,14 mm<sup>2</sup>, který se může natahovat podle polohy tlumiče (viz obr. 5-31). Kabel je dále vyveden z tlumiče pomocí elektrického konektoru WEIPU WA22J7Z1, který zajišťuje také napájení cívky. Kabel napájení cívky je protažen dutou pístnicí k jednoduchému konektoru s těsněním v pístu, do kterého jsou připájeny dráty cívky. Dutina magnetického jádra je pak vyplněna plastovou hmotou, aby nedošlo k úniku MR kapaliny skrz pístnici.



obr. 5-30 Zástavba snímače zdvihu

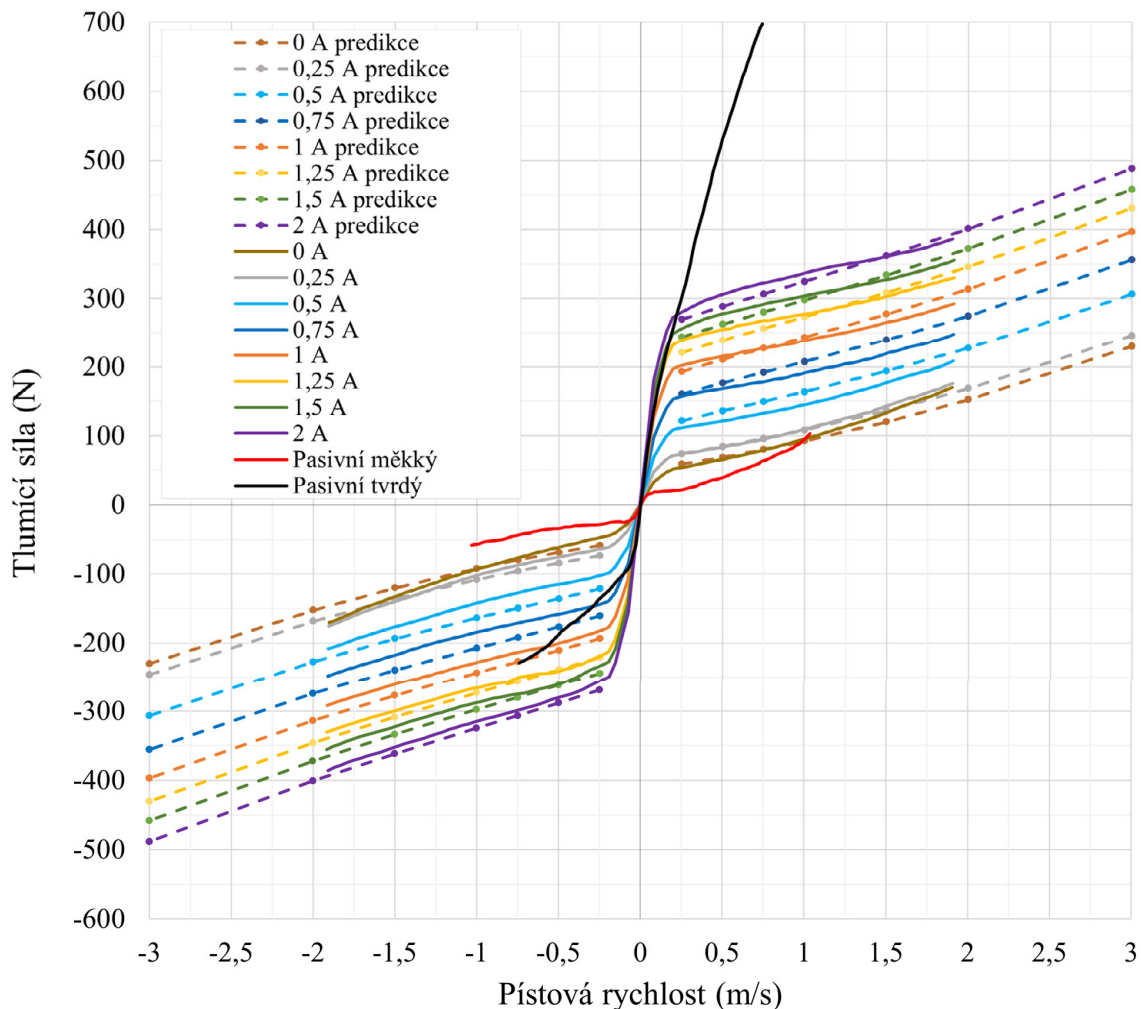


obr. 5-31 Spirální kabel: a) stlačený, b) natažený

## 5.3 Testování tlumiče

### 5.3.1 Rychlostní charakteristika

Po finálním sestavení byl MR tlumič otestován. Tlumič byl upnut pomocí přípravků do hydraulického pulzátoru Inova, který je přizpůsoben pro měření tlumičů a umožňuje měřit sílu, polohu a rychlost. MR tlumič byl zatěžován řízením posunutí, které má harmonický průběh s konstantní amplitudou a zvyšující se frekvencí, tzv. frequency sweep. Bylo provedeno celkem 9 měření pro vzrůstající hodnotu napájecího proudu. Takto bylo možné zmapovat celou tlumicí charakteristiku MR tlumiče. Výsledky měření jsou v grafu na obr. 5-32 porovnány s analytickou predikcí. Jelikož jsou rozptyly v parametrech MR kapaliny uvedených v datasheetu značné a můžou se měnit i podle výrobní šarže. Bylo potřeba korigovat mez toku MR kapaliny, ta byla lineárně zvýšena o 20 %.



obr. 5-32 Porovnání naměřené F-v charakteristiky a predikce

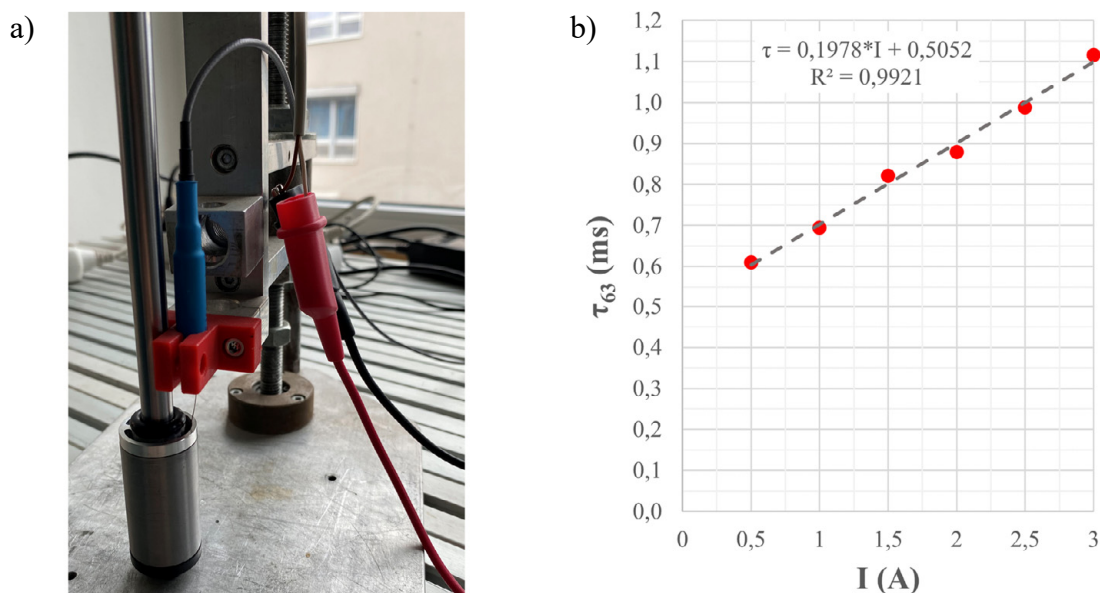
Z grafu je patrné, že naměřené hodnoty ve většině případů odpovídají predikci. Tlumič má dynamický rozsah 5,2. Je však patrná poměrně vysoká tlumicí síla ve vypnutém stavu, za což můžou pasivní odpory v tlumiči. Predikce proto byla upravena zvýšením třecí síly na



50 N. Dynamický rozsah je nízký právě z důvodu vysokého tření. Snížením pasivních odporů se zabývá dále kap. 5.3.3.

### 5.3.2 Časová odezva

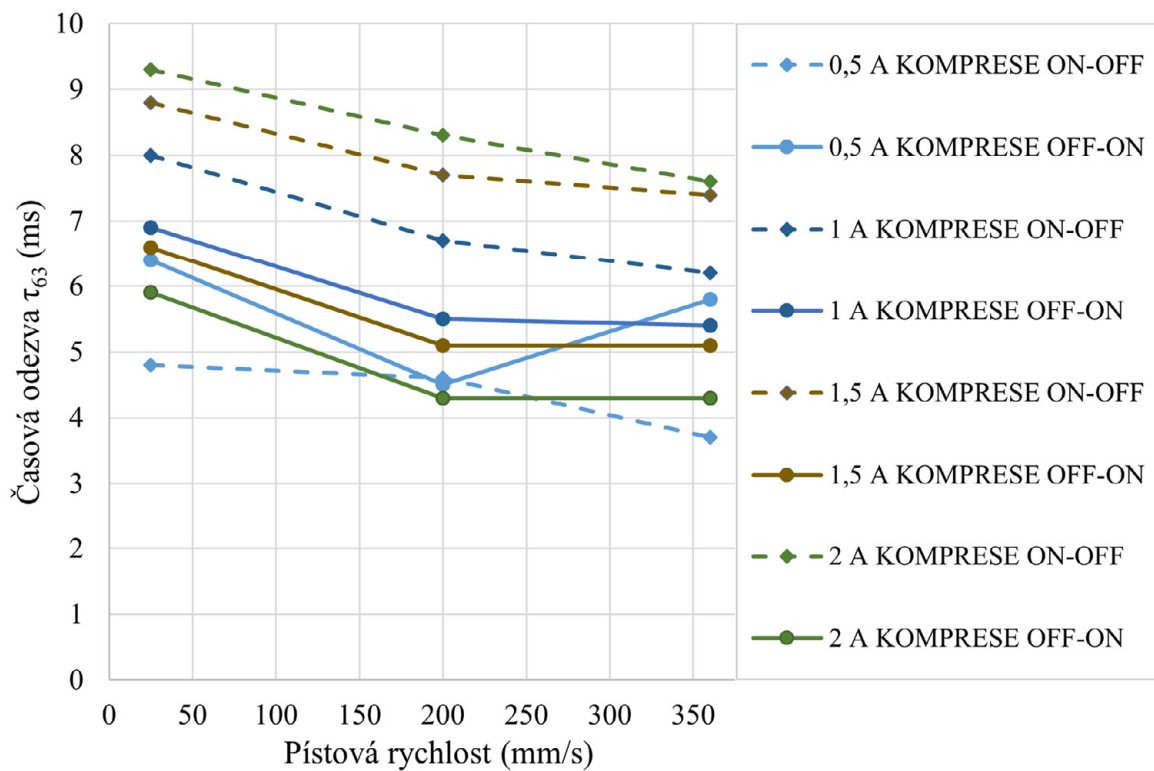
Ještě před sestavením MR tlumiče bylo provedeno měření časové odezvy magnetického obvodu. Měření probíhalo při různých hodnotách amplitudy napájecího proudu a výsledkem je graf závislosti časové odezvy magnetického pole na proudu (obr. 5-33b). Pro měření byl použit gaussmetr, jehož snímač byl zaveden do štěrbiny mezi póly (viz obr. 5-33a). Cívka MR ventilu byla napájena pomocí proudového regulátoru. Napájecí proud měl čtvercový průběh, který byl řízen generátorem funkcí. Vyhodnocována byla časová odezva  $\tau_{63}$  magnetické indukce na náběžnou hranu napájecího proudu. MR ventil má velmi krátkou časovou odezvu, která je při proudu 3 A přibližně 1,1 ms. Časová odezva je na napájecím proudu lineárně závislá.



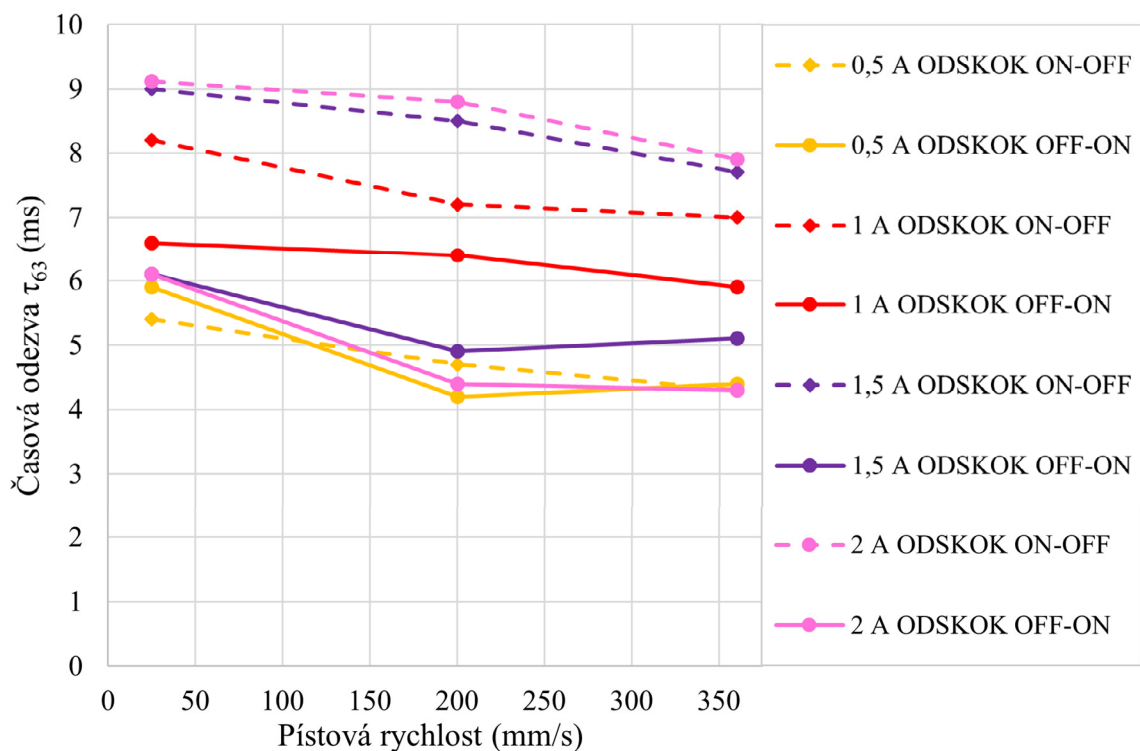
obr. 5-33 Měření časové odezvy: a) fotografie měření, b) závislost časové odezvy na proudu

Na pulzátoru byla kromě F-v charakteristiky změřena také časová odezva celého tlumiče. Tlumič byl zatěžován harmonickým průběhem posunutí s konstantní frekvencí. Napájení cívky tlumiče bylo nastaveno tak, že po třech cyklech v zapnutém stavu následovaly dva cykly ve vypnutém stavu a poté opět tři cykly v zapnutém stavu. Zapnutí a vypnutí proudu dochází v momentě, kdy je tlumič uprostřed zdvihu a má nejvyšší pístovou rychlost. Měření bylo provedeno pro kompresi i odskok tlumiče a pro čtyři hodnoty proudu (0,5 A až 2 A). Vyhodnocována byla časová odezva  $\tau_{63}$  tlumičí síly při vypnutí (ON-OFF) i zapnutí (OFF-ON) napájecího proudu. Z naměřených dat (obr. 5-34 a obr. 5-35) vyplývá, že tlumič má nejkratší časovou odezvu při vypnutí (ON-OFF) proudu v kompresi při nejvyšší rychlosti

(3,7 ms). Nejvyšší odezva je při vypnutí proudu 2 A v kompresi (9,3 ms). Celkově má tlumič průměrnou časovou odezvu 6,3 ms, což je nižší než požadovaných 10 ms.



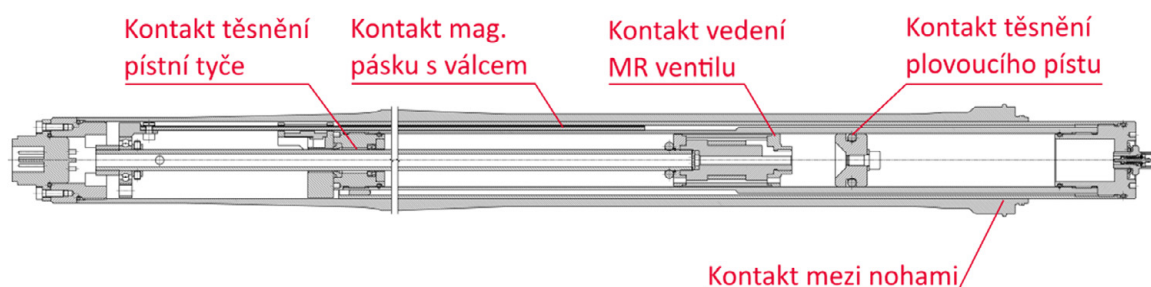
obr. 5-34 Závislost časové odezvy tlumiče na pístní rychlosti a proudu pro kompresi



obr. 5-35 Závislost časové odezvy tlumiče na pístní rychlosti a proudu pro odskok

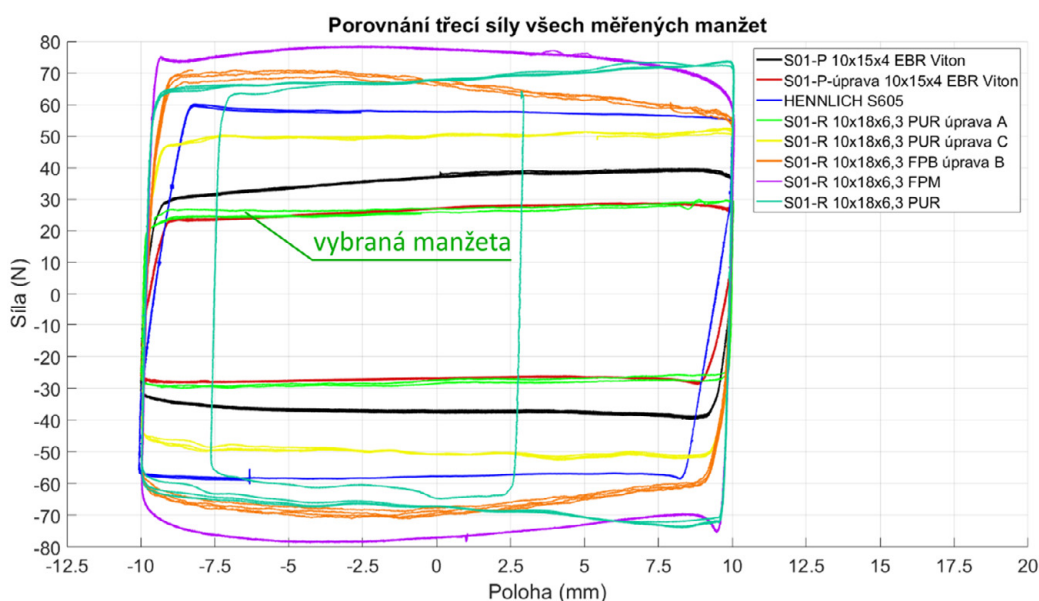
### 5.3.3 Pasivní odpory tlumiče

Při testování tlumiče se ukázalo, že MR tlumič má vysoké pasivní odpory, které mají velikost přibližně 50 N. Takto vysoké tření může být způsobeno hned několika kontakty v tlumiči, které jsou zobrazeny na obr. 5-36. Proto bylo provedeno další měření tření pouze s patronou tlumiče, aby se vyloučilo tření mezi nohami a magnetického pásku s válcem. Patrona tlumiče pak má velikost pasivních odporů 40 N. Proto bylo rozhodnuto vyzkoušet jiné řešení těsnění pístní tyče.



obr. 5-36 Kontakty v tlumiči

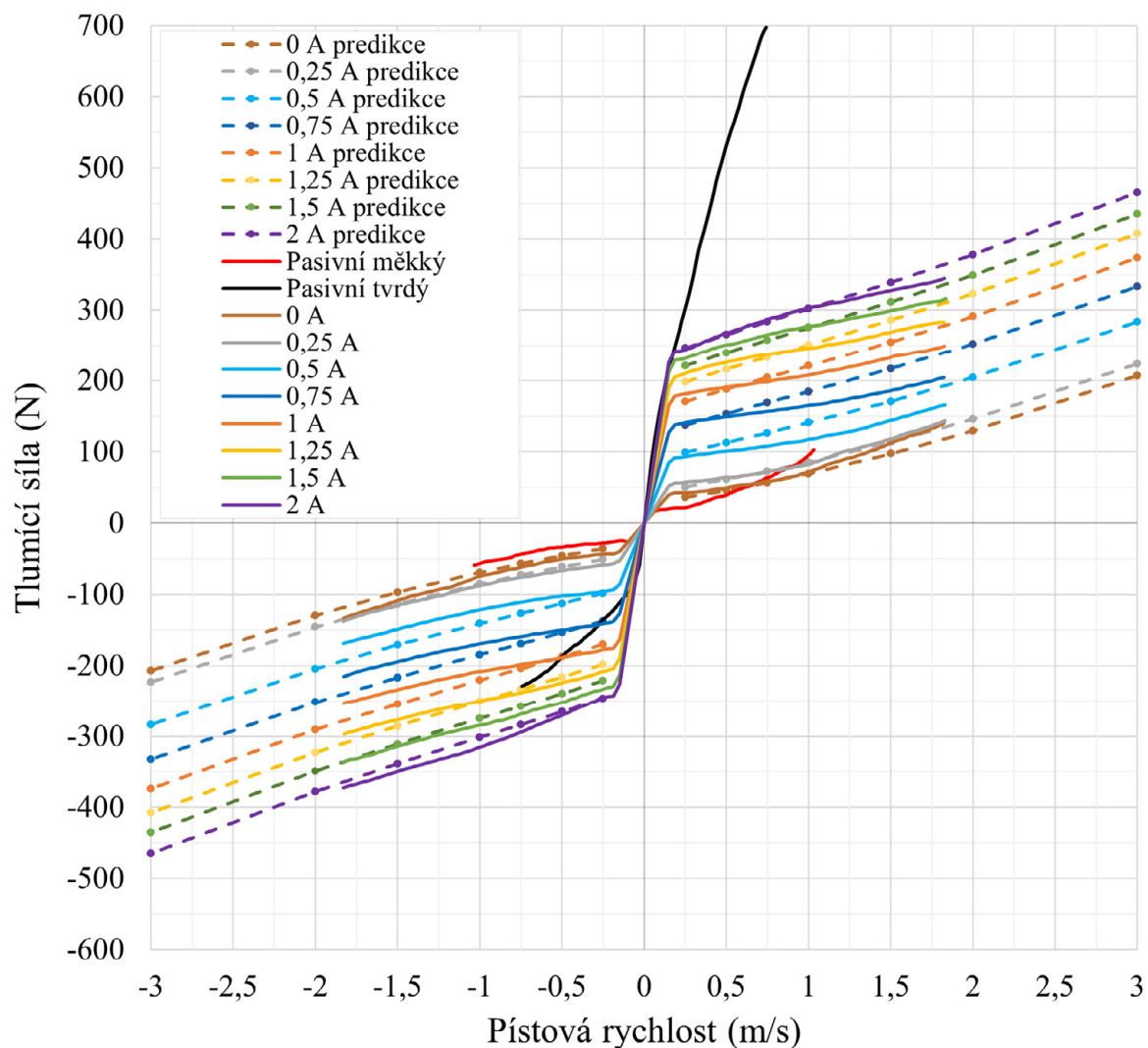
První úpravou bylo vyjmutí stíracího kroužku, jelikož těsnění pístnice je uzavřeno v noze vidlice a je tak chráněno před nečistotami. Dále bylo testováno sedm nových pístnicových těsnění - manžet, details o jejich testech jsou v Příloze 3. První byly testovány manžety s malým zástavbovým prostorem. Upravená verze této manžety sice dosahovala nízké třecí síly pod 30 N (viz obr. 5-37), avšak docházelo k lekáži MR kapaliny kolem pístnice. Proto byla ve víčku upravena zástavba pro větší manžetu a bylo otestováno několik typů manžet se standardní velikostí zástavby. Testovány byly dva různé materiály manžet – pryž FPM a polyuretan PUR. Žádná z testovaných manžet neměla lekáž a nejnižší třecí síly (27 N) dosáhla manžeta PUR verze A. Pro MR tlumič II. generace tedy navrhuji manžetu S01-R-úpr. 10x18x6,3 PUR verze A.



obr. 5-37 Porovnání výsledků měření tření manžet

### 5.3.4 Rychlostní charakteristika s novou manžetou

Po nalezení vhodné manžety s nízkým třením byla naměřena finální F-v charakteristika MR tlumiče (na obr. 5-38). Tlumič s novou manžetou dosahuje nízké hodnoty třecí síly 27 N. Dynamický rozsah se zvýšil na hodnotu 5,7. Tlumící charakteristika pokrývá celou charakteristiku původního pasivního tlumiče a dokáže ho tedy zcela nahradit. Tato výsledná tlumící charakteristika bude zachována i v II. generaci MR tlumiče.



obr. 5-38 Finální F-v charakteristika MR tlumiče

## 5.4 Zhodnocení MR tlumiče I. generace

Ačkoliv byl tlumič úspěšně sestaven a otestován, jsou v konstrukci místa, u kterých je vhodnější konstrukci pozměnit, aby se dále vylepšila funkce a montáž tlumiče. Zároveň je potřeba snížit hmotnost MR tlumiče, která je u I. generace vyšší o 62 % oproti původnímu pasivnímu tlumiči.

Vysokou hmotnost tlumiče lze řešit hmotnostní optimalizací vyráběných komponentů, což spočívá v přemodelování vybraných dílů s cílem je odlehčit a výměnou komponent z oceli za komponenty z hliníkové slitiny. Komponenty, které je potřeba optimalizovat jsou:

- válec – současný materiál z oceli nahradit hliníkem a snížit jeho tloušťku,
- pístnice – vyrobit ji z hliníku a povlakovat její povrch,
- hmotnostně optimalizovat obě víka válce, víko vnější nohy a další komponenty.

Dále je vhodné pro zjednodušení montáže provést úpravu konstrukce horního víka nohy na dvoudílnou konstrukci. Při montáži se vyskytl problém vyvedení kabelu od senzoru z víka ven. Také je potřeba vyřešit připojení sensoriky, dvou akcelerometrů, na tlumič.

## 6 DETAILNÍ NÁVRH

V předchozí kapitole byla navržena a otestována I. generace MR tlumiče. Ta však má několik nedostatků, které je potřeba v II. generaci odstranit. Následující část se tedy prvně věnuje hlavnímu nedostatku – vysoké hmotnosti. Vybrané komponenty tlumiče byly přemodelovány s cílem minimalizovat jejich hmotnost, ale zachovat jejich funkci stejnou. Nejprve byla vybrána jedna z variant odlehčení pístnice, poté byl navržen odlehčený válec a nakonec byla odlehčena víka a další komponenty tlumiče. U komponentů zatěžovaných provozní silou byla provedena pevnostní MKP analýza v programu ANSYS Workbench 2023 R2. Dále bylo potřeba provést úpravy pro zjednodušení montáže, které se týkají komponenty horního víka nohy. Nakonec bylo také vyřešeno zakomponování akcelerometrů do konstrukce, které jsou potřebné pro semiaktivní řízení.

### 6.1 Pístnice

#### 6.1.1 Materiály

Pro pístnici jsou uvažovány dvě materiálové možnosti – ocel a hliníková slitina. Materiál původní pístnice byl dán nabídkou firmy Hydraulics a jedná se o ocel ST52 BK+S (podobná jako E355SR). Pro novou pístnici je uvažována ocel 20MnV6 (podobná jako 13 220), která má vyšší mez pevnosti. Jako alternativa k oceli je hliníková slitina EN AW 6082 T6 nebo EN AW 7075 T6. Více o těchto materiálech je v tab. 6-1 a více o použité hliníkové slitině je v kap. 6.1.3. u hliníkové varianty pístnice.

tab. 6-1 Materiálové vlastnosti použitých materiálů pístnice [23–25]

Materiál	Mez pevnosti	Mez kluzu	Modul pružnosti	Mez únavy	Korigovaná mez únavy	Hustota
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	$E$ (GPa)	$\sigma_{Co}$ (MPa)	$\sigma'_{Co}$ (MPa)	$\rho$ (g·cm <sup>-3</sup> )
ST52 BK+S	Min 590	Min 450	210	297	170	7,85
20MnV6	Min 600	Min 390	210	302	173	7,85
EN AW-6082 T6	Min 295	Min 250	69	–	–	2,7
EN AW-7075 T6	Min 540	Min 485	72	–	–	2,81

Mez únavy obou ocelí v tab. 6-1 byla odhadnuta z meze pevnosti pomocí vztahu:

$$\sigma_{Co} = 0,504 \cdot R_m, \quad (10)$$

kde  $R_m$  je mez pevnosti (MPa).

Korigovaná mez únavy pak byla získána pomocí Marinovy rovnice:

$$\sigma'_{Co} = k_a k_b k_c k_e \sigma_{Co}, \quad (11)$$

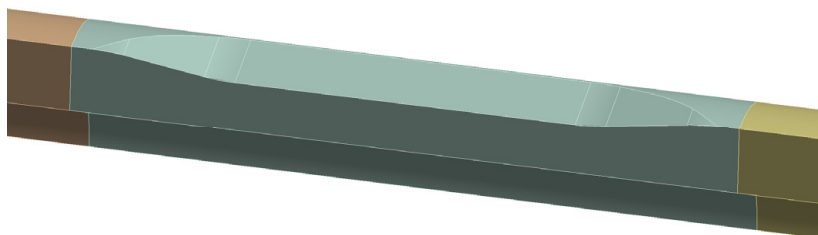
kde  $k_a$  je součinitel vlivu jakosti povrchu,  $k_b$  je součinitel vlivu velikosti tělesa,  $k_c$  je součinitel vlivu způsobu zatěžování a  $k_e$  je součinitel spolehlivosti. Hodnoty jednotlivých součinitelů jsou vypsány v tab. 6-2.

tab. 6-2 Hodnoty součinitelů korigované meze únavy

Součinitel	Uvažované hledisko	Hodnota (-)
$k_a$	obrábění	0,83
$k_b$	tah/tlak	1
$k_c$	tah/tlak	0,85
$k_e$	99 %	0,814

### 6.1.2 Ocelová varianta pístnice

Geometrie pístnice vychází z první generace pístnice. Pístnice I. generace neměla výhodný tvar, jelikož obsahovala koncentrátor napětí ve formě průchozí příčné díry. První změnou proto bylo nahrazení této díry zafrézováním pro plochý klíč velikosti 9 (viz obr. 6-1). Zafrézování bylo navrženo tak, aby nevznikly ostré hrany, které působí jako koncentrátoři napětí. Nastavení MKP analýzy je stejné jako u analýzy pístnice I. generace MR tlumiče. Okrajové podmínky jsou pevná vazba na čele závitů pro upevnění do horního víka nohy a tahové osově zatížení o velikosti 250 N působící na závit na opačném konci pístnice (celkově tedy 1 kN). Nastavení sítě bylo zachováno stejné, pouze v upravené části se zafrézováním byla použita tetrahedronová síť s velikostí elementů 0,4 mm.



obr. 6-1 Navržená geometrie pro klíč

Díky úpravě se maximální redukované napětí snížilo na 67 MPa a jeho poloha se přesunula do výběhu závitů na koncích pístnice. Další rozdíl oproti pístnici I. generace je v materiálu – byla použita ocel 20MnV6, která má lehce vyšší pevnost (viz tab. 6-1).

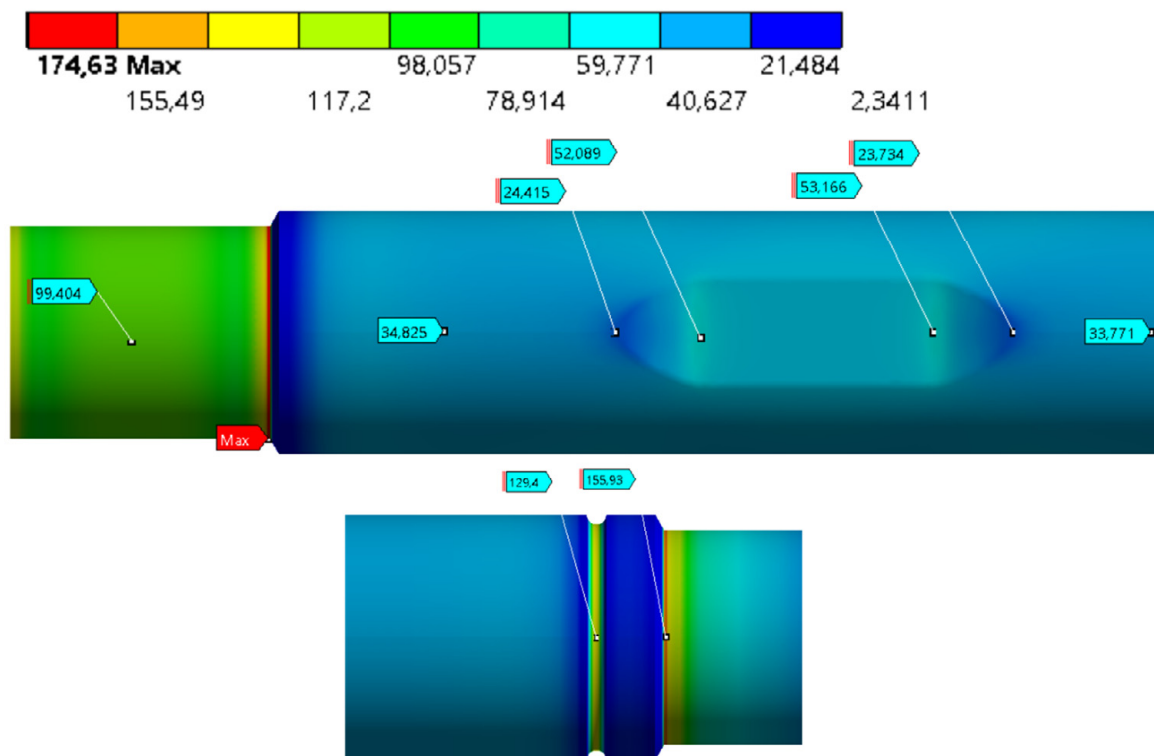
Po nastavení analýzy byla provedena jednoparametrická optimalizace. Jako měněný parametr byl zvolen průměr vnitřního otvoru pístnice, jelikož jeho změna neovlivní připojovací rozměry ani funkci pístnice. Původní rozměr otvoru byl 6 mm, poté byl zvýšen na 6,6 mm a následně inkrementálně zvyšován po 0,2 mm až do rozměru 8 mm, při kterém je součinitel bezpečnosti roven jedné. Vybrané výsledky analýzy jsou vypsány v tab. 6-3.

tab. 6-3 Výsledky jednoparametrické analýzy průměru otvoru pístnice

Otvor pístnice d (mm)	Celkové posunutí (mm)	Nejvyšší redukované napětí (MPa)	Nejnižší součinitel bezpečnosti MSP	Nejnižší součinitel bezpečnosti MSÚ	Hmotnost pístnice (g)
6	0,0319	66,54	5,9	2,6	126,9
6,6	0,0364	78,86	4,9	2,2	111,6
6,8	0,0383	84,47	4,6	2,05	106,2
7	0,0405	91,23	4,3	1,90	100,6
7,2	0,0431	99,46	3,9	1,74	94,8
7,4	0,0461	109,72	3,6	1,58	88,9
7,6	0,0498	122,79	3,2	1,4	82,8
7,8	0,0542	145,77	2,66	1,19	76,5
8	0,0599	174,63	2,23	1,0	70,1

Výsledkem je optimalizovaná geometrie ocelové pístnice s vnitřním průměrem 8 mm. Tato úprava vyhovuje jednak pevnostně, ale i na únavový život. Rozložení redukovaného napětí v pístnici je na obr. 6-2. Maximální hodnota redukovaného napětí 175 MPa se nachází ve výběhu závitů. Druhé lokální maximum napětí 124 MPa je v drážce pro drátěný kroužek. Nahrazením příčného otvoru zafrézováním pro klíč se snížilo lokální maximum napětí v této oblasti o 32 %. Cílem analýzy bylo minimalizovat hmotnost pístnice, ta se snížila na 70 g z původních 127 g, což je v relativním měřítku snížení o 45 %.



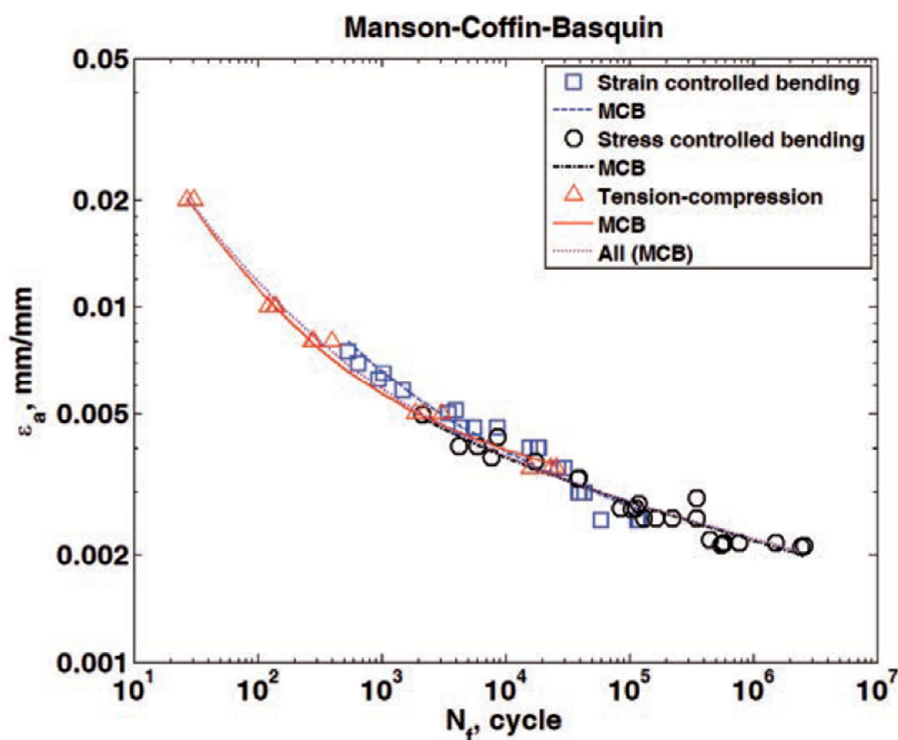


obr. 6-2 Redukované napětí v ocelové pístnici II. generace

### 6.1.3 Hliníková varianta pístnice

Druhou možností je vyrobit pístnici z hliníkové slitiny. Ta má oproti oceli téměř o dvě třetiny nižší hustotu, a tudíž volbou tohoto materiálu lze dále snížit hmotnost pístnice. Důležitý je však výběr správné slitiny. Požadavkem na pístnici je také dostatečná tvrdost povrchu pístnice, což bez povrchové úpravy pístnice nelze dosáhnout. Neméně důležité jsou také mechanické vlastnosti slitiny – mez kluzu a pevnosti. Jedna z nejpevnějších hliníkových slitin je EN AW-7075 T6, která se používá v aerospace a letectví. Nevýhodou této slitiny je však nižší odolnost vůči atmosférické korozi, náchylnost na praskání ve vrubech a nemožnost eloxování [24, 26]. Z těchto důvodů byla vybrána slitina EN AW-6082 T6. Jedná se o precipitačně tvrditelnou slitinu, která má nejvyšší pevnost z řady 6000, výbornou odolnost vůči korozi, dobrou obrobitelnost a možnost eloxování [23, 27].

Nevýhodou hliníkové slitiny je absence meze únavy materiálu, a tudíž návrh pístnice musí být proveden na časovanou pevnost v oblasti vysokocyklové únavy. Na obr. 6-3 je E-N křivka pro slitinu EN-AW 6082 T6 včetně interpolace pomocí Manson-Coffin-Basquin modelu. Tento model je následně použit pro výpočet únavového života pístnice.



obr. 6-3 Experimentálně naměřený E-N graf pro EN AW-6082 T6 [28]

MCB model E-N křivky je dán rovnicí:

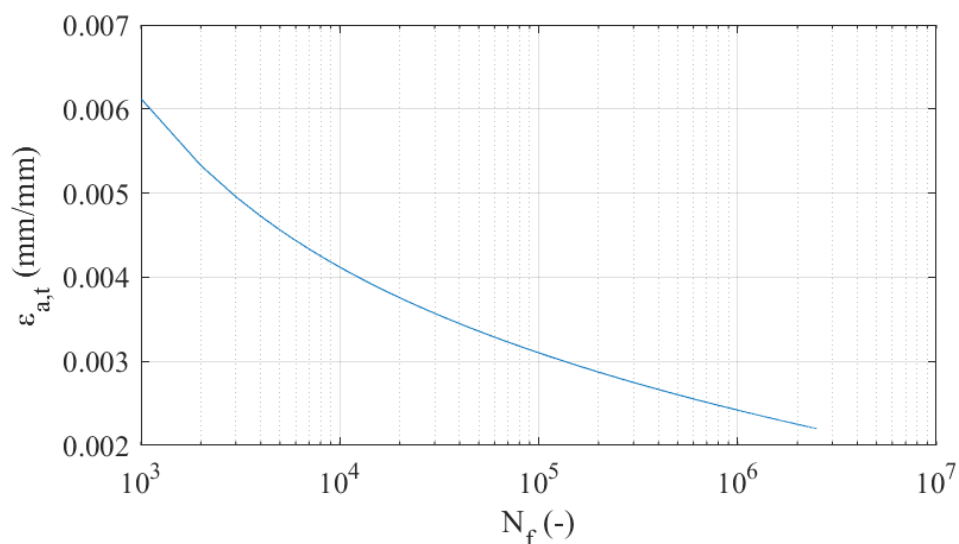
$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (12)$$

kde  $\varepsilon_{a,t}$  je celkové přetvoření (–),  $\varepsilon_{a,e}$  a  $\varepsilon_{a,p}$  jsou elastická a plastická složka přetvoření (–),  $\sigma'_f$  je součinitel meze únavy (MPa),  $\varepsilon'_f$  je součinitel plastického únavového přetvoření (–),  $E$  je modul pružnosti (MPa),  $N_f$  je únavová životnost v cyklech (–),  $b$  a  $c$  jsou exponenty (–). Parametry MCB modelu pro různé způsoby zatěžování jsou v tab. 6-4.

tab. 6-4 Použité hodnoty parametrů MCB modelu [28]

Manson-Coffin-Basquin				
	$b$	$c$	$s'_f$ MPa	$e'_f$
bending (stress controlled)	-0.1014	-0.6566	733.4613	0.1876
bending (strain controlled)	-0.1127	-0.6359	823.0734	0.2755
Tension-compression	-0.0656	-0.6340	533.2891	0.1854
All	-0.0909	-0.5815	649.1205	0.1476

Pro účely návrhu pístnice ve vysokocyklové oblasti byly použity parametry modelu pro ohyb s řízením napětí (stress controlled bending). Použitá E-N křivka na základě tohoto modelu je vykreslena na obr. 6-4.



obr. 6-4 Použitá E-N křivka hliníkové slitiny EN AW-6082 T6

Pevnostní analýza byla nastavena totožně, jako předchozí analýza ocelové pístnice s jediným rozdílem v materiálu geometrie. Následně byl proveden parameter sweep průměru otvoru v pístnici, který byl zvětšován až do momentu přiblížení meznímu stavu pružnosti. Výsledky analýzy jsou v tab. 6-5.

tab. 6-5 Výsledky pevnostní analýzy hliníkové pístnice

Otvor pístnice d (mm)	Celkové posunutí (mm)	Nejvyšší redukované napětí (MPa)	Nejnižší součinitel bezpečnosti MSP	Nejvyšší elastické přetvoření (mm/mm)	Počet cyklů do únavy dle MCB	Hmotnost pístnice (g)
6	0,097	65,94	3,8	0,00097	>2,5 M	43,9
6,6	0,111	77,44	3,2	0,00115	>2,5 M	38,6
6,8	0,117	83,1	3,0	0,00123	>2,5 M	36,7
7	0,124	89,9	2,8	0,00133	>2,5 M	34,8
7,2	0,131	96,90	2,6	0,00143	>2,5 M	32,8
7,4	0,141	108,73	2,3	0,00162	>2,5 M	30,7
7,6	0,152	122,36	2,0	0,00182	>2,5 M	28,6
7,8	0,165	143,00	1,75	0,00209	>2,5 M	26,5
8	0,183	176,20	1,42	0,00255	586 000	24,3

Dle očekávání je hodnota a poloha nejvyššího redukovaného napětí stejná jako u ocelové pístnice. Součinitel bezpečnosti MSP je však u hliníkové pístnice menší. Stále však pístnice pevnostně vyhovuje. V případě hliníkové pístnice bylo také vyhodnocováno nejvyšší elastické přetvoření, podle kterého byl určován počet cyklů do únavy. Vzniklé přetvoření je velmi nízké a na E-N grafu na obr. 6-4 na základě práce Kurka [28] se nachází mimo měřenou oblast, byla tedy uvažována nejvyšší naměřená hodnota v této práci, což je 2,5 milionů cyklů. Pístnice s 8 mm otvorem pak má únavový život pouze 586 000 cyklů.

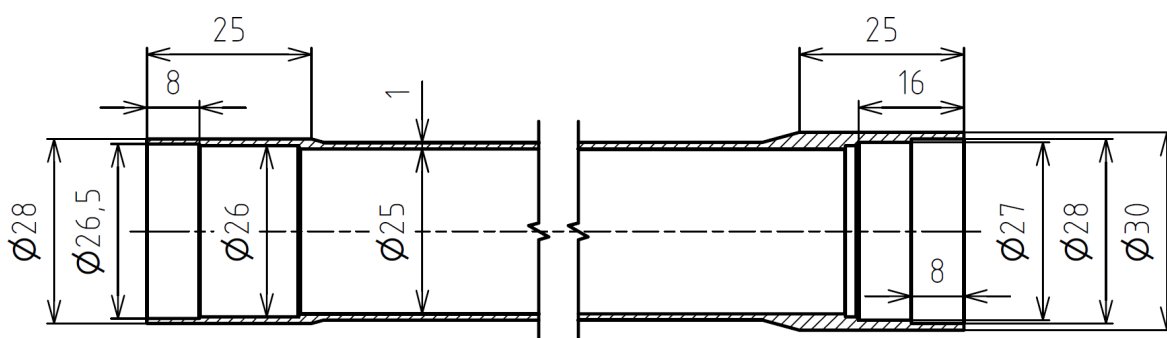
Finální geometrie hliníkové pístnice bude mít tedy vnitřní otvor o průměru 7,8 mm. Hmotnost takto odlehčené pístnice je 27 g, což je oproti pístnici I. generace snížení o 78 % a oproti ocelové pístnici II. generace snížení o 61 % hmotnosti. Právě z důvodu nízké hmotnosti byla vybrána hliníková pístnice.

#### Povrchová úprava hliníkové pístnice

Navrženou pístnici nelze použít bez potřebné povrchové úpravy, která zvýší tvrdost povrchové vrstvy a zlepší tření pístnice ve vedení. Jako povrchová úprava bylo vybráno PVD povlakování Tribobond 20. Jedná se o ořezuvzdorný povlak na bázi AlTiN, který je vhodný pro povlakování hliníkových slitin a také odolává erozivním částicím v MR kapalině [29]. Podmínkou pro tento povlak je však dosažení co nejnižší hodnoty drsnosti Rz na funkčním povrchu pístnice, po povlakování je povrch leštěn.

## 6.2 Válec

Válec II. generace MR tlumiče je vyroben z hliníkové slitiny EN AW-6082 T6 (pro materiálové vlastnosti viz tab. 6-1). Oproti předchozí verzi byla geometrie válce razantně odlehčena snížením tloušťky ve střední části na 1 mm (viz obr. 6-5). Na horním konci byl zachován vnitřní závit M26x1 a vnější průměr válce byl zachován stejný. Vnitřní závit na dolním konci byl změněn na M27x1, aby byla ulehčena montáž plovoucího pístu. Závitů nebyly pro potřeby pevnostní analýzy modelovány. Pro ověření pevnosti válce byla vytvořena podsestava válce sestávající také ze zjednodušené geometrie horního a dolního víka. Analýza byla řešena ve čtvrtinové symetrii. Podrobné nastavení sítě a další výsledky analýzy jsou uvedeny v Příloze 1.

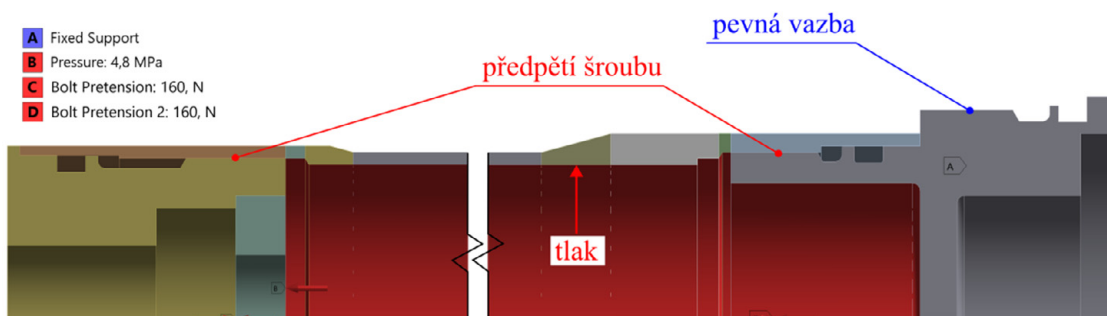


obr. 6-5 Geometrie válce II. generace použitá pro MKP pevnostní analýzu

Okrajové podmínky pevnostní analýzy jsou na obr. 6-6. Zatížení válce vychází z předpokladu nejvyšší dosažitelné tlumicí síly, která způsobuje zvýšení tlaku ve válci. Nejvyšší možný provozní tlak ve válci je roven dvojnásobku nejvyššího tlaku v plynové komoře, tj. 4,8 MPa. Tento tlak působí nejen na vnitřní stěnu válce, ale také na čela obou vík. Víka jsou navíc zatížena předpětím v závitě, které je dáno utahovacím momentem, který byl odhadnut na 5 N·m. Předpětí v závitě je pak získáno rovnicí:

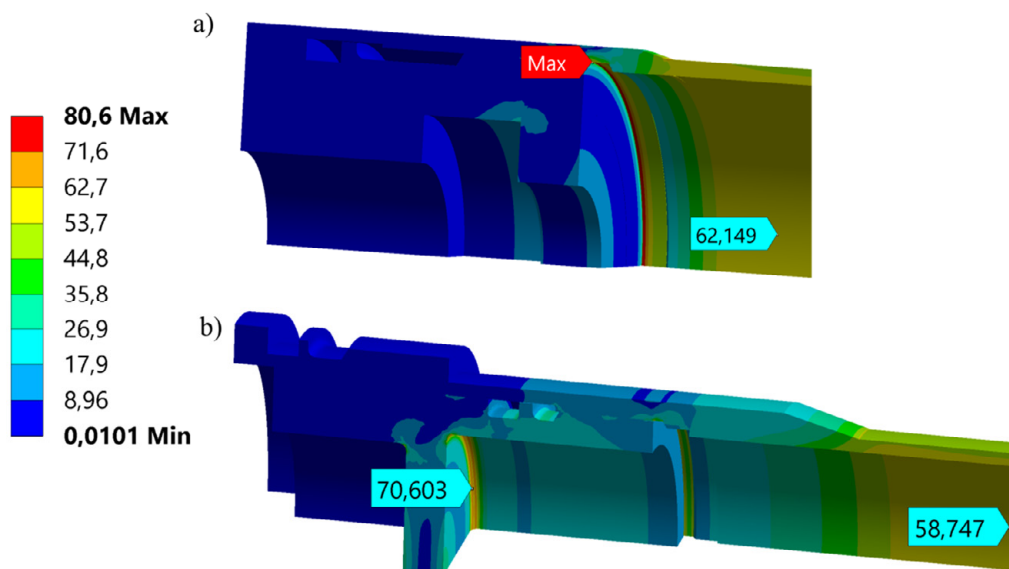
$$F_i = \frac{M}{K \cdot d_m}, \quad (13)$$

kde  $M$  (N·m) je utahovací moment,  $K$  (–) je součinitel utahovacího momentu a  $d_m$  (m) je průměr závitu.

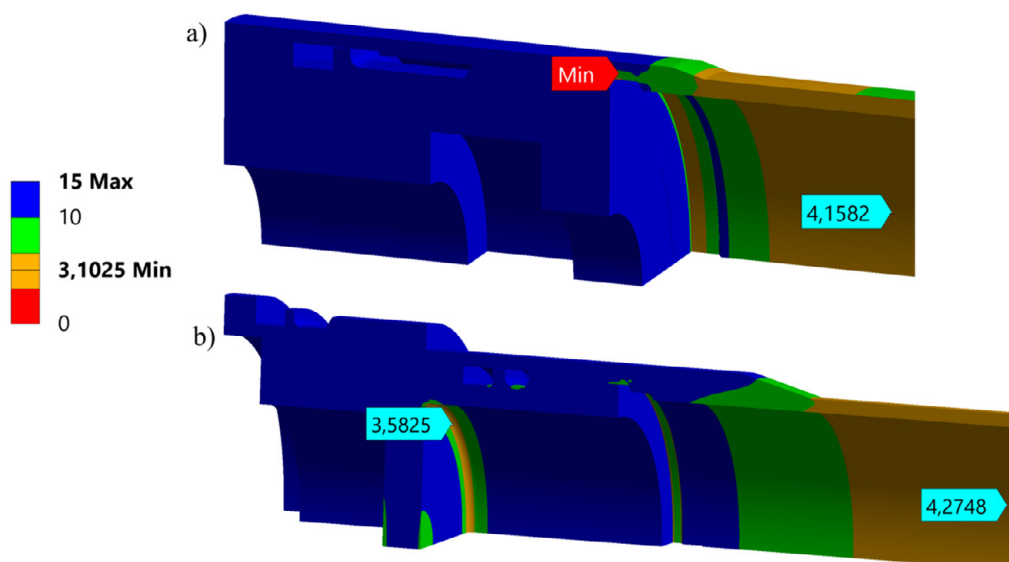


obr. 6-6 Okrajové podmínky pevnostní analýzy válce 2.0: a) horní víko, b) dolní víko

Na obr. 6-7 je výsledné redukované napětí celé podstavy válce. Maximální napětí se nachází na válci v místě styku s horním víkem. Součinitel bezpečnosti je zde 3,1 a tedy vyhovuje. Maximální redukované napětí na vnitřní stěně válce je 62 MPa se součinitelem bezpečnosti 4,2 (viz obr. 6-8), válec tedy také vyhovuje. Válec je pevnostně předdimenzovaný a je zde prostor pro další snížení tloušťky pod 1 mm, avšak toto nebylo provedeno z důvodu zabezpečení výroby válce obráběním. Takto malé tloušťky stěny válce by muselo být dosaženo jinak, například tvářením. Válec také vyhovuje na únavové vlastnosti, maximální elastické přetvoření je zde 0,0011, což znamená minimální únavovou životnost 2,5 miliónu cyklů. Hmotnost odlehčeného válce je 97 g. Při porovnání s původním ocelovým válcem I. generace MR tlumiče je hmotnost nižší o 83 %.



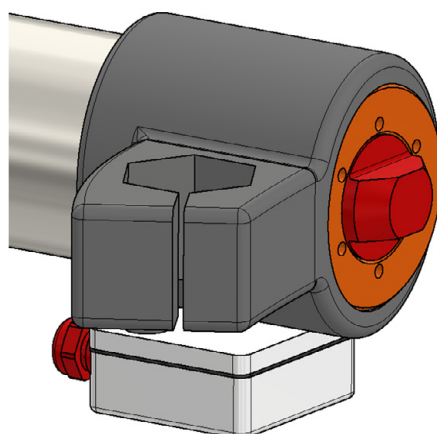
obr. 6-7 Výsledné redukované napětí: a) horní víko, b) dolní víko



obr. 6-8 Součinitel bezpečnosti: a) horní víko, b) dolní víko

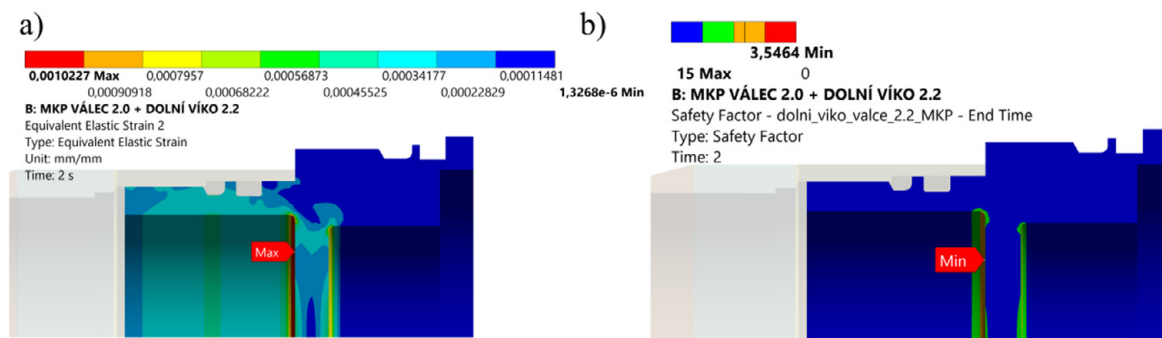
## 6.3 Dolní víko válce

Odlehčováno bylo také dolní víko válce. Materiál víka je EN AW-6082 T6. Zde byl ubírán materiál zejména na čelní ploše. Vzduchový ventil byl zapuštěn do víčka, což zajistí jeho ochranu před mechanickým poškozením. Bylo přidáno také víčko (na obr. 6-9), které ventil chrání před nečistotami. Těmito úpravami byla snížena hmotnost víka o 7 % na aktuálních 40 g.



obr. 6-9 Víčko dolního víka válce

Víko bylo opět pevnostně analyzováno pomocí MKP. Výsledky jsou z předchozí analýzy v kap. 6.2. Dle výsledků na obr. 6-10 odlehčené víko pevnostně vyhovuje, minimální součinitel bezpečnosti je 3,5 a maximální přetvoření je 0,001, z čehož opět z obr. 6-4 vychází únavový život minimálně 2,5 miliónů cyklů.

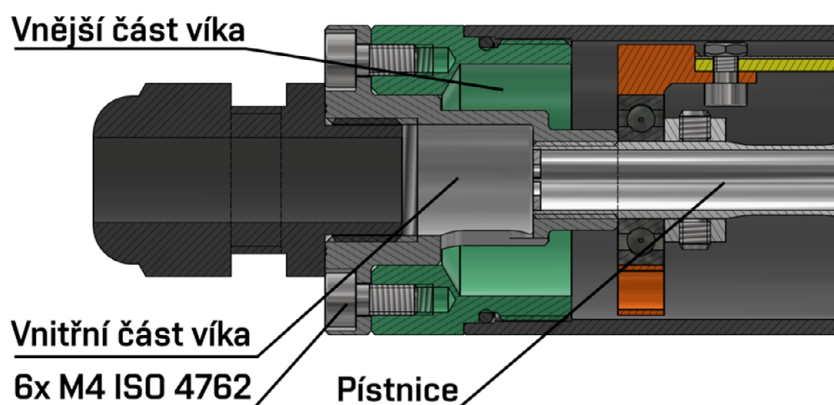


obr. 6-10 Výsledky analýzy dolního víka válce: a) elastické přetvoření, b) součinitel bezpečnosti

## 6.4 Horní víko nohy

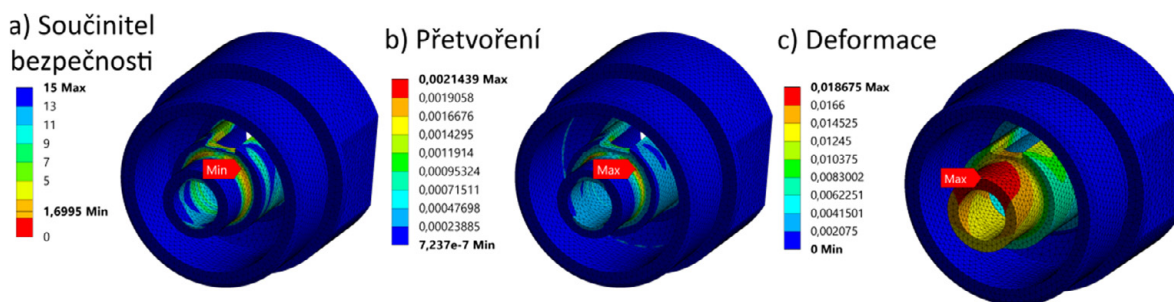
U horního víka nohy proběhla změna celého konceptu dílu. Víko bylo rozděleno na dvě části, vnější šroubovací část a vnitřní přírubová část. Toto rozhodnutí bylo učiněno pro zjednodušení montáže napájecího kabelu, který je nutné protáhnout víkem až po

zašroubování pístnice do víka. U předchozí verze víka bylo nutné toto provést až po našroubování horního víka do nohy a přístup ke kabelu byl tedy velmi omezený. Nové dvoudílné víko používá šestici šroubů ISO 4762 M4 pro přenos tlumící síly z pístnice do nohy. Kontrolní výpočet šroubů na MSP a MSÚ je uveden v Příloze 2. Horní víko nohy bylo poté odlehčeno výrazným snížením tloušťky stěn, čímž byla celková hmotnost snížena o 20 %. Celkově má nové víko hmotnost 59 g. Následně byla provedena pevnostní analýza víka. Obě části víka jsou vyrobeny z hliníkové slitiny EN AW-6082 T6. Zatížení je shodné s předchozí analýzou pístnice – 1 kN v axiálním směru a působí na závit pro připojení k pístnici. Šrouby byly zatíženy předpětím 350 N. Druhá okrajová podmínka – pevná vazba, je pak na vnějším závitě pro připojení nohy. Analýza probíhala v poloviční symetrii a pro oba stavy zatížení – tah i tlak. Další podrobnosti o analýze jsou v Příloze 1.



obr. 6-11 Nová konstrukce horního víka nohy

Oba stavy zatížení vyšly velmi podobně. Na obr. 6-12a je výsledný součinitel bezpečnosti pro zatížení tahem, jehož minimum je 1,7. Maximální redukované napětí je 147 MPa a maximální přetvoření je 0,0021. Z E-N grafu na obr. 6-4 vyplývá únavový život minimálně 2,5 milionů cyklů. Deformace dílu je velmi malá v řádu desítek mikrometrů (obr. 6-12c). Díl tedy vyhovuje z hlediska MSP i MSÚ.

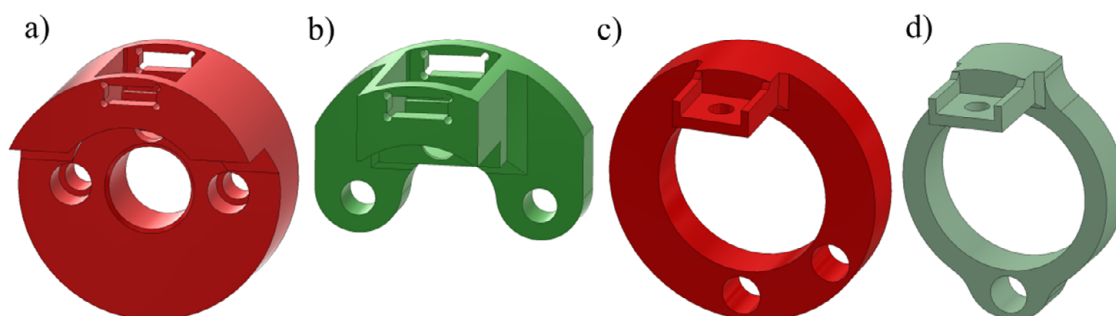


obr. 6-12 Výsledky analýzy horního víka nohy: a) součinitel bezpečnosti, b) přetvoření, c) deformace



## 6.5 Další komponenty

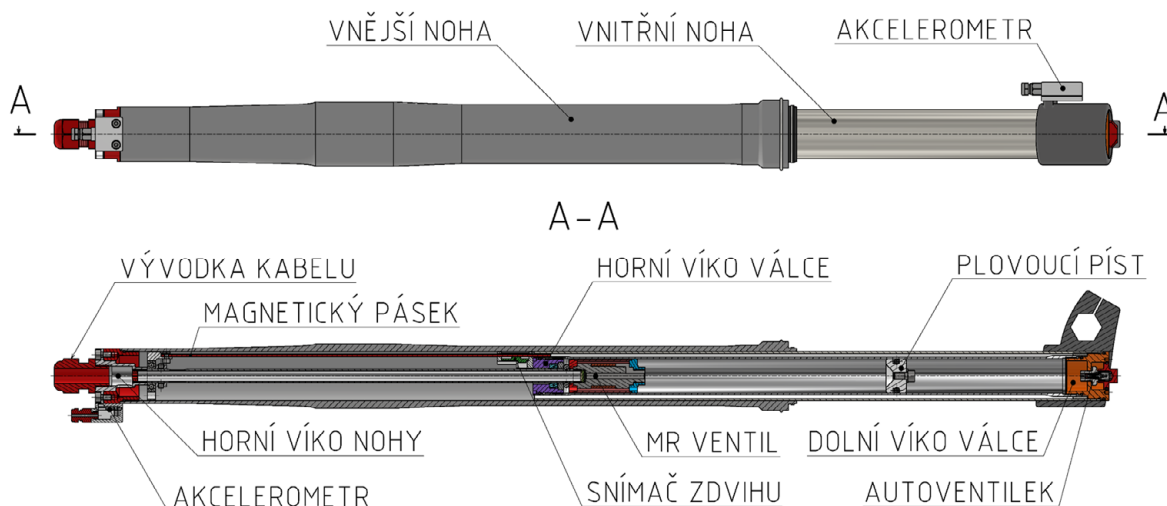
Dále byly odlehčeny také 3D tištěné komponenty – držák magnetického pásku a nosič senzoru, změny jsou vidět na obr. 6-13. Podložka těsnění v zástavbě těsnění pístnice byla taktéž navržena z hliníkové slitiny. Těmito změnami se podařilo snížit celkovou hmotnost těchto komponentů o 64 %.



obr. 6-13 Nosič senzoru: a) původní, b) odlehčený; Držák magnetického pásku: c) původní, d) odlehčený

## 6.6 Konstrukční návrh

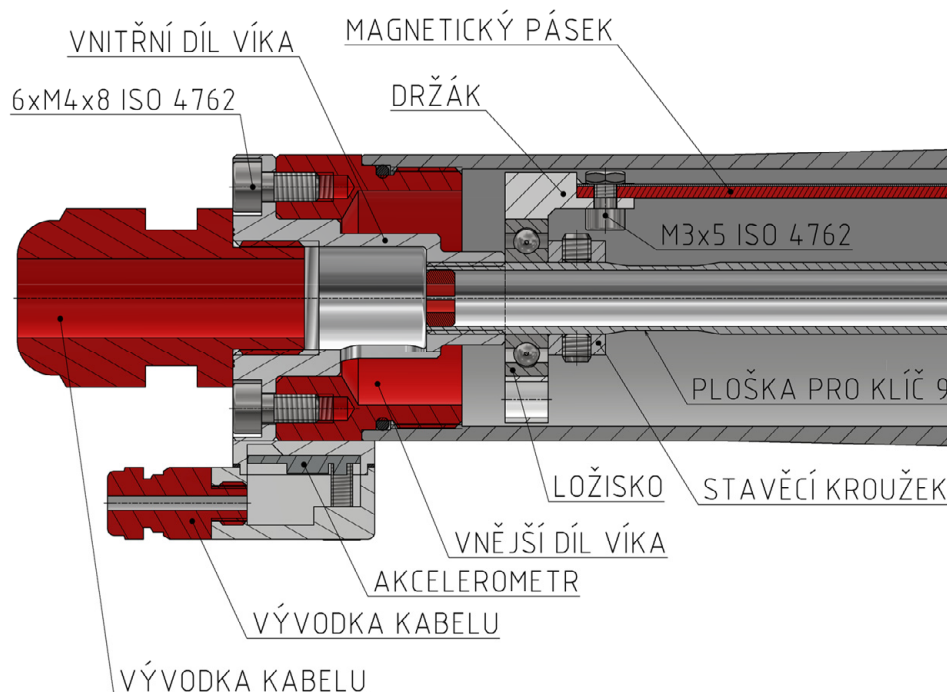
Finální konstrukční návrh II. generace MR tlumiče je na obr. 6-14. Základní koncepce tlumiče vychází z I. generace, jedná se tedy o jednoplášťový tlumič s plynovou komorou (viz obr. 5-16). MR ventil zůstal nezměněn, aby se zachovala stejná tlumící charakteristika, časová odezva i další funkční parametry tlumiče. Provedené změny byly za účelem snížení hmotnosti tlumiče, zjednodušení montáže a doplnění sensoriky.



obr. 6-14 Konstrukce MR tlumiče II. generace

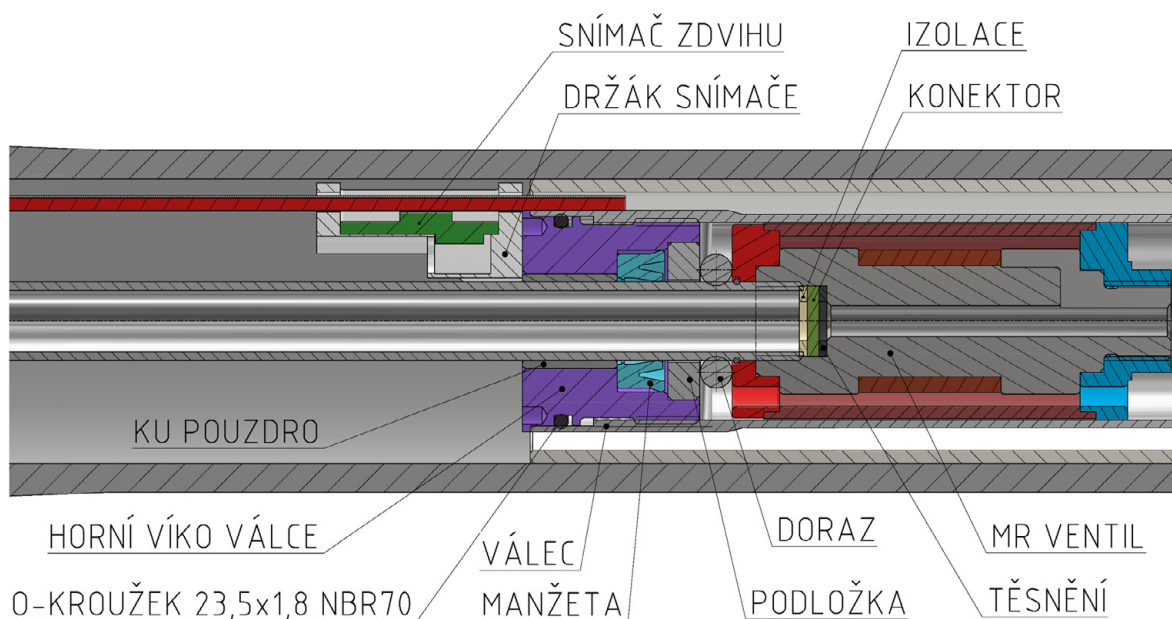
Horní část tlumiče (na obr. 6-15) se skládá z dvoudílného víka nohy, to je sešroubováno dohromady šestici šroubů M4x8 ISO 4762. Díly víka jsou středěná válcovou plochou pro udržení souososti pístnice. Do vnitřního dílu víka je zašroubována pístnice pomocí závitu M10x1, víko tedy přenáší tlumící sílu z pístnice přes nohu do rámu kola. Na vnější díl víka

je pak přišroubována krabička s akcelerometrem odpružené hmoty. Skrz víko také prochází kabel napájení cívky a snímače zdvihu, ten je vyveden ven pomocí plastové vývodky se závitem M16. Vnitřní část víka po zašroubování svírá kuličkové ložisko DIN 625, na kterém je nalisován 3D tištěný plastový držák magnetického pásku. Jako doraz slouží hliníkový stavěcí kroužek připevněný dvojicí stavěcích šroubů M4 ISO 4026. Pro umožnění montáže pístnice do víka je na pístnici vyfrézována ploška pro klíč velikosti 9.



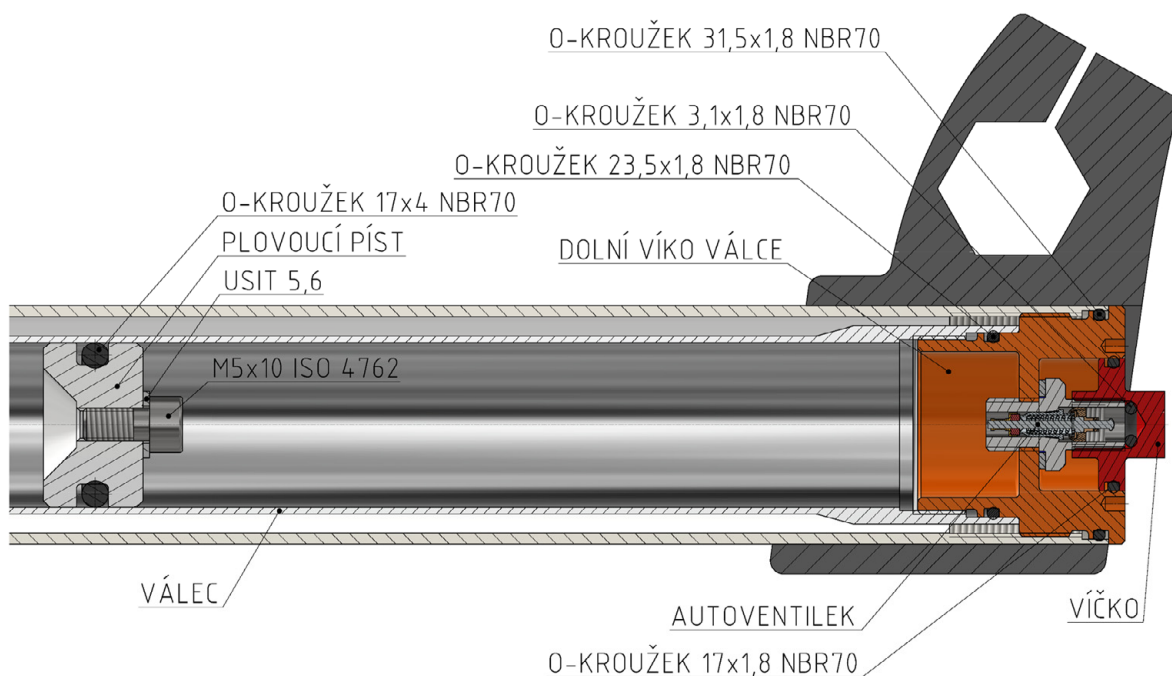
obr. 6-15 Detail horní části tlumiče

Zásadní změna proběhla u pístnice, ta je oproti I. generaci hliníková s PVD povlakem Tribobond 20 na bázi AlTiN. Tento povlak zajistí dostatečnou otěruschopnost proti částicím MR kapaliny. Zástavba vedení pístnice je na obr. 6-16. Pístnice je vedena v horním víku válce pomocí KU pouzdra 1012 a těsněna je pístnicovou manžetou S01-R úpr. 10x18x6,3 PUR A, která byla zakázkově upravena pro nižší třecí sílu. Manžeta je ve víku válce uzavřena pomocí podložky, která se do víčka zalisuje. Opětovná demontáž je možná díky závitovým díram v podložce. Víčko těsní válec pomocí O-kroužku, který je oproti I. generaci až za závitem, což usnadní montáž a sníží riziko jeho poškození. Oproti I. generaci bylo přidáno středění víčka vůči válci pomocí válcové plochy za O-kroužkem. Na víčko je pak přišroubován 3D tištěný nosič senzoru zdvihu. MR ventil je shodný s I. generací, jedinou změnou je přidání plastové izolace mezi pístnicí a konektorem, která zabrání zkratování kontaktů s pístnicí a poškození kontaktů při montáži.

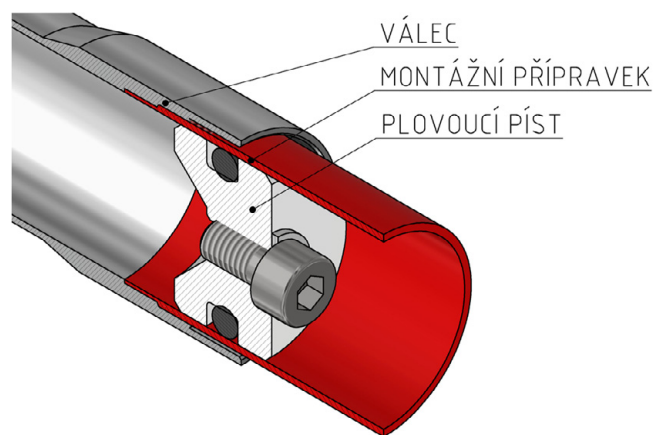


obr. 6-16 Detail horního víka válce a MR ventilu

Plovoucí píst (na obr. 6-17) je shodný s I. generací, usnadnila se však jeho montáž zvětšením závitu ve válci na M27x1 a navržením přípravku pro jeho montáž (viz schéma montáže na obr. 6-18). Dolní víko válce bylo přepracováno tak, aby byl autoventilek schován v zahloubení a bylo přidáno víčko, které jej chrání před poškozením a nečistotami. Opět byla změněna poloha O-kroužku těsnícího válec za závit pro šroubení do válce. Stejně jako u horního víčka bylo přidáno také středění vůči válci.

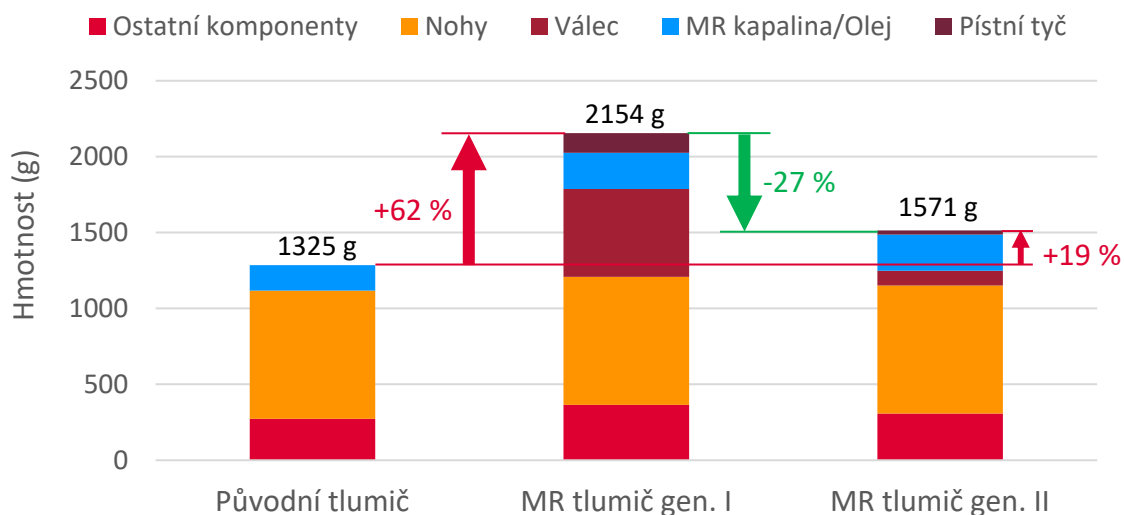


obr. 6-17 Detail plovoucího pístu a dolního víka válce



obr. 6-18 Schéma montáže plovoucího pístu

Většina dílů II. generace MR tlumiče byla také odlehčena. Celková hmotnost MR tlumiče II. generace je včetně náplně MR kapaliny 1571 g. V grafu na obr. 6-19 je porovnání všech verzí tlumiče. Oproti MR tlumiči I. generace s hmotností 2154 g se podařilo snížit hmotnost odlehčením komponentů o 27 %. MR tlumič II. generace má však stále vyšší hmotnost oproti původnímu pasivnímu tlumiči o 19 %. Další technické parametry MR tlumiče II. generace jsou vypsány v tab. 6-6.



obr. 6-19 Porovnání hmotností všech tlumičů

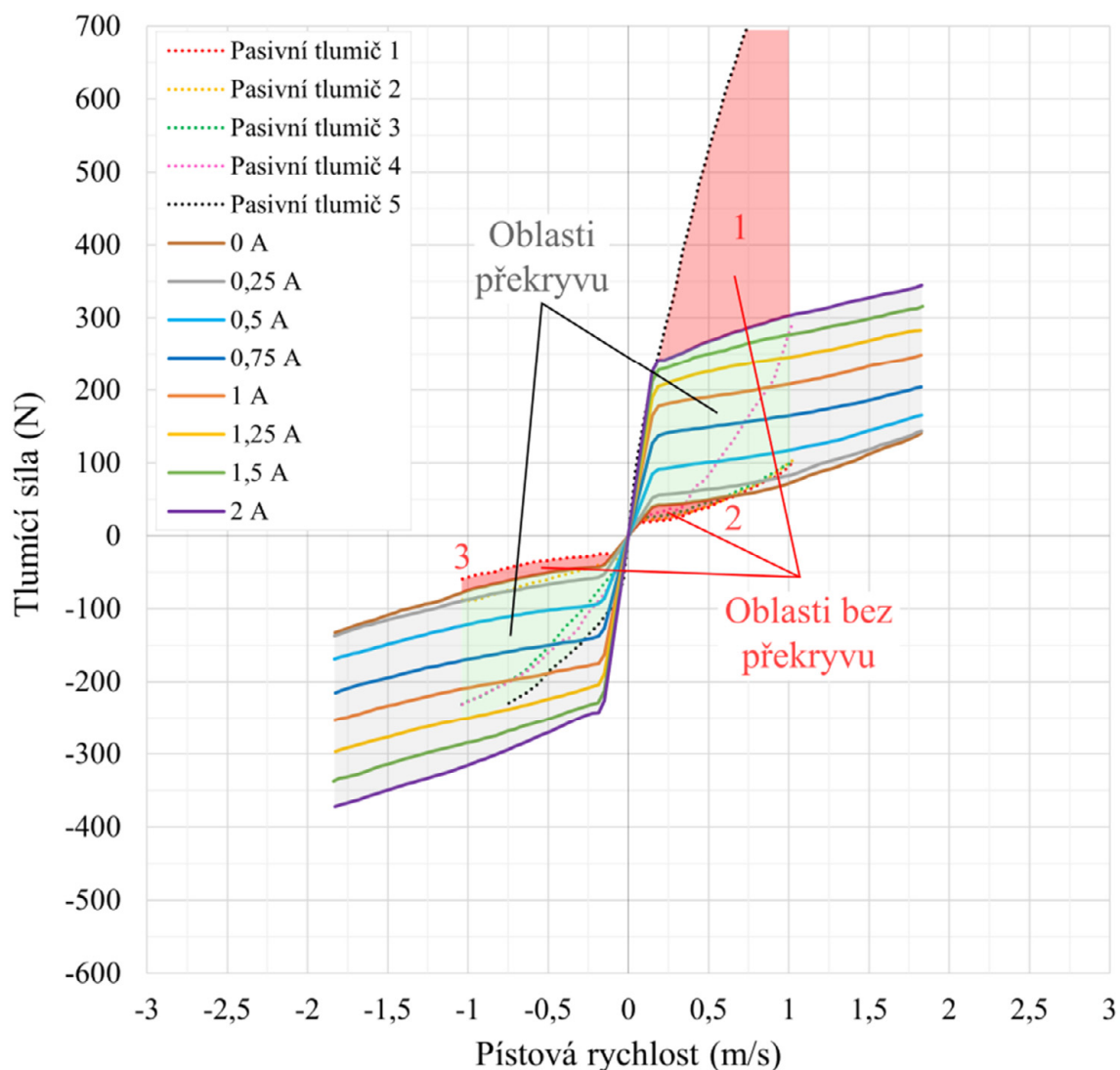
tab. 6-6 Technické parametry MR tlumiče II. generace

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Zdvih	180 mm
Průměr pístu	25 mm
Maximální tlumící síla	400 N při 2 m/s
Minimální tlumící síla	43,3 N při 0,25 m/s
Pasivní odpory patrony	27 N
Dynamický rozsah při 0,25 m/s	5,7
Průměrná časová odezva	6,3 ms
Celková hmotnost	1571 g

## 6.7 Hodnocení klíčových parametrů

V práci byly navrženy dvě generace MR tlumičů. První generace sloužila jako funkční vzorek, který byl vyroben a následně otestován. Po získání požadovaných parametrů tlumiče byla na základě zkušeností z I. generace navržena II. generace MR tlumiče. Tato generace nebyla vyrobena a otestována, má však všechny funkční díly shodné s I. generací, tudíž se dá předpokládat, že všechny klíčové parametry budou shodné.

Porovnání rychlostní charakteristiky navrženého MR tlumiče s původním pasivním tlumičem je na obr. 6-20. Lze vidět, že MR tlumič pokrývá většinu plochy tlumící charakteristiky pasivního tlumiče a lze tedy usoudit, že MR tlumič jej dokáže plnohodnotně nahradit. Avšak se zde nachází tři nepokryté oblasti. Oblast 1 je funkce „lock-out“ pasivního tlumiče, která zamyká vidlici a zamezuje jejímu pohybu. Tuto funkci MR tlumič nemá, není však k jeho funkci důležitá. Oblasti 2 a 3 jsou v nízkých tlumících silách, zde hrají roli vysoké pasivní odpory v MR tlumiči, které zvyšují tlumící sílu, což se negativně projevuje vysokou tlumící silou při vypnutém stavu tlumiče (0 A).



obr. 6-20 Porovnání F-v charakteristiky MR tlumiče a původního pasivního tlumiče

Shrnutí dosažených parametrů je v tab. 6-7. Podařilo se navrhnout MR tlumič pro přední vidlici elektromotorky s nízkou hmotností. Hmotnost je však stále vyšší oproti původnímu pasivnímu tlumiči o 19 %, což je však méně než dříve stanovená mez 40 %. Tento cíl lze tedy považovat za úspěšně splněný.

Vidlice elektromotorky má omezený vnitřní prostor, který omezoval výsledný návrh MR ventilu. Přesto se však podařilo navrhnout řešení, které má nejvyšší vnější rozměr 30 mm a pohodlně se vmísí do dané vidlice. Teoreticky by patrona vidlice mohla být instalována i do vidlice s menším průměrem, za předpokladu nahrazení magnetického pásku jiným řešením měření zdvihu (např. dvěma akcelerometry).

Dynamický rozsah byl na základě rešerše předchozích řešení předpokládán nad hodnotou 7. Avšak tento cíl se nepodařilo splnit. Největším problémem zde bylo najít vhodné těsnění, které bude spolehlivě těsnit MR kapalinu, ale zároveň bude mít dobré třecí vlastnosti. Těsnění má nižší tření, pokud má rozvolněné předpětí, avšak je vyšší šance na lekáž MR kapaliny. Tudíž

muselo být přistoupeno na kompromis. Lepší dynamický rozsah by se dal získat dalším snižováním tření ve všech kontaktech tlumiče.

Časová odezva tlumiče je důležitá pro semiaktivní řízení tlumiče. Z rešerše vyplynulo, že ideální hodnota časové odezvy pro Skyhook je pod 10 ms. Podařilo se zajistit velmi krátké časové odezvy 9,3 ms díky použití kobaltové slitiny Hiperco 50 v magnetickém obvodu.

Nízká tlumicí síla při vypnutém stavu je také důležitá pro semiaktivní řízení. Ta je také ovlivněna vysokými pasivními odpory v tlumiči, proto je vyšší než požadovaná hodnota 30 N. Naměřená tlumicí síla při pístové rychlosti 0,25 m/s je 43,3 N.

Elektrická spotřeba MR ventilu je primárně dána odporem elektromagnetické cívky. Naměřená hodnota odporu byla 1,2  $\Omega$ . Pro napájení elektrickým proudem 2 A je tedy zapotřebí napětí 2,4 V a maximální příkon je 4,8 W. Jelikož však při spínacím semiaktivním řízení není MR tlumič neustále aktivní, dá se konzervativně předpokládat, že MR tlumič bude aktivní pouze v 50 % době užívání. Z tohoto lze odvodit, že průměrná elektrická spotřeba MR tlumiče je 2,4 W, což je méně než požadovaná spotřeba 3 W.

tab. 6-7 Porovnání požadovaných a dosažených parametrů

Název parametru	Požadovaná hodnota	Dosažená hodnota
Maximální zvýšení hmotnosti oproti původnímu tlumiči	40 %	19 %
Maximální vnější průměr válce patrony tlumiče	32 mm	30 mm
Minimální dynamický rozsah při 0,25 m/s	7	5,7
Maximální časová odezva tlumiče	17 ms	9,3 ms
Maximální tlumicí síla ve vypnutém stavu při 0,25 m/s	30 N	43,3 N
Průměrná elektrická spotřeba	3 W	2,4 W

Navržený produkt, MR tlumič, lze analyzovat pomocí SWOT analýzy, která je v tab. 6-8. V analýze jsou uvedeny výhody i nevýhody tlumiče oproti pasivnímu tlumiči, jeho možné přínosy pro zákazníka, ale i hrozby při vstupu s tímto produktem na trh.

tab. 6-8 SWOT analýza

<b>Silné stránky</b>	<b>Slabé stránky</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompatibilita s běžnou vidlicí</li> <li>• Lepší komfort a jízdní vlastnosti díky semiaktivnímu řízení</li> <li>• Nízká elektrická spotřeba – 2,4 W</li> <li>• Možnost semiaktivního řízení pomocí ON-OFF Skyhook</li> <li>• Jednodušší konstrukce oproti pasivnímu tlumiči podobné kategorie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyšší hmotnost oproti pasivnímu tlumiči</li> <li>• Vyšší výrobní cena kvůli MR kapalině</li> <li>• Nutnost napájení elektrickým proudem – baterie</li> <li>• Nutnost instalace senzoriky pro řízení</li> <li>• Nutnost instalace řídicí jednotky</li> </ul>
<b>Příležitosti</b>	<b>Hrozby</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• High-tech produkt</li> <li>• Nerozšířená technologie u jednostopých vozidel</li> <li>• Lepší komfort jízdy pro běžné jezdce</li> <li>• Lepší jízdní vlastnosti pro závodní jezdce</li> <li>• Uživatelsky jednoduché nastavení odpružení</li> <li>• Potenciál u elektrokol a elektromotorek <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyšší hmotnost není problém</li> <li>• Napájení vestavěnou baterií</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odmítnutí cyklistickou komunitou z důvodu vyšší hmotnosti</li> <li>• Vyšší cena odradí zákazníky</li> <li>• Snížení poptávky o elektromotorky a elektrokola</li> </ul>



## 7 ZÁVĚR

V této práci je navržen, vyroben a otestován magnetoreologický tlumič s krátkou časovou odezvou pro vidlici elektromotorky. V práci jsou uvedeny dvě generace MR tlumiče, I. generace slouží jako funkční vzorek pro otestování rychlostní charakteristiky, časové odezvy a celkové funkčnosti tlumiče. Vzorek byl navržen, aby byl jednoduše vyrobitelný a nebyl kladen důraz na nízkou hmotnost. Následně je na základě zkušeností s I. generací uvedena II. generace tlumiče. Hlavním cílem úprav u této generace je odstranit hlavní nevýhodu MR tlumičů a tou je jejich vysoká hmotnost. Podařilo se snížit hmotnost pod 140 % původní hmotnosti tlumiče, čímž byl splněn cíl nízké hmotnosti. Navržený MR tlumič má hmotnost 1571 g, což je 119 % hmotnosti původního pasivního tlumiče. Tato hodnota je ale výrazně menší než předchozí návrhy MR tlumičů pro jednostopá vozidla, u kterých se hmotnost pohybovala kolem 300 % původní hmotnosti. Dalším vývojem by se dala hmotnost dále snížit úpravou hustoty MR kapaliny. Ta totiž tvoří 15 % celkové hmotnosti tlumiče. Ředěním MR kapaliny se však změní i její magnetoreologické vlastnosti, a tudíž by bylo potřeba nové vlastnosti naměřit, nebo predikovat.

Navržený tlumič má jednoduchou jednoplášťovou konstrukci s minimem komponentů oproti původnímu tlumiči, čímž se výrazně zjednodušila výroba. Nevýhodou tohoto konceptu je však vyšší tuhost tlumiče z důvodu tlaku plynové komory a vyšší tření těsnění, což se projevuje ve vyšší tlumící síle při vypnutém stavu. Součástí práce je také měření tření manžet pístnice, kde bylo za cíl najít manžetu s nejmenším třením, u které ale nedochází k úniku MR kapaliny. Nejlepší testovaná manžeta má třecí sílu 27 N, což je ale stále vysoká hodnota, která negativně ovlivňuje jak dynamický rozsah, tak tlumící sílu ve vypnutém stavu, která musí být co nejmenší.

Požadavek na vysoký dynamický rozsah se tudíž nepodařilo dosáhnout, jeho hodnota je 5,7 při pístové rychlosti 0,25 m/s. Očekávaná hodnota byla nad 7. Toto je způsobeno vysokou tlumící silou při vypnutém stavu, která je 43,3 N při 0,25 m/s. Cílem bylo dosáhnout síly 30 N, nebo méně. Podařilo se však dosáhnout velmi nízké časové odezvy  $\tau_{63}$  9,3 ms, hlavně díky použití kobaltové slitiny Hiperco 50 a provedení transientní magnetické analýzy. Průměrná spotřeba tlumiče je taktéž nízká – 2,4 W, což umožňuje napájení MR tlumiče vestavěnou baterií elektromotorky či elektrokola.

Součástí konstrukce tlumiče je také zabudovaná sensorika. Ta se skládá z magnetického senzoru zdvihu, který je zabudován uvnitř konstrukce a je tak chráněn před poškozením. Dále jsou zapotřebí dva akcelerometry, které jsou upevněny na obou koncích tlumiče. Pro akcelerometry jsou navrženy 3D tištěná pouzdra. Všechny senzory jsou zapojeny do řídicí jednotky na rámu kola, jednotka však už není součástí této práce.

Výsledný návrh posouvá dál možnost uvést na trh zcela nový produkt, využívající magnetoreologickou kapalinu, do segmentu elektromotorek, elektrokol a případně

i horských kol. V současném stavu není na trhu pro cyklistiku dostupný žádný produkt podobného typu, využívající stejnou technologii. Velký potenciál tohoto produktu jsou elektrokola, která se těší oblibě hlavně u obyčejných jezdců, kteří vyhledávají vyšší jízdní komfort. Zároveň je elektrokolo perfektní aplikací MR tlumiče díky jeho vestavěné baterii a přirozené vyšší hmotnosti stroje. Oproti pasivním tlumičům pak semiaktivně řízené MR tlumiče nabízejí komfortní jízdu i bez složitého nastavování odpružení, což určitě ocení méně zkušený jezdcí.

## 8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Výsledkem je funkční vzorek magnetoreologického tlumiče s rychlou časovou odezvou pro vidlici elektromotorky Kuberg, který je možné semiaktivně řídit.

### 8.1 Druh výsledku

G – funkční vzorek

### 8.2 Název výsledku

Semiaktivně řízený magnetoreologický tlumič vidlice elektromotorky.

### 8.3 Autoři

Blahuta J., Kubík M.

### 8.4 Technický popis

Navržený tlumič využívá semiaktivní řízení pro úpravu tlumicí charakteristiky tlumiče. Navržený vzorek je vhodný pro zástavbu do vidlice elektromotorky Kuberg. Ke své funkci tlumič využívá napájení proudem o velikosti 0 - 2 A s maximální hodnotou přepětí 60 V. Zdvih tlumiče 180 mm je dán plynovou pružinou ve vidlici. Tlumič má vnější průměr 30 mm a délku 772 mm. Součástí tlumiče je také senzorika – snímač zdvihu a dva akcelerometry.

### 8.5 Místo uložení výsledku

B2/405

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JANOŠEK, Marek. Tlumiče motocyklu | Motorkáři.cz. *Motorkáři.cz* [online]. 2018 [vid. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/tlumice-motocyklu-40525.html>
- [2] BMW MOTORRAD. *Milestones* | *BMW Motorrad* [online]. 2024 [vid. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.bmwmotorcycles.com/en/engineering/innovation-overview/innovation/milestones.html>
- [3] KELLY, Charlie. First Full Suspension Mountain Bike. *Fat Tire Flyer* [online]. 1. září 2019 [vid. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://fattireflyer.com/2019/08/01/first-full-suspension-mountain-bike/>
- [4] LIN, Bruce. The First Full-Suspension Mountain Bikes: A Brief History of Full-Suspension MTBs. *TPC* [online]. 2019 [vid. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.theproscloset.com/blogs/news/five-vintage-full-suspension-bikes>
- [5] ZEUSBIKE.CZ. *Jak nastavit odpružení u svého elektrokola nebo kola?* [online]. 2024 [vid. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.zeusbike.cz/poradna/jak-nastavit-odpruzeni-u-sveho-elektrokola-nebo-kola/>
- [6] FOX ACADEMY. *What Is FOX Live Valve?* [online]. 2022 [vid. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://foxacademy.ridefox.com/2020/06/fox-academy-video-series-live-valve/>
- [7] FOX. *Live Valve | Mountain Bike Suspension | FOX* [online]. 2022 [vid. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.ridefox.com/content.php?c=livevalve-bike>
- [8] GOŁDASZ, Janusz a Bogdan SAPIŃSKI. *Insight into magnetorheological shock absorbers*. 1. vyd. Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-13232-7.
- [9] DIXON, John C. *The Shock Absorber Handbook* [online]. B.m.: Wiley, 2007. ISBN 9780470510209. Dostupné z: doi:10.1002/9780470516430
- [10] AHMADIAN, Mehdi a John GRAVATT. A comparative analysis of passive twin tube and skyhook MRF dampers for motorcycle front suspensions. In: Kon-Well WANG, ed. [online]. 2004, s. 238. Dostupné z: doi:10.1117/12.540218
- [11] SALVA, Matúš. *Návrh přední odpružené vidlice s MR tlumičem pro sjezdová kola* [online]. Brno, 2022 [vid. 2022-11-30]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140034>
- [12] BREESE, Darrell G. a Faramarz GORDANINEJAD. Semi-active, fail-safe magnetorheological fluid dampers for mountain bicycles. *International Journal of Vehicle Design* [online]. 2003, **33**(1–3), 128–138 [vid. 2022-11-07]. ISSN 01433369. Dostupné z: doi:10.1504/IJVD.2003.003653

- [13] AHMADIAN, Mehdi. Magneto-rheological suspensions for improving ground vehicle's ride comfort, stability, and handling. *VEHICLE SYSTEM DYNAMICS* [online]. 2017, **55**(10), 1618–1642. ISSN 0042-3114. Dostupné z: doi:10.1080/00423114.2017.1323106
- [14] GOLDASZ, Janusz a Bogdan SAPINSKI. Verification of magnetorheological shock absorber models with various piston configurations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2013, **24**(15), 1846–1864 [vid. 2023-03-18]. ISSN 1045389X. Dostupné z: doi:10.1177/1045389X13479684
- [15] WERELEY, Norman M., Jason LINDLER, Nicholas ROSENFELD a Young Tai CHOI. Biviscous damping behavior in electrorheological shock absorbers. *Smart Materials and Structures* [online]. 2004, **13**(4), 743–752 [vid. 2023-03-18]. ISSN 09641726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/13/4/012
- [16] 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]. 2002, **24**(3), 309–323 [vid. 2022-11-07]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-0296(01)00097-9
- [17] STRECKER, Zbyněk, Filip JENIŠ, Michal KUBÍK, Ondřej MACHÁČEK a Seung Bok CHOI. Novel Approaches to the Design of an Ultra-Fast Magnetorheological Valve for Semi-Active Control. *Materials 2021, Vol. 14, Page 2500* [online]. 2021, **14**(10), 2500 [vid. 2022-11-29]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA14102500
- [18] STRECKER, Zbyněk, Michal KUBIK, Petr VITEK, Jakub ROUPEC, David PALOÚŠEK a Vit ŠREIBR. Structured magnetic circuit for magnetorheological damper made by selective laser melting technology. *Smart Materials and Structures* [online]. 2019, **28**(5) [vid. 2023-03-18]. ISSN 1361665X. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/AB0B8E
- [19] YOON, Dal Seong, Yu Jin PARK a Seung Bok CHOI. An eddy current effect on the response time of a magnetorheological damper: Analysis and experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2019, **127**, 136–158 [vid. 2023-03-18]. ISSN 10961216. Dostupné z: doi:10.1016/J.YMSSP.2019.02.058
- [20] STRECKER, Zbyněk, Filip JENIŠ, Michal KUBÍK, Ondřej MACHÁČEK a Seung Bok CHOI. Novel Approaches to the Design of an Ultra-Fast Magnetorheological Valve for Semi-Active Control. *Materials 2021, Vol. 14, Page 2500* [online]. 2021, **14**(10), 2500 [vid. 2022-11-29]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA14102500
- [21] LORD CORP. *MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid* [online]. Cary, USA: LORD Corporation. 2008. Dostupné z: www.lord.com

- [22] 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]. 2002, **24**(3), 309–323 [vid. 2022-11-07]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/S0141-0296(01)00097-9
- [23] ALUNET. *EN AW-6082 T6 (AlMgSi1 F28/F31/F32)* [online]. 2024 [vid. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.alunet.cz/ENAW-6082>
- [24] ALUNET. *EN AW-7075 T6 (AlZnMgCu1,5)* [online]. 2024 [vid. 2024-02-06]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-7075>
- [25] HYDRAULICS. *PRODEJNÍ KATALOG HUTNÍHO MATERIÁLU* [online]. 2011. Dostupné z: <http://www.hydraulics.cz>
- [26] NPS PROAL. *EN AW-7075, AlZn5.5MgCu: Vlastnosti | NPS PROAL s.r.o.* [online]. únor 2019 [vid. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-7075/>
- [27] NPS PROAL. *EN AW-6082, AlSi1MgMn: Vlastnosti | NPS PROAL s.r.o.* [online]. 2019 [vid. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-6082/>
- [28] KUREK, Andrzej, Marta KUREK, Justyna KOZIARSKA, Sabrina VANTADORI a Tadeusz ŁAGODA. FATIGUE CHARACTERISTICS OF 6082-T6 ALUMINIUM ALLOY OBTAINED IN TENSION-COMPRESSION AND OSCILLATORY BENDING TESTS. *Journal of Machine Construction and Maintenance*. 2018, 59–69. ISSN 1232-9312.
- [29] IONBOND. *Tribobond™ 20 | Ionbond IHI Group* [online]. 2024 [vid. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.ionbond.com/coatings/tribobond-20/>

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

CFD		computational fluid dynamics
MCB		Manson-Coffin-Basquin model
MKP		metoda konečných prvků
MR		magnetoreologický
MRF		magnetorheological fluid
MSP		mezní stav pevnosti
MSÚ		mezní stav únavy
SLM		selective laser melting
SMC		soft magnetic composite
PVD		physical vapour deposition
B	$T$	magnetická indukce
H	$kA/m$	intenzita magnetického pole
$\tau_{63}$	$ms$	časová odezva

# 11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1 Jedno z prvních celoodpružených MTB (Manitou) [4] .....	14
obr. 1-2 Ruční nastavení tlumení [5] .....	14
obr. 1-3 Systém celoodpruženého kola FOX Live Valve [7] .....	15
obr. 2-1 Prizma diagram .....	16
obr. 2-2 Pasivní hydraulický tlumič: a) jednoplášťový, b) dvouplášťový .....	17
obr. 2-3 a) jednoplášťový MR tlumič, b) magnetický obvod v pístu; 1 písní tyč, 2 píst, 3 MR kapalina, 4 válec, 5 stlačený plyn, 6 plovoucí píst, 7 cívka, 8 štěrba, 9 plášť pístu, 10 magnetická indukce, 11 magnetické jádro [9].....	18
obr. 2-4 a) píst s MR ventilem a plovoucí píst, b) sestava MR tlumiče [10] .....	18
obr. 2-5 Tlumící charakteristika MR a továrního tlumiče [10] .....	19
obr. 2-6 Schéma MR tlumiče [11] .....	20
obr. 2-7 Řez pístem tlumiče s MR ventilem [11].....	20
obr. 2-8 Naměřená F-v charakteristika MR tlumiče v porovnání s predikcí (čárkovaně) [11] .....	21
obr. 2-9 Tlumící charakteristika pro amplitudu 20 mm [12] .....	21
obr. 2-10 Schémata řídicích metod odpružení: a) skyhook, b) groudhook [13] .....	22
obr. 2-11 Znázornění parallel-plate modelu [16] .....	24
obr. 2-12 Porovnání modelu a experimentu [16] .....	24
obr. 2-13 Vířivé proudy v magnetickém jádře: a) bez drážek, b) s drážkami [17] .....	25
obr. 2-14 Strukturované mag. jádro [18] .....	25
obr. 2-15 Schéma napájecího RL obvodu [19].....	26
obr. 3-1 Nahrazovaný pasivní tlumič elektromotoriky .....	27
obr. 4-1 Hierarchická struktura cílů a omezení .....	31
obr. 4-2 Black box vidlice s MR tlumičem .....	32
obr. 4-3 Glass box vidlice s MR tlumičem .....	32
obr. 4-4 Koncepční návrh sestavy MR tlumiče .....	33
obr. 4-5 Plné magnetické jádro a plášť pístu: a) s jednou cívku, b) s dvěma cívkami.....	34
obr. 4-6 Drážkované magnetické jádro a plášť z oceli 11SMn30 .....	34
obr. 4-7 Víko pístu: a) kruhové pole děr, b) zakřivené drážky .....	35



obr. 4-8 MR ventil se dvěma štěrbinami .....	36
obr. 5-1 Použitá geometrie MR ventilu .....	40
obr. 5-2 Konečnoprvková síť .....	40
obr. 5-3 Výsledné rozměry MR ventilu .....	41
obr. 5-4 Magnetická indukce pro proud 2 A .....	41
obr. 5-5 Magnetický tok pro proud 2 A .....	42
obr. 5-6 Závislost průměrné intenzity magnetického pole ve štěrbině na napájecím proudu .....	42
obr. 5-7 (a) Časový průběh napájecího proudu, (b) Potřebné napájecí napětí .....	43
obr. 5-8 Vytvoření axisymetrické geometrie .....	43
obr. 5-9 a) geometrie štěrbin se zúžením b) geometrie štěrbin bez zúžení .....	43
obr. 5-10 a) nastavení velikosti elementů sítě b) graf kvality elementů.....	44
obr. 5-11 Okrajové podmínky pro kompresi.....	44
obr. 5-12 Tlaková ztráta: a) při kompresi, b) při odskoku .....	45
obr. 5-13 F-v charakteristika: a) komprese, b) odskok .....	45
obr. 5-14 Závislost meze toku MRF122EG na intenzitě magnetického pole [21].....	46
obr. 5-15 Predikce F-v charakteristiky a porovnání s původním pasivním tlumičem.....	47
obr. 5-16 Konstrukce MR tlumiče I. generace .....	48
obr. 5-17 Sestava pístu, pístnice a horního víka válce.....	48
obr. 5-18 Fotografie sestavené patrony tlumiče .....	48
obr. 5-19 a) návrh MR ventilu b) fotografie částečně složeného MR ventilu.....	50
obr. 5-20 Výsledný návrh MR ventilu .....	50
obr. 5-21 Okrajové podmínky pevnostní analýzy válce .....	51
obr. 5-22 Součinitel bezpečnosti válce a vík.....	51
obr. 5-23 Geometrie pístnice I. generace: a) horní část, b) pístní část .....	52
obr. 5-24 Nastavení sítě MKP analýzy pístnice I. generace .....	52
obr. 5-25 Maximální redukované napětí pístnice I. generace .....	52
obr. 5-26 a) rozložené horní víko válce b) složené horní víko válce .....	53
obr. 5-27 Okrajové podmínky pevnostní analýzy horního víka nohy.....	54
obr. 5-28 Výsledek MKP - součinitel bezpečnosti horního víka nohy .....	54

obr. 5-29 Fotografie vyrobeného víka.....	54
obr. 5-30 Zástavba snímače zdvihu .....	55
obr. 5-31 Spirání kabel: a) stlačený, b) natažený .....	55
obr. 5-32 Porovnání naměřené F-v charakteristiky a predikce .....	56
obr. 5-33 Měření časové odezvy: a) fotografie měření, b) závislost časové odezvy na proudu .....	57
obr. 5-34 Závislost časové odezvy tlumiče na pístní rychlosti a proudu pro kompresi .....	58
obr. 5-35 Závislost časové odezvy tlumiče na pístní rychlosti a proudu pro odskok .....	58
obr. 5-36 Kontakty v tlumiči .....	59
obr. 5-37 Porovnání výsledků měření tření manžet.....	59
obr. 5-38 Finální F-v charakteristika MR tlumiče .....	60
obr. 6-1 Navržená geometrie pro klíč .....	63
obr. 6-2 Redukované napětí v ocelové pístnici II. generace .....	65
obr. 6-3 Experimentálně naměřený E-N graf pro EN AW-6082 T6 [28].....	66
obr. 6-4 Použitá E-N křivka hliníkové slitiny EN AW-6082 T6.....	67
obr. 6-5 Geometrie válce II. generace použitá pro MKP pevnostní analýzu .....	69
obr. 6-6 Okrajové podmínky pevnostní analýzy válce 2.0: a) horní víko, b) dolní víko ...	69
obr. 6-7 Výsledné redukované napětí: a) horní víko, b) dolní víko .....	70
obr. 6-8 Součinitel bezpečnosti: a) horní víko, b) dolní víko .....	70
obr. 6-9 Víčko dolního víka válce .....	71
obr. 6-10 Výsledky analýzy dolního víka válce: a) elastické přetvoření, b) součinitel bezpečnosti.....	71
obr. 6-11 Nová konstrukce horního víka nohy .....	72
obr. 6-12 Výsledky analýzy horního víka nohy: a) součinitel bezpečnosti, b) přetvoření, c) deformace .....	72
obr. 6-13 Nosič senzoru: a) původní, b) odlehčený; Držák magnetického pásu: c) původní, d) odlehčený .....	73
obr. 6-14 Konstrukce MR tlumiče II. generace .....	73
obr. 6-15 Detail horní části tlumiče .....	74
obr. 6-16 Detail horního víka válce a MR ventilu .....	75
obr. 6-17 Detail plovoucího pístu a dolního víka válce .....	75

obr. 6-18 Schéma montáže plovoucího pístu .....	76
obr. 6-19 Porovnání hmotností všech tlumičů.....	76
obr. 6-20 Porovnání F-v charakteristiky MR tlumiče a původního pasivního tlumiče .....	78

## 12 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1 Porovnání materiálů magnetického jádra [17].....	25
tab. 3-1 Přehled cílů a dalších charakteristik produktu.....	29
tab. 3-2 Požadované parametry magnetoreologického tlumiče.....	30
tab. 4-1 Výběr parametrů použitých pro hodnocení konceptů.....	31
tab. 4-2 Morfologická analýza konceptů konstrukčních uzlů.....	36
tab. 4-3 Přehled konstrukčních uzlů jednotlivých konceptů.....	37
tab. 4-4 Přehled alternativních řešení a jejich hodnocení.....	37
tab. 4-5 Hodnocení konceptů.....	38
tab. 5-1 Materiály magnetické analýzy.....	40
tab. 5-2 Tabulka rozměrů MR ventilu.....	41
tab. 5-3 Seznam upravitelných komponent.....	49
tab. 5-4 Použité materiály pro pevnostní analýzu.....	51
tab. 6-1 Materiálové vlastnosti použitých materiálů pístnice [23–25].....	62
tab. 6-2 Hodnoty součinitelů korigované meze únavy.....	63
tab. 6-3 Výsledky jednoparametrické analýzy průměru otvoru pístnice.....	64
tab. 6-4 Použité hodnoty parametrů MCB modelu [28].....	66
tab. 6-5 Výsledky pevnostní analýzy hliníkové pístnice.....	67
tab. 6-6 Technické parametry MR tlumiče II. generace.....	77
tab. 6-7 Porovnání požadovaných a dosažených parametrů.....	79
tab. 6-8 SWOT analýza.....	80

## 13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Pevnostní MKP analýzy

Příloha 2: Kontrolní výpočet šroubů horního víka nohy

Příloha 3: Protokol měření třecí síly

Příloha 4: Funkční vzorek

Výkresová dokumentace MR tlumiče I. generace

Výkresová dokumentace MR tlumiče II. generace