



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**HYDRODYNAMICKÉ TLUMIČE NA PRINCIPU  
MAGNETICKÉ KAPALINY**

HYDRODYNAMIC DAMPERS ON THE PRINCIPLE OF MAGNETIC FLUID

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Matěj Přikryl**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. František Pochylý, CSc.**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Matěj Příkryl**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Fluidní inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. František Pochylý, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

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:

## Hydrodynamické tlumiče na principu magnetické kapaliny

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza základních principů klasických hydrodynamických tlumičů.

Analýza základních principů hydrodynamických tlumičů s feromagnetickou a magnetoreologickou kapalinou. Studium základních vlastností hydrodynamických tlumičů na principu proudění tekutin v magnetickém poli.

### Cíle diplomové práce:

Matematický model hydrodynamického tlumiče a jeho řešení. Návrh základních rozměrů hydrodynamického tlumiče. Konstrukční návrh vlastní konstrukce tlumiče.

### Seznam literatury:

Rosensweig, R. E.: Ferrohydrodynamics. Mineola, New York, 1985.

Byrne, J. V.: Ferrofluid hydrostatics according to classical and recent theories of the stresses. Proc. IEE, V.124, No.11, 1977, pp. 1089-1097.

Příkryl, M.: Hydrodynamické tlumiče na principu magnetické kapaliny. Bakalářská práce, VUT v Brně, FSI, EÚ – OFI V. K., akad. r. 2013/14.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá magnetickými kapalinami a jejich aplikací v hydrodynamických tlumičích. V první části práce je provedena rešerše stávající technologie hydraulických tlumičů se zaměřením na tlumiče využívající magnetoreologickou kapalinu. Na tuto kapitolu navazuje rešerše na téma magnetických kapalin s ohledem na jejich fyzikální vlastnosti a matematický popis, který je využit pro CFD simulaci proudění. Druhá část práce se věnuje výpočtové simulaci proudění MR kapaliny v reálném MR tlumiči za účelem zjištění tlumící charakteristiky a jejím porovnáním s experimentálními daty.

## Klíčová slova

tlumič, magnetoreologická kapalina, feromagnetická kapalina, pasivní, semiaktivní, aktivní, MR tlumič, magnetické pole, CFD, simulace, Fluent, UDF, neneutronovská, Herschel-Bulkley, Bingham, mez toku

## Abstract

This diploma thesis covers the topic of magnetic fluids and their utilisation in hydrodynamic dampers. The first part of the work consists of research on the current state of technology in hydraulic dampers with the focus on dampers using magnetorheological fluid. This chapter is followed by research on magnetic fluids with regard to their physical properties and mathematical description, which is used for CFD simulation of flow. The second part deals with the computational simulation of the flow of MR liquid in real MR damper in order to determine the damping characteristic and its comparison with the experimental data.

## Keywords

damper, magnetorheological fluid, ferromagnetic fluid, passive, semi-active, active, MR damper, magnetic field, CFD, simulation, Fluent, UDF, non-newtonian, Herschel-Bulkley, Bingham, yield stress



## **Bibliografická citace**

PŘIKRYL, M. *Hydrodynamické tlumiče na principu magnetické kapaliny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 77 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc..





## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Hydrodynamické tlumiče na principu magnetické kapaliny vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 25. května 2017

.....  
Bc. Matěj Příkryl



## Poděkování

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu prof. Ing. Františku Pochylému, CSc. za odborné vedení a věcné rady při vypracovávání této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval kolektivu z Ústavu konstruování VUT v Brně za experimentální data. Naměřenou F-v charakteristiku a výsledky simulace rozložení magnetického pole MR tlumiče poskytli jmenovitě Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D., Ing. Jakub Roupec, Ph.D. a Ing. Michal Kubík.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>15</b>
1.1	Motivace	15
1.2	Cíle práce	15
1.3	Metodika	16
1.4	Přínos práce	16
<b>I</b>	<b>Přehled současného stavu poznání</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>Hydrodynamické tlumiče</b>	<b>18</b>
2.1	Pasivní tlumiče	20
2.1.1	KONI Frequency Selective Damping	20
2.1.2	Polohově závislé tlumiče	20
2.1.2.1	King Internal Bypass Shock	21
2.1.2.2	Monroe SENSE-TRAC & SAFE-TECH	21
2.1.2.3	Monroe Displacement Conscious Damping	22
2.1.3	ZF Sachs Sensitive Damping Control	22
2.1.4	Mercedes-Benz Frequency Selective Damping	22
2.1.5	ZF Sachs Nivomat	23
2.1.6	Monroe GT	24
2.2	Adaptivní tlumiče	24
2.2.1	KONI nastavitelný tlumič	25
2.2.2	KONI elektronicky řízený tlumič	25
2.3	Semi-aktivní tlumiče	26
2.3.1	CDC tlumiče	26
2.3.1.1	ZF Sachs CDCi	27
2.3.1.2	ZF Sachs CDCe	27
2.3.2	Magnetoreologické tlumiče	27
2.3.2.1	Typická konstrukce MR tlumiče	28
2.3.2.2	Pasivní MR tlumič	28
2.3.2.3	Dvouplášťový MR tlumič s dvěma cívkami	29
2.3.2.4	MR příčný tlumič pro vlaky	29
2.3.2.5	Jednoplášťový MR tlumič s radiálním pístem	31
2.3.2.6	Hybridní MR tlumič	31
2.3.2.7	Self-sensing MR tlumič	32
2.3.2.8	Self-sensing MR tlumič s generací energie	33
2.3.3	Další konstrukce MR tlumičů	34
2.4	Aktivní tlumiče	34
2.4.1	Aktuátory pro naklánění vlaku	34
2.4.2	Aktuátory pro natáčení vlaku	36
2.4.3	Monroe ACOCAR	36

<b>3</b>	<b>Magnetické kapaliny</b>	<b>37</b>
3.1	Feromagnetické kapaliny	38
3.1.1	Negativní viskozita	41
3.1.2	Magnetoviskózní efekt	42
3.2	Magnetoreologické kapaliny	44
3.2.1	Pracovní módy MR kapalin	45
3.2.2	Reologický model MR kapalin	45
3.3	Aplikace magnetických kapalin	47
<b>II</b>	<b>Analýza problému a interpretace výsledků</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>Výpočtová simulace proudění</b>	<b>51</b>
4.1	Identifikace zadání	51
4.1.1	Geometrie tlumiče	51
4.1.2	Charakteristika tlumiče	52
4.1.3	Rozložení magnetického pole	53
4.2	CFD simulace	53
4.2.1	Výpočetní doména & okrajové podmínky	54
4.2.2	Výpočetní síť	55
4.2.3	Nastavení výpočtu	57
4.2.3.1	Korekce viskozity v neaktivovaném stavu	58
4.2.3.2	Skutečná tlumící síla z F-v charakteristiky	58
4.2.3.3	Definice viskozity pomocí UDF	59
4.2.4	Výsledky	60
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>66</b>

# 1 | Úvod

Účelem této kapitoly je seznámit čtenáře s motivací vzniku této práce a s jejím cílem, jehož má být dosaženo. Autor zde uvede stručný metodický přístup využitý při kompozici práce a také při tvorbě výpočtové simulace proudění (CFD simulace).

## 1.1 Motivace

V automobilním a železničním dopravním průmyslu je problematika tlumení vibrací spojena s hydraulickými tlumiči teleskopického typu. V leteckém průmyslu a v případech kmitání rotující hřídele obecně jsou spojeny tlumiče s vytlačitelnou mezní vrstvou, tzv. squeeze-filmové tlumiče. Tato práce se zabývá prvním typem, tedy tlumiči teleskopickými.

Zvyšování transportní rychlosti především v železniční dopravě klade větší nároky na systém odpružení vozidla. Nesprávně fungující tlumiče vedou na jedné straně k přenosu nadměrných silových účinků do celé mechanické soustavy, jsou-li příliš „tuhé“, a na straně druhé nedokáží vyvinout dostatečnou tlumící sílu pro zajištění bezpečnosti, jsou-li příliš „měkké“.

Tento konflikt mezi bezpečností a jízdním komfortem je fundamentálním zdrojem inovací nových typů tlumičů, jelikož je takřka neřešitelný s použitím klasické pasivní technologie. Semiaktivní tlumiče umožňují upravovat poměr mezi „tuhým“ a „měkkým“ nastavením a aktivní tlumící jednotky navíc přidávají možnost dodávat energii do systému odpružení vozidla.

Uvážíme-li schopnosti tlumiče — jmenovitě rozsah nastavení tlumící charakteristiky, délku reakční doby na řídicí impuls, robustnost systému a pořizovací náklady, jeví se jako nejrelevantnější technologie semiaktivních tlumičů s magnetoreologickou (MR) kapalinou. MR kapaliny jsou tzv. chytré materiály, jejichž efektivní viskozita (pojem vysvětlen dále v práci) je ovlivnitelná působením externího magnetického pole. Tohoto fenoménu je s výhodou využito právě v hydrodynamických tlumičích fungujících na principu disipace energie na teplo v důsledku viskózního tření.

## 1.2 Cíle práce

Jedním z cílů této práce je vytvoření důkladné rešerše na téma hydrodynamických tlumičů s důrazem na tlumiče využívající MR kapaliny. V této rešerši budou uvedeny různé konstrukční typy tlumičů napříč jejich aplikacemi. Čtenář by zde měl nalézt solidní vysvětlení principu funkce jak tlumičů klasických, tzv. pasivních konstrukcí, tak i tlumičů semiaktivních a aktivních. Větší pozornost přitom bude věnována tlumičům využívaných v kolejových vozidlech

a tlumičům s MR kapalinou.

Druhý cíl této práce je zaměřen na řešerši magnetických kapalin s ohledem na jejich fyzikální vlastnosti. V této části bude uvedeno z čeho se magnetické kapaliny skládají, mechanismus změny jejich chování za přítomnosti magnetického pole a přehled matematických přístupů, jež se snaží popsat jejich chování.

V neposlední řadě si tato práce klade za úkol provedení CFD simulace proudění MR kapaliny v reálném sériovém tlumiči. Hlavním cílem je navržení postupu CFD výpočtu tak, aby vypočtená tlumicí síla co nejlépe reflektovala skutečné chování tlumiče, jehož F-v charakteristika byla změřena na Ústavu konstruování VUT v Brně.

## 1.3 Metodika

Práce je rozdělena na část řešeršní s názvem *Přehled současného stavu poznání* a část analytickou s názvem *Analýza problému a interpretace výsledků*. První část se skládá z řešerše různých typů hydrodynamických tlumičů vyznačujících se jedinečným principem funkce, který je názorně vysvětlen. Následně je v této části provedena řešerše magnetických kapalin — MR kapalin a kapalin feromagnetických. Popis vlastností feromagnetických kapalin slouží jako výchozí bod pro matematický popis MR kapalin.

Druhá část je věnována CFD simulaci proudění MR kapaliny v reálném tlumiči za účelem výpočtu tlumicí síly při daném řídicím proudu v elektromagnetické cívce pístu. Hodnota intenzity magnetického pole, nutná pro určení meze toku MR kapaliny, je získána z magnetostatické simulace Ústavu konstruování VUT v Brně (dále jen ÚK). Dále je navržen tvar výpočetní domény, její diskretizace a okrajové podmínky tak, aby byla respektována geometrie a zatěžovací podmínky skutečného MR tlumiče. MR kapalina pod účinkem magnetického pole je nahrazena Binghamským modelem viskoplastické kapaliny, jehož parametry (konstanty) jsou viskozita v neaktivovaném stavu a výše zmíněná mez toku.

## 1.4 Přínos práce

Hlavním očekávaným přínosem této práce je přiblížení se tzv. *zero-prototype engineering* — metodě konstruování bez nutnosti ověřování určitých vlastností na zkušebním prototypu. Tento přístup využívá simulační výpočty ke zjištění vlastností navrhovaného produktu na základě zadaných okrajových podmínek. Tímto přístupem lze do jisté míry odbourat nutnost výroby prototypu spojenou se značnými finančními a časovými nároky.

Právě návrh takovéto simulace včetně porovnání výsledků se skutečnou F-v charakteristikou je v této práci popsán. V tomto případě zde hovoříme o možnosti zjištění F-v charakteristiky MR tlumiče v okamžiku dokončení geometrického modelu. Tento přístup dává konstruktérovi do rukou efektivní nástroj, s nímž může velmi rychle a za minimální náklady optimalizovat navrhovaný tlumič za účelem dosažení požadovaných parametrů.



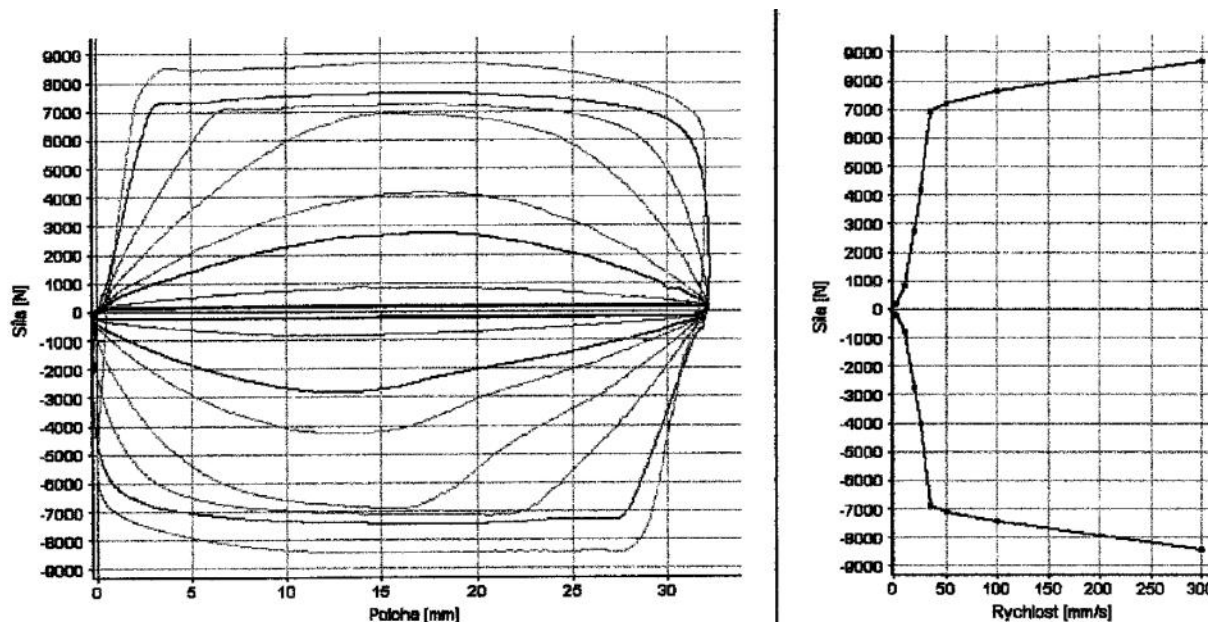
## Část I

# Přehled současného stavu poznání

## 2 | Hydrodynamické tlumiče

V této kapitole je uveden přehled současných typů hydrodynamických tlumičů lišících se principem jejich funkce. S ohledem na téma této diplomové práce, je hlavní pozornost věnována tlumičům využívajících magnetoreologickou kapalinu a tlumičům pro kolejová vozidla.

Nejvíce rozšířené rozdělení tlumičů je podle jejich schopnosti měnit tlumící charakteristiku (viz. Obr. 2.1 na kterém je reálná charakteristika tlumiče pro kolejová vozidla od firmy Strojírna Oslavany). Tato změna, pokud ji konstrukce umožňuje, může být vyvolána čistě mechanickými principy bez nutnosti dodávky elektrické energie, nebo dodáváním elektrické energie do cívky elektromagnetického ventilu. V následujících podkapitolách jsou postupně uvedeny jednotlivé tlumiče od různých výrobců. Tlumiče bez přívodu elektrické energie a neschopnosti měnit jejich odezvu bez demontáže se nazývají **pasivní**. Skupina adaptivních tlumičů přidává možnost přenastavení tlumící charakteristiky v montážním stavu na vozidle. **Semiaktivní** tlumiče jsou už vybaveny elektromagnetickými ventily nebo používají MR kapalinu a vyžadují přívod elektrické energie. Poslední skupinou jsou tlumiče **aktivní**. Tlumič je součástí systému se zdrojem tlakové kapaliny a kromě disipace energie je schopen energii do kmitající soustavy i dodávat. S tím jsou spojeny vyšší pořizovací i provozní náklady.

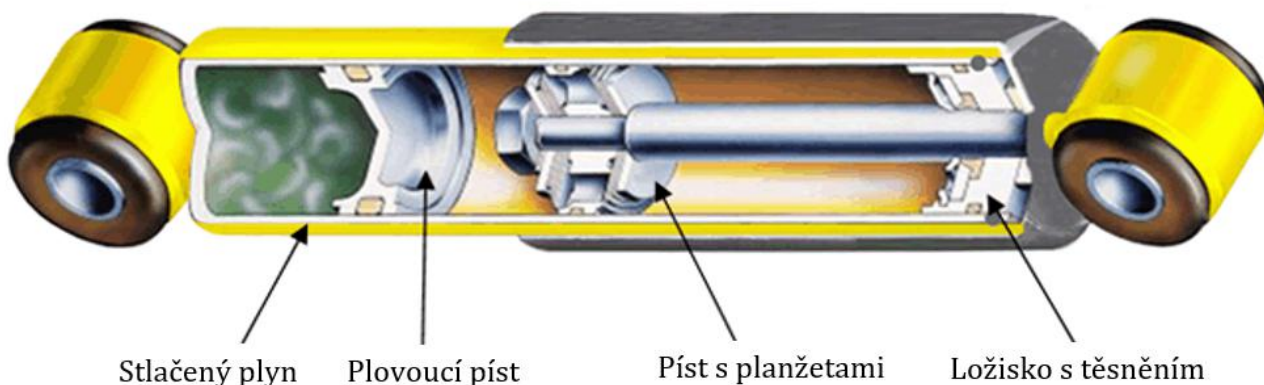


Obr. 2.1: Skutečná charakteristika tlumiče pro kolejová vozidla. Vlevo - závislost síly na zdvihu při různých rychlostech. Vpravo - závislost síly na rychlosti s patrnou náběhovou (průtokový ventil) a omezovací větví (omezovací ventil).

Dalším základním dělením je podle způsobu oběhu pracovní kapaliny a to na tlumiče jednoplášťové a dvouplášťové. Speciálním případem jednoplášťových tlumičů jsou poté tlumiče s oboustrannou pístnicí, u kterých nedochází ke změně objemu pracovního prostoru v důsledku

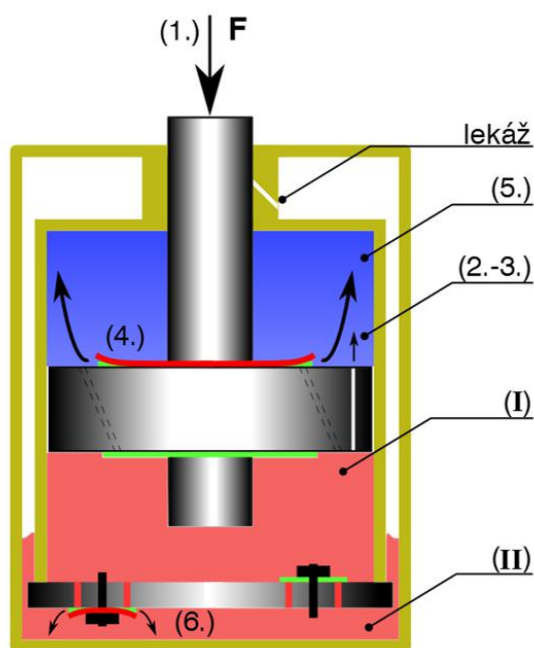
zasouvání pístnice. Tyto tlumiče nemají zásobní prostor nebo plovoucí píst (avšak musejí kompenzovat teplotní dilataci kapaliny).

**Jednoplášťové tlumiče** - kompenzují zmenšení pracovního objemu o objem vnikající pístnice kompresí akumulární komory s plynem (většinou dusík). Viz Obr. 2.2 – pohyblivý píst (*floating piston*) stlačuje prostor s plynem, který je při výrobě natlakovaný na řádově desítky barů. Toto předpětí potlačuje vznik bublinek v oleji a zlepšuje tlumící schopnost, avšak s rostoucím tlakem roste také pružení plynu;



Obr. 2.2: Schéma jednoplášťového tlumiče [1].

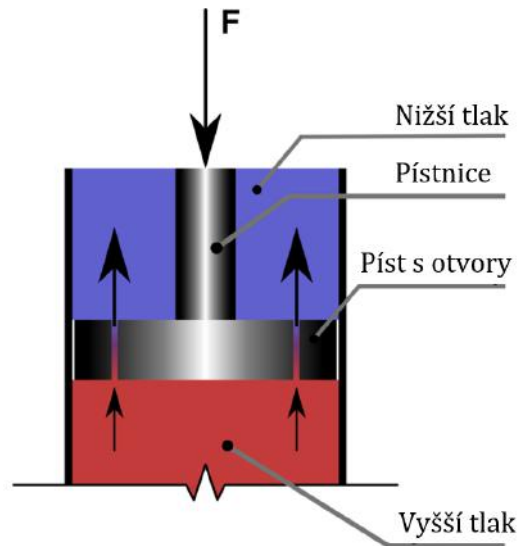
**Dvouplášťové tlumiče** - kompenzují změnu objemu způsobenou vysunutím pístnice doplněním oleje z druhého pracovního prostoru. Princip funkce je patrný na Obr.2.3. Podrobný popis funkce označených částí je k nalezení v [2]. Výhodou těchto tlumičů je absence přídatného pružení v důsledku akumulárního prostoru s plynem. Potlačit pění oleje lze řešit plynovými vaky ve vyrovnávacím prostoru.



Obr. 2.3: Schéma dvouplášťového tlumiče [2].

## 2.1 Pasivní tlumiče

Primární funkcí tlumiče je tlumit vlastní frekvence systému vypružení vznikající pohybem vozidla disipací<sup>1</sup> energie na teplo prostřednictvím viskózního tření (*katarakt*, viz Obr. 2.4). Pasivní tlumiče se však nepoužívají jen v dopravním průmyslu, jejich aplikace lze nalézt ve výrobě obecně jako tlumiče rázů, tlumiče výhybek, kmitání potrubních systémů v důsledku hydraulických rázů, rotační tlumiče dveří atd. Další zajímavé aplikace jsou uvedeny dále v textu [2].



Obr. 2.4: Princip funkce kataraktu [2].

### 2.1.1 KONI Frequency Selective Damping

Jedná se o zajímavý typ kapalinového tlumiče, který přidává prvek zvyšující komfort při tlumení vysokých frekvencí. Při vysokofrekvenčním pohybu pístu vznikají v kapalině rychlé nárůsty tlaku, potažmo tlumící síly, které jsou přenášeny do vozidla, zvyšují dynamické namáhání karoserie a snižují komfort posádky. Tento negativní jev se snaží redukovat FSD tlumič od firmy KONI. Olej proudí kromě klasické cesty pístem navíc otvorem v pístnici na sekundární píst s předepnutou ucpávkou, která reaguje právě na vysoké frekvence, viz Obr. 2.5 níže. FSD tlumič nahrazuje složitější řešení s elektronikou jednoduchým mechanickým principem. Při zvyšování rychlosti pohybu tlumiče proudí olej postupně:

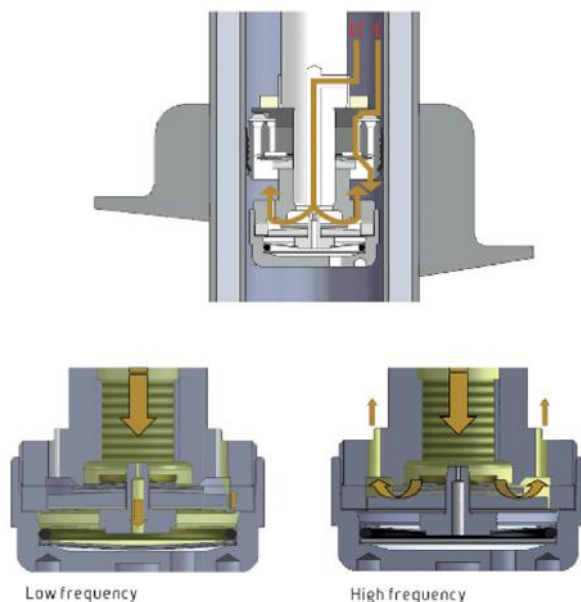
1. pouze dýzou v hlavním pístu (není na obrázku);
2. dýzou + planžetami v hlavním pístu;
3. dýzou + planžetami v hlavním pístu + planžetami v sekundárním pístu (II).

### 2.1.2 Polohově závislé tlumiče

Kromě závislosti na rychlosti je tlumící síla závislá i na výchylce ze statické polohy. Tyto tlumiče jsou z pravidla navrhnuty tak, aby při malých výchylkách ze statické polohy nekladly

<sup>1</sup>Elektromagnetické tlumiče umožňují konvertovat část disipované energie na elektrickou energii. Ovšem i kapalinový tlumič by mohl částečně využívat teplo vznikající při viskózním tření, například pomocí Peltierova článku.

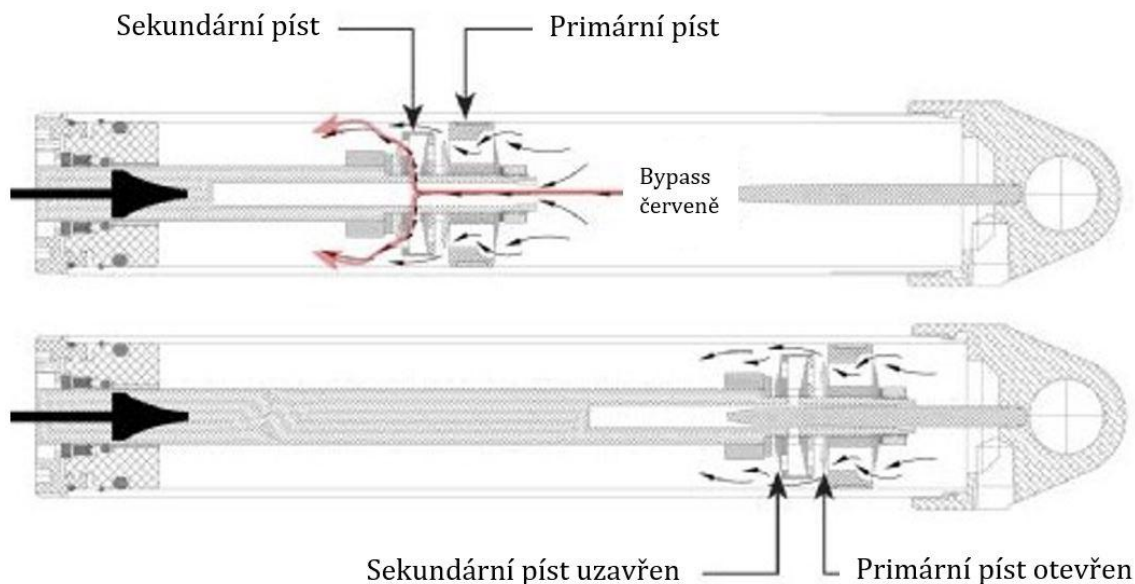
příliš velký odpor. Při větších výchylkách musí tlumič z bezpečnostních důvodů vyvinout větší tlumící síly, aby se zajistil kontakt kola s povrchem nebo se například zabránilo náklonu vozu.



Obr. 2.5: KONI FSD tlumič [3].

### 2.1.2.1 King Internal Bypass Shock

Do vrtaného otvoru v pístnici vniká jehla, čímž zabraňuje vnikání oleje do sekundárního pístu. Vrcholový úhel jehly ovlivňuje rychlost náběhu tlumící síly a lze tak jednoduše kontrolovat například dojezdové nebo omezující síly/rychlosti; viz Obr. 2.6 níže.



Obr. 2.6: King IBS tlumič [4].

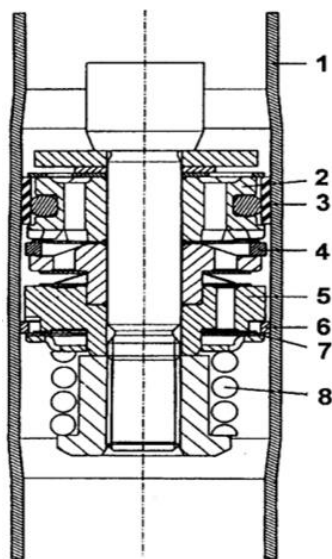
### 2.1.2.2 Monroe SENSE-TRAC & SAFE-TECH

Tlumič od firmy Monroe má na vnitřním válci vybrání nebo drážku určité délky, což umožňuje obtok pístu a snížení tlumící síly. Oproti předchozí variantě IBP má nevýhodu v oslabení

stěny válce, jenž je dynamicky namáhán. Varianta SENSEA má ostrý přechod drážky z jednoho průměru na druhý, kdežto varianta SAFE má plynulý průběh drážky. Tomu poté odpovídá i tvar náběhu tlumící síly.

### 2.1.2.3 Monroe Displacement Conscious Damping

Podobně jako v předchozích případech je změny tlumící síly dosaženo pomocí úpravy válce, avšak v tomto případě je zvětšen celý průměr válce ve střední poloze. Tento systém byl vyvinut firmou Monroe a je používán například u vozů Ford Galaxy nebo VW Sharan. Pokud je vozidlo naloženo, klesne píst do místa s menším průřezem, čímž se zvýší tlumící síla a zajistí stabilita a bezpečnost automobilu. V odlehčeném stavu je píst v rozšíření a jízda je komfortnější. Aby tento systém fungoval, je těsnicí kroužek na pístu uložen pružně, aby byl ve stálém kontaktu se stěnou válce, viz Obr. 2.7.



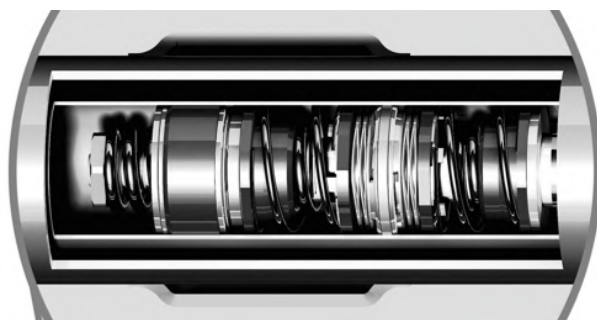
Obr. 2.7: Monroe DCD tlumič [5].

### 2.1.3 ZF Sachs Sensitive Damping Control

Tento systém opět zohledňuje požadavek na zvýšení komfortu při malých vertikálních výchylkách (nerovnostech vozovky) bez využití elektroniky. Na pístnici je umístěn jeden klasický píst s dýzami a planžetami a nad ním je na systému pružin uložen druhý plovoucí píst. Ten se při malých výchylkách vyšších frekvencí díky své hybnosti příliš nepohybuje a neprotéká jím téměř žádná kapalina. Vzroste-li amplituda kmitů na určitou hodnotu, plovoucí píst se opře o tuhou pružinu a dále se hýbe spolu s pevným pístem, čímž dojde ke zvýšení tlumící síly. Viz Obr. 2.8.

### 2.1.4 Mercedes-Benz Frequency Selective Damping

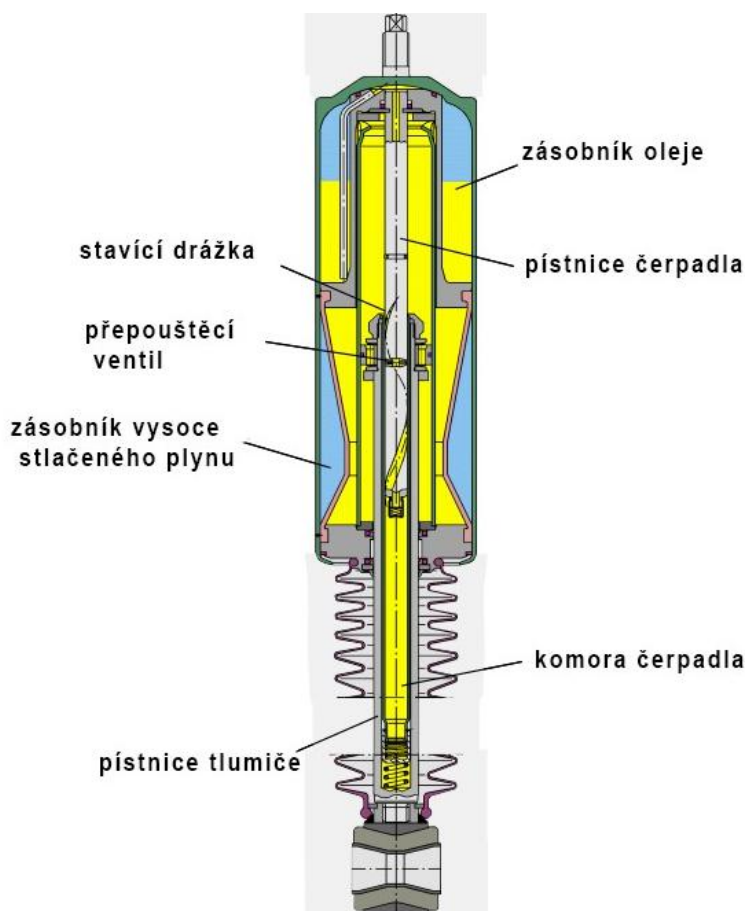
Tento systém využívá plovoucího pístu uvnitř pístnice. Při rychlých pohybech tlumiče zůstává plovoucí píst „na místě“ vzhledem k vozovce a umožňuje tak protéct oleji a snížit tlumící sílu. Při větších pohybech tlumiče, jako třeba zatáčení brzdění atd. je však vnitřní píst dotlačen do krajní polohy a utěsňuje obtokovou cestu, čímž naroste tlumící síla a vozidlo se stává velmi stabilním.



Obr. 2.8: ZF Sachs SDC tlumič s plovoucím pístem [6].

### 2.1.5 ZF Sachs Nivomat

Tlumič se samočerpacím účinkem – má za úkol udržovat konstantní světlou výšku tzn., že po zatížení vozidla nákladem dojde po určitém počtu kompresí/expanzí tlumiče (ujetí cca 500 m) k nastavení původní světlé výšky vozidla. Uvnitř duté pístnice s pístem je uložena druhá „čerpací“ pístnice, která přečerpává olej z nízkotlakého do vysokotlakého prostoru. Oba prostory jsou vyplněny olejem i plynem, navzájem oddělených membránou. Montážní tlak v plynovém zásobníku je stanoven na 20–50 bar, ale tento tlak může v důsledku pohybu špičkově dosáhnout až hodnoty 350 bar. Jakmile je dosažen stanovený zdvih, uniká olej spirálovou drážkou a tlak v komoře již dále neroste. Jakmile dojde k odstavení vozidla a odlehčení nápravy (při vystoupení pasažérů), jednotka se s nižším zatížením nejdříve začne roztahovat a vůz se chvíli zvedá. Na pístnici čerpadla je přepouštěcí ventil, který po odhalení uvolní tlak z čerpací komory a pohyb se zastaví. Zjednodušené schéma tohoto tlumiče je vidět na Obr. 2.9.



Obr. 2.9: ZF Sachs Nivomat tlumič [7].

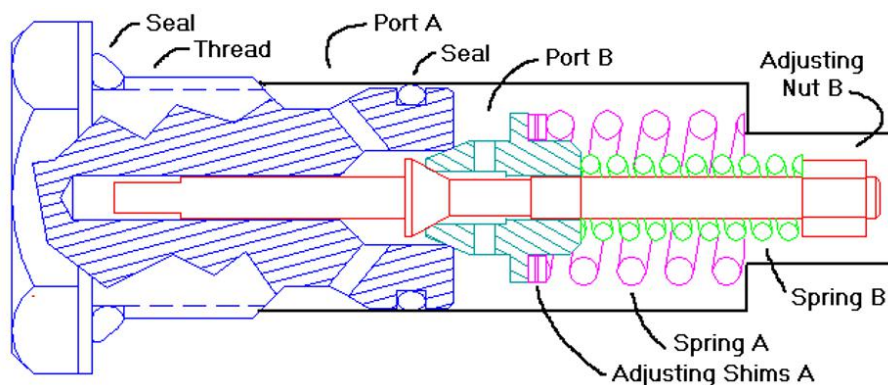
## 2.1.6 Monroe GT

Tyto tlumiče mají systém dvojitých planžet jak na pístu (*Multi-Tuned rebound valve*), tak na dně (*Compression valve*). Při malých rychlostech pístu se nejdříve otevře malá planžeta a zapře se o větší planžety. Po překročení určité rychlosti naroste tlak ve válci a překoná se předpětí i větších planžet a umožní se tak vyšší průtok oleje. Píst od výrobce Tenneco, který je použit u tohoto tlumiče je tedy vybaven sendvičovou sestavou planžet, které doplňují funkci omezovacích ventilů.

## 2.2 Adaptivní tlumiče

Tlumiče umožňují změnu charakteristiky pomocí manuálního zásahu (tzv. „přeladění“) nebo pomocí elektronického signálu, který ovládá jednoduchý elektromagnetický ventil. Výhodou řízení pomocí elektrického signálu je možná automatizace, která na základě určitého parametru (např. rychlosti) přepíná mezi *měkkým* nastavením, kde je preferován komfort a nastavením *tvrdým*, kde je preferována jízdní bezpečnost. Z toho plyne, že nevýhodou elektronických adaptivních tlumičů (viz Obr. 2.12) jsou jen dvě možná nastavení, jelikož elektromagnetický ventil je buď otevřen, nebo zcela uzavřen. Manuálně nastavitelné tlumiče, též „laditelné“ nabízejí mnohem více pracovních bodů. Díky těmto vlastnostem a jednoduché obsluze jsou adaptivní tlumiče nejvíce rozšířeny u rally vozů.

Existuje celá řada tlumičů, jejichž charakteristika se dá ovlivňovat pomocí manuálního zásahu obsluhy a o všech lze prohlásit, že fungují na velmi podobném principu. Jedná se o implementaci laditelného škrtkového prvku do hydraulického obvodu v tlumiči. Příkladem takového prvku (*ventilu*) je nastavitelný ventil, který vyvinula firma Armstrong, viz Obr. 2.10. Tento ventil musí být pro jeho „přenasazení“ vyšroubován, což ho odlišuje od klasické konstrukce u adaptivních tlumičů, ale je vhodný pro vzorový příklad této práce.



Obr. 2.10: Nastavitelný dvoucestný ventil firmy Armstrong [8].

### Popis funkce ventilu Armstrong

Ventil byl používán ve speciálních tlumičích firmy Armstrong, které jsou používány ve sportovních vozech MGA. Pákový mechanismus převádí rotační kmitavý pohyb na lineární pohyb dvou pístů, které jsou v místech Port A a Port B napojeny na tento omezovací<sup>2</sup> ventil. Při kompresi válce B se zvyšuje tlak oleje v místě Port B, kde tlačí na tyčinku předepnutou silou od menší zelené pružiny. Po jejím překonání se nadzvedne kuželka a umožní průtok oleje

<sup>2</sup>Omezovací ventil zajišťuje pokles tlumící konstanty při překročení nastavené hodnoty tlaku/síly v tlumiči. Tím zamezí přenosu kritických sil do konstrukce vozu.

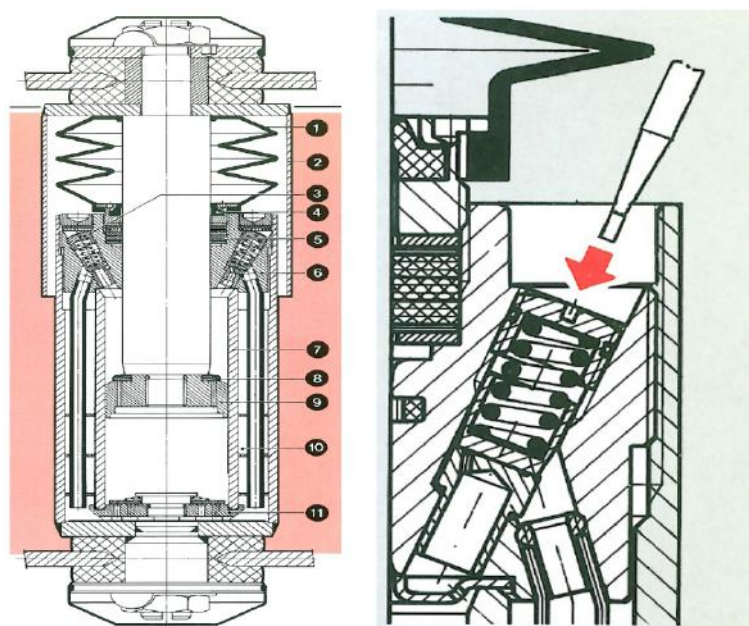


do komory A a dojde k vyrovnání tlaků. Při opačném pohybu roste tlak v místě A a působí proti síle fialové pružiny. Po překonání tohoto odporu se opět vyrovnají tlaky v obou komorách a poklesne tlumící síla.

Hydraulických tlumičů s nastavitelnou charakteristikou existuje celá řada od různých výrobců a jejich příklady jsou uvedeny v [9, 10, 11]. Pro účely této práce byly vybrány dva tlumiče, jako zástupci manuálního a elektronicky řízeného tlumiče. Princip „laditelných“ tlumičů spočívá vždy ve změně předpětí pružiny (u omezovacího ventilu) nebo změně průtočné plochy (u škrťacího ventilu).

### 2.2.1 KONI nastavitelný tlumič

Tyto nastavitelné tlumiče vrtění<sup>3</sup> jsou hojně používány v různých typech vlaků (TGV-Corail Francie, Pendolino ETR450 Itálie, Amtrak USA atd.). Tlumič na Obr. 2.11 obsahuje jednosměrný píst a dno a pak dva nastavitelné ventily mezi vnitřním prostorem a vyrovnávacím prostorem. Nastavitelné ventily (3) slouží ke kompenzaci poklesu tlumící síly při dlouhodobém provozu. Při kompresi je dno (11) uzavřeno a olej proudí skrze jednosměrný ventil v pístu (8,9). Přebytečný objem vnikající pístnice je kompenzován přepouštěním oleje z vnitřního válce do akumulacího prostoru skrze laditelné ventily. Při roztahování tlumiče je píst uzavřený a olej je tlačěn opět skrze laditelné ventily. Úbytek objemu je kompenzován přísávaním oleje přes ventil na dně, viz Obr. 2.11 níže. Tlumič tedy čerpá olej stále stejným směrem. Tyto tlumiče byly úspěšně odzkoušeny na francouzském vysokorychlostním vlaku TGV při rychlostech až 482 km/hod [13].



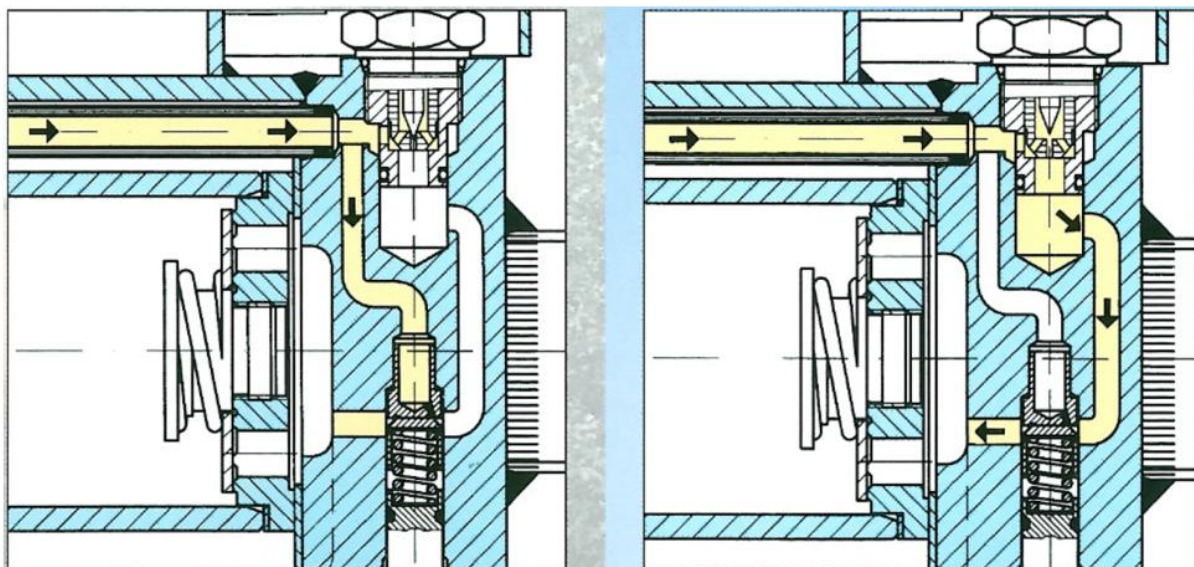
Obr. 2.11: KONI manuálně nastavitelný tlumič vrtění [13].

### 2.2.2 KONI elektronicky řízený tlumič

Tento tlumič vrtění je sice vybaven elektromagnetickým ventilem, ale jeho funkce je omezena pouze na dva pracovní body — otevřen/zavřen, proto nemůže být zařazen do kategorie semiaktivních tlumičů. Ovládání ventilu provádí buď obsluha, nebo je řízen automaticky, přičemž při

<sup>3</sup>Tlumiče vrtění jsou umístěny mezi podvozkem a skříní vlaku a tlumí vrtivé pohyby, ke kterým dochází při jízdě po přímé koleji [12].

nízkých rychlostech je zapnut → otevřen a snižuje se namáhání kolejnic. Při překročení určité rychlosti dojde k automatickému rozepnutí obvodu a síla pružiny uzavře ventil, čímž dojde ke zvýšení bezpečnosti. Hydraulický obvod je navržen tak, aby se při výpadku proudu uvedl tlumič do bezpečnější *tvrdé* charakteristiky.



Obr. 2.12: KONI elektronicky řízený tlumič; detail na zavřený a otevřený ventil [13].

## 2.3 Semi-aktivní tlumiče

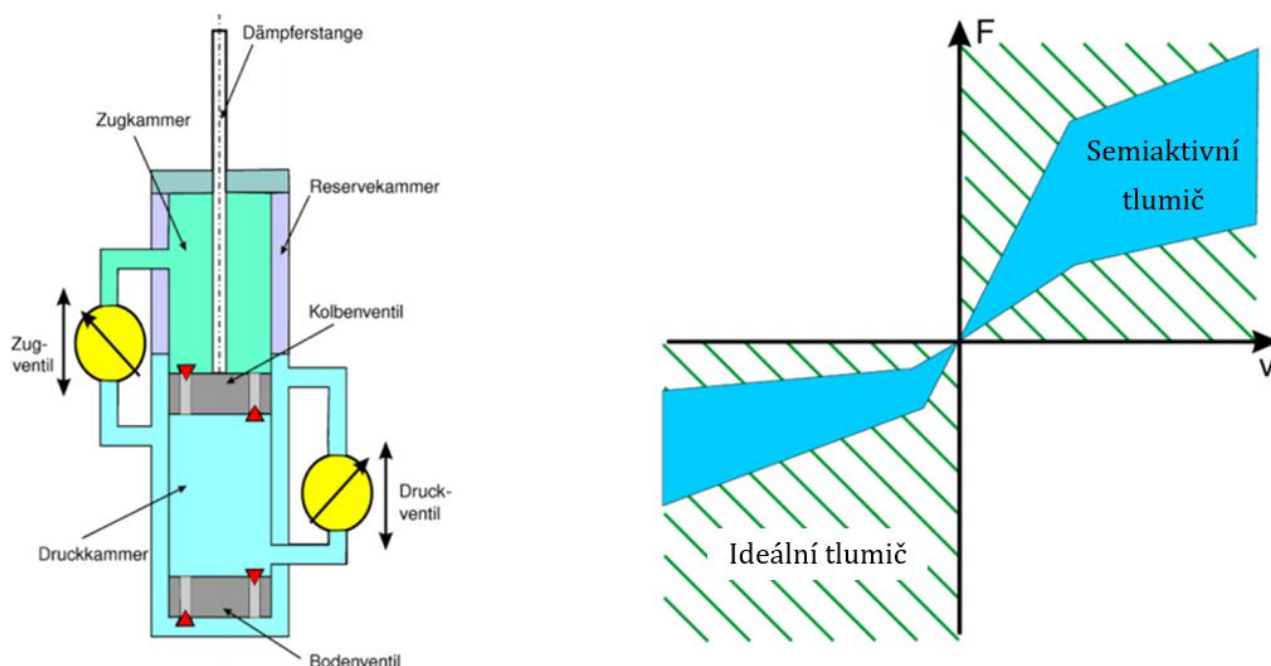
Semiaktivní tlumiče jsou již zcela ovládaný řídicí jednotkou (např. typu PID regulátor) na základě informací ze senzorů na vozidle. Podle ovládacího algoritmu může být tlumič řízen v *měkém*, *tvrdém* režimu, nebo algoritmem typu Skyhook<sup>4</sup> či jemu opačným algoritmem Groundhook [14]. Odezva semiaktivních systémů se měří v řádech milisekund a jsou tak schopné reagovat na kmitání neodpružených hmot. Z toho plyne označení těchto systémů jako tzv. **rychlé systémy**. Na rozdíl od adaptivních tlumičů, které mají možnost střídat charakteristiku většinou jen mezi omezeným počtem diskrétních bodů, se možnosti nastavení semiaktivních tlumičů jeví jako neomezené, díky rychlému spínání a proporcionálních ventilů). Tlumiče využívající magneto-reologickou kapalinu pak mají počet nastavení skutečně neomezený a přechod mezi nimi je spojitý, jelikož intenzita magnetického pole plynule mění zdánlivou viskozitu kapaliny [2].

### 2.3.1 CDC tlumiče

CDC – Continuous Damping Control je systém semiaktivního tlumení, který umožňuje měnit tlumící sílu dle pokynů řídicí jednotky. Děje se tak prostřednictvím řízeného škrcení průtoků, viz schéma na Obr. 2.13. V pravé části obrázku je zeleně vyznačena charakteristika ideálního tlumiče a modře oblast semiaktivního tlumiče (plocha, kdežto pasivní tlumič je jen jedna křivka). Systém CDC vyvinula firma ZF Sachs. K plynulému regulování průtoku obtokem jsou využity proporcionální průtočné ventily, které jsou ovládaný řídicí jednotkou. Ta každé 2 milisekundy vyhodnocuje různé typy vstupních veličin (zrychlení kola a karoserie, rychlost, poloha pedálu akcelérátoru, boční zrychlení, tlak v brzdovém systému, ABS a EPS systémy atd.) a upravuje

<sup>4</sup>Optimalizační algoritmus Skyhook upravuje tlumící síly na každém tlumiči tak, aby byla vzálenost mezi vozidlem a myšleným bodem na obloze konstantní. Groundhook má za účel udržet neustálý kontakt kola s vozovkou.

proud v cívice v rozmezí 0—1,8 A neboli upravuje polohu šoupátka zhruba 20 x za sekundu. Celá jednotka potřebuje příkon cca 15 W. Při výpadku elektrické energie dojde k samovolnému uzavření ventilu přtlakem pružiny a tím ke zvýšení bezpečnosti. Jedná se tedy o tzv. *fail-safe* systémy [15].



Obr. 2.13: Schéma semiaktivního CDC tlumiče (vlevo) a charakteristika idealizovaného a semiaktivního tlumiče (vpravo) [16].

### 2.3.1.1 ZF Sachs CDCi

První provedení CDC tlumiče má elektromagnetický proporcionální ventil umístěný uvnitř tlumiče. Toto provedení není příliš vhodné pro aplikace kladoucí nároky na celkové rozměry tlumiče, byl proto vyvinut i CDCe tlumič s externím umístěným ventilem.

### 2.3.1.2 ZF Sachs CDCe

Jak již bylo zmíněno, z důvodů limitujících zástavbových rozměrů byl vyvinut CDCe tlumič, který má externě uložený proporcionální ventil. Tlumení je regulováno přepouštěním oleje z vyrovnávacího prostoru do mezipláště, který je v horní části propojen s prostorem nad pístem. Ventilový systém v pístu i přepouštěcí ventil na dně jsou konstruovány na rozdíl od klasického tlumiče jako jednostranné, tzn., že jsou při roztahování tlumiče zcela uzavřeny a jejich funkci přebírá regulovatelný ventil.

## 2.3.2 Magnetoreologické tlumiče

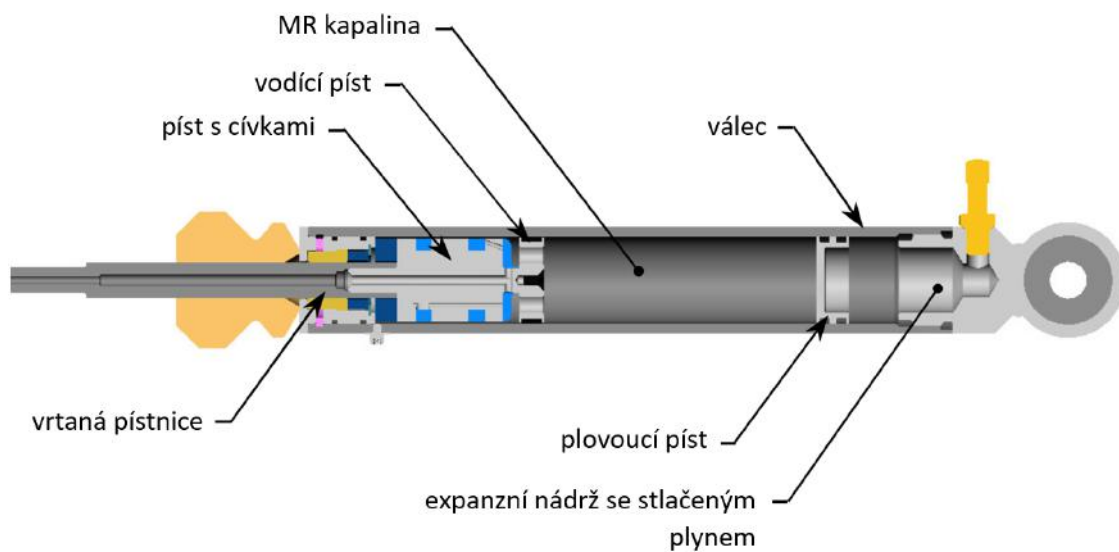
Tyto tlumiče využívají namísto klasického tlumičového oleje MR kapaliny, které umožňují téměř okamžitou změnu tlumicí síly podle provozních podmínek. MR kapalinám, jejich identifikaci, aplikacím a **magnetoviskóznímu** jevu je věnována kapitola *Magnetické kapaliny*. Historicky první MR tlumič představila firma Lord jako tlumič sedadla řidiče nákladního vozu. V osobních automobilech se tlumiče této firmy objevují od roku 2002 a v současnosti jsou nasazeny na vozech Audi TT, Audi R8, Buick Lucerne, Ferrari 599GTB, Holden HSV Commodore aj. [17].

MR tlumiče představují nejmodernější vývojovou tendenci v oblasti tlumení automobilů i vlaků, avšak nacházejí uplatnění v různých oblastech lidské činnosti. Díky jednoduché konstrukci, nízkému příkonu, velké silové kapacitě a celkové robustnosti se uplatňují při ochraně budov proti účinkům zemětřesení a silnému větru. Návrh a konstrukce takového seismického tlumiče o hmotnosti 20 *tun* jsou uvedeny v [18]. Mezi další aplikace MR tlumičů patří například tlumení zpětného rázu palebných zbraní [19]. Hlavní výhody MR tlumičů ve srovnání s konkurenčními technologiemi jsou [2, 20, 21]:

- téměř okamžitá odezva na provozní podmínky – řádově několik milisekund;
- obsahuje o 60% méně pohyblivých částí než CDC tlumič s proporčním ventilem;
- spojitá regulace průběhu tlumící síly  $\rightarrow \infty$  nastavení;
- velká koncentrace disipace energie na jednotku objemu  $\rightarrow$  malé rozměry při zachování vysoké tlumící síly.

### 2.3.2.1 Typická konstrukce MR tlumiče

Na Obr. 2.14 je zachycen řez konstrukcí jednoplášťového MR tlumiče, která je typická pro automobilové použití. Jednoplášťová konstrukce znamená nárůst délky<sup>5</sup> tlumiče o expanzní nádrž, což je nevhodné pro aplikace neumožňující měnit zástavbové rozměry. Ovládací proud je k cívice přiveden drátem ve vrtané pístitnici [20].



Obr. 2.14: Jednoplášťový MR tlumič [20].

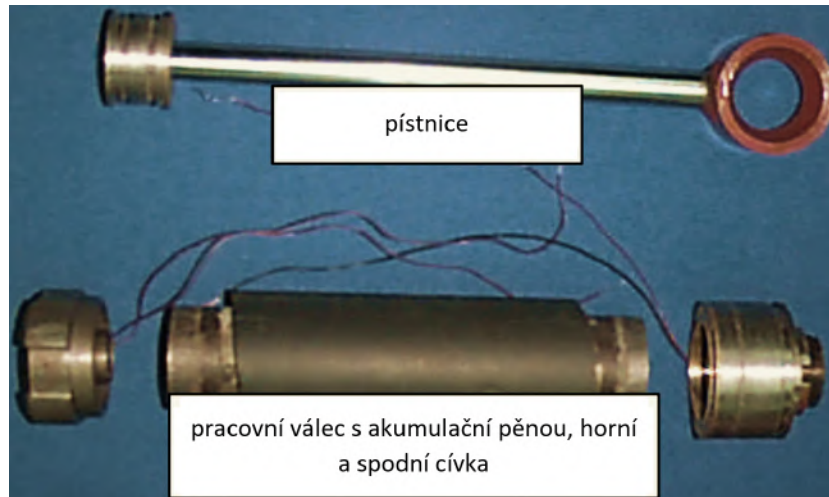
### 2.3.2.2 Pasivní MR tlumič

V roce 2010 představil tým vědců z *Institute of Fluid Science, Tohoku University Japan* koncept nového MR tlumiče, který neobsahuje žádná elektrická zařízení. U tohoto polohově závislého tlumiče jsou ke změně zdánlivé viskozity magnetoreologické kapaliny použity dva permanentní neodymové magnety umístěné na okrajích zdvihu. Přiblížením speciálního pístu k permanentnímu magnetu dojde k uzavření magnetického obvodu a kapalina klade větší odpor proti pohybu. Tento tlumič má oboustrannou pístitnici (anglické označení *double-ended damper*), což znamená, že nedochází ke změně objemu kapaliny v důsledku zasouvání/vysouvání pístitnice a není tak nutno implementovat do zařízení akumulací prostor [22].

<sup>5</sup>Expanzní nádržka může být umístěna také mimo tělo tlumiče, tzv. v provedení *Piggy Back* [2].

### 2.3.2.3 Dvouplášťový MR tlumič s dvěma cívkami

Další kolektiv konstruktérů z *Virginia Polytechnic Institute* navrhl, sestrojil a otestoval dvouplášťový MR tlumič, který vznikl úpravou klasického tlumiče. Elektromagnetické cívky nejsou umístěny v pístu, ale jsou součástí ventilů na horním a spodním okraji vnitřního válce, viz Obr. 2.15. Autoři uvádí, že MR kapalina nesmí být v kontaktu se vzduchem, jako je tomu u klasického dvouplášťového tlumiče a proto byl do mezipláště instalován pěnový akumulátor, který se v důsledku změny tlaku okolní kapaliny smršťuje či roztahuje [23].



Obr. 2.15: Součásti dvouplášťového MR tlumiče se dvěma cívkami [23].

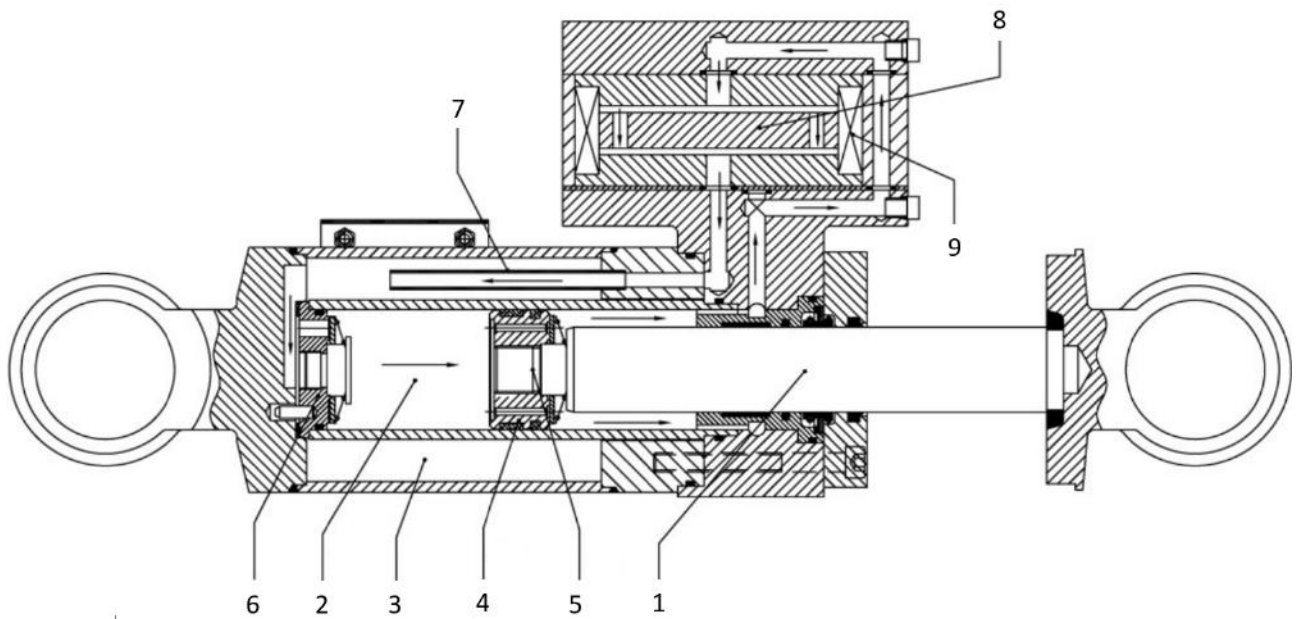
### 2.3.2.4 MR příčný tlumič pro vlaky

Literatura [24] popisuje vývoj autorského semiaktivního MR tlumiče příčných vibrací vysokorychlostních vlaků. Tento dvouplášťový tlumič o maximální silové kapacitě 9 kN je navržen tak, aby splňoval následující požadavky:

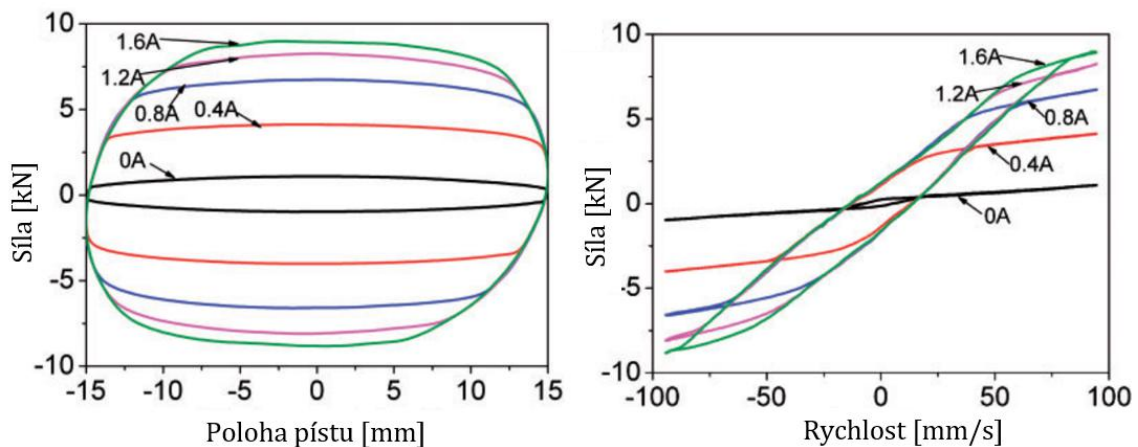
- omezené zástavbové rozměry v podvozku;
- zachování dostatečného zdvihu s ohledem na předchozí bod;
- tlumící síly jsou symetrické při obou směrech pohybu pístu;
- vysoká spolehlivost a bezpečnost, jelikož se jedná o prvek přímo ovlivňující chodové vlastnosti vozidla a tedy i možnost vykolejení.

MR ventil je umístěn mimo hlavní tělo tlumiče a je tvořen dvěma cívkami spojenými škrticím členem s dvěma otvory, kterými proudí kapalina vždy kolmo na směr magnetického pole. Tlumič čerpá kapalinu pouze jedním směrem, stejně jako KONI nastavitelný tlumič, viz. Obr. 2.16. Tento princip byl již popsán v kapitole 2.2.1 na straně 25. Vzniklý proud kapaliny je jímán válcovou spárou mezi vodícím členem s těsněním a vnitřním válcem, kde je soustavou otvorů přiveden na MR ventil. Po průchodu ventilem je kapalina přivedena do zásobního prostoru pomocí spojovací trubice. Vhodným umístěním spojovací trubice lze efektivně promíchávat MR kapalinu a zamezit tak její sedimentaci [24].

MR ventil je navržen tak, aby při výpadku elektrické energie nebo selhání cívek zaručoval dostatečné škrcení kapaliny bez působení magnetického pole a tlumící síla byla přijatelně velká. Takový systém se označuje anglickým pojmem *fail-safe*.



Obr. 2.16: Řez MR tlumičem pro tlumení příčných vibrací vlaku. 1-pístnice, 2-vnitřní válec, 3-akumulační prostor, 4/5-zpětný ventil, 6-dno, 7-spojovací trubice, 8-magnetoreologický píst, 9-elektromagnetická cívka [24].



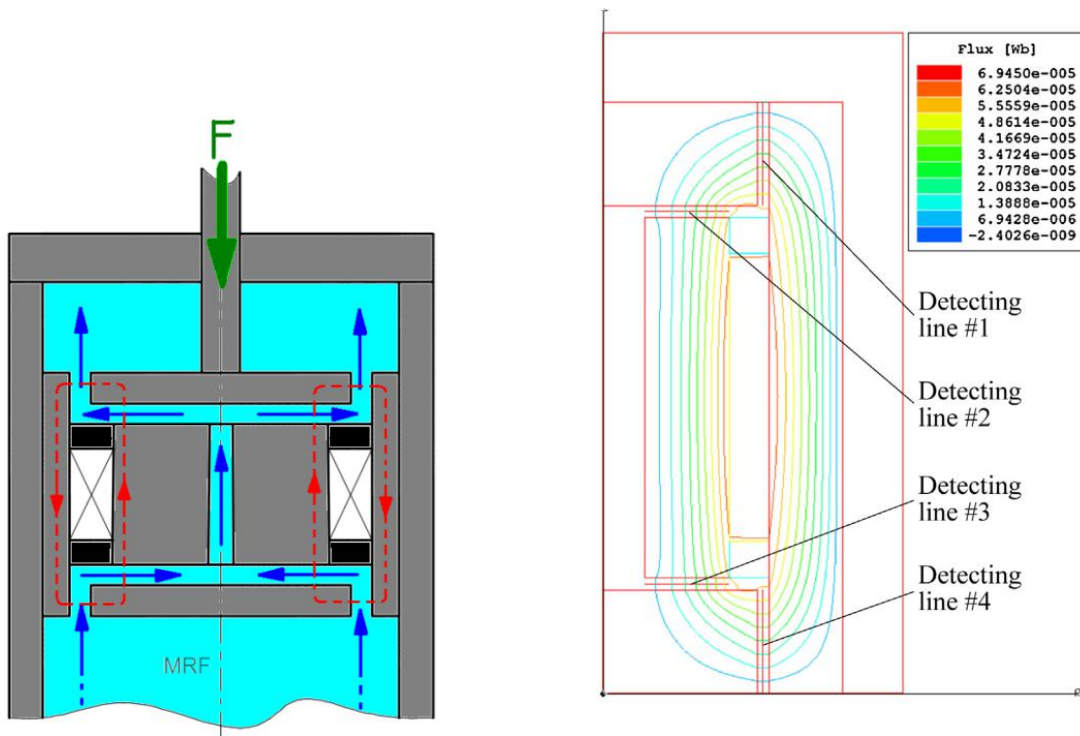
Obr. 2.17: Charakteristika MR tlumiče, při různých velikostech řídicího proudu [24].

Na Obr. 2.17 je vykreslena naměřená charakteristika zhotoveného MR tlumiče. Autoři zvolili zatěžovací cyklus ve tvaru funkce  $x = \sin(\omega \cdot t)$ , kde předepisují zkušebnímu stroji polohu příčnicku v čase. Buzení probíhalo s frekvencí  $1 \text{ Hz}$  a amplitudou  $15 \text{ mm}$ . Z měření je vidět markantní vliv řídicího proudu na velikost tlumící síly. Při vypnutém obvodu vykazuje tlumič nejmenší hodnotu tlumení  $1 \text{ kN}$ , což představuje velikost viskózního tření odtížené MR kapaliny. Při maximálním ovládacím proudu o velikosti  $1,6 \text{ A}$  dosahuje tlumící síla hodnoty  $9 \text{ kN}$ .

Z naměřených dat vyplývá, že navržený MR tlumič splňuje silové požadavky na tlumení příčných pohybů v primárním vypružení vozidla. Minimální hodnota  $1 \text{ kN}$  v odtíženém stavu je dostačující pro zachování bezpečného tlumení. Zároveň tlumič vykazuje velkou silovou kapacitu, při maximálním proudu a to  $9 \text{ kN}$ . Jako nepříliš pozitivní se však projevila reakční doba tlumiče o velikosti  $0,3 \text{ s}$ . Tato doba limituje použití tlumiče na kategorii adaptivních, jelikož tlumiče semiaktivní musejí být schopné reagovat na provozní podmínky v rádech několika milisekund.

### 2.3.2.5 Jednoplášťový MR tlumič s radiálním pístem

Konstrukční zvláštností tohoto typu je píst, který kromě válcové spáry obsahuje i radiální, čímž podle autorů efektivněji využívá magnetické pole cívky. Schématicky znázorněný píst je na Obr. 2.18. Sendvičový píst je veden ve vnitřním válci dvěma vodícími disky na okrajích, skrze které je čtyřmi šrouby utážen. Elektrický proud je k cívce přiveden vrtanou pístnicí. Na Obr. 2.19 jsou magnetické siločáry (respektive rozložení magnetického toku  $\Phi$  [Wb]) v pístu získané axiymetrickou MKP simulací v programu Maxwell 2D při proudu 2 A [25].



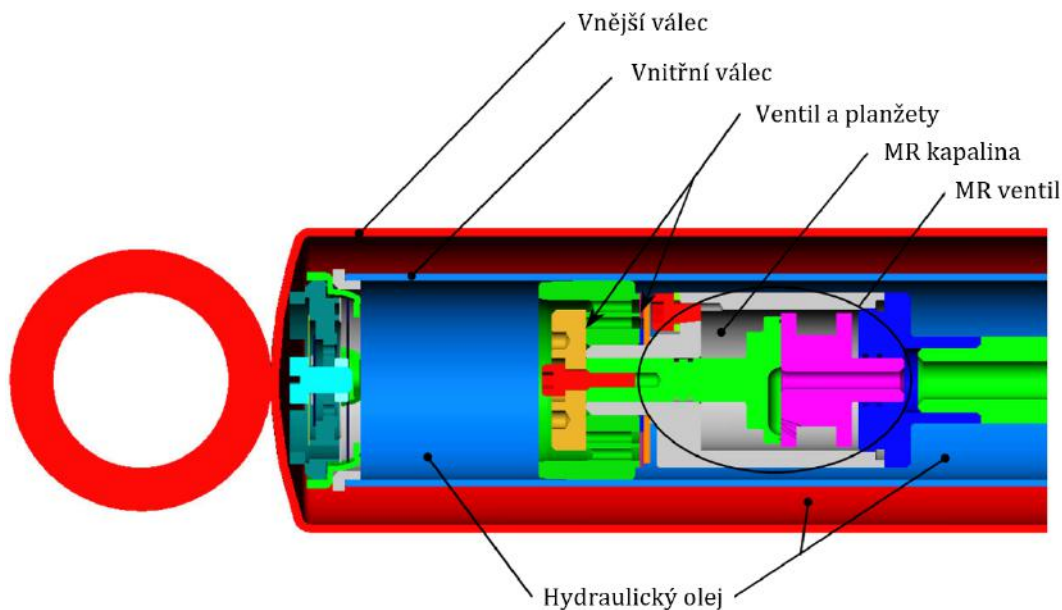
Obr. 2.18: Schéma radiálního MR pístu [26].  
Obr. 2.19: Rozložení magnetického toku v okolí MR cívky [26].

Naprostoj stejný princip využívá i píst jednoplášťového tlumiče autorů tohoto článku [27]. Liší se pouze kompaktnější konstrukcí a nátokovými kužely pro lepší usměrnění proudu kapaliny.

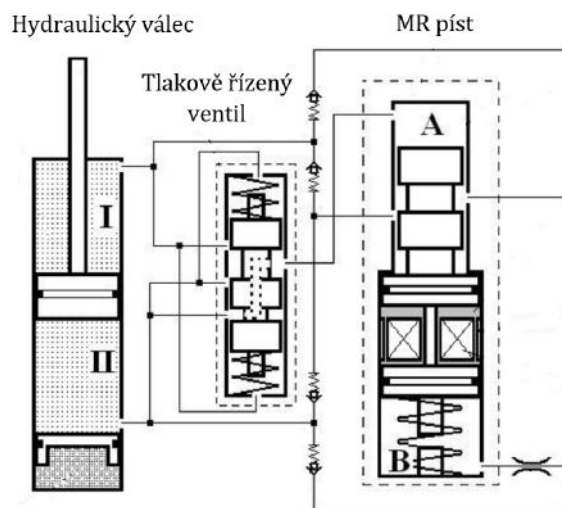
### 2.3.2.6 Hybridní MR tlumič

V tomto článku [20] se objevuje tlumič obsahující malý MR píst, pomocí kterého je ovládán větší píst, kterým proudí klasický hydraulický olej. Malým množstvím MR kapaliny je tak regulován průtok hydraulického oleje pístem, jenž obsahuje planžetový ventil. Planžety se otevírají až při určité hodnotě tlaku, čímž definují tzv. omezovací větev charakteristiky, avšak první planžeta na dosedací ploše může mít po obvodu výřezy, kterými lze docílit náběhové větve charakteristiky. Řez tímto tlumičem je na Obr. 2.20.

Stejnou myšlenkou se zabývali i autoři této práce [28]. Jedná se v podstatě o ne příliš kompaktní tlumič vzniklý dekompozicí předchozího tlumiče na jednotlivé části. Hydraulický válec s expanzní komorou je přes tlakově ovládaný trojcestný ventil propojen s MR pístem s malým množstvím MR kapaliny, který zpětně ovládá tlumící sílu tlumiče.



Obr. 2.20: Hybridní MR tlumič kombinující MR kapalinu a hydraulický olej [20].



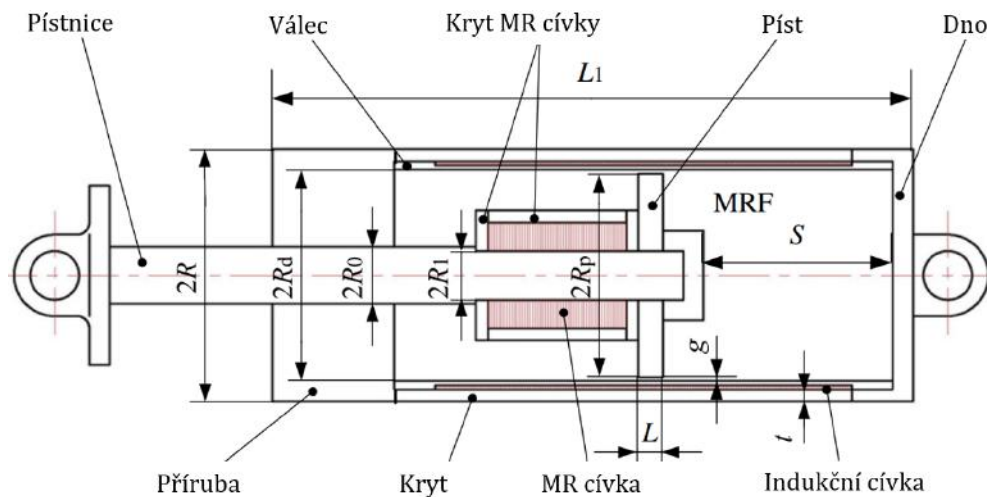
Obr. 2.21: Schéma hybridního MR tlumiče [28].

### 2.3.2.7 Self-sensing MR tlumič

Nutnou součástí semiaktivních tlumičů je řídicí systém skládající se ze senzorů polohy/rychlosti/zrychlení, samotné řídicí jednotky a přívodních kabelů. To podle autorů *prof. D. H. Wang* a *prof. T. Wang* z *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Ministry of Education of China* zvyšuje cenu, složitost systému a nároky na zástavbový prostor a snižuje celkovou spolehlivost. V roce 2009 tedy přišli s myšlenkou implementovat senzory polohy přímo do těla tlumiče, z toho titulu plyne označení *self-sensing*. Schéma tohoto tlumiče je na Obr. 2.22.

Tato technologie integrovaného senzoru polohy (*integrated relative displacement sensor - IRDS*), funguje na principu elektromagnetické indukce. Kolem pracovního válce z nemagnetické oceli je navinuta indukční cívka, ve které je indukován elektrický proud. Magnetický obvod je tvořen MR cívkou, pístnicí, přírubou a částí indukční cívky. V závislosti na poloze pístu se mění počet aktivních závitů v indukční cívce a tedy i velikost indukovaného napětí, které je posléze využito k určení polohy pístu vůči válci a semiaktivnímu řízení tlumiče [29].





Obr. 2.22: Schéma self-sensing MR tlumiče (IDRS) [29].

### 2.3.2.8 Self-sensing MR tlumič s generací energie

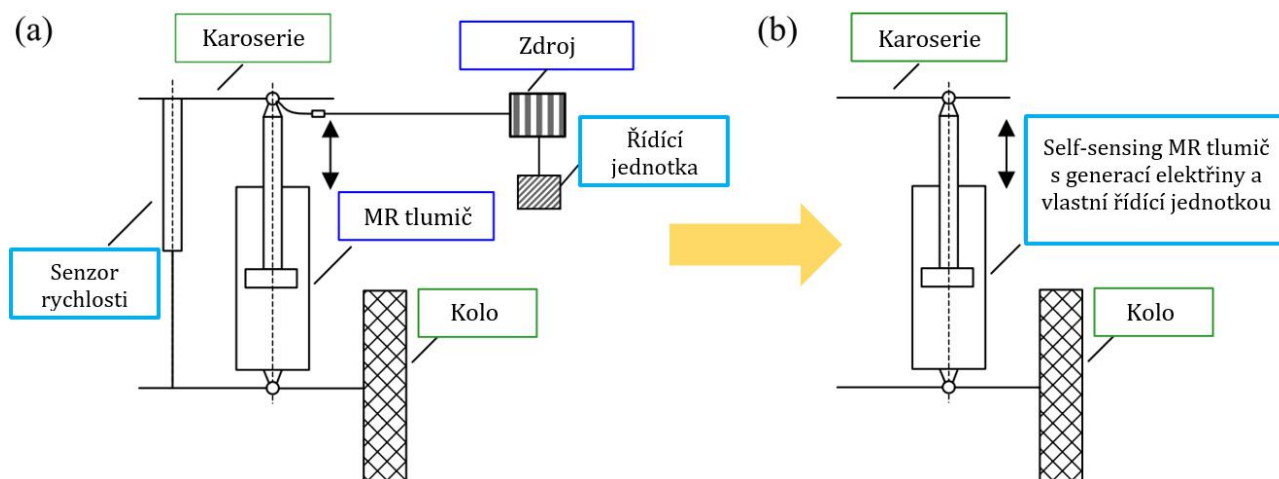
Konstruktéři z *Department of Mechanical and Automation Engineering, University of Hong Kong* navázali na myšlenku self-sensing MR tlumiče a v roce 2010 představili novou koncepci zcela autonomního tlumiče, jehož zapojení je patrné z Obr. 2.23 [30].

Při pohybu vozidla je část kinetické energie (výkonu motoru) přeměněna v tlumičích na teplo. Problematikou regenerace<sup>6</sup> energie z tlumičů se výzkumníci zabývají od konce 70-tých let minulého století [31]. Několik výzkumů prokázalo, že množství takto zmařené energie je značné. Například automobil o hmotnosti 1,5 t se čtyřmi tlumiči jedoucí po 2 cm vysokých nerovnostech frekvencí 3 Hz by mohl generovat 1,34 kW elektrického výkonu [32]. Tento zdroj [33] uvádí hodnotu disipovaného výkonu 200 W, která byla získána simulací jízdy automobilu po nekvalitní vozovce rychlostí 48 km · h<sup>-1</sup>. Autoři tohoto článku [34] zjistili, že u nákladních vozidel, autobusů a vlaků by mohlo být harvestováno až 10 kW výkonu. Ještě více zajímavá je tato technologie s příchodem elektrických či hybridních automobilů, u kterých by mohlo dojít až k 8 % zvýšení účinnosti [35].

Double-ended MR tlumič na Obr. 2.24 od autorů článku [30] využívá k získávání energie vícepólový lineární generátor umístěný radiálně kolem vnitřního válce z nemagnetické oceli. Každý pól je tvořen permanentním magnetem, cívkou a dvěma ocelovými kroužky. Kolem vícepólového generátoru je navinuta cívka uložená v nemagnetickém válci. Tato cívka je pevně spojena s pístnicí. Dochází tedy k relativnímu pohybu mezi pístem/cívkou generátoru a permanentními magnety generátoru. Při vibračním pohybu pístu dochází ke změně magnetického toku v cívce generátoru a vzniká elektrický proud, který je využit hned pro tři následující funkce:

1. napájení vlastní spotřeby tlumiče;
2. zdroj elektrické energie pro další využití;
3. určování relativní rychlosti pístu vzhledem k válci → self-sensing.

<sup>6</sup>Kromě zde uvedené technologie přeměny kinetické energie na elektřinu, uvádí například tento článek [31] systém obsahující membránový akumulátor, který zachytává přebytečnou tlakovou energii v tlumiči. Akumulátor je dále napojen na hydrogenerátor.



Obr. 2.23: Sestava tlumicího systému a) klasického magnetoreologického tlumiče; b) autonomního magnetoreologického tlumiče [30].

### 2.3.3 Další konstrukce MR tlumičů

Zde je uveden stručný přehled ostatních typů MR tlumičů nebo MR pístů, kterým nebyla věnována samostatná kapitola s ohledem na rozsah této práce:

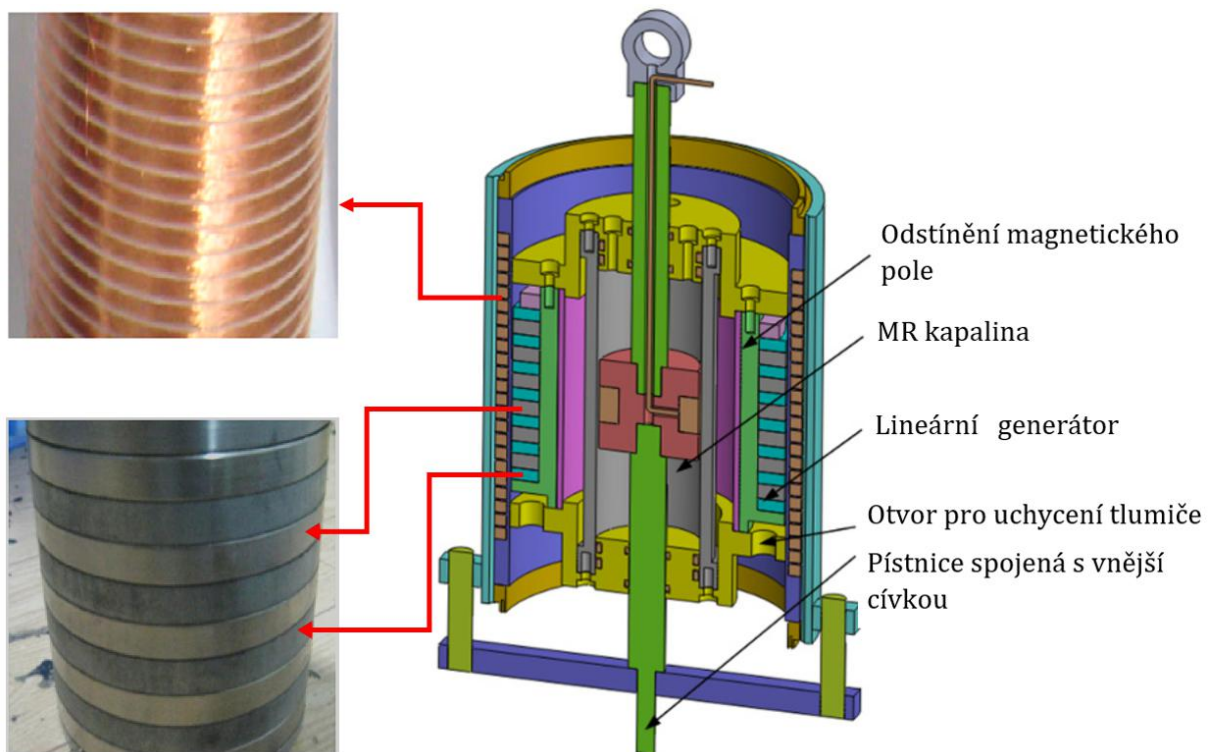
- experimentální zkoušky sekundárního MR tlumiče na železnici [36];
- tlumicí jednotka s nastavitelnou tuhostí pružiny [37];
- seizmický tlumič s permanentním magnetem pro *fail-safe* stav, cívka vytváří opačné magnetické pole a ruší a následně překonává vliv magnetu [38];
- návrh MR vzpěry vibroizolačního adaptéru pro kosmonautiku [39];
- píst s kuželovým ventilem s nastavitelnou velikostí spáry [40];
- modulární píst s radiálním tokem kapaliny [41];
- srovnání různých konstrukcí MR pístů [42].

## 2.4 Aktivní tlumiče

Aktivní systémy tlumení obsahují kromě hydrodynamického tlumiče taky hydrogenerátor, který slouží jako zdroj tlakového oleje. Tlumič navíc funguje jako řízený válec neboli aktuátor. Aktivní systém vypružení umožňuje dodávat velké množství energie do systému, čímž umožňují nejlepší kontrolu nad vozidlem ze všech předchozích systémů vypružení. Nevýhodou jsou však relativně velké pořizovací i provozní náklady, spojené s velkým příkonem těchto zařízení, větší hmotnost a celková komplexnost konstrukce. Schematicky znázorněný aktivní tlumič je zobrazen na Obr. 2.25 níže.

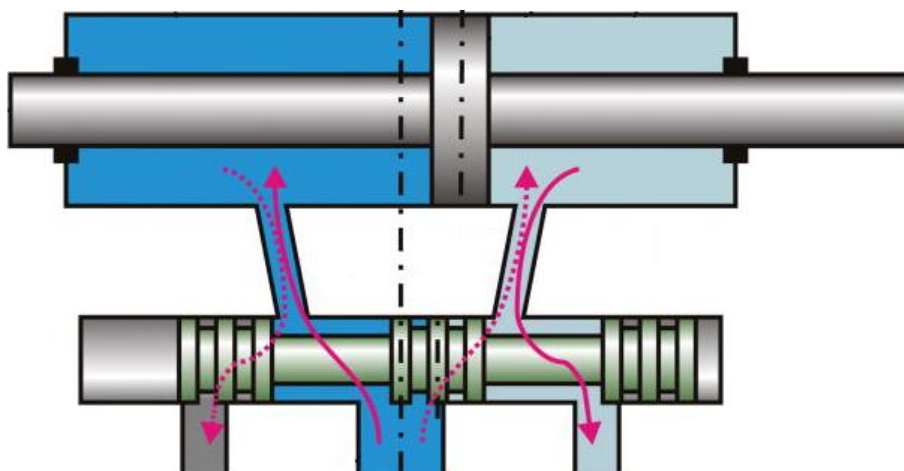
### 2.4.1 Aktuátory pro naklánění vlaku

Požadavek na maximalizaci transportní kapacity železniční dopravy se stává palčivou otázkou všech vyspělých zemí. Zkrácení dojezdových časů o několik procent může v konečném důsledku znamenat nárůst počtu přepravených osob o několik milionů ročně. Vlaky tedy musí jezdit rychleji. V tom jsou ovšem limitovány mimo jiné maximální průjezdovou rychlostí v zatáčce.



Obr. 2.24: Self-sensing MR tlumič s generací energie [30].

Trat je v ní nakloněná, aby vyrovnávala účinek odstředivého zrychlení. Pokud má být zvýšena průjezdová rychlost zatáčkou, musel by být celý úsek trati přebudován, což s sebou nese nemalé finanční náklady. Naklánění karoserie vlaku pomocí hydraulických aktuatorů (anglicky *tilting*) do vnitřní strany zatáčky umožňuje až 30 % zvýšení maximální rychlosti v zatáčce aniž by došlo k vykolejení v soupravy. Toto řešení je mnohonásobně levnější nežli výměna kolejové trati. Pro zajištění kontinuální dodávky proudu je nutná kompenzace naklonění vlaku nakloněním pantografu<sup>7</sup> [44].



Obr. 2.25: Schéma aktivního tlumiče [43].

<sup>7</sup>Pantograf je označení pro sběrnici elektrického proudu vlaku či tramvaje [44].

## 2.4.2 Aktuátory pro natáčení vlaku

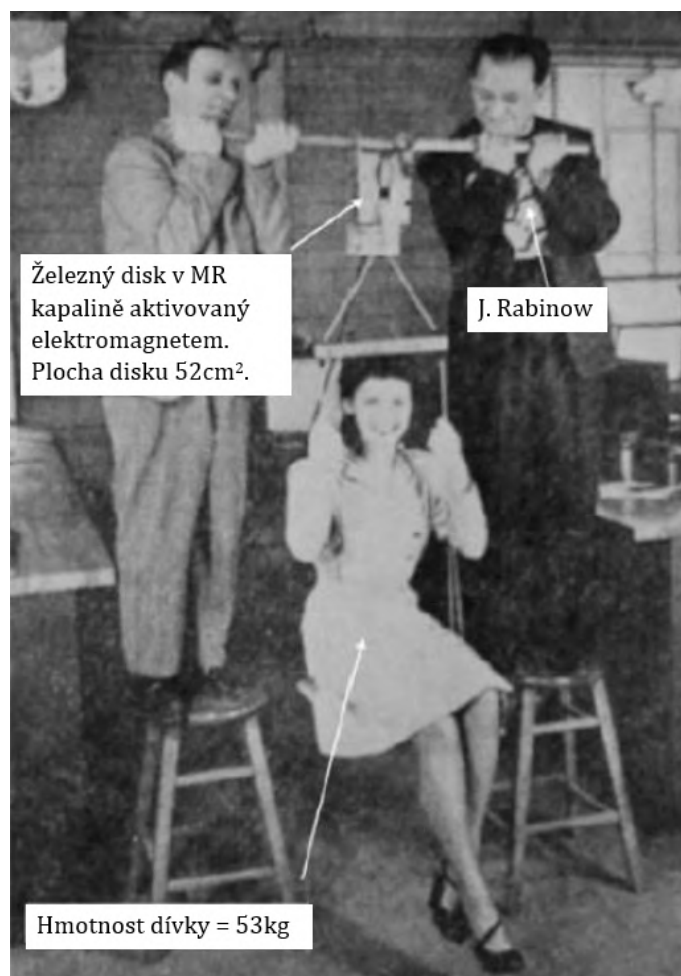
Mezi další aplikace hydraulických aktuátorů v železniční dopravě patří aktivní natáčení jednotlivých náprav do zatáčky, především za účelem snížení boční a kontaktní síly mezi nápravami a kolejnicemi. Tato boční síla způsobuje značné opotřebení jak kol, tak i kolejnic a v extrémním případě může vést k vykolejení celého vozidla; její redukce je tedy nutná, chceme-li zvýšit průjezdovou rychlost vozidla. Jeden ze způsobů popsaných ve článku [45] zmiňuje využití GPS zařízení určující polohu vlaku (s přesností cca 4 m) v kombinaci s databází železničních tratí; pomocí těchto informací natáčí řídicí systém jednotlivé nápravy dle aktuální rychlosti a poloměru zatáčky. Pragmatičtější způsobem určování polohy vlaku jsou rozmístěné vysílače signálu před daným místem na trati. Vysílaný signál je zachycen senzory řídicí jednotky a ta vyšle signál do aktuátorů [45].

## 2.4.3 Monroe ACOCAR

Každý tlumič je vybaven elektronickými ventily, které jsou připojené na zdroj tlakového oleje. Dle akčního zásahu ECU (Electronic Control Unit) je poté tlakový olej přepouštěn na tlakovou či tahovou stranu aktuátoru. Tento systém plně umožňuje nahradit funkci stabilizátoru (tzv. *anti-roll bar*) [46].

### 3 | Magnetické kapaliny

Původem ukrajinský inženýr Jacob Rabinow přišel ve 40. letech minulého století s myšlenkou vytvoření materiálu, jehož vlastnosti mohou být ovlivňovány určitým vnějším působením. Tyto materiály jsou označovány jako tzv. reologické, termínem, který vytvořil prof. E.C. Bingham v roce 1920 [2]. Rabinow a jeho kolega Ing. Winslow vytvořili kapalinu obsahující feromagnetické částice. Při přiblížení magnetu k této suspenzi pozorovali výrazné snížení její tekutosti, respektive zvýšení zdánlivé viskozity. Magnetoviskózní efekt je fyzikální jev, při kterém se částice feromagnetické látky rozptýlené v nosné kapalině formují do řetězců pod vlivem externího magnetického pole. Analogicky si můžeme představit, že kapalina proudí skrze porézní síto tvořené feromagnetickými částicemi. Na fotografii níže je zachycen J. Rabinow při demonstraci schopností nové MR kapaliny.



Obr. 3.1: Ing. Rabinow při demonstraci magnetoreologické kapaliny [25].

Myšlenka ovladatelné tekutiny zajímala techniky po mnoho let. Ti ji však zpočátku považovali pouze za výplod fantazie spisovatelů science-fiction literatury. Objev takového média by

však otevřel dosud nevídané možnosti techniky. Pevné magnetické látky jako například železo či kobalt, ztrácejí své magnetické schopnosti při Curiově teplotě, která je mnohem nižší než teplota tání, tudíž tekutý kov nepřipadá v úvahu ani teoreticky<sup>8</sup>. Jiné magnetické kapaliny, jako například paramagnetické roztoky solí, zase vyžadují ke změně vlastností extrémně silná magnetická pole v řádech několika Tesla. Odpovědí na tento problém jsou právě magnetické kapaliny, tvořené feromagnetickými částicemi v nosné kapalině [47].

Klasická hydrodynamika tekutin nezahrnuje účinky magnetického pole, chováním magnetických kapalin se tedy začal věnovat nový multidisciplinární obor *ferohydrodynamika*<sup>9</sup>, jejíž kořeny položil *prof. M. Shliomis* [49] roku 1969. *Ferohydrodynamika* se zabývá interakcí mezi vnějším magnetickým polem a magneticky polarizovatelnou a elektricky nevodivou kapalinou [48]. Důkladnou teorii magnetických kapalin je možné nalézt v knize *Magnetic Fluids* od *prof. E. Blumse* z roku 1997 [50]. *Ferohydrodynamika* uvažuje s novou objemovou silou, také známou jako Kelvinova síla, která reprezentuje vliv magnetického pole na feromagnetickou částici 3.1:

$$\mathbf{F}_K = \mu_0 \oint_V \mathbf{M} \nabla H \, dV, \quad (3.1)$$

kde  $F_K[N]$  značí magnetickou (též Kelvinovu) sílu působící na feromagnetickou částici v magnetickém poli;  $\mu_0[V\,s/Am]$  je permeabilita vakua;  $M[A/m]$  určuje magnetizaci kapaliny;  $H[A/m]$  je intenzita magnetického pole a  $\nabla H$  značí gradient magnetického pole;  $V[m^3]$  je objem kapaliny.

### 3.1 Feromagnetické kapaliny

Prvním druhem magnetických kapalin jsou kapaliny feromagnetické, které vznikly v 60. letech dvacátého století pro účely NASA i přesto, že nakonec nebyly k tomuto účelu použity. Ing. Steven Papell je objevil při hledání řešení dopravy tekutého paliva v beztížném stavu. Magnetické částice rozptýlené v kerosinu ovládané pomocí velkých elektromagnetů usměrnily proud paliva do spalovací části proudového motoru. Kvůli nežádoucí abrazi ve spalovacích tryskách však bylo nutno použít jinou technologii [51].

Feromagnetické částice kulovitěho tvaru o rozměrech cca 3–15 *mm* jsou většinou vyrobeny z magnetitu ( $Fe_3O_4$ ) nebo z práškového železa, pro jejich vysokou magnetickou saturaci ( $\mu_0 M_S = 2, 1T$ ) a nízkou koercivitu  $H_C$  (intenzitu magnetického pole nutnou pro odmagnetizování, která způsobuje hysterezní smyčku u magneticky tvrdých materiálů) [52, 53]. Díky jejich malé velikosti tvoří Wiessovu doménu a mají vlastní magnetický moment — jednodoménové částice [48]. Pohybují se nahodilým Brownovým pohybem a pokud není přítomno vnější magnetické pole, kapalina je navenek nemagnetická. Aby nedocházelo k usazování částic při uvažování pouze magnetického pole, musí být tepelná energie ( $E_T$ ) částice větší než její magnetická energie ( $E_H$ ) podle rovnice sedimentační stability (3.2) [47]:

$$E_T = k_B T > |E_H| = \mu_0 M_0 \frac{\pi}{6} d^3 H, \quad (3.2)$$

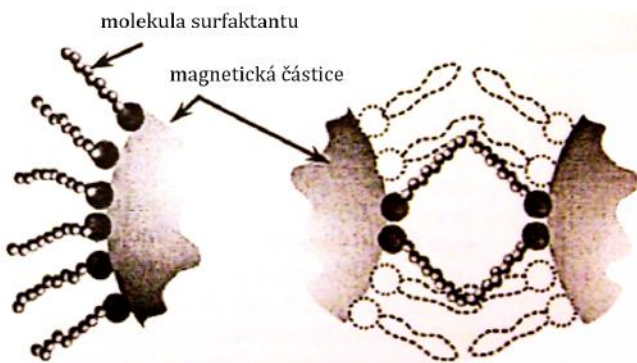
kde  $k_B[J/K]$  je Boltzmanova konstanta;  $T[K]$  je teplota;  $M_0[A/m]$  je spontánní magnetizace;  $d[m]$  je průměr částice. Z této rovnice vyplývá maximální velikost částic 6 *nm*, při typických hodnotách  $M_0$ ,  $H$ ,  $T$ . Stejně tak můžeme určit maximální průměr částice při uvažování

<sup>8</sup>Kromě speciální slitiny Co a Pd v nerovnovázném stavu a helia pod teplotou 3 *mK*, které vykazují samovolnou orientaci magnetických domén i v kapalném stavu [47].

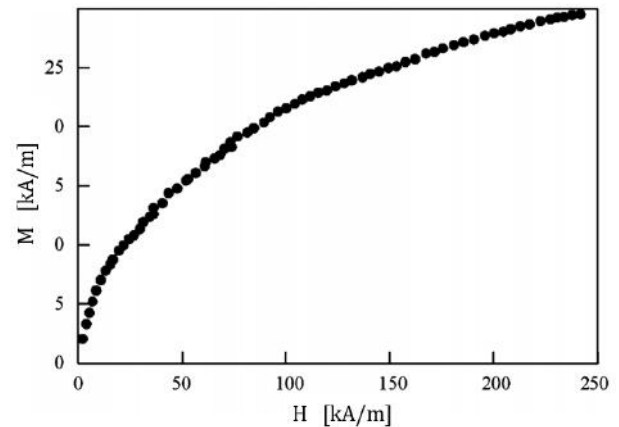
<sup>9</sup>Dalšími obory jsou: *magneto hydrodynamika* - magnetické pole + elektrický proud v kapalině; *elektrohydrodynamika* - elektrické pole + elektricky polarizovatelná kapalina [48].

gravitačního pole —  $10\text{ nm}$ . Je vidět, že sedimentační stabilita může být zaručena dodržáním určité velikosti částice, proto je nutno zabránit jejich shlukování, které se realizuje dvěma mechanismy.

První je v důsledku magnetické interakce mezi jednotlivými dipóly. Při porovnání s tepelnou energií a uvažování stejných podmínek bylo dokázáno, že částice se v důsledku interakce dipól–dipól neshlukují, pokud nejsou větší než  $10\text{ nm}$ . Problémem je ovšem druhý mechanismus — přitažlivé van der Waalsovy síly, jejichž vliv je větší než odpuzivý vliv tepelné energie a částice by se agregovaly. Kvůli potlačení vlivu van der Waalsových sil jsou částice feromagnetu potaženy  $1\text{--}2\text{ nm}$  tenkou vrstvou polymerní látky, tzv. surfaktantu (též detergentu), která je tvořena řetězcem polárních molekul (např. kyseliny mastné). Hydrofilní konec řetězce je pevně spojen s povrchem částice a druhý hydrofobní konec je přitahován okolní kapalinou a odpuzován koncem řetězce okolních částic, viz Obr. 3.2 [47]. Agregace může být do značné míry minimalizována vhodnou volbou nosné kapaliny, jako jsou například speciální gely/pasty (používané u seizmických tlumičů). Nosná kapalina také určuje viskozitu v neaktivovaném stavu a rozsah pracovních teplot. Kromě surfaktantu jsou do kapaliny přidávány také další aditiva jako látky pro změnu pH nebo antioxidační činidla pro zvýšení životnosti částic.



Obr. 3.2: Schéma odpuzujících se nanočástic potažených surfaktantem [47].



Obr. 3.3: Typická magnetizační křivka feromagnetické kapaliny [54].

Na Obr. 3.3 je zobrazena závislost magnetizace typické feromagnetické kapaliny na intenzitě magnetického pole. Právě vysoká hodnota magnetizace, v porovnání s ostatními médii, umožňuje měnit vlastnosti magnetických kapalin pomocí slabých a jednoduše dosažitelných magnetických polí v řádech desítek  $mT$ . Tato vlastnost se nazývá superparamagnetismus a spočívá v mnohonásobně vyšší magnetizaci při účinku slabých a středních magnetických polí ve srovnání s paramagnetickými látky [53].

Prozatím uvažujme, že vysoce naředěná feromagnetická kapalina je systém vzájemně neinteragujících, tepelně ovlivnitelných magnetických dipólů. Na základě tohoto předpokladu je patrná analogie s paramagnetickým systémem vedoucí ke zjednodušení matematického popisu, který čerpá z [47, 53, 54]. Interakce mezi částicemi jsou do popisu přidány později.

$$M = M_S \left( \coth \alpha - \frac{1}{\alpha} \right) \quad \wedge \quad M_S = \phi M_0 \quad \wedge \quad \alpha = \frac{\mu_0 m H}{k_B T} \quad \wedge \quad m = M_0 \frac{\pi}{6} d^3 \quad (3.3)$$

kde  $M_S [A/m]$  je magnetizační saturace kapaliny;  $\phi [1]$  je objemová koncentrace pevných částic;  $m [Am^2]$  je magnetický moment částice.

S uvážením (3.1) a (3.3) můžeme určit hustotu kvazi-stacionární magnetické síly  $f_{mag}$  jako:

$$f_{mag} = \mu_0 \chi_{in} H \nabla H, \quad (3.4)$$

je-li magnetické pole slabé, pak susceptibilita  $\chi_{in}$  určující vztah mezi magnetizací a intenzitou magnetického pole  $\mathbf{M} = \chi_{in} \mathbf{H}$  je:

$$\chi_{in} = \frac{M_S \mu_0 m H}{3 k_B T}. \quad (3.5)$$

Pro feromagnetickou kapalinu s nízkou koncentrací pevných částic, jejichž interakci zanedbáváme můžeme psát Navier-Stokesovu rovnici při účincích slabého magnetického pole bez vlivu gravitace [53]:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mu_0 \mathbf{M} \nabla \mathbf{M}, \quad (3.6)$$

kde  $\rho [kg/m^3]$  je hustota;  $\mathbf{v} [m/s]$  je vektor rychlosti;  $t [s]$  je čas;  $p [Pa]$  je hydrostatický tlak;  $\mu [Pa \cdot s]$  je dynamická viskozita.

Taktéž můžeme účinek magnetického pole zahrnout do Bernoulliho rovnice [53]:

$$\rho g h + p + \frac{\rho}{2} v^2 - \mu_0 \bar{M} H = konst. \quad \wedge \quad \bar{M} = \frac{1}{H} \int_0^H M dH, \quad (3.7)$$

kde  $\bar{M}$  je hlavní/střední magnetizace.

Změna viskozity magnetické kapaliny není závislá pouze na intenzitě magnetického pole, ale také na jeho orientaci vzhledem ke směru proudění. Magnetické pole má tendenci rovnat  $\mathbf{m}$  částice podle indukčních čar. Pokud je částice orientována tak, že její vektor víru rychlosti  $\Omega_i = \varepsilon_{ijk} \frac{\partial v_k}{\partial x_j}$  je rovnoběžný s magnetickým polem, nedochází k magnetoviskóznímu efektu. Jestliže je však vektor  $\boldsymbol{\Omega}$  kolmý na směr magnetického pole  $\mathbf{H}$ , vzniká kroutící moment, který brání volné rotaci částice, což přispívá ke zvýšení zdánlivé viskozity kapaliny. Je zřejmé, že maximální změny viskozity bude dosaženo, dojde-li k úplnému zastavení rotace feromagnetické částice. Úhel mezi vektorem víru rychlosti a magnetickým polem způsobuje anisotropické chování magnetické kapaliny [47].

Odenbach [47] dále provedl ověření a rozšíření teorie *prof. Shliomise* [49], která se zabývá vlivem magnetického pole na rotující soustavu. Mezi dvěma válci je feromagnetická kapalina, kterou uvádí do pohybu rotující vnitřní válec o menším průměru. Při malých otáčkách se vyvine laminární rychlostní profil — Couettovo proudění. Při překročení určité rychlosti rotace, respektive Reynoldsova čísla  $Re[1]$  vznikne nestabilita proudění a vzniknou Taylorovy víry tvořené toroidními protichůdnými víry, viz Obr. 3.4<sup>10</sup>. Kvůli neprůhlednosti feromagnetické kapaliny je nemožné pozorovat vizuální změnu typu proudění. Změna byla tedy detekována měřením kroutícího momentu na hřídeli poháněného válce, který je lineárně závislý na otáčkách v obou režimech, ale v Taylorově vírovém režimu má větší směrnici. Reynoldsovo číslo je v tomto případě dáno [47] jako:

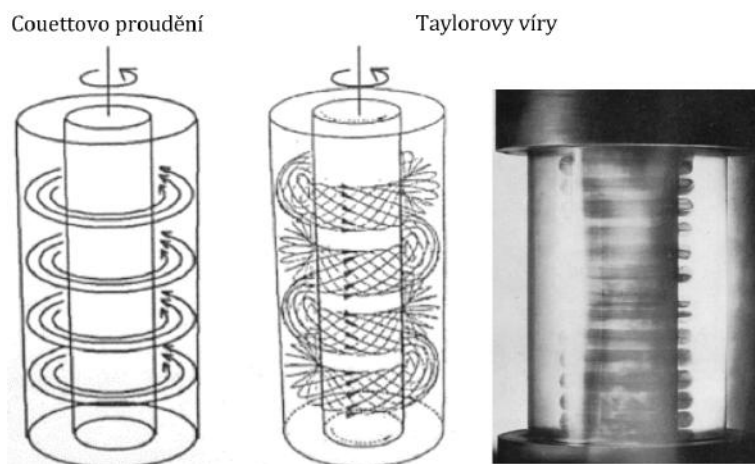
$$Re = \frac{2\pi f R_i w}{\nu} \quad (3.8)$$

<sup>10</sup>Na Obr. 3.4 vlevo jsou zachyceny Taylorovy víry při experimentu s vodou roku 1923.



kde  $f[\text{rad/s}]$  je frekvence otáčení vnitřního válce;  $R_i[m]$  je jeho poloměr;  $w[m]$  je šířka mezery mezi válci.

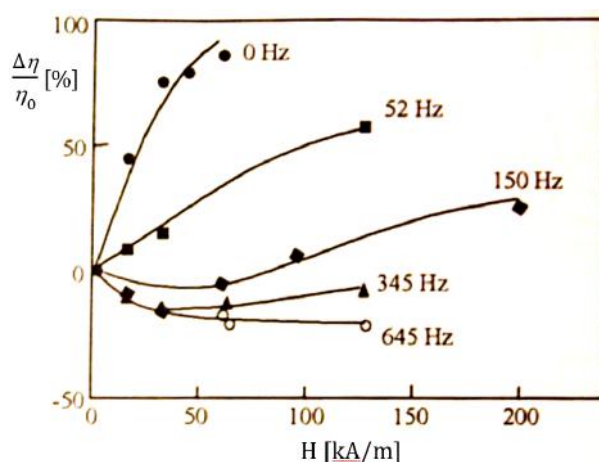
Tranzitní frekvence, při které dochází ke vzniku Taylorových vírů slouží jako měřítko pro určení viskozity kapaliny. Působí-li na kapalinu magnetické pole, změní se její viskozita, potažmo přechodová frekvence, jelikož  $Re = Re(f, \nu)$ .



Obr. 3.4: Experimentální schéma Couettova proudění s přechodem do oblasti Taylorových vírů [55].

### 3.1.1 Negativní viskozita

Doposud bylo kalkulováno se stacionárním magnetickým polem. Negativní viskozita je jev, který se objevuje v případě oscilujícího magnetického pole a prvně jej pozorovali *prof. Shliomis* a *prof. Morozov* v roce 1994. Magnetické pole oscilující stejnou frekvencí, jakou rotují částice magnetické kapaliny, nebude mít žádný vliv na jejich rotaci a tedy ani na viskozitu. Je-li však frekvence pole vyšší, než je frekvence otáčení částic, přispívá k jejich rotaci vyvolané smykovým třením, čímž zmenšuje kroutící moment na částici a snižuje viskozitu kapaliny.



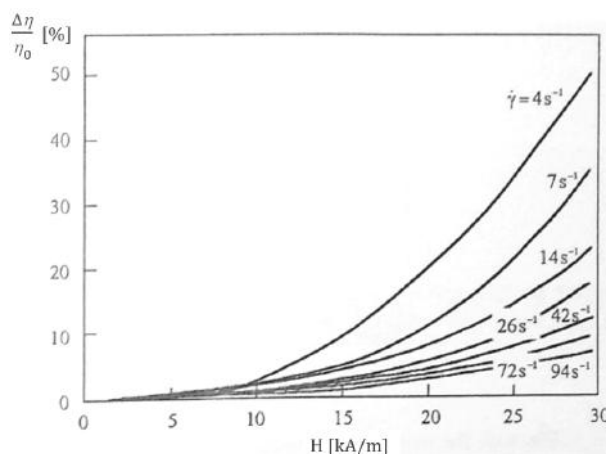
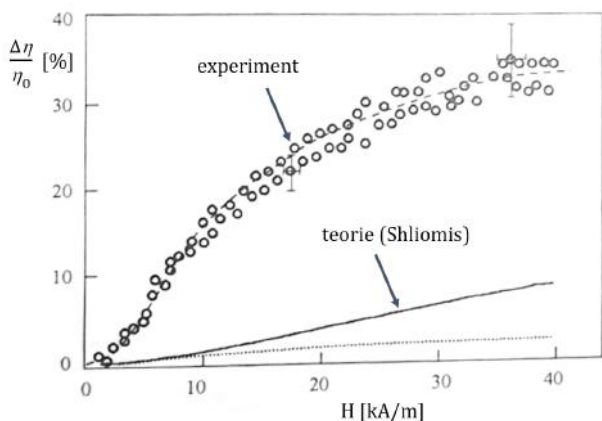
Obr. 3.5: Závislost relativní změny viskozity feromagnetické kapaliny na oscilujícím magnetickém poli [47].

V experimentu byla použita feromagnetická kapalina na vodní bázi s částicemi Co-feritu o průměru  $10 \text{ nm}$  a koncentraci  $\phi = 7 \%$ . Byla měřena změna zdánlivé (efektivní) viskozity

ve srovnání s původní *off-state* viskozitou  $\mu_{off}[Pa \cdot s]$  při různých frekvencích magnetického pole. Pro frekvenci  $0\ Hz$  byla demonstrována typická závislost viskozity na stacionárním poli. Při zvyšování frekvence se projevil pokles magnetického momentu. Z Obr. 3.5 je vidno, že od frekvence cca  $150\ Hz$  se viskozita nejen nezvětšovala, ale dokonce byla záporná  $\rightarrow$  negativní viskozita [47].

### 3.1.2 Magnetoviskózní efekt

Teoretické hodnoty získané na základě předpokladu neinteragujících částic se neshodují s experimentálně získanými daty, je-li použita magnetická kapalina s běžnou koncentrací pevných částic. Odchylka je zvláště velká u silnějších magnetických polí. Viz Obr. 3.6, kde je rozdíl mezi predikcí podle teorie Shliomis a experimentálními hodnotami markantní. Byla měřena feromagnetická kapalina (APG513A) s  $\phi = 0,18$  o průměru částic<sup>11</sup>  $d = 10\ nm$  pod smykovým spádem  $\dot{\gamma} = 500\ s^{-1}$ . Poznámka – autor zde označuje změnu viskozity jako  $\Delta\eta$  a původní viskozitu jako  $\eta_0$ .



Obr. 3.6: Závislost experimentální změny viskozity ve srovnání s teorií dle Shliomis [47]. Obr. 3.7: Závislost magnetoviskózního efektu na smykovém spádu [47].

Zde je nutno zmínit důležitý fakt, který bývá v tezech často opomíjen. Ke zvýšení odporu proti pohybu magnetických kapalin přispívá zaprvé výše uvedený mechanismus vzniku magnetického kroučícího momentu a za druhé tvorba řetězcových formací v kapalině. Význam druhého mechanismu roste s koncentrací  $\phi$  kapaliny a velikostí částic. Tento mechanismus tedy nemůže být opomíjen, chceme-li predikovat chování magnetických kapalin používaných v praxi, tedy kapalin o koncentraci  $\phi$  v řádech desítek procent.

K odlišení viskozity způsobené blokadí volné rotace částice od viskozity způsobené interakcí magnetických částic je první uvedená změna viskozity označována jako rotační viskozita  $\mu_r$  a druhá zmíněná změna jako *magnetoviskózní efekt*.

Magnetické kapaliny nemohou být z uvedených důvodů popisovány jako soustava vzájemně neinteragujících částic; vzájemná interakce musí být zakomponována do matematického modelu. O tom svědčí i fakt, že se u nich projevuje tzv. *shear thinning* — chování nenewtonovských kapalin, kdy je viskozita kapaliny závislá na smykovém spádu (rychlost deformace

<sup>11</sup>Je téměř nemožné vyrobit monodisperzní kapalinu obsahující pouze částice o jednom průměru, jako určující se tedy považuje nejčtetnější průměr.

$\dot{\gamma} = dv/dn[s^{-1}]$ . V případě magnetických kapalin dochází ke snížení viskozity s rostoucím smykovým spádem, což lze chápat jako roztržení řetězce částic, což vede ke snížení magnetoviskózního jevu, viz Obr. 3.7.

Počet částic v řetězci při působení silného magnetického pole a nulového smykového spádu je dán vztahem [53]:

$$\tilde{n}_{(H \rightarrow \infty)} = \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{\phi}{\lambda^2} e^{2\lambda} \right]^{-1} \quad \wedge \quad \lambda = \frac{\mu_0 M_0^2 V}{24 k_B T}, \quad (3.9)$$

kde  $\tilde{n}[1]$  je počet částic v řetězci;  $\lambda[1]$  je vazebný parametr.

Vazebný parametr (*interaction parameter*) určuje poměr mezi magnetickou interakcí částic a tepelnou energií. Vyšší hodnoty  $\lambda$  znamenají vyšší náchylnost k vytváření řetězcových formací feromagnetických částic. Vezmeme-li v úvahu pohybující se saturovanou magnetickou kapalinu, dojde k roztržení řetězce v okamžiku rovnosti viskózní smykové síly a přitažlivé magnetické síly mezi částicemi. Poté je maximální udržitelný počet částic v řetězci  $n_{max}[1]$  dán jako [47]:

$$n_{max} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\dot{\gamma} 18 \eta_{off}}} M_0 \frac{d^3}{(d + 2s)^3}, \quad (3.10)$$

kde  $s[m]$  je tloušťka surfaktantu ( $\approx 2nm$ ).

Tloušťka vrstvy surfaktantu vstupuje do rovnice přes smykovou viskózní sílu, jelikož zvětšuje hydraulický poloměr částice. Magnetický poloměr není ovlivněn tloušťkou surfaktantu. Z rovnice (3.9) pro  $\lambda$  vyplývá, že k magnetoviskóznímu efektu přispívají především větší částice, protože velikost  $\lambda$  je funkcí třetí mocniny poloměru. Z tohoto důvodu je magnetoviskózní efekt u MR kapalin s mikrometrickými částicemi nesrovnatelně větší. Po překročení kritické hodnoty smykového spádu, nebo jinými slovy rychlosti proudění, už nelze hovořit o zformovaných řetězcích částic a k magneticky vyvolané viskozitě přispívá už jen první mechanismus a to blokáce volného otáčení částic.

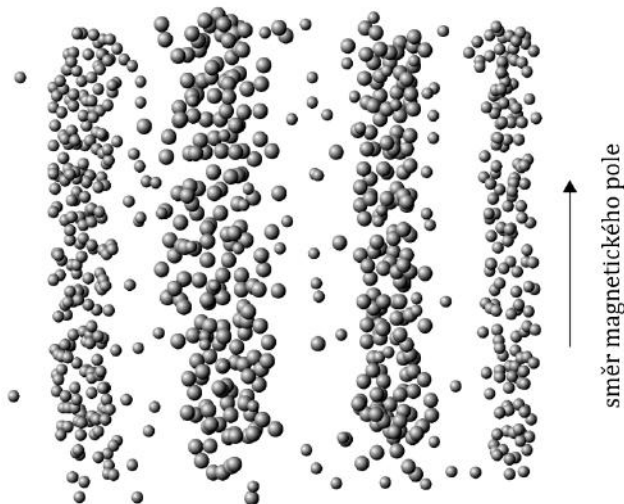
Fyzikální podstata magnetoviskózního efektu a následný matematický popis nejsou zdaleka triviální záležitosti a vyžadují mezioborový přístup. Ke vzniku teoretického popisu chování magnetických kapalin, musíme přijmout určitá zjednodušení na modelovém případě:

- poly-disperzní reálná kapalina nahrazena bi-disperzní, obsahující dvě skupiny velikostí částic;
- částice první skupiny mají velkou četnost a malý poloměr;
- částice druhé skupiny jsou větší a málo četné;
- částice jedné skupiny neinteragují s částicemi té druhé;
- řetězcové formace jsou přímé a rigidní a jsou tvořeny druhou skupinou částic.

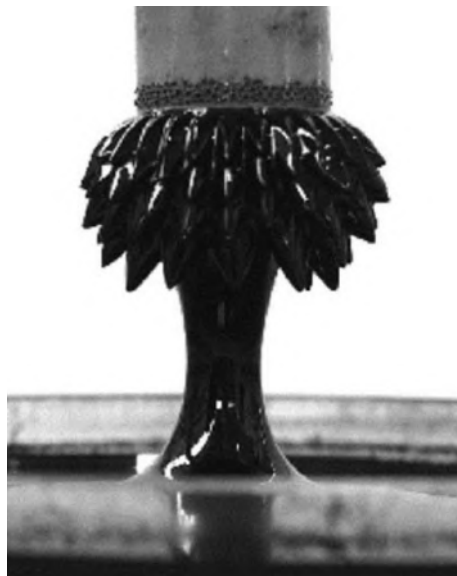
K formování řetězců dochází kvůli přirozené vlastnosti systému a to, že systém se snaží vždy zaujmout stav s nejnižší energií. Viz Obr. 3.8 a 3.9. Distribuční funkce  $g_n[1]$  musí zaručit, že vztah (3.11) pro volnou energii systému  $F_E[J]$  nabude svého minima:

$$F_E = k_b T \sum_n g_n \left( \ln \frac{g_n}{e} - \frac{1}{2k_b T} \mu_0 m_{chain} H \right), \quad (3.11)$$

kde  $m_{chain}[Am^2]$  reprezentuje magnetický moment řetězce částic.



Obr. 3.8: Řetězcové formace částic vzniklé vzájemnou dipólovou interakcí.



Obr. 3.9: Feromagnetická kapalina „přitažená“ elektromagnetem na vzdálenost 5 cm [54].

## 3.2 Magnetoreologické kapaliny

Popis chování MR kapalin vychází z popisu feromagnetických kapalin. Dominantní roli při změně viskozity zastává magnetoviskózní efekt, tedy formování částic do řetězců. Taktéž je u nich pozorována negativní viskozita. Hlavním rozdílem od feromagnetických kapalin je velikost částic, která se pohybuje v rozmezí 2–20  $\mu\text{m}$ . Takto velká částice již není jednodoménová, energie Brownova pohybu je zanedbatelná [56] a její magnetický moment nemůže být vyjádřen jednoduše pomocí objemu a spontánní magnetizací daného materiálu jako (3.3). Magnetický moment  $m$  musí být určen jako funkce vnějšího magnetického pole [53]:

$$m = \chi_p HV, \quad (3.12)$$

kde  $\chi_p$ [1] je magnetická susceptibilita materiálu částic.

Vazebný parametr  $\lambda$  vyjadřující tendenci k vytváření řetězců je dán jako [47]:

$$\lambda = \frac{\mu_0 \chi_p^2 H^2 V}{12 k_B T}. \quad (3.13)$$

Uvážíme-li částici o velikosti 10  $\mu\text{m}$ , typickou magnetickou intenzitu  $H = 10 \text{ kA/m}$  a susceptibilitu čistého železa, může být spočten vazebný parametr  $\lambda = 10^8$ . Z jeho vysoké hodnoty ve srovnání například s typickou částicí feromagnetických kapalin, kde je hodnota  $\lambda$  v řádech jednotek až desítek, vyplývají extrémně silné změny magneticky vybuzené viskozity, respektive velmi silný magnetoviskózní efekt.

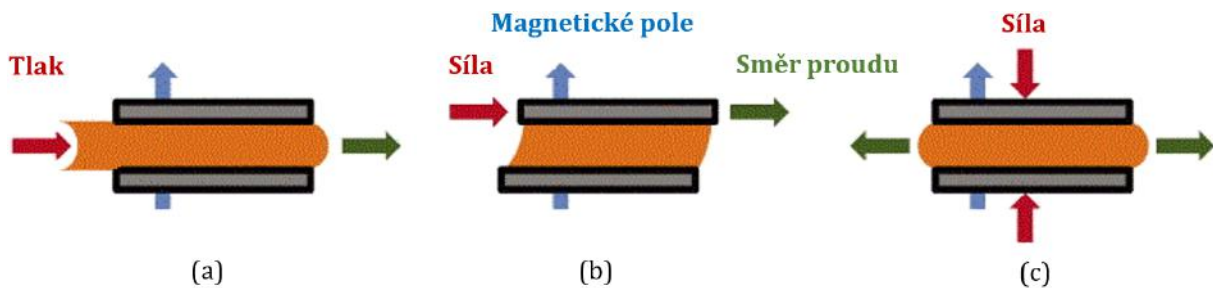
Minimalizace volné energie systému podle rovnice (3.11) ve skutečnosti znamená, že mezi částicemi působí přitažlivé nebo odpudivé síly v závislosti na orientaci k vnějšímu magnetickému poli  $\mathbf{H}$ . Síly jsou přitažlivé ve směru magnetického a odpudivé ve směru kolmém na magnetické pole. Zařízení využívající MR efekt jsou tedy koncipovány tak, aby bylo magnetické pole v pracovní oblasti kolmé na směr proudění kapaliny.

Článek [56] důkladně mapuje různé přístupy k teorii ferohydrodynamiky. Kromě principu vzniku magnetoviskózního efektu nebo použití MR kapalin také vysvětluje negativní viskozitu

a nelineární viskoelastické chování kapaliny.

### 3.2.1 Pracovní módy MR kapalin

Existují tři základní typy proudění MR kapalin v tlumičích a to *ventilový* mód, *smykový* mód a mód *squeeze-filmový*, viz Obr. 3.10. Obecně může být způsob zatěžování magnetické kapaliny v tlumičích určen pouze jedním módem, jako například u *squeeze-filmových* MR tlumičů (viz [2, 57]) a nebo je proudění ve škrtkové části tlumiče definováno kombinací některých z pracovních módů. S rostoucím počtem zařízení využívajících magnetické kapaliny roste poptávka po nových pracovních módech, protože každý pracovní mód má svá omezení — například velikost šěrby musí odpovídat velikosti částic tak, aby nedošlo k ucpaní. Takovým příkladem je třeba tzv. *Magnetic Gradient Pinch* pracovní mód, který umožňuje použití levnějších a hrubších železných částic [58].



Obr. 3.10: Základní pracovní módy MR kapalin: (a) ventilový; (b) smykový; (c) squeeze-filmový [59].

Typický MR tlumič, u kterého ke škrcení kapaliny probíhá mezi pohybujícím se pístem a vnitřním válcem, kombinuje *ventilový* a *smykový* mód. *Ventilový* mód je definován dvěma nepohyblivými stěnami a tlakovým spádem, což odpovídá situaci rozdílu tlaků nad a pod pístem tlumiče. *Smykový* mód je definován jednou pohyblivou stěnou a je typický pro zařízení přenášející kroutící moment jako jsou MR brzdy a spojky.

### 3.2.2 Reologický model MR kapalin

Reologický model umožňuje matematicky popsat mechanické chování kontinua pod účinky vnějšího zatěžování. Pevným kovovým materiálům s hookovským chováním je přiřazen reologický model klasické pružnosti, kde je relativní deformace tělesa  $\varepsilon[1]$  přímo úměrná napětí  $\sigma[Pa]$  [60]. Analogicky můžeme hledat závislost mezi smykovým spádem  $\dot{\gamma}[s^{-1}]$  a smykovým napětím  $\tau[Pa]$ .

Nosná kapalina se sice zpravidla chová jako newtonovská, ale jako celek vykazuje MR kapalina nenewtonovské chování. Existuje několik parametrických modelů, které kombinací elementárních mechanických prvků popisují chování magnetických kapalin, přehled zde [61]. Jedním z nich je také Binghamův model kapaliny, jenž je speciálním případem modelu Herschel-Bulkley pro  $n = 1$  [62]:

$$\text{Herschel-Bulkley model:} \quad \tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \mu \dot{\gamma}^n. \quad (3.14)$$

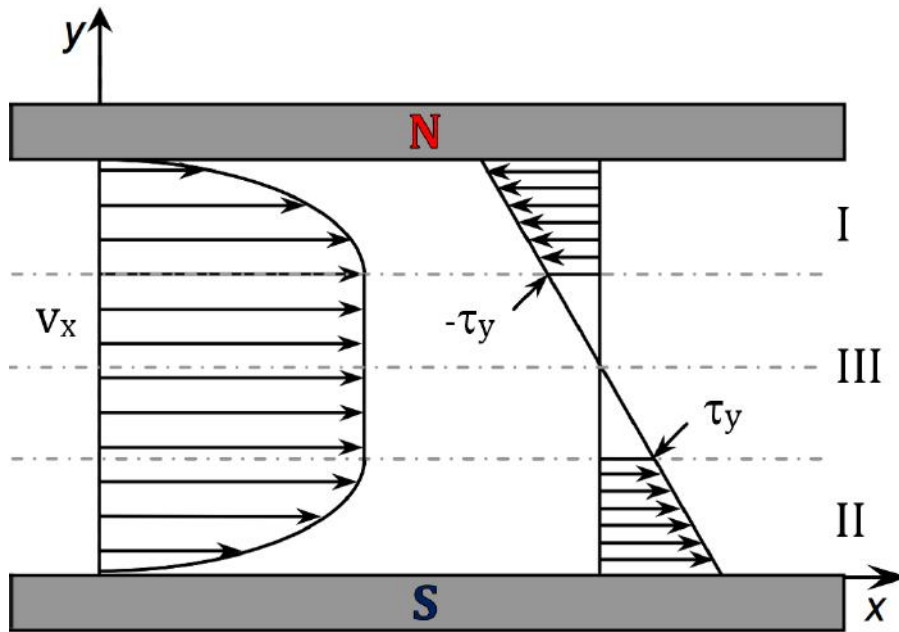
$$\text{Bingham model:} \quad \tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \mu \dot{\gamma}, \quad (3.15)$$

kde  $\tau_y[Pa]$  je mez kluzu (někdy také mez toku) závislá na magnetickém poli. Mez kluzu vyjadřuje smykové napětí nutné pro iniciaci proudění.

Tato rovnice platí pro  $\tau \geq \tau_y$ , tedy po překonání meze toku. Při nízkých hodnotách smykového napětí se MR kapalina chová viskoelasticky a smykové napětí je závislé na komplexním modulu materiálu  $G[Pa]$  (více zde [63]) a relativním přetvoření  $\gamma[1]$  [62]:

$$\tau = G\gamma \quad (\dot{\gamma} = 0). \quad (3.16)$$

Proudění MR kapaliny popsané tímto modelem je vidět na Obr. 3.11 níže. Smykové napětí  $\tau$  roste lineárně s klesající vzdáleností od stěny, v tomto případě od pólu magnetu. Hodnota smykového napětí v oblasti I a II, v tzv. *post-yield* oblasti, přesahuje hodnotu meze toku  $\tau_y$  a kapalina zde proudí. V oblasti III je smykové napětí pod kritickou hodnotou a kapalina se chová „tuhé“ těleso; jedná se o tzv. *pre-yield* oblast.



Obr. 3.11: Rychlostní profil Binghamské/MR kapaliny a průběh smykového napětí v homogenním magnetické poli [64].

Existuje mnoho přístupů, které se snaží analyticky určit smykové napětí pomocí vnějšího magnetického pole. Jeden z prvních pokusů je například podle Shulmana z roku 1986 [65]:

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} + \mu_0 H^2 \phi \alpha_0^{-1} \frac{\chi_{in}}{2} + \chi_{in}, \quad (3.17)$$

kde  $du/dz = \dot{\gamma}$  a  $\alpha_0$  je konstanta.

Mez toku ve *smykovém* zatěžovacím módu vyjádřili *prof. Si* a kolektiv v roce 2008 jako [65]:

$$\tau_0(H) = \sum_{n=1}^{k_p} \frac{\mu_0}{12n^2} \frac{r\phi(\mu_{MR} - 1)^2 H^2}{(2r + \delta_p)} \sin \theta_a \cos \theta_a, \quad (3.18)$$

kde  $\mu_{MR}[Vs/Am]$  je relativní permeabilita MR kapaliny —  $\mu_{MR} = 1 + \chi_{in}$ ;  $k_p[1]$  je průměrný počet částic v řetězci.

Výše uvedené rovnice (3.17) a (3.18) platí pro slabá magnetická pole. Pro silná magnetická pole predikují nižší hodnoty smykového napětí. Účinky středně silného magnetického pole na mez toku přesněji vystihli Phule a Ginder vztahem [65]:

$$\tau_0 = \sqrt{6}\phi M_S^{-\frac{1}{2}} H^{\frac{3}{2}}. \quad (3.19)$$

Tlakový spád a odporová síla.

Phillips (1969) [62] provedl výpočet síly vyvinuté MR kapalinou ve *ventilovém* módu. Nejprve odvodil tlakový spád  $\Delta p [Pa]$ , který je složen ze dvou částí — viskózní složkou  $\Delta p_\mu$  a magnetoviskózní složkou  $\Delta p_\tau$ :

$$\Delta p = \underbrace{\frac{12\mu_{off}QL}{g^3W}}_{\Delta p_\mu} + \underbrace{\frac{c\tau_y(H)L}{g}}_{\Delta p_\tau}, \quad (3.20)$$

kde  $Q [m^3/s]$  je průtok;  $L, g, W [m]$  jsou rozměry škrťacího kanálu;  $c[1]$  je parametr závislý na rychlostním profilu  $c \in \langle 2; 3 \rangle$ .

Stejně tak může být určena výsledná síla  $F [N]$ , která se opět skládá z viskózní síly  $F_\mu$  a magnetoviskózní síly  $F_\tau$ :

$$F = \underbrace{\frac{\mu\tilde{S}A}{g}}_{F_\mu} + \underbrace{\tau_y(H)A}_{F_\tau}, \quad (3.21)$$

kde  $\tilde{S} [m/s]$  je střední rychlost ve štěrbíně;  $A = LW [m^2]$  je plocha štěrbiny.

Při vývoji MR tlumiče je potřeba mít dostatečně silný matematický model predikující tlumící sílu, která je optimalizována v řídicí jednotce podle různých algoritmů, více o způsobu řízení MR tlumičů zde [66]. Z tohoto pohledu je nutné znát magnetickou saturaci kapaliny a závislost meze toku  $\tau_y$  na intenzitě magnetického pole  $H$ . Na Obr. 3.12 je tzv.  $B-H$  křivka MR kapaliny od firmy Lord, z níž je patrné magnetické nasycení kapaliny.

Závislost meze toku na intenzitě magnetického pole je na Obr. 3.13 níže.

### 3.3 Aplikace magnetických kapalin

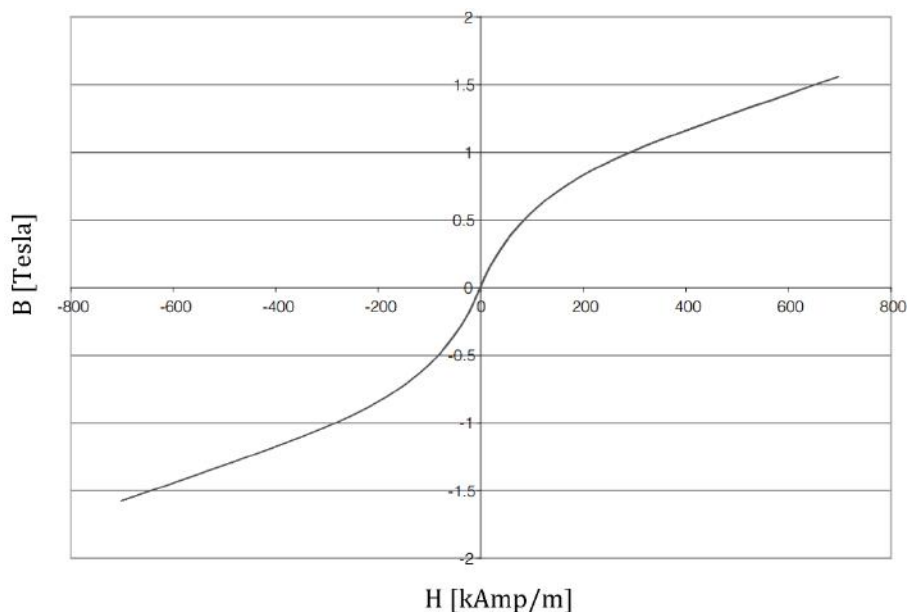
Zde jsou uvedeny způsoby využití magnetických kapalin kromě využití v hydrodynamických tlumičích, ty jsou uvedeny v kapitole 2.

#### 1. Brzdy & spojky

Principem je rotující disk obklopený MR kapalinou. Přenášený kroutící moment je závislý na řídicím proudu elektromagnetické cívky. Více o MR brzdách zde [68] a spojkách zde [69].

#### 2. Reproduktoři

MR kapalina vyplňuje prázdný prostor mezi permanentním magnetem vibrující cívkou reproduktoru, ve kterém je jinak vzduch. Kapalina zaprvé účinně chladí cívku (odvod tepla je řádově větší než u vzduchu) a zadruhé tlumí kmitající cívku. Díky tomuto řešení může mít reproduktor až o polovinu větší výkon při stejných rozměrech [70].



Obr. 3.12: B-H charakteristika kapaliny MRF-132DG od společnosti Lord [67].

### 3. Těsnění čerpadla pro oběh krve

Feromagnetické kapaliny jsou s výhodou používány jako těsnění, ložiska nebo jako ucpávky. Jedno z možných využití uvádí například tento článek [71], kde feromagnetická kapalina těsní hřídel umělého srdce.

### 4. Protetické náhrady končetin

Jednou z aplikací v medicíně jsou umělé náhrady končetin. Například spojka v umělém kolenu od *prof. WH. Liaoa* [72].

### 5. Hypertermické léčení rakoviny

Biokompatibilní nanočástice feromagnetické kapaliny jsou pomocí střídavého magnetického pole o vysoké frekvenci rozkmitávány, což vede k jejich ohřevu. Výhodou jsou slabé vedlejší účinky, protože částice vyzařující teplo, které zabíjí nádorové buňky, jsme schopni velice přesně lokalizovat [73].

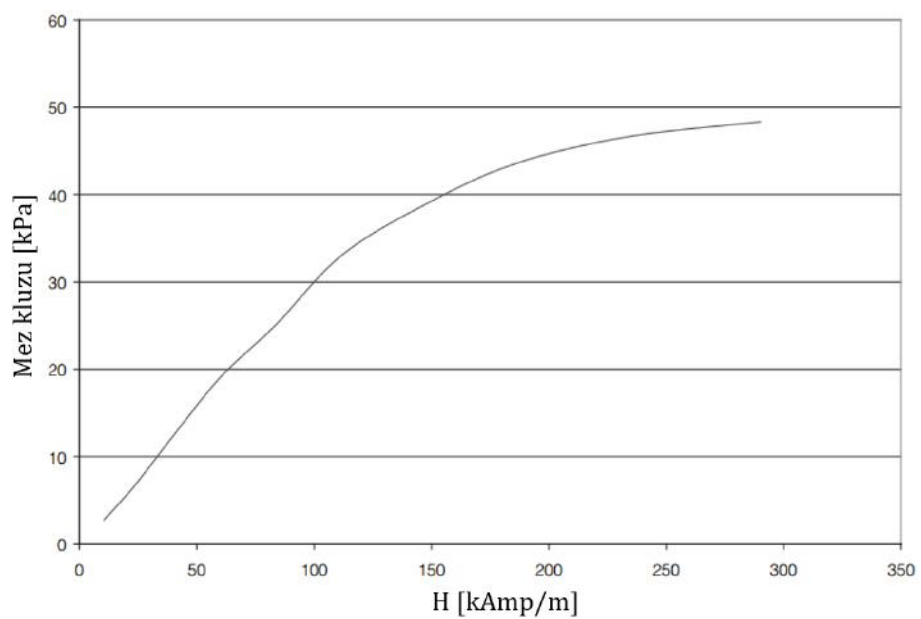
### 6. Medicína - aplikace léků

Na částice feromagnetické kapaliny je navázána účinná látka léku. Magnetickým polem jsou lékaři schopni dopravit lék přímo do cílové oblasti a pak jej pomocí zahřátí uvolnit [73].

### 7. Další aplikace

Jak se zlepšují kvalitativní vlastnosti magnetických kapalin a zlevňuje se jejich výroba, přibývá více a více různých způsobů jejich využití, až už v tlumičích, strojírenství, stavebnictví, vojenské technice nebo v medicíně. Další aplikace lze nalézt zde [70].





Obr. 3.13: Závislost meze toku na intenzitě magnetického pole. Měřena kapalina MRF-132DG od společnosti Lord [67].

## Část II

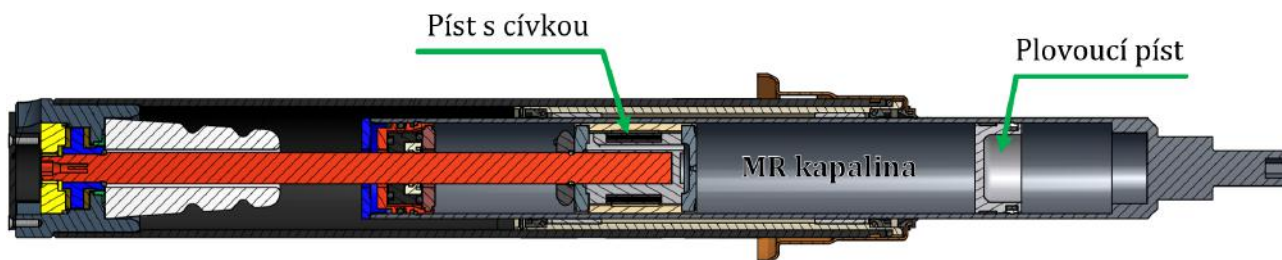
# Analýza problému a interpretace výsledků

## 4 | Výpočtová simulace proudění

Tato práce se v další části zabývá výpočetní simulací proudění MR kapaliny v tlumiči s cílem určení tlumicí síly a její porovnání s experimentem. CFD simulace je provedena v programu ANSYS Fluent 17.2, který poskytl Odbor fluidního inženýrství VUT. Experimentální data z měření vlastností kapalina MRF-132DG a vybraného tlumiče byla získána ve spolupráci s Ústavem konstruování na VUT.

### 4.1 Identifikace zadání

Byla vybrána upravená varianta MR tlumiče firmy Delphi, který se používá v osobních automobilech vyšší třídy od firem Audi, Landrover aj. Jedná se o jednoválčový MR tlumič s expanzní nádržkou na plyn zabudovanou uvnitř válce. Prostor mezi MR kapalinou a stlačeným plynem je oddělen plovoucím pístem, viz Obr. 4.1. V CFD simulaci je řešená oblast omezena na okolí MR pístu, kde bude určena celková tlumicí síla jako součet tlakových a viskózních sil.



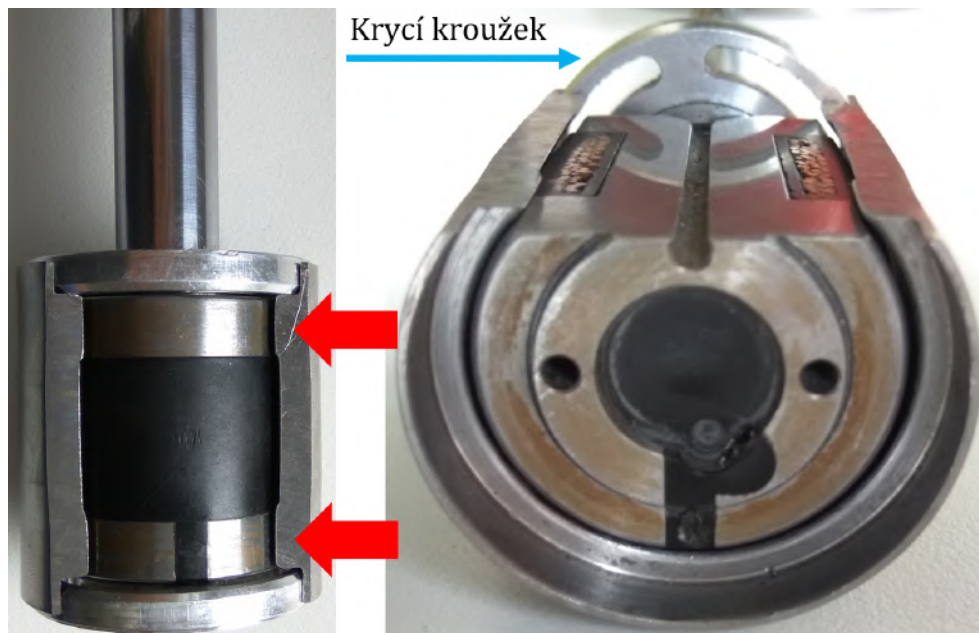
Obr. 4.1: MR tlumič Delphi v řezu.

Upravená varianta neobsahuje odlehčovací obtoky, které jsou vidět v řezu na Obr. 4.1 a také na Obr. 4.2. To umožňuje zjednodušit výpočet a uvažovat s určitým druhem axisymetrie. Píst je oproti klasickým konstrukcím specifický absencí vodícího kroužku a tuto funkci přebírá vnější plášť pístu. Mezi pláštěm pístu a hydraulickým válcem je tenká olejová vrstva umožňující vzájemný pohyb bez zadírání. Při uložení  $\phi 36j7$  na  $\phi 35,9H7$  je maximální konstrukční vůle  $0,14\text{ mm}$  na průměru. Průtok touto tenkou a dlouhou spárou o velikosti  $0,07\text{ mm}$  a délce  $48,6\text{ mm}$  je zanedbatelný díky velkým hydraulickým ztrátám a ve výpočtu je uvažováno s jeho nulovou hodnotou.

#### 4.1.1 Geometrie tlumiče

Na Obr. 4.2 je zachycen originální MR píst, který byl částečně vybroušen, aby byl viditelný obtokový kanál a elektromagnetická cívka. Krycí kroužky udržují plášť a píst ve koncentrické poloze a umožňují průtok kapalině do aktivní oblasti skrze vyfrézované otvory. Porovnáním rozměrů aktivní zóny a nátoky skrze tyto kroužky lze zanedbat hydraulické ztráty při průchodu kroužky. Aktivní oblasti, tedy dvě místa hlavního škrcení jsou označeny červenými šipkami

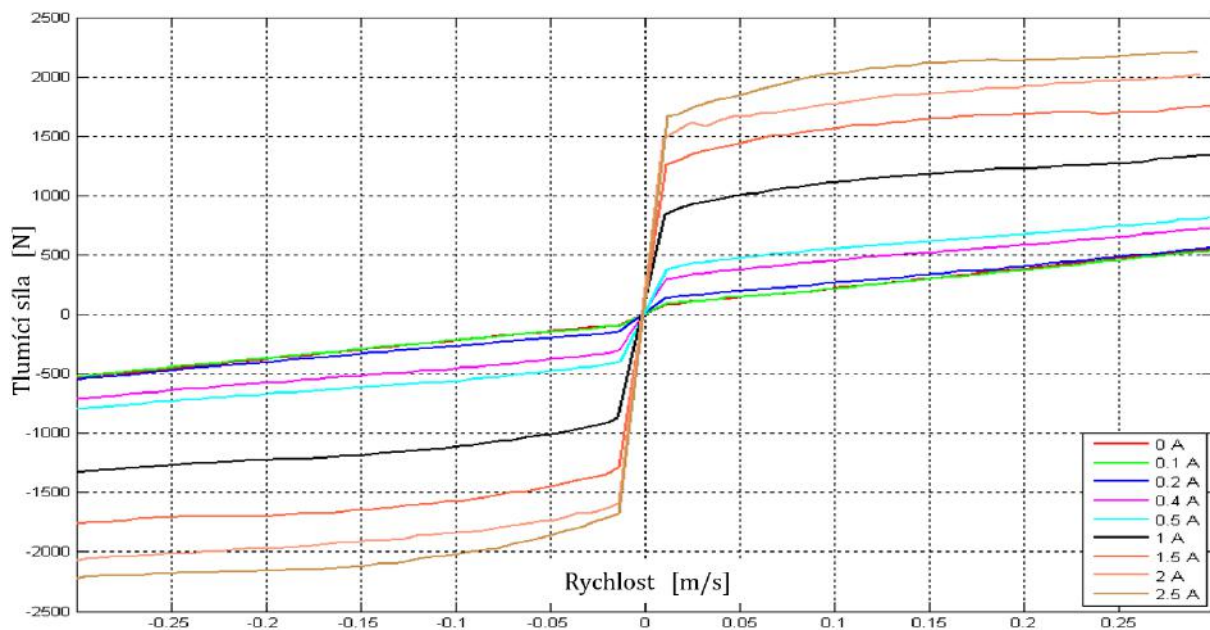
vlevo. Na stejném obrázku vpravo jsou patrné tři obtokové kanály, které však na upravené variantě pístu nejsou<sup>12</sup>.



Obr. 4.2: Detail pístu MR tlumiče Deplhi.

#### 4.1.2 Charakteristika tlumiče

Absence obtokových kanálů v pístu se projevuje na  $F$ - $v$  charakteristice velice ostrým nástupem tlumicí síly. Strmá sklon grafu také potvrzuje správnost předpokladu o zanedbání průtoku mezi pláštěm pístu a vnitřním válcem tlumiče, viz Obr. 4.3.

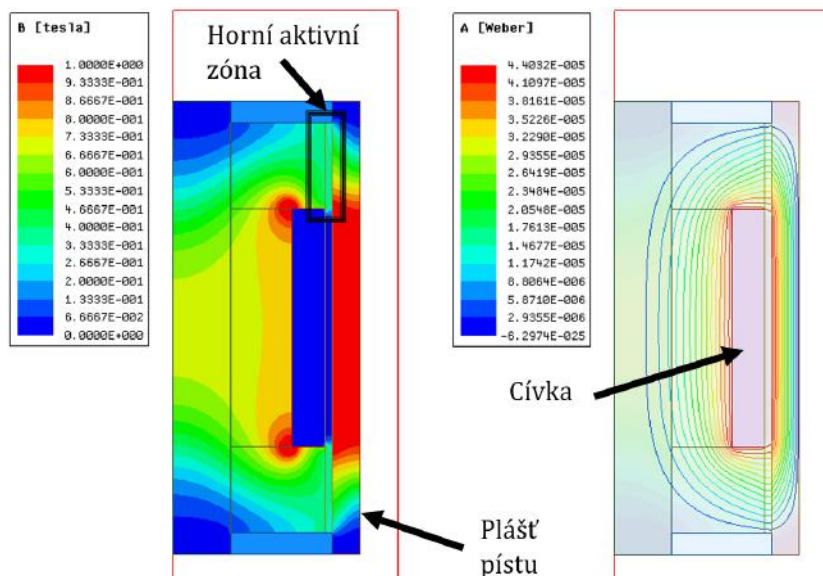


Obr. 4.3:  $F$ - $v$  charakteristika MR tlumiče při různých řídicích proudech.

<sup>12</sup>Upravený píst nebylo možno vyfotografovat, jelikož byl v době tvorby této práce již v testovaném tlumiči.

### 4.1.3 Rozložení magnetického pole

Rozložení a intenzita magnetického pole v okolí pístu určuje jakým způsobem se bude tlumič chovat při zatěžování pod účinkem různých řídicích proudů v cívce. Zde jsou převzaty výsledky magnetostatické simulace v programu Maxwell, která byla provedena na Ústavu konstruování VUT.



Obr. 4.4:  $F$ - $v$  charakteristika MR tlumiče při různých řídicích proudech.

Na Obr. 4.4 jsou prezentovány výsledky simulace v řezu jednou polovinou pístu. Vlevo je barevně vyznačeno rozložení magnetické indukce  $B$  a vpravo průběh magnetického indukčního toku  $\Phi$  [Wb]. Z výsledků je zřejmé následující:

1. velikost magnetické indukce je konstantní po celé délce aktivní zóny;
2. magnetické pole je kolmé na směr proudění kapaliny téměř po celé délce aktivní zóny;
3. magnetický obvod prochází kapalinou pouze v oblastech aktivní zóny.

S uvážením předchozích bodů je možno rozdělit oblast kapaliny na dvě oblasti a to na oblast s newtonovskou kapalinou, respektive s MR kapalinou bez vlivu magnetického pole a oblast s neneutronovskou kapalinou, tedy MR kapalinou v aktivovaném stavu.

## 4.2 CFD simulace

CFD simulace provedená v této práci má za úkol navrhnout metodu výpočtu tak, aby se výsledky co nejvíce shodovaly s provedeným experimentem. Takto navržený postup výpočtu pak může sloužit k předpovídání charakteristiky tlumiče pomocí výpočetní techniky a přiblížit se tak metodě *zero-prototype engineering*. Simulace je provedena v programu ANSYS Fluent 17.2 a vyhodnocení výsledků v CFD Post.

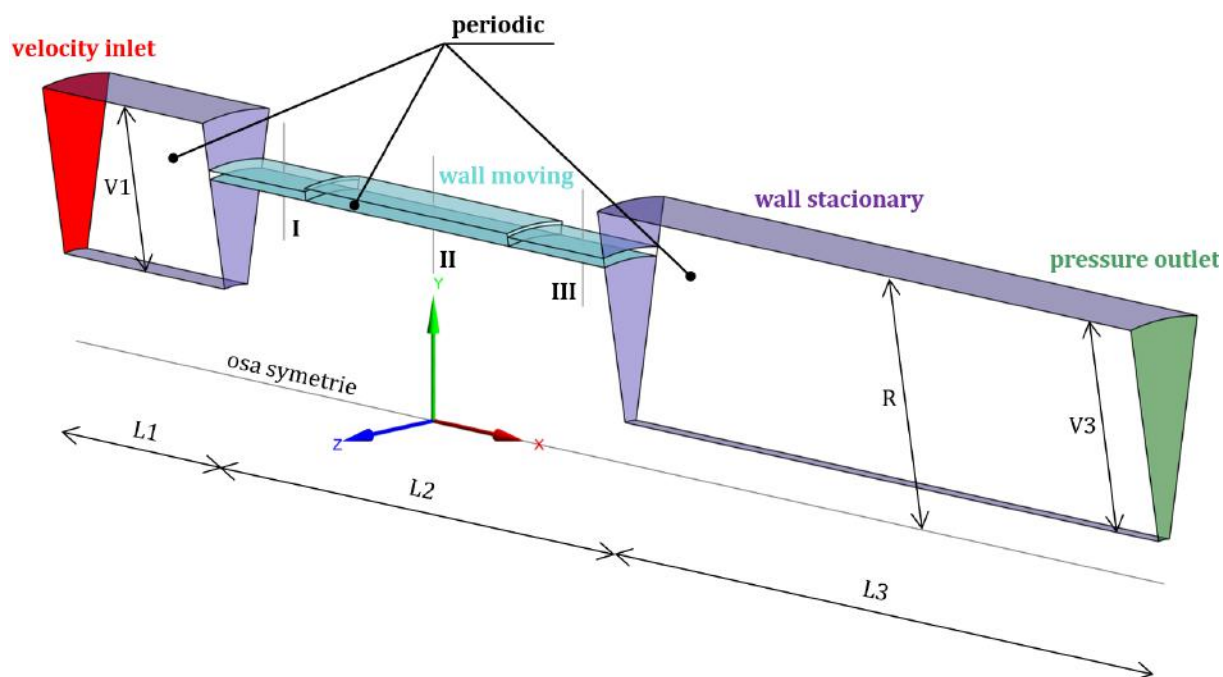
Symetrie úlohy umožňuje řešit úlohu jako rovinnou nebo prostorovou s využitím periodické okrajové podmínky. V prvotní fázi tak byl proveden komparativní výpočet pro 2D axisymetrickou úlohu, 3D periodickou úlohu s výsečí  $20^\circ$  a kompletní 3D úlohu. Všechny tři varianty dávaly velmi podobné výsledky pro newtonovskou kapalinu, ovšem 2D axisymetrická úloha se později

výrazně rozcházela s 3D úlohami při uvažování neneutronovské kapaliny. Z tohoto důvodu není vhodná pro další postup.

#### 4.2.1 Výpočetní doména & okrajové podmínky

CFD simulace zachycuje situaci při expanzi tlumiče. Píst se tedy pohybuje proti směru osy  $x$  a kapalina natéká ve směru osy  $x$ . Tomu odpovídají také okrajové podmínky (OP) výpočetní domény ve tvaru výseče s úhlem  $20^\circ$ , jejíž schéma je na Obr. 4.5. Ta je tvořena zleva:

- oblastí nátoku do pístu ze strany pístnice;
- štěrbinou mezi pístem a pláštěm pístu;
- výtokovou oblastí do prostoru mezi pístem a plovoucím pístem.



Obr. 4.5: Výpočetní doména jako  $20^\circ$  výseč a okrajové podmínky.

Tabulka 4.1: Rozměrová tabulka výpočtové domény; rozměry uvedeny v mm.

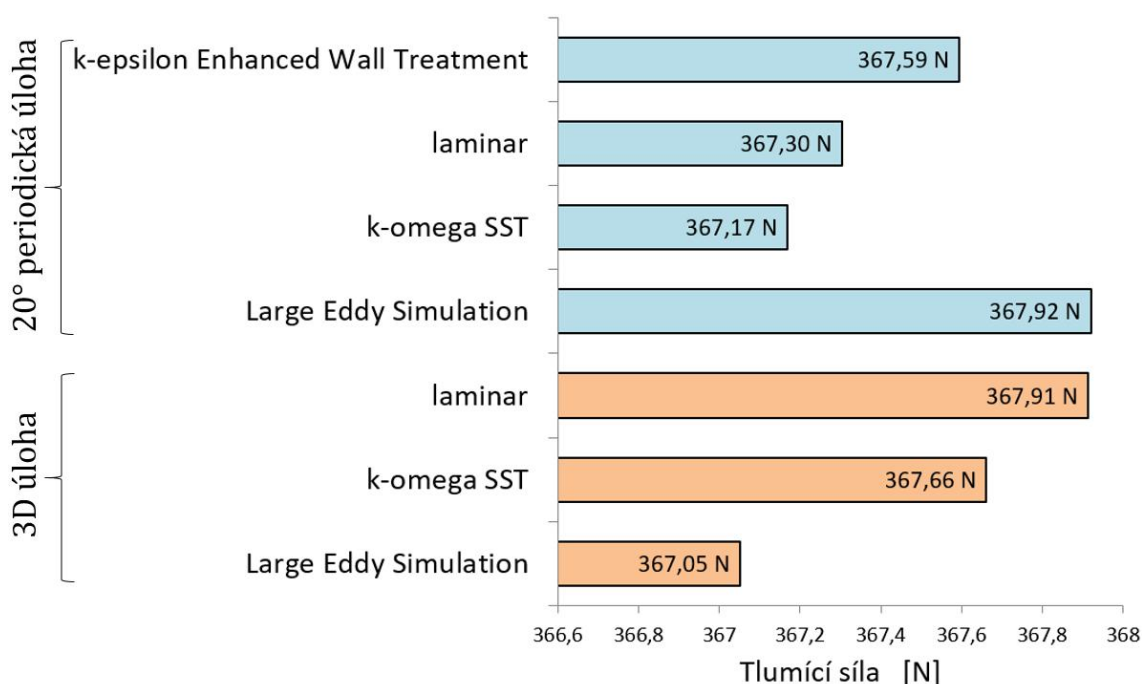
L1	L2	L3	V1	V2	R	šířka spáry I a III	šířka spáry II
15,000	37,000	50,000	11,785	15,000	18,000	0,650	0,900

K výpočtu byla použita rotační periodická OP na bočních stěnách domény. Tato podmínka musí být ručně nastavena v programu Fluent pomocí příkazu `/mesh/modify-zones> make-periodic`, při které se levá strana přiřadí pravé. Při použití podmínky `periodic` je nutné zaručit shodnost sítě na obou stranách domény.

Pohybu pístu vůči kapalině je zajištěno zaprvé pomocí podmínky `velocity inlet`, která definuje rychlost proudění na vstupu do domény a zadruhé pomocí podmínky `moving wall` na světle modré oblasti z obrázku výše. Na těchto stěnách, kopírujících píst a cívku z jedné strany

a plášť pístu ze strany druhé, je nastavena rychlost proti ose  $x$  o stejné velikosti jako je rychlost na `velocity inlet`, čímž je reprezentováno ulpívání kapaliny na stěnách štěrby. Tlaková OP `pressure outlet` na výstupu z domény je v průběhu všech výpočtů nastavena na hodnotu  $0 \text{ Pa}$ . Celkové řešení úlohy není závislé na nastavené hodnotě tlaku na výstupu, jelikož tlakový rozdíl se vytvoří na základě geometrie, vlastností MR kapaliny a vstupní OP.

Očekávaným druhem proudění v celé doméně bylo proudění laminární, jelikož odhadovaná rychlost ve spáře by neměla překonat  $5 \text{ m/s}$  a kapalina je i v neaktivovaném stavu velmi viskózní, což snižuje velikost Reynoldsova čísla. Pro ověření tohoto předpokladu však byl v dalším kroku proveden komparativní výpočet pro různé modely proudění, jehož výsledky jsou na Obr. 4.6. Byla uvažována MR kapalina v neaktivovaném stavu — tedy newtonovská kapalina s hustotou  $\rho = 3140 \text{ kg/m}^3$  (měření na ÚK) a dynamickou viskozitou  $\mu_{off} = 0,092 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (hodnota z materiálového listu kapaliny MRF-132DG).

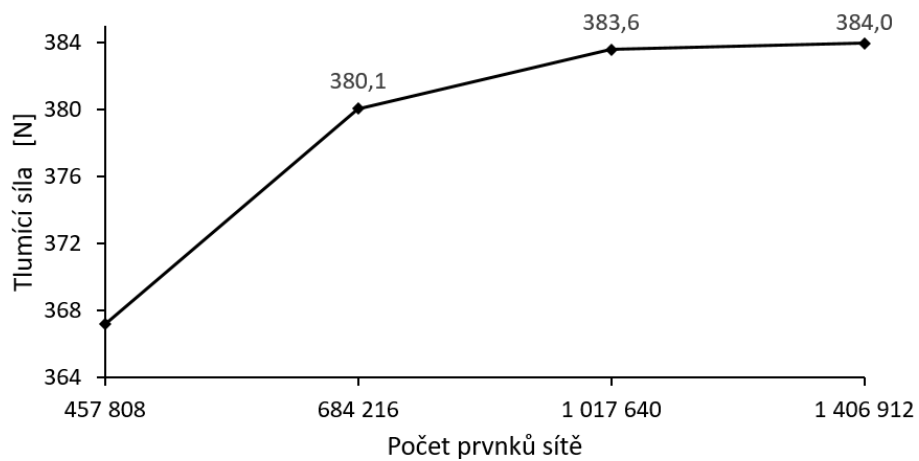


Obr. 4.6: Porovnání periodické úlohy s 3D úlohou při použití různých modelů proudění.

Z výsledků komparativního výpočtu vyplývá, že rozdíl v tlumící síle mezi periodickou úlohou a plným 3D řešením, stejně jako mezi jednotlivými modely proudění, je v řádu několika desetin  $N$ , což je zanedbatelná hodnota. Následující výpočty jsou řešeny jako pomocí laminárního proudění.

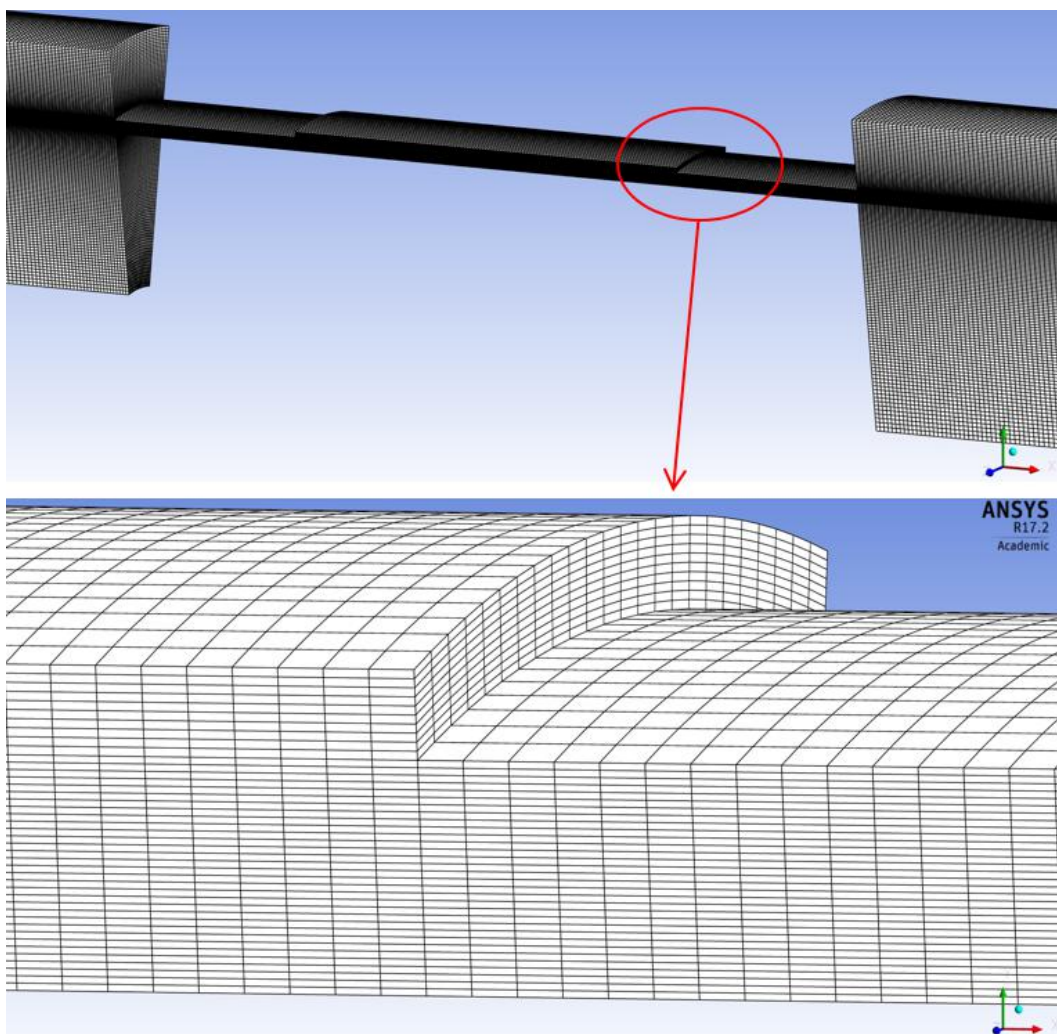
#### 4.2.2 Výpočetní síť

Výpočetní síť byla tvořena v programu ANSYS Meshing pomocí příkazů `edge sizing`, která definuje počet prvků na hranách. Síť se skládá z hexagonálních prvků zhuštěných v oblasti spáry, ve které jsou předpokládány největší změny rychlosti. Na zkušebním příkladu při uvažování newtonovské kapaliny byla provedena studie nezávislosti řešení na výpočetní síti. Hlavní vliv na řešení má počet prvků ve spáře o rozměru  $0,65 \text{ mm}$  — tlumící síla se ustálila při 32 prvcích na tomto rozměru. Závislost vypočtené tlumící síly na počtu prvků je zobrazena na Obr. 4.7.



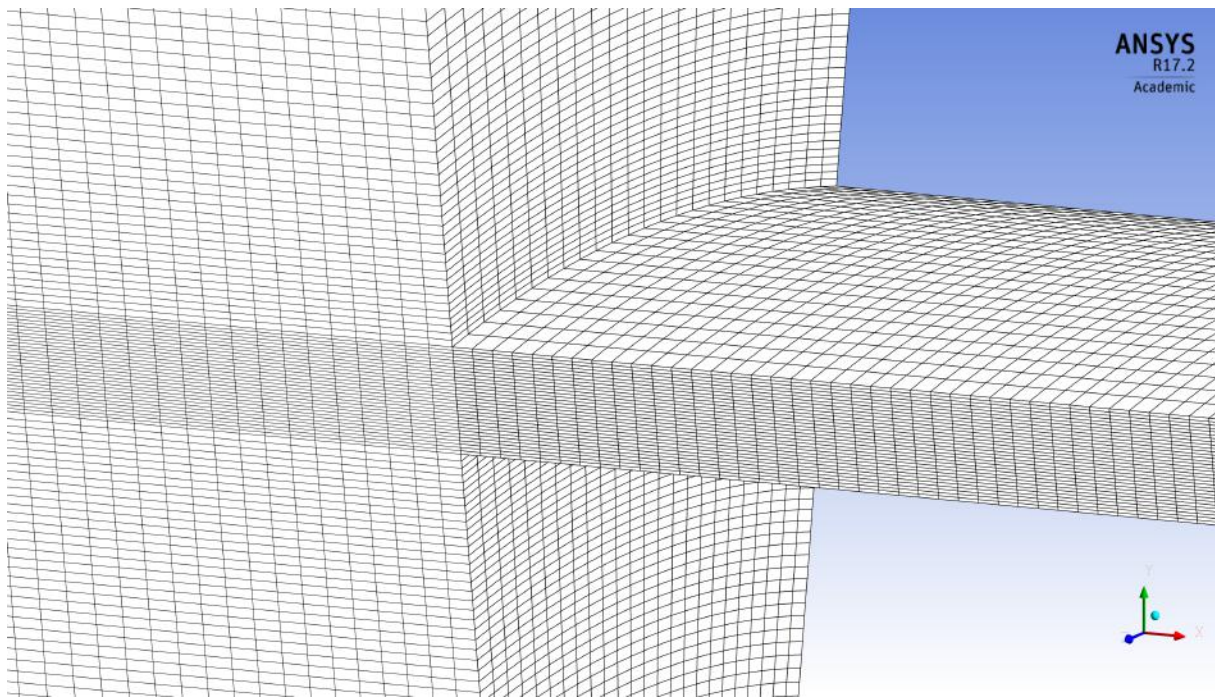
Obr. 4.7: Mesh independence study — závislost výsledné síly na kvalitě sítě.

Parametry finální sítě	Počet prvků	1 174 128
	Minimum Orthogonal Quality	0,998902
	Maximum Ortho Skew	0,00109843
	Maximum Aspect Ratio	26,4396



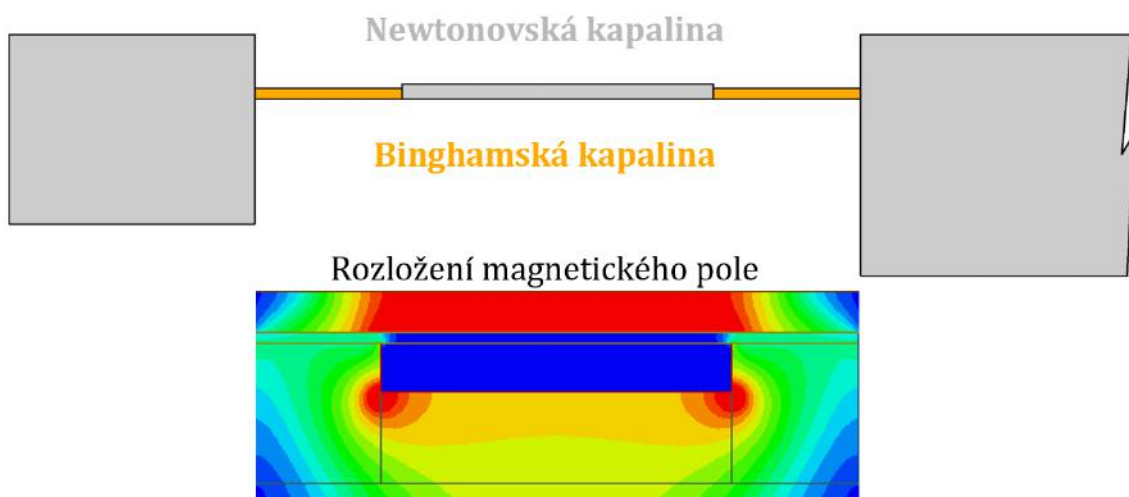
Obr. 4.8: Výpočetní síť.





Obr. 4.9: Detail výpočetní sítě u oblasti vstupu do aktivní zóny.

Na Obr. 4.10 je schématicky znázorněn způsob, jakým je zohledněn vliv magnetického pole. Celá výpočetní doména je rozdělena na dvě zóny, přičemž každé z nich je přiřazen jiný materiál. Šedé zóně je přiřazena newtonovská kapalina s hustotou  $\rho = 3140 \text{ kg/m}^3$  a dynamickou viskozitou  $\mu_{off}$ , která je upřesněna v kapitole 4.2.3.1. Oranžová aktivní zóna, která je ovlivněna magnetickým polem, pracuje s neneutronovskou kapalinou definovanou pomocí Binghamského modelu kapaliny, který je rozebrán v následující kapitole 4.2.3.3. Toto rozdělení domény na zóny s uvažováním magnetického pole ve dvou místech — aktivních zónách vychází z magnetostatické simulace, více v 4.1.3.



Obr. 4.10: Rozdělení domény na zóny s newtonovskou kapalinou a Binghamskou kapalinou. Ve spodní části detail na rozložení magnetického pole ve štěrbině.

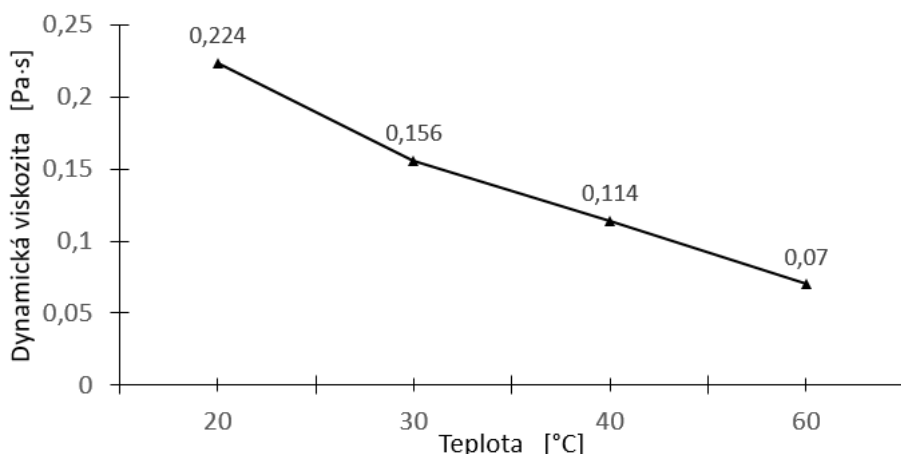
### 4.2.3 Nastavení výpočtu

Pro kontrolu byl proveden časově závislý (*transient*) výpočet, který neukázal vznik nestabilit proudění → výpočet je tedy nadále řešen jako stacionární (*steady*). Po standardní iniciaci-

zaci z *velocity inlet* byly všechny výpočty zkonvergovány nejprve schématem *First Order Upwind*, poté *Second Order Upwind* a složka hybností, tedy *momentum* i schématem třetího řádu *Quick*. Průměrný počet iterací potřebný k ustálení residuí se pohyboval okolo 70-ti tisíc s výpočetním časem přes 24 h.

#### 4.2.3.1 Korekce viskozity v neaktivovaném stavu

Při převzatí viskozity z materiálového listu kapaliny MRF-132DG od výrobce LORD o velikosti  $0,092 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  byla vypočtená tlumící síla velmi malá ve srovnání s experimentem. Viskozita v neaktivovaném stavu MR kapalin je silně závislá na teplotě. Na Obr. 4.11 je vykreslena závislost dynamické viskozity na teplotě MR kapaliny, jež byla získána vlastním měřením ÚK VUT.



Obr. 4.11: Grafická závislost dynamické viskozity kapaliny MRF-132DG na teplotě.

Měření charakteristiky tlumiče se provádělo při počáteční teplotě tlumiče  $29^\circ\text{C}$  a tak by se měla viskozita blížit hodnotě cca  $0,15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Pro tuto hodnotu však vycházela mnohem větší tlumící síla než ve skutečnosti. Tuto skutečnost lze vysvětlit nesprávným odečtením skutečné teploty uvnitř tlumiče. Navíc pokud měření probíhalo až po několika zdvizích tlumiče, došlo ke zvýšení teploty v důsledku disipace energie a tedy i poklesu viskozity.

Kvůli nemožnosti určit přesnou teplotu MR kapaliny v tlumiči, bylo přistoupeno k iterativnímu dopočtu dynamické viskozity. Byl vybrán jeden bod z F-v charakteristiky tlumiče, konkrétně [ $v = 0,2 \text{ m/s}$ ;  $I = 0 \text{ A}$ ;  $F = 383,4 \text{ N}$ ]. Po provedení řady výpočtů bylo správné tlumící síly dosaženo při dynamické viskozitě v neaktivovaném stavu  $\mu_{off} = 0,1456 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

#### 4.2.3.2 Skutečná tlumící síla z F-v charakteristiky

Síla vykreslená na tomto grafu (z Obr. 4.3) je celková síla, kterou vyvíjí tlumič při pohybu. Neoddělitelnou složkou této celkové síly je také třecí síla, vznikající v důsledku tření těsnících prvků o pístnici, tření plovoucího pístu a případné tření pístu o stěnu hydraulického válce. Hlavní vliv má přitom tření v ucpávce pístnice, které lze rozdělit na statickou a dynamickou složku. Body v charakteristice jsou zaznamenávány vždy při maximální rychlosti — nulovém zrychlení (harmonický pohyb) a může tak být zanedbána statická složka tření [74]. Takto definovaná třecí síla byla určena na  $47 \text{ N}$ . Jistou nepřesnost do vyhodnocení však vnáší fakt, že tření v ucpávkách je závislé na vnitřním přetlaku ve válci. S rostoucím tlakem roste i přitlačná síla ucpávky na pístnici. Tento fakt je v této práci zanedbán a je uvažováno s konstantní hodnotou třecí síly. V Tabulce 4.2 jsou uvedeny body z F-v charakteristiky ponížené o hodnotu  $47 \text{ N}$ .

Tabulka 4.2: Vybrané body z  $F$ - $v$  charakteristiky testovaného tlumiče.

		Tlumící síla [N]			
$v$ [m/s]	$I$ [A]	0,05	0,1	0,15	0,2
0		97,0	174,4	256,0	336,4
0,5		429,3	508,5	567,9	628,6
1,0		958,0	1066,0	1138,0	1184,0
1,5		1395,0	1523,0	1603,0	1635,0
2,0		1619,0	1724,0	1809,0	1875,0

#### 4.2.3.3 Definice viskozity pomocí UDF

Vliv magnetického pole je do výpočetní domény (aktivní zóny) zahrnut pomocí nového materiálu, jemuž je přiřazena odpovídající hodnota počátečního smykového napětí (meze toku/kluzu) pro daný řídicí proud v cívce. Velikost meze toku je odečítána z Obr. 3.13, str. 49 v závislosti na intenzitě magnetického pole v aktivní zóně. Intenzita magnetického pole v aktivní zóně je získána ze simulace magnetického pole, viz Tabulka 4.3.

Tabulka 4.3: Hodnoty intenzity magnetického pole a meze toku pro daný řídicí proud v cívce.

$I$ [A]	$H$ [kA/m]	$\tau_y$ [kPa]
0	0	0
0,5	25	7,210
1	53	16,875
1,5	76	23,154
2	92	27,646

Následující úpravou rovnice (3.15) byla vyjádřena efektivní viskozita  $\mu_{ef}$ , přičemž počáteční viskozita  $\mu_{off}$  zde vystupuje jako  $\mu$ :

$$\begin{aligned}
 \tau &= \tau_y + \mu \dot{\gamma} \cdot \frac{1}{\dot{\gamma}}, \\
 \frac{\tau}{\dot{\gamma}} &= \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \mu, \\
 \mu_{ef} &= \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \mu_{(=\mu_{off})},
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

kde poměr  $\tau/\dot{\gamma}$  reprezentuje efektivní dynamickou viskozitu  $\mu_{ef}$ .

Takto definovaná viskozita je implementována pomocí tzv. *User Defined Function* – *UDF*. Jedná se o textový soubor ve formátu `.c`, pomocí kterého je možné definovat například pohyb sítě, rychlostní profil na okrajové podmínce atd. Ke změně vlastností materiálu se používá makro `DEFINE_PROPERTY(jméno, c, t)`. Smykový spád  $\dot{\gamma}$  je volán z programu FLUENT pomocí příkazu `C_STRAIN_RATE_MAG(c, t)`. UDF je načtena do pomoci příkazu `functions>user-defined>interpreted` a musí být uložena přímo v pracovní složce. Zde je uvedena UDF pro řídicí proud v cívce  $I = 1,5$  A:

```

#include "udf.h"
#define muOFF 0.1456
#define tauY 23154
DEFINE_PROPERTY(apparent_vis_15A_1000_01456,c,t)
{
real x[ND_ND];
real mu_ef;
real gamma = C_STRAIN_RATE_MAG(c,t);
if(gamma!=0){
mu_ef = muOFF + tau/gamma;}
else{
mu_mag = 1000;
}
return mu_ef;
}

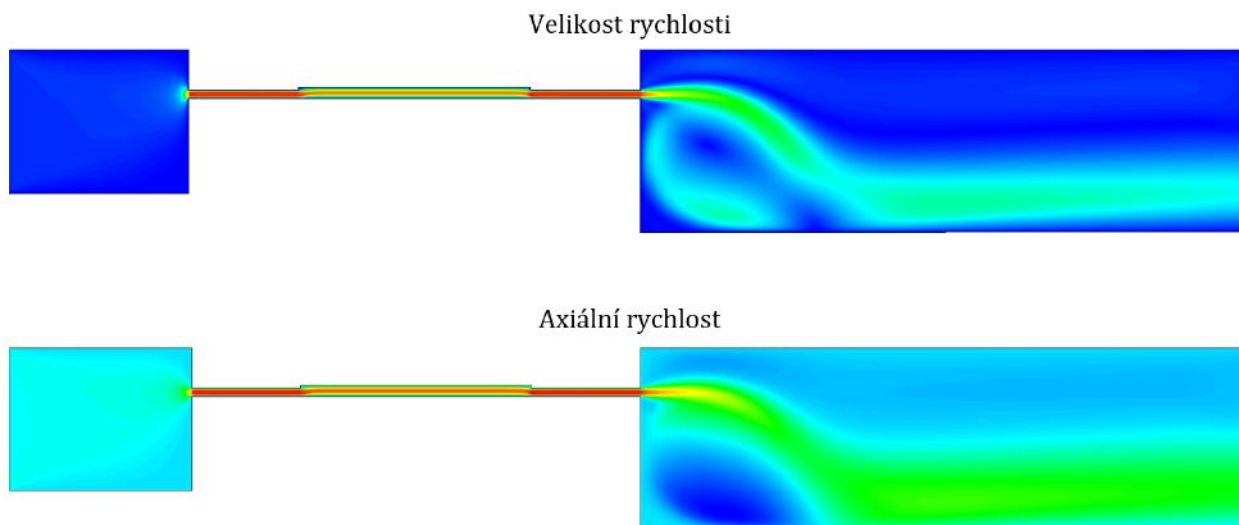
```

Podmínka `if` v UDF říká, že pokud je smykový spád různý od nuly, bude dopočítána hodnota efektivní viskozity dle (4.1). Podmínka `else` zabraňuje, aby rostla velikost  $\mu_{ef}$  nade všechny meze, je-li hodnota smykového spádu rovna nule. V takovém případě bude dosazena dostatečně velká hodnota dynamické viskozity  $1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , která je platná pro tzv. *pre-yield* oblast (viz. Obr. 3.11 na straně 46), kde se MR kapalina chová jako „tuhé“ těleso. UDF je poté nahrána přes *user-defined* viskozitu nového materiálu a zadané viskozitě  $\rho = 3140 \text{ kg/m}^3$ .

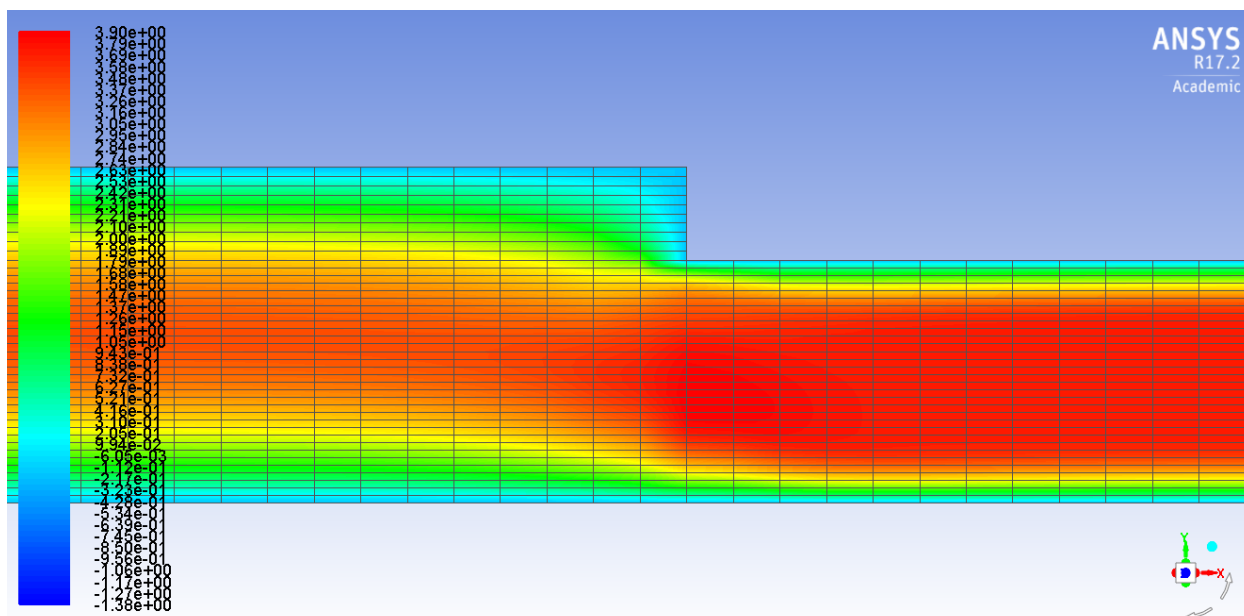
#### 4.2.4 Výsledky

Následují výsledky CFD simulace a jejich porovnání s experimentálními daty. Rychlostní profily zde uvedené jsou vyhodnocovány v řezech I, II a III z Obr. 4.5, přičemž řez II je v  $x$ -ové souřadnici  $= 0 \text{ mm}$  a řezy I a III jsou symetricky ve vzdálenosti  $\pm 14 \text{ mm}$ .

Na Obr. 4.12 je zobrazena velikost rychlosti a axiální rychlost v rovinném řezu doménou pro řídicí proud  $I = 1,5 \text{ A}$  a rychlost na vstupu  $v = 0,2 \text{ m/s}$ . Poté následuje detailní pohled na rozložení rychlosti v oblasti spáry (aktivní zóny).

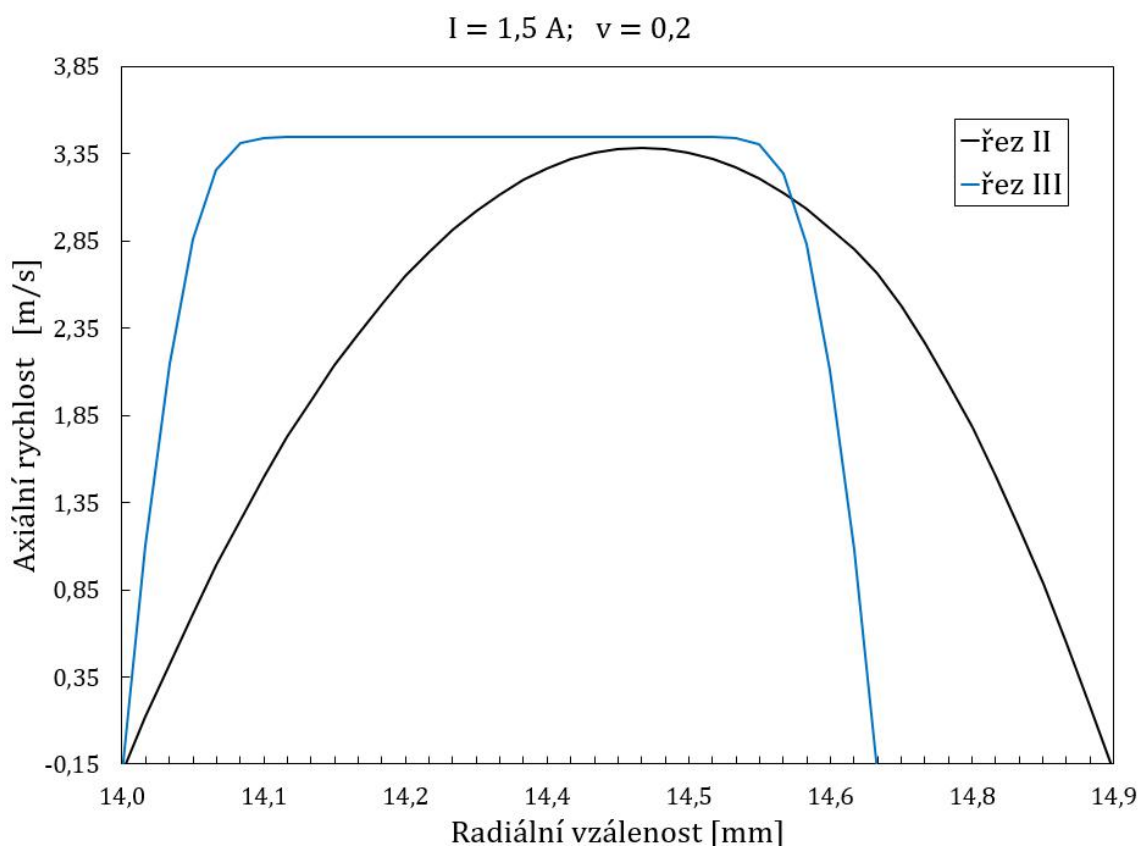


Obr. 4.12: Rozložení rychlosti v rovině  $xy$ ; *velocity magnitude* (nahore) a *x-velocity* (dole).



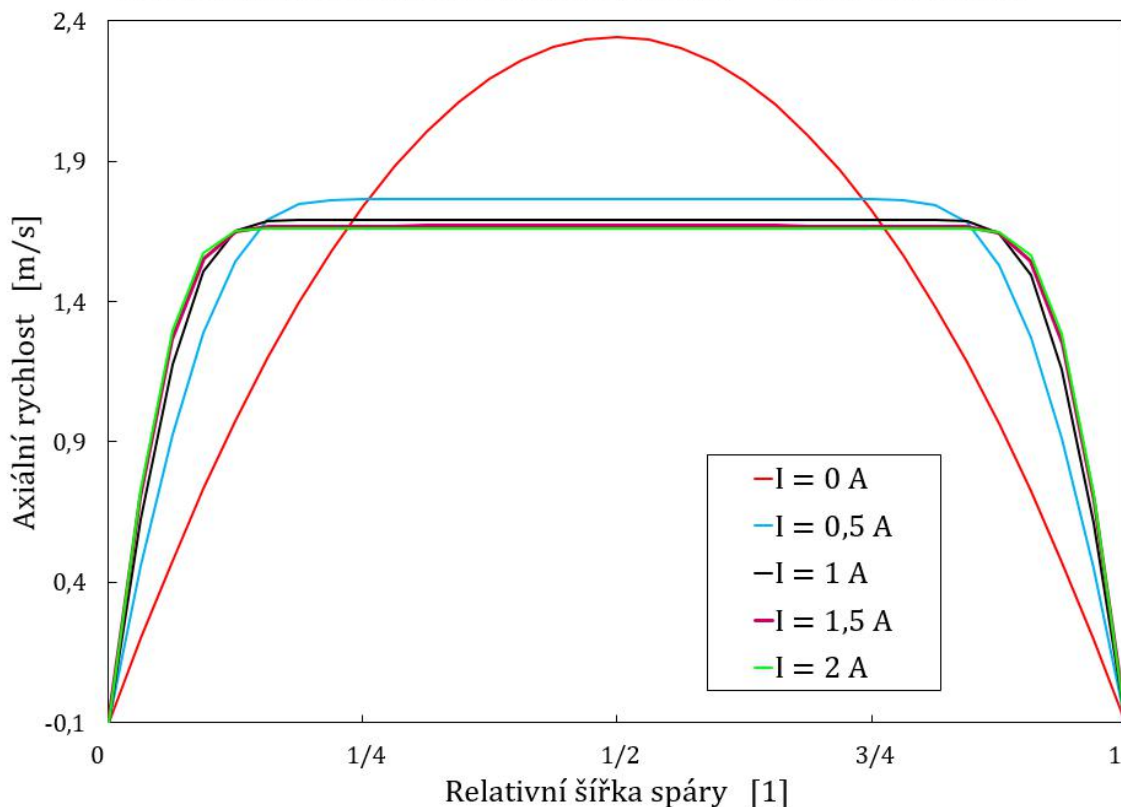
Obr. 4.13: Rozložení rychlosti v rovině  $xy$  v oblasti přechodu rozšíření do aktivní zóny s viditelnou výpočetní sítí.

Na Obr. 4.13 je zachycen přechod MR kapaliny z rozšířené oblasti (řez II), kde nepůsobí magnetické pole do aktivní zóny (zde řez III), ve které je proudění ovlivněno magnetickým polem. Níže jsou vykresleny rychlostní profily v řezu II a III, ve kterých je patrný parabolický profil pro kapalinu v neaktivované oblasti a typický Binghamský profil pro MR kapalinu v magnetickém poli.

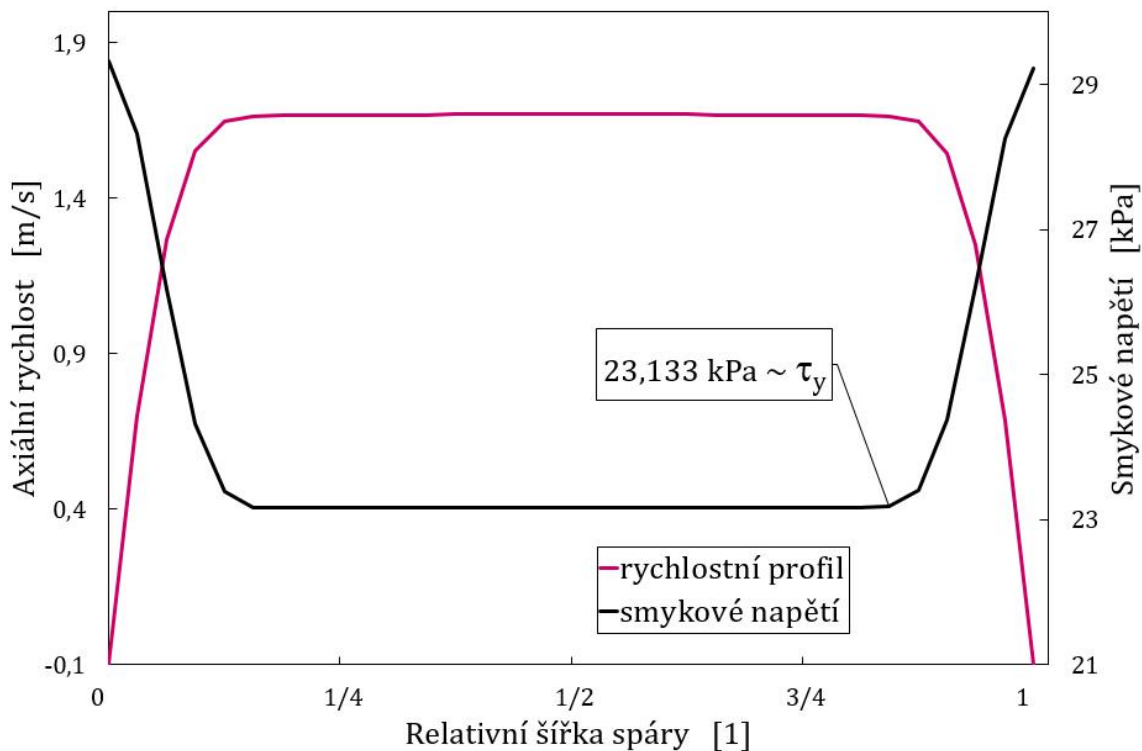


Obr. 4.14: Rychlostní profil po šířce spáry v řezu II a III.

Porovnání rychlostních profilů pro rychlost  $v = 0,1$  m/s na vstupu



Obr. 4.15: Rychlostní profily v aktivní zóně ( $=0,65$  mm) pro různé řídicí proudy.



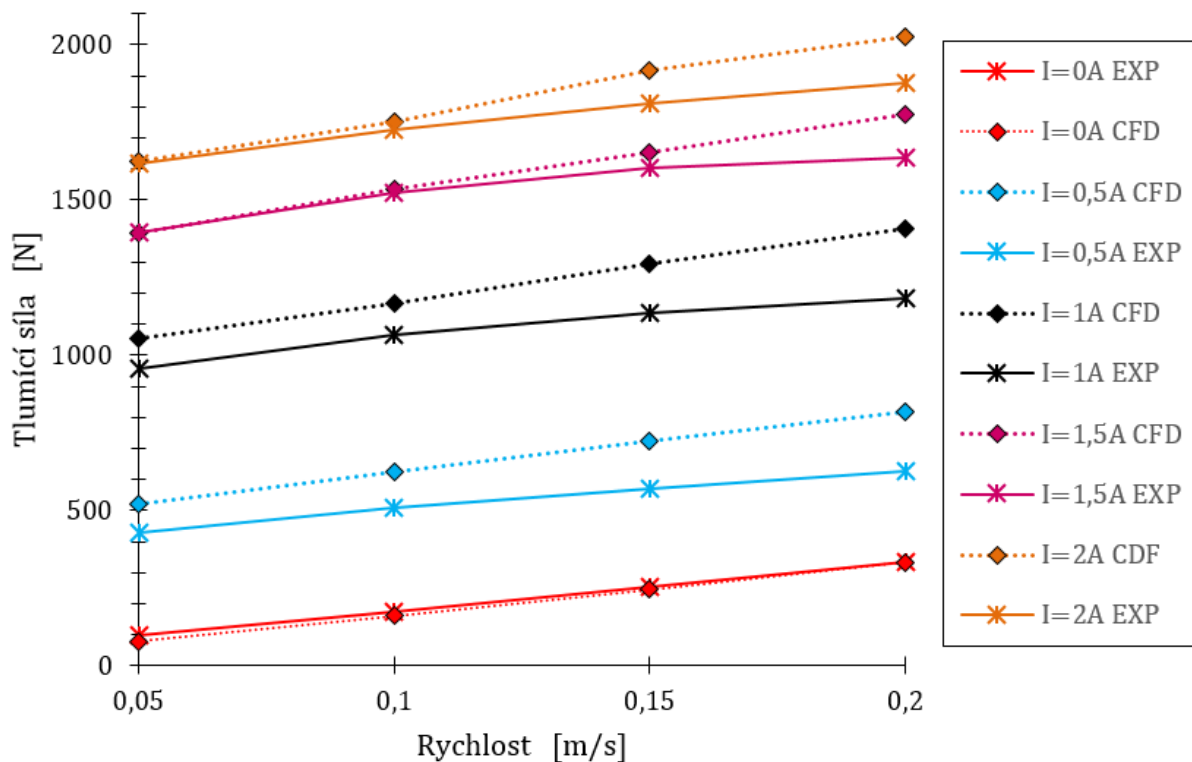
Obr. 4.16: Rychlostní profil a rozložení smykového napětí  $\tau$  v aktivní zóně pro  $I = 1,5$  A a  $v = 0,1$  m/s.

Z Obr. 4.15 lze vysledovat, že s narůstajícím proudem v cívce klesá maximální rychlost v aktivní zóně. To v konečném důsledku znamená, že se musí rozšířit tzv. *pre-yield* oblast (viz Obr. 3.13), má-li být zachována rovnice kontinuity. Zmíněné rozšíření je zde možno také pozorovat,

i když u vyšších proudů již není tolik markantní. Ke zvětšení oblasti, ve které se MR kapalina chová jako „tuhé“ těleso a pro kterou platí rovnice (3.16) dochází v důsledku vyšší meze toku  $\tau_y$  u vyšších proudů a platí zde  $\tau < \tau_y$ . Z Obr. 4.16 je vidět, že k přechodu MR kapaliny. Přechod MR kapaliny do „tuhého“ stavu je znázorněn na Obr. 4.16 a je z něj patrné, že MR kapalina teče, je-li smykové napětí větší než 23,133 kPa, což odpovídá mezi toku pro  $I = 1,5 A$ .

## Výsledná tlumící síla

Hlavním předmětem CFD výpočtu bylo určení tlumící síly MR tlumiče při různých řídicích prouděch a různých rychlostech pohybu. Byly vybrány čtyři rychlosti a pět proudů, což dává počet dvaceti jednotlivých bodů z F-v charakteristiky, viz Tab. 4.2. Jednotlivé body jsou spojeny přímkou. Hodnota tlumící síly byla vypsána přímo z programu Fluent a obsahuje tedy tlakovou i viskózní složku, přičemž viskózní síly tvoří cca 7 %. Na Obr. 4.17 jsou zaznamenány tlumící síly z CFD simulace a z experimentu.



Obr. 4.17: Porovnání F-v charakteristiky z CFD výpočtu s naměřenými daty.

Výsledky CFD simulace ukazují, že tlumící síla je, až na malou odchylku u proudu  $I = 2 A$ , přímo úměrná rychlosti pohybu pístu. Experimentální data vykazují stejnou lineární závislost pro malé rychlosti pohybu pístu. Z Obr. 4.17 je vidět pokles směrnice experimentální síly (plnou čarou) při vyšších prouděch a rychlostech, což může být zapříčiněno poklesem snížením viskozity  $\mu_{off}$  v důsledku ohřevu MR kapaliny, jenž nebyl při výpočtu uvažován.

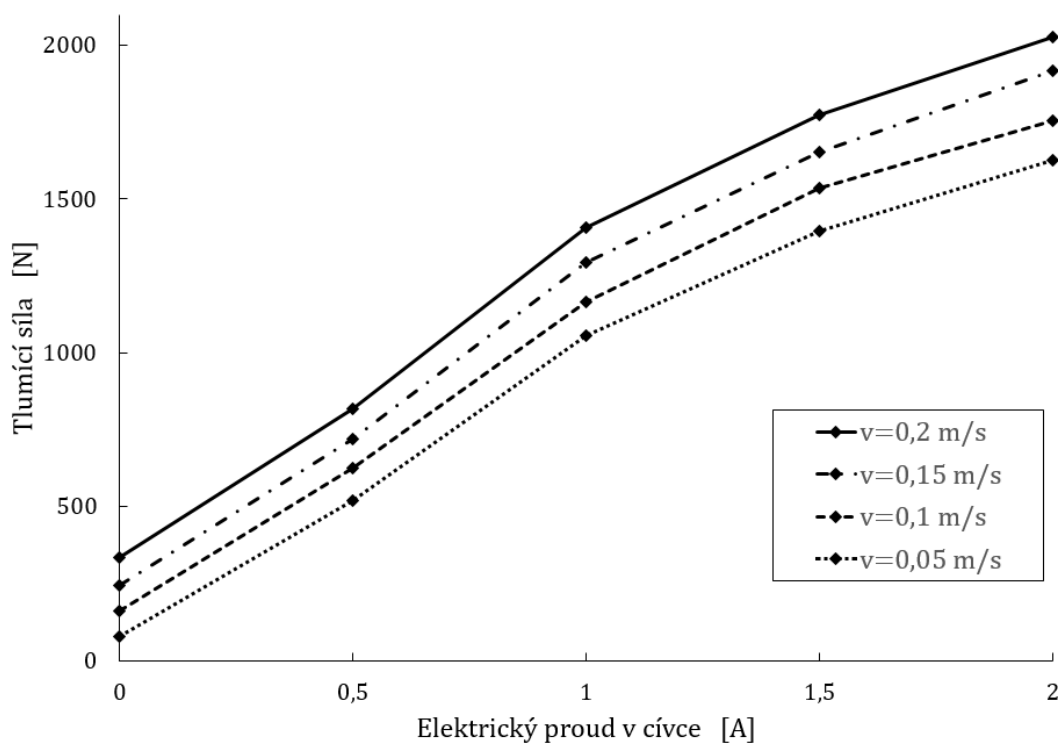
Nejlépejší shoda vypočtené tlumící síly se skutečnou tlumící silou je pro proudy 1,5 A a 2 A, u kterých je průměrná relativní odchylka cca 3,5 %. Největší odchylka simulace a experimentu je pozorována pro proud 0,5 A a 1 A. U těchto proudů nadhodnocuje CFD výpočet velikost tlumících sil v průměru o 19,1 %, viz Tab. 4.4 na následující straně. S ohledem na jinak dobře se shodující výsledky, není možné vyloučit chybné vstupní hodnoty intenzity magnetického pole získané z magnetostatické simulace. Potenciální nepřesnost je také v odečítání hodnoty meze

kluzu z grafu výrobce kapaliny MRF-132DG, i když citlivost tlumicí síly na změnu meze toku v rádech desítek  $Pa$  se ukázala jako velmi malá.

Tabulka 4.4: Relativní odchylka CFD řešení od experimentálních hodnot tlumicí síly.

		Relativní chyba [%]			
		v [m/s]			
I [A]	v [m/s]	0,05	0,1	0,15	0,2
0		-18,64	-8,01	-4,26	-1,03
0,5		21,40	22,83	27,04	30,18
1,0		10,16	9,34	13,77	18,71
1,5		-0,04	0,78	3,06	8,55
2,0		0,39	1,71	6,07	8,02
$\delta(v)$		8,00	8,57	12,48	16,37

V tabulce jsou také vypsány hodnoty průměrné relativní odchylky  $\delta(v)$ <sup>13</sup> pro danou rychlost pohybu tlumiče, která ukazuje, že CFD simulace je přesnější pro nižší rychlosti. Na Obr. 4.18 je vykreslen vliv řídicího proudu v cívice na tlumicí sílu pro konstantní rychlosti z CFD simulace.



Obr. 4.18: Vliv řídicího proudu na velikost tlumicí síly z CFD simulace při konstantních rychlostech.

Odklon naměřené tlumicí síly z F-v charakteristiky od hodnot získaných CFD výpočtem

<sup>13</sup>Do průměrné relativní odchylky nejsou zahrnuty hodnoty pro nulový proud, protože na něj byla optimalizována viskozita v neaktivovaném stavu.



je možné vysvětlit dvěma způsoby. První způsob již zde byl uveden a tím je pokles dynamické viskozity v neaktivovaném stavu v důsledku zvýšení teploty tlumiče. Je však otázkou, zda-li se na poklesu směrnicí síly nepodílí smykově-řídňující chování (*shear-thinning*) MR kapaliny zmíněné v kapitole 3.1.2 na straně 42. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik výpočtů, kde je namísto modelu Binghamské kapaliny použit model Herschel-Bulkley. Analogickou úpravou rovnice (3.14) jako v případě Binghamského modelu je poté možno psát UDF viskozitu:

```
#include "udf.h"
#define muOFF 0.1456
#define tauY 23154
DEFINE_PROPERTY(apparent_vis_15A_1000_n_01456,c,t)
{
  real x[ND_ND];
  real n = 0.9;
  real mu_eff;
  real gamma = C_STRAIN_RATE_MAG(c,t);
  if(gamma!=0){
    mu_eff = muOFF*pow(gamma,n-1) + tau/gamma;}
  else{
    mu_mag = 1000;
  }
return mu_mag;
}
```

Exponent  $n \in \langle 0; 1 \rangle$  udává tendenci ke smykově-řídňujícímu chování, ve výše uvedené UDF je jeho hodnota 0,9. Bylo provedeno několik výpočtů pro různé hodnoty  $n$ , ale došlo k velkému poklesu tlumící síly pro hodnoty  $n < 0,9$ . Pro  $n = 0,9$  byla tlumící síla<sup>14</sup> stále o 8 % menší než skutečná.

Je velmi pravděpodobné, že by se pomocí smykově-řídňujícího chování MR kapaliny dala přesně nastavit shoda CFD síly se skutečnou. Jelikož však není známo nakolik převažuje vliv zvyšování teploty nebo smykově-řídňujícího chování, nemusel by takový výpočet plně reprezentovat fyzikální podstatu chování MR kapaliny. Pro konstruktivní kritiku postupu výpočtu a validace výsledků — bylo by vhodné zjistit přesnou teplotu v každém zatěžovacím bodě nebo měření provádět při konstantní teplotě tlumiče → nutno chladit tlumič přímo na měřícím stroji či jej temperovat mezi měřeními jednotlivých bodů. Poté by se dal přesněji určit vliv teploty na výslednou tlumící sílu.

---

<sup>14</sup>Byl vybrán bod z F-v charakteristiky pro  $I = 1,5 A$  při rychlosti  $0,2 m/s$

## 5 | Závěr

Práce je rozdělena do dvou metodických okruhů a to na okruh řešeršní a analytický. První kapitola řešeršní části se věnuje hydrodynamickým tlumičům, kde byl vysvětlen rozdíl v hydraulickém obvodu jednoplášťových a dvouplášťových tlumičů plynoucí ze změny objemu vnitřního válce v důsledku pohybu pístnice. Do přehledu současného stavu techniky byly vybrány tlumiče, které jsou do jisté míry unikátní svým principem funkce a ty byly rozděleny podle schopnosti měnit tlumící charakteristiku na tlumiče **pasivní**, **adaptivní**, **semiaktivní** a **aktivní**. S ohledem na téma práce je větší pozornost věnována magnetoreologickým tlumičům.

V navazující kapitole je uvedena řešerše na téma magnetických kapalin. Po krátké úvodní části, která se zabývá historií vzniku těchto tzv. chytrých materiálů se práce zaměřuje na feromagnetické kapaliny a jejich matematický popis. Velikost feromagnetických částic v řádech několika nanometrů sice zaručuje koloidní stabilitu feromagnetických kapalin, ale také výrazně snižuje maximální dosažitelnou mez toku ( $\tau_y$ ), což je činí nepoužitelnými pro aplikace vyžadující přenos velkých smykových napětí a sil, tedy například tlumiče. Magnetoreologické kapaliny mají schopnost zvýšit mez toku až do okamžiku úplné ztráty tekutosti. V této části byl kromě mechanismu zvýšení efektivní viskozity a tvorby řetězců v kapalině popsán také efekt negativní viskozity vznikající v důsledku oscilujícího magnetického pole a byl zde uveden Binghamský pseudoplastický model kapaliny a Herschel-Bulkey model kapaliny, které jsou využity ve výpočetní části práce.

Hlavním cílem analytické části práce bylo navrhnutí postupu CFD výpočtu proudění MR kapaliny v tlumiči za účelem zjištění tlumící síly při známém pohybu tlumiče a elektrickém proudu v cívce pístu. K tvorbě výpočetní sítě byl použit program ANSYS Workbench 17.2, CFD výpočet byl proveden v programu ANSYS Fluent 17.2. Úloha je osově symetrická, a proto byl v prvotní fázi proveden komparativní výpočet tlumící síly v případě rovinné axisymetrické úlohy, 3D periodické úlohy a plného 3D řešení s použitím různých výpočetních modelů. Výsledky ukázaly, že rovinná úloha se rozchází s experimentálními daty v případě proudění MR kapaliny pod vlivem magnetického pole a z tohoto důvodu byla zvolena periodická úloha pod výsekem  $20^\circ$  a laminární model proudění. Plné 3D řešení není vhodné s ohledem na výpočetní čas, jelikož počet prvků sítě periodické úlohy byl téměř 1,2 mil. Po definování okrajových podmínek, s využitím například podmínky `periodic` a `moving wall`, která reprezentuje ulpívání kapaliny na stěnách pohybujícího se pístu, byla provedena studie nezávislosti řešení na výpočetní síti. Pro správné řešení bylo třeba použít 32 hexagonálních prvků sítě ve spáře o velikosti  $0,65 \text{ mm}$ .

Díky velké citlivosti dynamické viskozity v neaktivovaném stavu ( $\mu_{off}$ ) na teplotu MR kapaliny a skutečnosti, že teplota při provedeném měření F-v charakteristiky reálného tlumiče nebyla změřena dostatečně přesně, bylo nutno iterativním způsobem dopočítat dynamickou viskozitu v neaktivovaném stavu. Po určení  $\mu_{off}$  byla definována efektivní viskozita  $\mu_{ef}$  Binghamským modelem pseudoplastické kapaliny, která byla pomocí UDF načtena do programu Fluent, čímž byl zahrnut vliv magnetického pole na MR kapalinu.

Magnetostatická analýza prokázala homogenní rozložení magnetického pole po délce aktivních oblastí, což zjednodušilo implementaci Binghamské kapaliny jako dalšího materiálu do výpočetní domény. Vypočtená tlumící síla dobře koresponduje s naměřenou silou při experimentu, od které musela být odečtena hodnota třecí síly v těsnících prvcích tlumiče. Zejména pro proudy  $I = 0 \text{ A}$ ,  $I = 1,5 \text{ A}$  a  $I = 2 \text{ A}$  odpovídá velikost vypočtené tlumící síly velikosti síly naměřené, přičemž průměrná relativní odchylka pro čtyři body charakteristiky u proudu  $I = 1,5 \text{ A}$  je 3,1 %. U proudů  $I = 0,5 \text{ A}$  a  $I = 1 \text{ A}$  nadhodnocuje CFD výpočet velikost síly znatelně více — v průměru o cca 19,1 %. S ohledem na jinak malou odchylku u ostatních proudů, musí být zřejmě chybně spočtena velikost intenzity magnetického nebo došlo ke změně závislosti meze toku na intenzitě magnetického pole uváděné výrobcem kapaliny MRF-132DG.

Průběh vypočtené tlumící síly je lineární na rozdíl od průběhu síly skutečné, která má tendenci snižovat směrnici s vyššími rychlostmi. Tento jev zde byl vysvětlen dvěma způsoby a to snížením viskozity v důsledku zvýšení teploty MR kapaliny a smykově-řídnuocímú (*shear-thinning*) chování nenevtonovských kapalin. Bylo provedeno několik výpočtů s použitím modelu Herschel-Bulkey, jenž zahrnuje vliv jak magnetického pole, tak i vliv smykového řídnutí vznikajícího kvůli přetrhávání řetězců feromagnetických částic. Výsledná síla byla menší a její velikost byla silně ovlivněna volbou exponentu  $n$  v použitém modelu. Je nutno zmínit fakt, že neznalost teploty MR kapaliny v každém měřeném bodě vnáší do vyhodnocení experimentu značnou nejistotu. Z tohoto důvodu není možné řádně vyšetřit, zda k poklesu směrnice tlumící síly dochází v důsledku zvýšení teploty nebo smykového řídnutí; dokonce nelze vyloučit ani součinnost obou mechanismů. Pro budoucí měření by bylo vhodné odvádět přebytečné teplo z tlumiče efektivním chlazením nebo přesně měřit teplotu uvnitř tlumiče při každém měřeném bodu. Pokud by i při konstantní teplotě kapaliny měla tlumící síla tendenci klesat, potvrdilo by se tak smykově-řídnuocí chování MR kapalin.

# Seznam obrázků

2.1	Skutečná charakteristika tlumiče pro kolejová vozidla. Vlevo - závislost síly na zdvihu při různých rychlostech. Vpravo - závislost síly na rychlosti s patrnou náběhovou (průtokový ventil) a omezovací větví (omezovací ventil). . . . .	18
2.2	Schéma jednoplášťového tlumiče [1]. . . . .	19
2.3	Schéma dvouplášťového tlumiče [2]. . . . .	19
2.4	Princip funkce kataraktu [2]. . . . .	20
2.5	KONI FSD tlumič [3]. . . . .	21
2.6	King IBS tlumič [4]. . . . .	21
2.7	Monroe DCD tlumič [5]. . . . .	22
2.8	ZF Sachs SDC tlumič s plovoucím pístem [6]. . . . .	23
2.9	ZF Sachs Nivomat tlumič [7]. . . . .	23
2.10	Nastavitelný dvoucestný ventil firmy Armstrong [8]. . . . .	24
2.11	KONI manuálně nastavitelný tlumič vrtění [13]. . . . .	25
2.12	KONI elektronicky řízený tlumič; detail na zavřený a otevřený ventil [13]. . . . .	26
2.13	Schéma semiaktivního CDC tlumiče ( <i>vlevo</i> ) a charakteristika idealizovaného a semiaktivního tlumiče ( <i>vpravo</i> ) [16]. . . . .	27
2.14	Jednoplášťový MR tlumič [20]. . . . .	28
2.15	Součásti dvouplášťového MR tlumiče se dvěma cívkami [23]. . . . .	29
2.16	Řez MR tlumičem pro tlumení příčných vibrací vlaku. 1-pístnice, 2-vnitřní válec, 3-akumulační prostor, 4/5-zpětný ventil, 6-dno, 7-spojovací trubice, 8-magnetoreologický píst, 9-elektromagnetická cívka [24]. . . . .	30
2.17	Charakteristika MR tlumiče, při různých velikostech řídicího proudu [24]. . . . .	30
2.18	Schéma radiálního MR pístu [26]. . . . .	31
2.19	Rozložení magnetického toku v okolí MR cívky [26]. . . . .	31
2.20	Hybridní MR tlumič kombinující MR kapalinu a hydraulický olej [20]. . . . .	32
2.21	Schéma hybridního MR tlumiče [28]. . . . .	32
2.22	Schéma self-sensing MR tlumiče (IDRS) [29]. . . . .	33
2.23	Sestava tlumícího systému a) klasického magnetoreologického tlumiče; b) autonomního magnetoreologického tlumiče [30]. . . . .	34
2.24	Self-sensing MR tlumič s generací energie [30]. . . . .	35
2.25	Schéma aktivního tlumiče [43]. . . . .	35
3.1	Ing. Rabinow při demonstraci magnetoreologické kapaliny [25]. . . . .	37
3.2	Schéma odpuzujících se nanočástic potažené surfaktantem [47]. . . . .	39
3.3	Typická magnetizační křivka feromagnetické kapaliny [54]. . . . .	39
3.4	Experimentální schéma Couettova proudění s přechodem do oblasti Taylorových vírů [55]. . . . .	41
3.5	Závislost relativní změny viskozity feromagnetické kapaliny na oscilujícím magnetickém poli [47]. . . . .	41
3.6	Závislost experimentální změny viskozity ve srovnání s teorií dle Shliomise [47]. . . . .	42
3.7	Závislost magnetoviskózního efektu na smykovém spádu [47]. . . . .	42
3.8	Řetězcové formace částic vzniklé vzájemnou dipólovou interakcí. . . . .	44

3.9	Feromagnetická kapalina „přitažená“ elektromagnetem na vzálenost 5 cm [54]. . . . .	44
3.10	Základní pracovní módy MR kapaliny: (a) ventilový; (b) smykový; (c) squeeze-filmový [59]. . . . .	45
3.11	Rychlostní profil Binghamské/MR kapaliny a průběh smykového napětí v homogenním magnetické poli [64]. . . . .	46
3.12	B-H charakteristika kapaliny MRF-132DG od společnosti Lord [67]. . . . .	48
3.13	Závislost meze toku na intenzitě magnetického pole. Měřena kapalina MRF-132DG od společnosti Lord [67]. . . . .	49
4.1	MR tlumič Delphi v řezu. . . . .	51
4.2	Detail pístu MR tlumiče Delphi. . . . .	52
4.3	F-v charakteristika MR tlumiče při různých řídicích proudech. . . . .	52
4.4	F-v charakteristika MR tlumiče při různých řídicích proudech. . . . .	53
4.5	Výpočetní doména jako 20° výseč a okrajové podmínky. . . . .	54
4.6	Porovnání periodické úlohy s 3D úlohou při použití různých modelů proudění. . . . .	55
4.7	Mesh independence study — závislost výsledné síly na kvalitě sítě. . . . .	56
4.8	Výpočetní síť. . . . .	56
4.9	Detail výpočetní sítě u oblasti vstupu do aktivní zóny. . . . .	57
4.10	Rozdělení domény na zóny s newtonovskou kapalinou a Binghamskou kapalinou. Ve spodní části detail na rozložení magnetického pole ve šterbině. . . . .	57
4.11	Grafická závislost dynamické viskozity kapaliny MRF-132DG na teplotě. . . . .	58
4.12	Rozložení rychlosti v rovině xy; velocity magnitude (nahore) a x-velocity (dole). . . . .	60
4.13	Rozložení rychlosti v rovině xy v oblasti přechodu rozšíření do aktivní zóny s viditelnou výpočetní sítí. . . . .	61
4.14	Rychlostní profil po šířce spáry v řezu II a III. . . . .	61
4.15	Rychlostní profily v aktivní zóně (=0,65 mm) pro různé řídicí proudy. . . . .	62
4.16	Rychlostní profil a rozložení smykového napětí $\tau$ v aktivní zóně pro $I = 1,5$ A a $v = 0,1$ m/s. . . . .	62
4.17	Porovnání F-v charakteristiky z CFD výpočtu s naměřenými daty. . . . .	63
4.18	Vliv řídicího proudu na velikost tlumící síly z CFD simulace při konstantních rychlostech. . . . .	64

# Literatura

- [1] PARSIA SHOCK. Unique & advanced technology designed for better performance and long life. <http://www.parsiashock.com/english/tech2.asp/>, 2008.
- [2] PŘIKRYL M. *Hydrodynamické tlumiče na principu magnetické kapaliny*. Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. František Pochylý, CSs., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
- [3] AUTODÍLY MJAUTO. Koni tlumiče pérování - sportovní tlumiče pérování. [http://www.mjauto.cz/KONI\\_tlumice.htm/](http://www.mjauto.cz/KONI_tlumice.htm/), 2013.
- [4] FOURWHEELER NETWORK. King ibp internal bypass shocks - internal bypass oil flow compression. <http://www.fourwheeler.com/how-to/1102or-king-ibp-internal-bypass-shocks/photo-06.html/>, 2013.
- [5] TENNECO. Monroe intelligent suspension. <http://www.monroe.com/en-emea/>, 2015.
- [6] ZF SACHS. Zf sdc sensitive damping control animation. <http://www.youtube.com/watch?v=KLlzz4QXHKA/>, 2010.
- [7] AUTODÍLY MJAUTO. Boge – Sachs Nivomat. <http://www.mjauto.cz/boge-sachs-nivomat/>, 2013.
- [8] MGAGURU. Valving for armstrong shock absorbers- FS-119. [http://mgaguru.com/mgtech/suspensn/pics/shock\\_v.gif/](http://mgaguru.com/mgtech/suspensn/pics/shock_v.gif/), 2010.
- [9] KONI. Adjustment guides. <http://www.koni.com/en-US/Cars/Technology/Adjustment-Guides>, 2015.
- [10] TEIN. Micro speed valve(m.s.v.). <http://www.tein.co.jp/e/products/msv.html/>, 2008.
- [11] QA1. Adjustability. <http://www.qa1.net/suspension/shock-technology/adjustability>, 2017.
- [12] STROJÍRNA OSLAVANY spol. s r.o. Tlumiče řady R110. <http://www.st-os.cz/cz/tlumice/>, 2005.
- [13] KONI. Dampers for railway rolling stock (unpublished document). 2000.
- [14] XIN-JIE Zhang, KONG-HUI Guo, and MEHDI Ahmadian. On the benefits of semi-active suspensions with inerters. *Shock and Vibration*, 19(3):257–272, 2012.
- [15] DYKE S.J. and SPENCER B.F. A comparison of semi-active control strategies for the mr damper. In *Intelligent Information Systems, 1997. IIS '97. Proceedings*, pages 580–584. IEEE Publishing, 1997.

- [16] ZF SACHS. Intelligent suspension systems CDC (unpublished document). 2004.
- [17] LORD CORPORATION. Automotive suspension systems. <http://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/automotive-suspension-systems/>, 2017.
- [18] YANG G., SPENCER B.F., CARLSON J.D., and SAIN M.K. Large-scale mr fluid dampers. *Engineering Structures*, 24(3):309–323, 2002.
- [19] AHMADIAN M. and POYNOR J.C. An evaluation of magneto rheological dampers for controlling gun recoil dynamics. *Shock and Vibration*, 8(3-4):147–155, 2001.
- [20] POYNOR J.C. *Innovative designs for magneto-rheological dampers*. PhD thesis, Virginia Tech, 2001.
- [21] WANG D.H. and LIAO W.H. Magnetorheological fluid dampers. *Smart Materials and Structures*, 20(2):023001, 2011.
- [22] MURAKAMI Takahiro, SAKAI Michiya, and NAKANO Masami. Study on the development of passive mr damper with displacement-dependent damping characteristics. *Journal of Fluid Science and Technology*, 5(2):86–97, 2010.
- [23] SIMON D.E. Experimental evaluation of semiactive magnetorheological primary suspensions for heavy truck applications, 1998.
- [24] GUO Chaoyang, GONG Xinglong, ZONG Luhang, PENG Chao, and XUAN Shouhu. Twin-tube-and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(1):48–57, 2015.
- [25] BOSSIS G. *Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions: Proceedings of the Eighth International Conference, Nice, France, 9-13 July 2001*. World Scientific, 2002.
- [26] BAI XX., WANG DH., and FU H. Principle, modeling, and testing of an annular-radial-duct magnetorheological damper. *Sensors and Actuators A: Physical*, 201:302–309, 2013.
- [27] WANG DH., LIAO WH., and AI HX. A magnetorheological valve with both annular and radial fluid flow resistance gaps. *Smart Materials and Structures*, 18(11):115001, 2009.
- [28] SEBESAN I., BAIASU D., and GHITA G. A magneto rheological hybrid damper for railway vehicles suspensions. *INCAS-National Institute for Aerospace Research „Elie Carafoli“*, 4(3):47–62, 2012.
- [29] WANG D.H. and WANG T. Principle, design and modeling of an integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper based on electromagnetic induction. *Smart Materials and Structures*, 18(9):095025, 2009.
- [30] CHEN C. and LIAO W.H. A self-sensing magnetorheological damper with power generation. *Smart Materials and Structures*, 21(2):025014, 2012.
- [31] WANG Ruichen, GU Fengshou, CATTLEY Robert, and BALL Andrew D. Modelling, testing and analysis of a regenerative hydraulic shock absorber. *Energies*, 5(386), 2016.
- [32] AVADHANY S., ABEL P., TARASOV V., and ANDERSON Z. Regenerative shock absorber. *U.S. Patent Application*, page No. 2009/0260935 A1, 2009.

- [33] SEGEL L. and LU X. Vehicular resistance to motion as influenced by road roughness and highway alignment. *Australian Road Research*, 12(4):211–222, 1982.
- [34] ZYGA L. Energy harvesting shock absorber technology wins rd 100 award. *Phys. Org*, 2011.
- [35] LI Z., BRINDAK Z., and ZUO L. Modeling of an electromagnetic vibration energy harvester with motion magnification. In *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Denver, CO, USA*, 11-17:285–293, 2011.
- [36] KIM HC., SHIN YJ., YOU W., JUNG K.Ch., OH JS., and CHOI SB. A ride quality evaluation of a semi-active railway vehicle suspension system with mr damper: Railway field tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(3):306–316, 2017.
- [37] SUN S., YANG J., LI W., DENG H., DU H., and ALICI G. Development of a novel variable stiffness and damping magnetorheological fluid damper. *Smart Materials and Structures*, 24(8):085021, 2015.
- [38] DING Y., ZHANG L., ZHU HT., and LI ZX. A new magnetorheological damper for seismic control. *Smart Materials and Structures*, 22(11):115003, 2013.
- [39] MACHÁČEK O. *MR vzpěra pro vibroizolační Stewardovu plošinu pro kosmonautiku*. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSs., Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
- [40] HU G., LONG M., YU L., and LI W. Design and performance evaluation of a novel magnetorheological valve with a tunable resistance gap. *Smart Materials and Structures*, 23(12):127001, 2014.
- [41] ICHWAN B., MAZLAN SA., IMADUDDIN F., KOGA T., and IDRIS MH. Development of a modular mr valve using meandering flow path structure. *Smart Materials and Structures*, 25(3):037001, 2016.
- [42] GRUNWALD A. and OLABI AG. Design of magneto-rheological (mr) valve. *Sensors and Actuators A: Physical*, 148(1):211–223, 2008.
- [43] KOCK F. and FERRARI C. Flatness-based high frequency control of a hydraulic actuator. In *ASME. J. Dyn. Sys.*, page 134(2). Meas., Control, 2011.
- [44] SU-GIL Lee and SEONG-HO Han. The study of tilting actuator control for korea tilting train. In *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2011 8th International Conference on*, pages 840–841. IEEE Publishing, 2011.
- [45] UMEHARA Yasuhiro, KAMOSHITA Shogo, ISHIGURI Kotaro, and YAMANAGA Yusuke. Development of electro-hydraulic actuator with fail-safe function for steering system. *Quarterly Report of RTRI*, 55(3):131–137, 2014.
- [46] MONROE USA. Acocar. <http://www.monroeintelligentsuspension.com/products/acocar/>, 2015.
- [47] ODENBACH S. and THURRN S. Magnetoviscous effects in ferrofluids. Technical report, ISBN 3—540—43068—7, Springer-Verlag, Heidelberg, 2002.
- [48] MAYER D. Magnetické kapaliny a jejich použití (1. část). *ELEKTRO, Sv. 3*, 2007.



- [49] SHLIOMIS M. I. and ZAITSEV V. M. Entrainment of ferromagnetic suspension by a rotating field. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 10(5):696–700, 1969.
- [50] BLUMS E., CEBERS A., and MAIOROV M. *Magnetic fluids*. Walter de Gruyter, 1997.
- [51] CONCEPT ZERO. A brief history of ferrofluid. <http://www.czferro.com/news1/2014/10/27/history-of-ferrofluids/>, 2014.
- [52] DERIN B. and GENC S. Field responsive fluids - a review. *Key Engineering Materials*, 521:87–99, 9 2012.
- [53] ROSENSWEIG R.E. *Ferrohydrodynamics*. Courier Corporation, 1985.
- [54] ODENBACH S. Ferrofluids — magnetically controlled suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 217(1–3):171 – 178, 2003. Symposium C of the E-MRS 2002 Spring Meeting in Strasbourg, France.
- [55] G.I. TAYLOR. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 223:289–343, 1923.
- [56] de VICENTE J., KLINGENBERG D.J., and HIDALGO-ALVAREZ R. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*, 7(8):3701–3710, 2011.
- [57] WANG J., MENG G., and HAHN N., FENGE.J. Dynamic performance and control of squeeze mode mr fluid damper–rotor system. *Smart Materials and Structures*, 14(4):529, 2005.
- [58] GONCALVES F.D. and CARLSON J.D. An alternate operation mode for mr fluids—magnetic gradient pinch. *Journal of Physics: Conference Series*, 149(1):012050, 2009.
- [59] de VICENTE J., RUIZ-LÓPEZ J.A., ANDABLO-REYES E., SEGOVIA-GUTIÉRREZ J.P., and HIDALGO-ALVAREZ R. Squeeze flow magnetorheology. *Journal of Rheology*, 55(4):753–779, 2011.
- [60] JANÍČEK P. *Mechanika těles*. CERM, Brno, 3., přeprac. vyd., v akademickém nakl. cerm 1. edition, 2004.
- [61] BUTZ T. and VON STRYK O. Modelling and simulation of electro-and magnetorheological fluid dampers. *ZAMM*, 82(1):3, 2002.
- [62] JOLLY M.R., BENDER J.W., and CARLSON J.D. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. In *5th annual international symposium on smart structures and materials*, pages 262–275. International Society for Optics and Photonics, 1998.
- [63] LI W.H., CHEN G., and YEO S.H. Viscoelastic properties of mr fluids. *Smart Materials and Structures*, 8(4):460, 1999.
- [64] GONCALVES F.D. *Characterizing the behavior of magnetorheological fluids at high velocities and high shear rates*. PhD thesis, Virginia Tech, 2005.
- [65] GOŁDASZ J. and SAPIŃSKI B. *Erratum to: MR Fluids*, pages E1–E1. Springer International Publishing, Cham, 2015.

- [66] STRECKER Z. *Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče*, 2013.
- [67] LORD CORPORATION. Magneto-rheological product MRF-132DG. <http://http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/mrf-132dg-magneto-rheological-fluid/>, 2017.
- [68] LIU B., LI WH., KOSASIH P.B., and ZHANG XZ. Development of an mr-brake-based haptic device. *Smart materials and structures*, 15(6):1960, 2006.
- [69] YADMELLAT P. and KERMANI M.R. Adaptive modeling of a magnetorheological clutch. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(5):1716–1723, Oct 2014.
- [70] RAJ K., MOSKOWITZ B., and CASCIARI R. Advances in ferrofluid technology. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 149(1):174 – 180, 1995.
- [71] MITAMURA Y., ARIOKA S., SAKOTA D., SEKINE K., and AZEGAMI M. Application of a magnetic fluid seal to rotary blood pumps. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(20):204145, 2008.
- [72] CHEN J. and LIAO W.H. Design, testing and control of a magnetorheological actuator for assistive knee braces. *Smart Materials and Structures*, 19(3):035029–035029, 2010.
- [73] JORDAN A., SCHOLZ R., WUST P., FÄHLING H., and FELIX R. Magnetic fluid hyperthermia (mfh): Cancer treatment with ac magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 201(1):413–419, 1999.
- [74] ROUPEC J. Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení. 2011.
- [75] DYKE S.J. and SPENCER B.F. A comparison of semi-active control strategies for the mr damper. In *Intelligent Information Systems, 1997. IIS '97. Proceedings*, pages 580–584. IEEE Publishing, 1997.
- [76] ALLOTTA B., PUGI L., and BARTOLINI F. Design and simulation of magneto-rheological dampers for railway applications.
- [77] BYRNE J.V. Ferrofluid hydrostatics according to classical and recent theories of the stresses. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 124(11):1089–1097, November 1977.
- [78] LANDAU L.D. and LIFSHITZ E.M. Mechanics of fluids. *Course of Theoretical Physics*, 6, 1985.

# Seznam použitých zkratek a symbolů

CDC	continous damping control	
CFD	výpočtové modelování proudění	
DCD	displacement conscious damping	
ECU	electronic control unit	
FSD	frequency selective damping	
IBP	internal bypass shock	
IRDS	itegrated relative displacement sensor	
MKP	metoda konečných prvků	
MR	magnetoreologická	
MRF	magnetoreologická kapalina	
SDC	sensitive damping control	
UDF	user defined function	
ÚK	Ústav konstruování	
$[\alpha]$	vztah mezi magnetickou a tepelnou energií	1
$[\alpha_0]$	konstanta	1
$[\gamma]$	relativní přetvoření	1
$[\dot{\gamma}]$	smykový spád	$s^{-1}$
$[\delta(v)]$	průměrná relativní odchylka	%
$[\varepsilon]$	relativní deformace	1
$[\Delta\eta]$	změna dynamické viskozity	$Pa \cdot s$
$[\lambda]$	vazebný parametr	1
$[\mu]$	dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
$[\mu_0]$	permeabilita vakua	$V \cdot s/A \cdot m$
$[\mu_{ef}]$	efektivní viskozita MR kapaliny	$Pa \cdot s$
$[\mu_{off}]$	dynamická viskozita v neaktivovaném stavu	$Pa \cdot s$
$[\mu_{MR}]$	relativní permeabilita MR kapaliny	$V \cdot s/A \cdot m$
$[\rho]$	hustota	$kg/m^3$
$[\sigma]$	normálové napětí	$Pa$
$[\tau]$	smykové napětí	$Pa$

$[\tau_y]$	mez toku (kluzu) kapaliny	$Pa$
$[\phi]$	objemová koncentrace částic MR kapaliny	1
$[\Phi]$	magnetický tok	$Wb$
$[\chi_{in}]$	susceptibilita	1
$[\chi_p]$	susceptibilita materiálu částic	1
$[\omega]$	úhlová rychlost	$rad/s$
$[B]$	magnetická indukce	$T$
$[c]$	parametr rychlostního profilu	1
$[d]$	průměr částice	$m$
$[e]$	Eulerovo číslo	1
$[E_H]$	magnetická energie	$J$
$[E_T]$	tepelná energie	$J$
$[f]$	frekvence	$Hz$
$[f_{mag}]$	hustota magnetické síly	$N/m^3$
$[F]$	tlumící síla	$N$
$[F_E]$	volná energie systému	$J$
$[F_K]$	magnetická (Kelvinova) síla	$N$
$[g_n]$	distribuční funkce	1
$[G]$	komplexní modul materiálu	$Pa$
$[H]$	intenzita magnetického pole	$A/m$
$[H_C]$	koercivita	$A/m$
$[I]$	elektrický proud	$A$
$[k_B]$	Boltzmanova konstanta	$J/K$
$[k_p]$	průměrný počet částic v řetězci	1
$[L], [g], [W]$	rozměry škrťícího kanálu	$m$
$[m]$	magnetický moment částice	$A \cdot m^2$
$[m_{chain}]$	magnetický moment řetězce	$A \cdot m^2$
$[M_0]$	spontánní magnetizace	$A/m$
$[M]$	magnetizace kapaliny	$A/m$
$[M_S]$	magnetizační saturace	$A/m$
$[\bar{M}]$	střední magnetizace	$A/m$
$[n]$	exponent modelu Herschel-Bulkley	1
$[\tilde{n}]$	počet částic v řetězci	1
$[n_{max}]$	maximální počet částic v řetězci	1
$[p]$	tlak	$Pa$
$[\Delta p]$	tlakový spád	$Pa$
$[Q]$	průtok	$m/s$
$[Re]$	Reynoldsovo číslo	1

$[R_i]$	poloměr Couettova válce	$m$
$[s]$	tloušťka vrstvy surfaktantu	$m$
$[S]$	plocha štěrbin	$m^2$
$[\tilde{S}]$	střední rychlost ve štěrbině	$m/s$
$[t]$	čas	$s$
$[T]$	teplota	$K$
$[v]$	rychlost	$m/s$
$[V]$	objem	$m^3$
$[w]$	šířka spáry Couettova válce	$m$
$[x]$	poloha příčnicku zkušebního stroje	$m$