



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU RYCHLÉHO  
MAGNETOREOLOGICKÉHO TLUMIČE BEZ POUŽITÍ  
FERITŮ**

THE DESIGN OF FAST MAGNETORHEOLOGICAL VALVES WITHOUT THE USE OF FERRITES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Strmiska**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.**

**BRNO 2017**





## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Bc. Tomáš Strmiska</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.</b>
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:

### **Návrh magnetického obvodu rychlého magnetoreologického tlumiče bez použití feritů**

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

Klasická konstrukce magnetického obvodu magnetoreologického tlumiče z konstrukční oceli neumožňuje dosažení rychlé časové odezvy. Dlouhá časová odezva je způsobena zejména vznikem vířivých proudů vznikajících přímo v magnetickém obvodu tlumiče. Vířivé proudy je možné eliminovat využitím magneticky vodivých, ale elektricky nevodivých materiálů. Tyto požadavky splňují například feritové materiály, ze kterých byla zkonstruována první generace rychlých MR tlumičů. Ferity ale mají velmi špatné mechanické vlastnosti a špatně se obrábí. Proto je třeba navrhnout jinou konstrukci.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

#### **Cíle diplomové práce:**

Cílem práce je konstrukční návrh pístní skupiny rychlého magnetoreologického ventilu bez použití feritových materiálů.

Dílní cíle diplomové práce:

- definovat vhodné materiály na konstrukci jader,
- provést simulace magnetického obvodu MR tlumiče,
- navrhnout vhodnou segmentaci jader,
- experimentálně ověřit magnetické modely.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, výkresy součástí, fotografická dokumentace, digitální data.

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

#### Seznam literatury:

HOLLAUS, K. a J. SCHOBEL. A Higher Order Multi-Scale FEM With A for 2-D Eddy Current Problems in Laminated Iron. IEEE Transactions on Magnetics [online]. 2015, 51(3), 1-4 [cit. 2016-11-02]. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2360075. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7093479/>

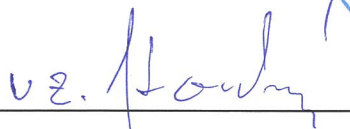
HIROSE, Y., D. HASEGAWA a Y. OHKI. Development of Low Loss Magnetodielectric Nanocomposites of Epoxy Resin and Iron Nanoparticles. Electrical Engineering in Japan [online]. 2015, 190(2), 17-23 [cit. 2016-11-02]. DOI: 10.1002/eej.22677. ISSN 0424-7760. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/eej.22677>

STRECKER, Z., J. ROUPEC, I. MAZUREK, O. MACHACEK, M. KUBIK a M. KLAPKA. Design of magnetorheological damper with short time response. Journal of Intelligent Material Systems and Structures [online]. 2015, 26(14), 1951-1958 [cit. 2016-11-02]. DOI: 10.1177/1045389X15591381. ISSN 1045-389x. Dostupné z: <http://jim.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1045389X15591381>

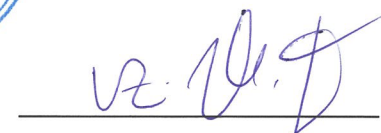
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016





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



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

---

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá vývojem nové generace magnetických obvodů rychlých magnetoreologických (MR) tlumičů, které nebudou využívat problematických feritových materiálů. Pro zajištění krátké časové odezvy je nutné zabránit vzniku vířivých proudů. S využitím metody konečných prvků byly navrženy 2 způsoby řešení – využití magneticky měkkých kompozitů s vysokým elektrickým odporem a vyhotovení drážek do kovového materiálu. Následně byly vyrobeny 2 magnetické obvody – jeden z kompozitu Sintex SMC prototyping material a druhý z oceli 11SMn30 se 48 hlubokými drážkami o šířce 0,35 mm. Oba byly implementovány do MR tlumiče a otestovány na hydraulickém pulsátoru. Výsledky experimentů byly porovnány s obvodem z 11SMn30 bez drážek a s obvodem s jádrem z feritu Epcos N87. Bylo zjištěno, že oba nové obvody zajistily stejně krátkou odezvu síly tlumiče na změnu elektrického proudu jako ferit a zároveň násobně větší dynamický rozsah. Oproti 11SMn30 bez drážek nové obvody zajistily cca 7x rychlejší odezvu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Magnetoreologický (MR) tlumič, časová odezva, regulační rozsah

---

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with development of a new generation of magnetic circuits of fast magnetoreological (MR) dampers that will not use problematic ferrite materials. To ensure a short response time, eddy currents must be avoided. Using the Finite Element Method, 2 solutions were proposed - the use of soft magnetic composites with high electrical resistance and the cutting of grooves in metallic material. Subsequently, 2 magnetic circuits were produced - one from Sintex SMC prototyping material composite and one from 11SMn30 steel with 48 deep grooves 0,35 mm wide. Both were implemented into the MR damper and tested on a hydraulic pulsator. The results of the experiments were compared with 2 different MR dampers: one with 11SMn30 magnetic circuit without grooves and another with the Epcos N87 ferrite magnetic core. It has been found that both new circuits have ensured an equally short response of the damper force to the change of electric current like ferrite. At the same time, a much larger dynamic range was ensured. Compared to 11SMn30 without grooves, the new circuits provided approximately 7x faster response.

## **KEYWORDS**

Magnetorheological (MR) damper, time response, dynamic range

---



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

STRMISKA, T. *Návrh magnetického obvodu rychlého magnetoreologického tlumiče bez použití feritů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D..

---



---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych předně rád poděkoval Ing. Zbyňku Streckerovi, Ph.D. za odborné vedení a spolupráci při realizaci experimentů. Děkuji také všem kolegům z jeho týmu za odbornou podporu a pomoc při přípravě experimentů. Dále bych chtěl poděkovat zejména doc. Ing. Danielovi Koutnému, Ph.D., který zajistil část elektrojiskrového řezání a poskytl vakuovou komoru a materiál pro zalévání drážek (za pomoc s odlíváním vděčím Ing. Radkovi Vránovi). Dále bych chtěl poděkovat panu Rostislavovi Konečnému za ochotné a rychlé provedení soustružnických prací. V neposlední řadě jsem vděčný také Tomáši Navrátilovi z firmy Ryston Electronics s.r.o. za to, že zdarma poskytl vzorky toroidů z práškového materiálu.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Zbyňka Streckera, Ph.D. s využitím informací a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne .....

.....

Podpis

---





**OBSAH**

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>14</b>
2.1 Vířivé proudy.....	15
2.2 Vlastnosti magneticky měkkých materiálů.....	17
2.2.1 Relativní permeabilita.....	17
2.2.2 Měrný elektrický odpor .....	18
2.2.3 Mez nasycení .....	18
2.3 Používané konstrukce magnetických obvodů.....	20
2.3.1 Vstřikovače paliva .....	20
2.3.2 Pevné disky.....	20
2.3.3 Elektromotory .....	21
2.3.4 Transformátory .....	22
2.3.5 MR spojky .....	23
2.3.6 MR tlumiče.....	24
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE .....</b>	<b>27</b>
<b>4 MATERIÁL A METODY .....</b>	<b>29</b>
4.1 Dynamická odezva systému prvního řádu.....	29
4.2 Elektromagnetický model pístu.....	30
4.2.1 Okrajové podmínky .....	31
4.3 Experimentální určení vlastností .....	34
4.3.1 Měření odezvy magnetické indukce.....	34
4.3.2 Měření silové odezvy tlumiče.....	35
<b>5 VÝSLEDKY .....</b>	<b>38</b>
5.1 Drážkování jader.....	41
5.2 Drážkování pláště .....	45
5.3 Výroba vzorků .....	48
5.3.1 Vzorek z SMC materiálu .....	48
5.3.2 Drážkovaný vzorek z automatové oceli 11SMn30.....	48
5.3.3 Porovnání navržených obvodů s feritovým obvodem .....	50
5.4 Výsledky měření magnetické indukce na vzduchu .....	51
5.4.1 Srovnání měření na vzduchu s MKP modelem .....	54
5.5 Výsledky měření na pulsátoru Inova.....	56
5.5.1 Dynamický rozsah testovaných tlumičů.....	56
5.5.2 Odezva testovaných tlumičů dle systému prvního řádu .....	59
5.5.3 90% odezva testovaných tlumičů .....	60
5.5.4 Srovnání měření tlumiče s elektromagnetickými simulacemi.....	61
<b>6 DISKUZE .....</b>	<b>63</b>
6.1 MKP simulace s MR kapalinou.....	63
6.2 Magnetická indukce na vzduchu .....	64
6.3 Vlastnosti MR tlumičů .....	65
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>67</b>
<b>8 BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>69</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>	<b>72</b>
<b>10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....</b>	<b>73</b>
<b>11 SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>76</b>
<b>12 SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>77</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>78</b>

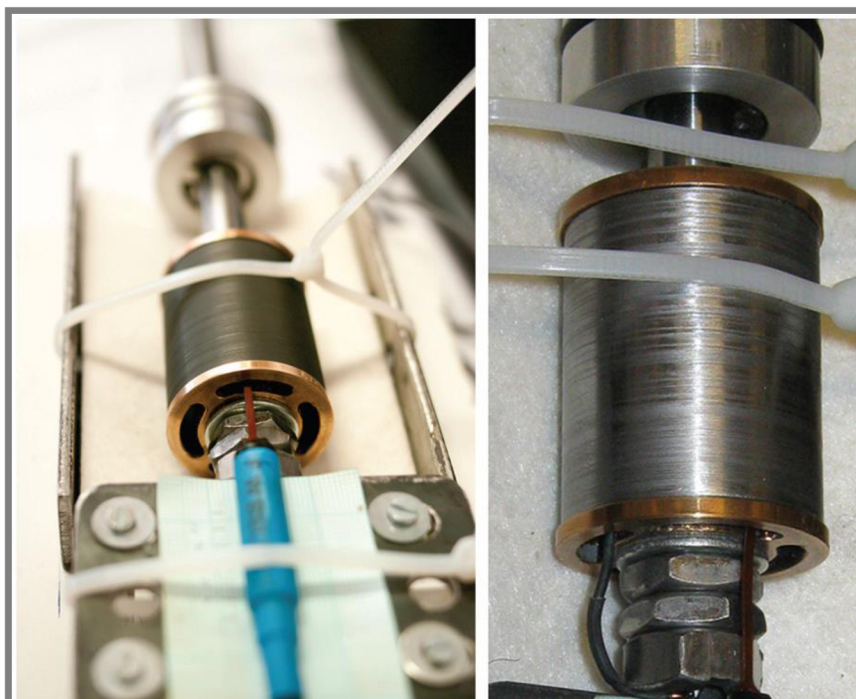


## 1 ÚVOD

Magnetoreologické (dále MR) tlumiče byly vyvinuty pro semiaktivní regulaci tlumicí síly (tlumicí síla je závislá na rychlosti pohybu pístu a síle magnetického pole ve štěrbině, kterou protéká MR kapalina). Nastavení vhodné tlumicí síly dle dat ze senzorů umožňuje výrazné snížení přenosu vibrací, díky čemuž lze např. zvýšit komfort provozu strojů a vozidel, zabezpečit dopravu zranitelných nákladů nebo zvýšit životnost strojních součástí.

Efektivnost semiaktivního tlumení je však podmíněna krátkou časovou odezvou tlumiče (v řádu milisekund). Problematickým prvkem je magnetický obvod, protože v kovových materiálech vznikají vířivé proudy<sup>1</sup> prodlužující časovou odezvu. Vířivé proudy lze eliminovat sestavením magnetického obvodu z feritů, ty ale neumožňují vytvořit silné magnetické pole a nemají dostatečné mechanické vlastnosti.

Na ÚK FSI VUT se výzkumný tým zabývá návrhem MR tlumičů (obr. 1) již několik let a mj. získal patenty na velmi rychlý proudový regulátor a MR ventil. Tato práce by měla přispět k dalšímu vylepšení parametrů vyvíjených tlumičů díky optimalizaci magnetického obvodu.



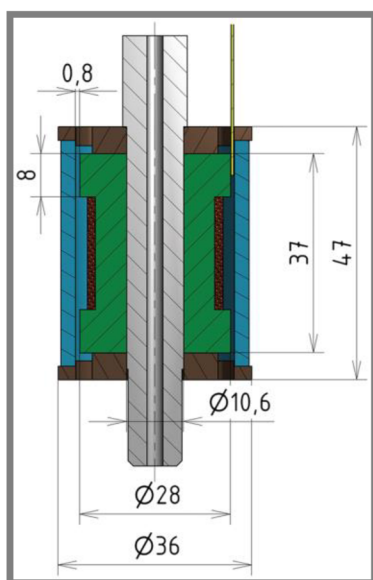
Obr. 1 Písty MR tlumiče navržené na ÚK [1]

<sup>1</sup> více v kapitole 2.1

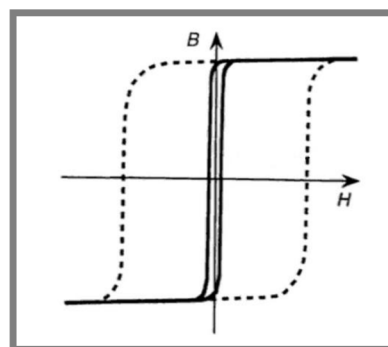
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Na vlastnosti magnetického obvodu mají zásadní vliv především materiály, ze kterých je zkonstruován – jak bude uvedeno dále, hodnoty mnohých parametrů se u různých magneticky měkkých materiálů liší i o více než 8 řádů [2].

V MR tlumiči je navíc magnetický obvod součástí MR pístu a jeho díly jsou při montáži i provozu mechanicky namáhány. Zejm. vnější válec pístu („plášť“ - modrý na obr. 2) tak musí být vyroben z materiálu s dostatečnou pevností [1].



Obr. 2 Řez MR pístem [1]



Obr. 3 B-H křivka magneticky měkkého (souvislá čára) a tvrdého (čárkované) materiálu [3]

V regulovatelných magnetických obvodech se používají magneticky měkké materiály, které se od magneticky tvrdých materiálů (vhodných pro permanentní magnety) liší nízkou koercitivní silou (koercivitou) – obr. 3. To znamená, že v případě magneticky měkkých materiálů stačí relativně slabé vnější pole, aby ovlivnilo jejich magnetismus. Toto vnější pole je v elektromagnetech vytvářeno proudem procházejícím cívkou a jeho velikost je nazývána intenzita magnetického pole  $H$  [ $A \cdot m^{-1}$ ] [3].

Vytvořené magnetické pole je popsáno vektorovou fyzikální veličinou nazvanou magnetická indukce  $B$  [T] a závisí na intenzitě magnetického pole a na permeabilitě materiálu  $\mu$  [ $N \cdot A^{-2}$ ]. Ta není konstantní a při určité intenzitě začíná prudce klesat – říkáme, že došlo k saturaci materiálu. V praxi se častěji používá relativní permeabilita  $\mu_r$  – ta udává násobek indukce, kterou daný materiál vytvoří v porovnání s vakuem (to má permeabilitu  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$ ). Malá permeabilita je nevýhodná, protože cívka musí vytvářet intenzivnější magnetické pole (musí jí protékat silnější proud nebo cívka musí mít víc závitů). Dostatečně velká permeabilita je důležitá i z toho důvodu, aby magnetický obvod zajistil požadované usměrnění toku magnetické indukce.

Důležité také je, jakou maximální indukci dokáže materiál vytvořit – té je dosaženo při saturaci materiálu, a proto se nazývá saturační indukce (nebo také mez nasycení). Čím větší je, tím je větší regulační rozsah obvodu. Regulační rozsah naopak snižuje remanence, tedy magnetická indukce, kterou naměříme poté, kdy byl materiál vnějším polem satureován a následně bylo vnější pole zrušeno (bylo vypnuto napájení cívky).

Maximální možnou rychlost regulace zvyšuje elektrický odpor – při rychlé změně intenzity magnetického pole totiž dochází ke vzniku vířivých proudů, které brání požadované změně magnetické indukce.

## 2.1 Vířivé proudy

2.1

---

Z Faradayova indukčního zákona vyplývá, že při změně toku magnetické indukce  $\Phi_B$  v materiálu vzniká napětí  $U$  přímo úměrné rychlosti této změny:

$$U = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad [4] \quad (1)$$

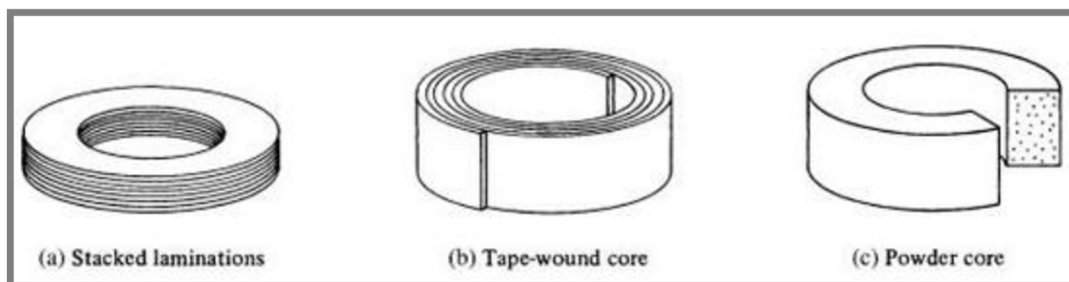
Z rovnice (1) také vyplývá, že indukované napětí je vůči změně záporné a proud, který jeho vlivem vzniká v materiálu, vytváří magnetické pole působící proti probíhající změně. Takto v materiálu mohou vznikat vířivé proudy (někdy též nazývané Foucaultovy [5]), které brání rychlé změně magnetické indukce a způsobují energetické ztráty (přeměnou elektrické energie na teplo).

Rychlá regulace, která zvyšuje užitečnost MR tlumičů, je však samozřejmě založena na rychlých změnách magnetického pole. Proto je nutné vznik vířivých proudů potlačit. Jednou z možností je využití materiálu s vysokým elektrickým odporem  $R$ , protože z Ohmova zákona (rovnice (2)) vyplývá, že při stejném napětí bude vzniklý proud  $I$  menší.

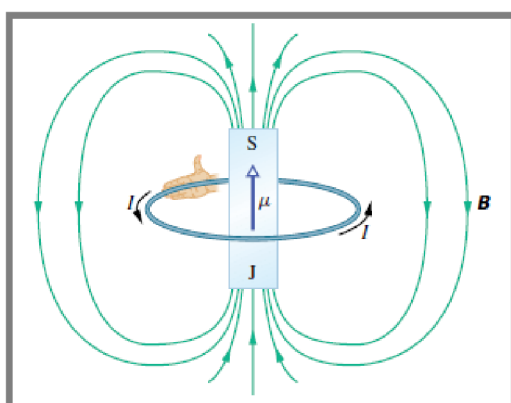
$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

Všechny kovové materiály jsou však elektricky vodivé, takže je nutné omezovat vliv vířivých proudů např. sestavením jádra z mnoha vzájemně odizolovaných kovových částí (buď plechů, nebo částic kovového prášku). Možná uspořádání jsou na obr. 4.

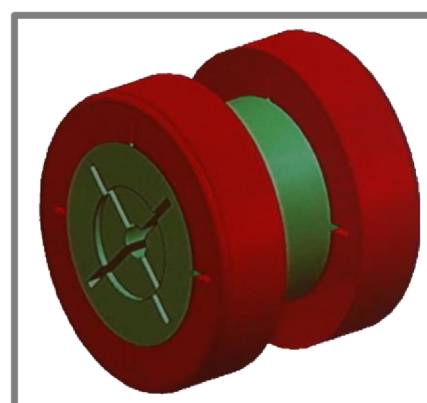
Aby toto řešení bylo efektivní, je nutná správná orientace plechů vůči magnetickému toku. Z Biot-Savartova zákona vyplývá, že indukovaný proud se pohybuje v rovině kolmé ke směru magnetického pole (obr. 5). Proto je nutné, aby plechové laminace byly orientované ve směru magnetického toku a omezovaly tak vířivé proudy, které jsou indukované kolmo na ně (obr. 7) [6,7]. Stejně pravidlo platí i pro další možnost omezení vířivých proudů – vyhotovení drážek do magnetického obvodu (obr. 6). Drážky musí být orientované ve směru toku magnetické indukce, aby ho neomezovaly a aby bránily vířivým proudům.



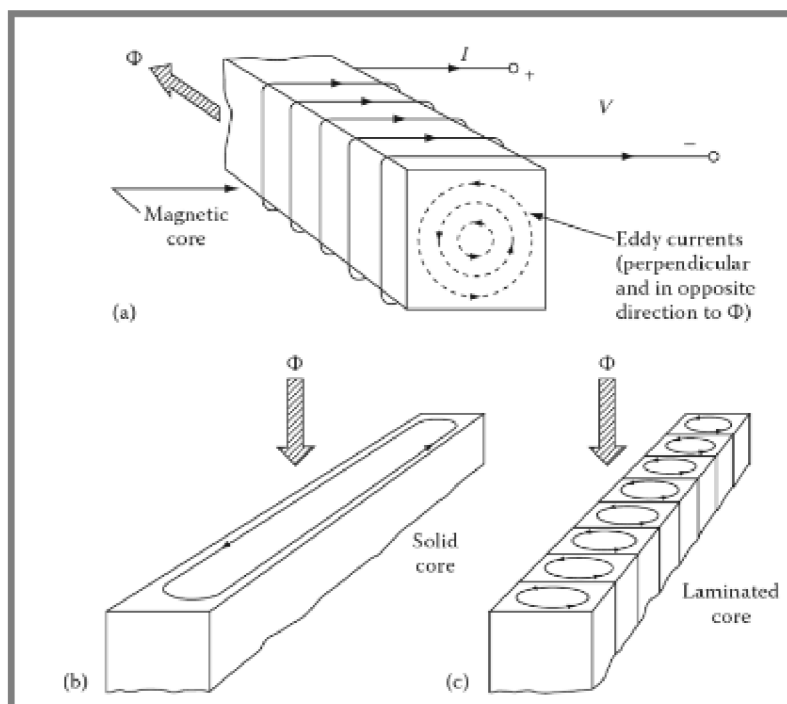
Obr. 4 Možnosti upořádání kovových jader [3]



Obr. 5 Modrý proud  $I$  a zelená magnetická indukce  $B$  [6]



Obr. 6 Drážkovaný mag. obvod [8]



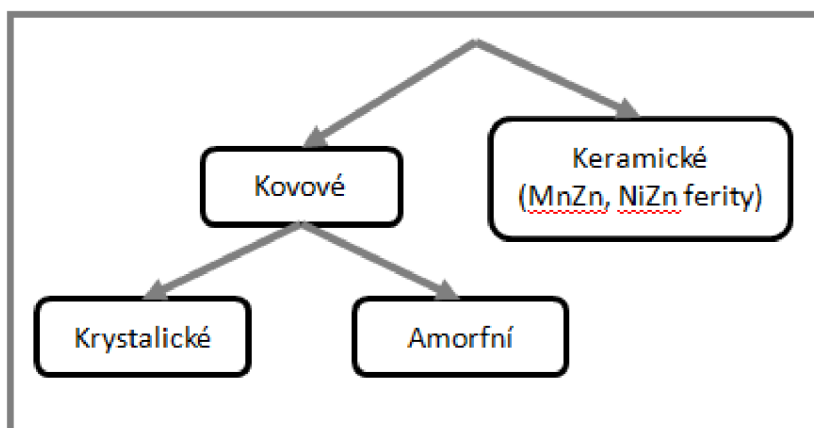
Obr. 7 Orientace vířivých proudů [7]



## 2.2 Vlastnosti magneticky měkkých materiálů

Do současné doby byly magneticky měkké vlastnosti zjištěny pouze u kovových slitin železa (Fe), niklu (Ni), kobaltu (Co) a u keramických materiálů na bázi zinku (Zn) a oxidů železa (tzv. niklové (NiZn) a manganové (MnZn) ferity).<sup>2</sup>

Kovové slitiny běžně mají krystalickou strukturu, ale je možné vhodnou technologií výroby zajistit amorfni strukturu, což má nezanedbatelný vliv na většinu fyzikálních vlastností. Přehled dostupných typů materiálů je na obr. 8.



Obr. 8 Rozdělení magneticky měkkých materiálů

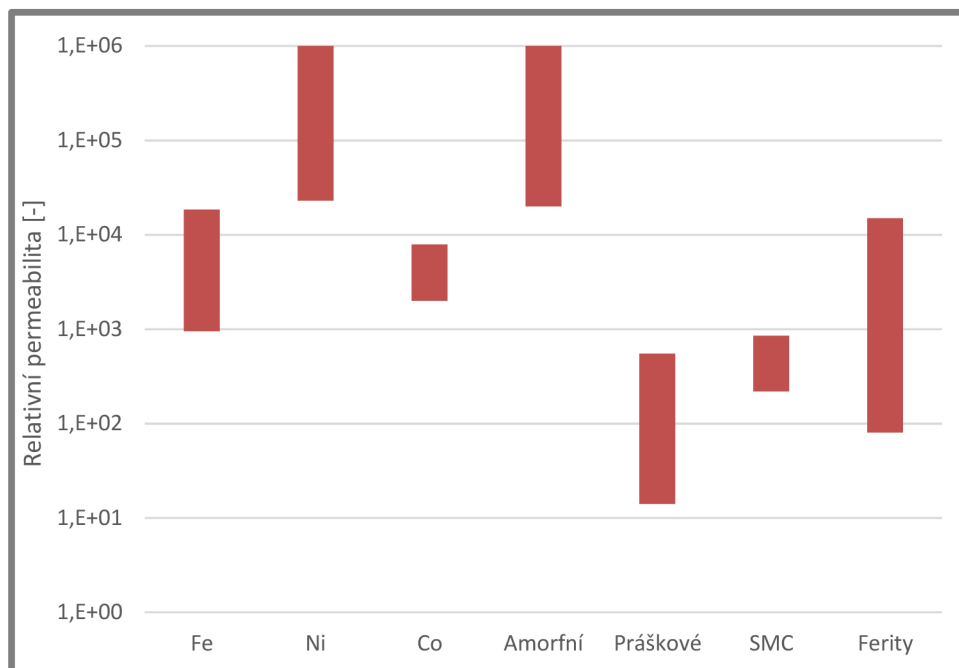
Samostatnou skupinou magneticky měkkých materiálů jsou kompozitní materiály, které se skládají z částic kovu, které jsou vzájemně elektricky izolovány oxidy (magneticky měkké kompozity – SMC) nebo přidaným nevodivým materiálem (práškové materiály). Výroba probíhá většinou lisováním za velmi vysokých tlaků (cca 600 MPa). Příloha 1 obsahuje tabulku s přehledem zjištěných vlastností dostupných magneticky měkkých materiálů.

### 2.2.1 Relativní permeabilita

Pro elektromagnetické vlastnosti magneticky měkkých materiálů je typický jejich velký rozsah – v případě relativní permeability jsou komerčně dostupné materiály s deklarovanou hodnotou 14 (práškové materiály) až 1 000 000 (niklové slitiny a amorfni kovy) - obr. 9. Nejvyšších permeabilit je dosahováno u tenkých plechů a to ve směru válcování (vlastnosti plechů nejsou izotropní). V případě MR tlumiče je však nutné, aby permeabilita nebyla ani příliš nízká, ani příliš vysoká – materiál s nízkou permeabilitou by nebylo možné dostatečně vybudit a vytvářel by jen slabé, neusměrněné pole, materiál s příliš velkou permeabilitou by způsoboval příliš velkou citlivost magnetické indukce na elektrický proud [10-17].

Vzhledem k tomu, že tlumič, kterým se tato práce zabývá, je navržen pro využití s ocelovým jádrem, dá se očekávat vhodnost materiálů s podobnou permeabilitou – slitin kobaltu a feritů. V případě práškových a SMC materiálů by mohly být vhodné ty, jejichž permeabilita je alespoň v řádu stovek.

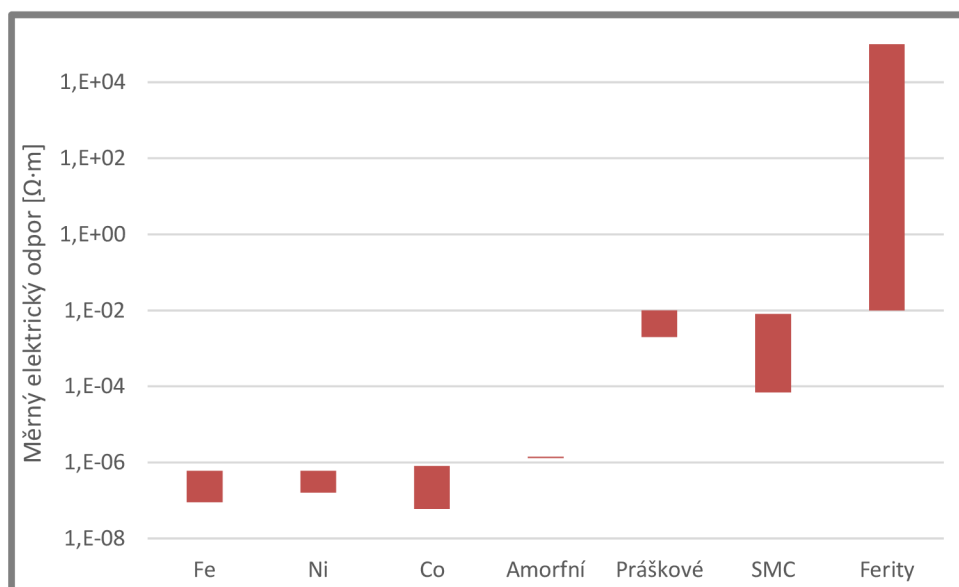
<sup>2</sup> Silné magnetické vlastnosti vykazují také slitiny gadolinia, ale za teplot nižších než pokojových [38]



Obr. 9 Permeabilita jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17]

### 2.2.2 Měrný elektrický odpor

Měrný elektrický odpor je rozhodující vlastností vzhledem ke vzniku vířivých proudů. Vzhledem k deklarované výhodnosti amorfniích materiálů, které mají pouze o řád větší odpor než krystalické kovy, lze předpokládat vhodnost použití práškových a SMC materiálů, které mají odpor ještě o 2 až 3 řády větší - téměř takový, jako nejlépe elektricky vodivé ferity (obr. 10) [10-17].



Obr. 10 Měrný el. odpor jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17]

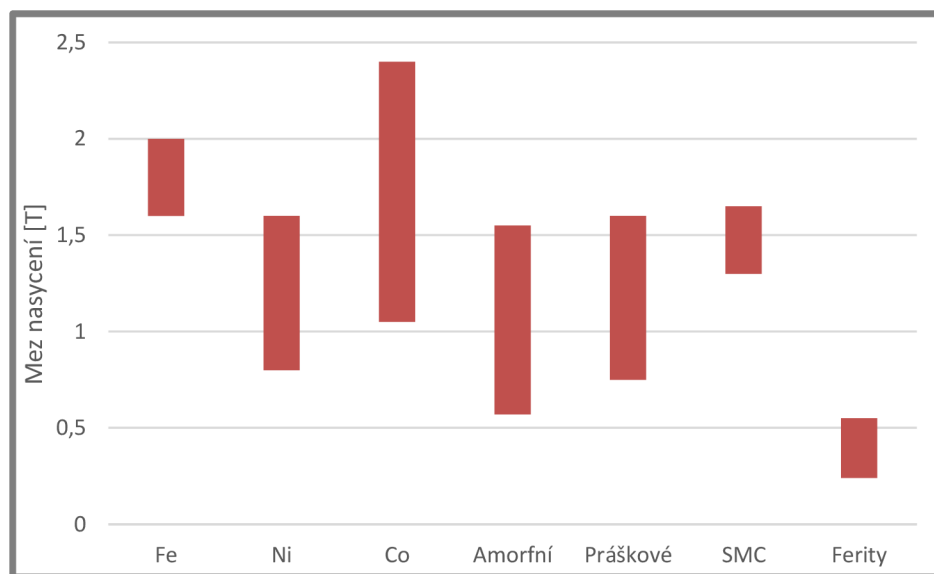
### 2.2.3 Mez nasycení

Mez nasycení udává, jak silné mag. pole materiál umožňuje v sobě vytvořit, dokud nedojde k saturaci, která tento nárůst výrazně zpomalí (permeabilita klesne až na



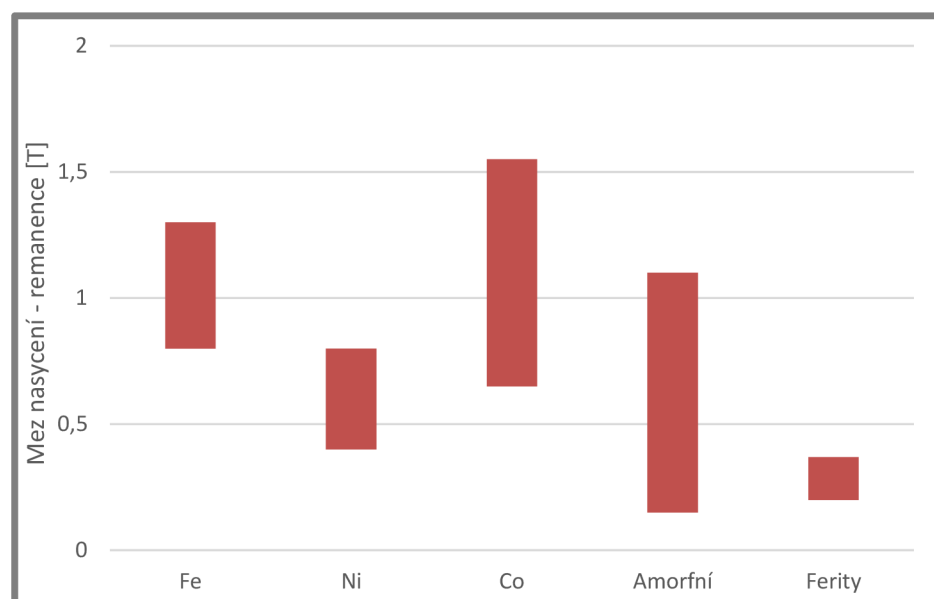
hodnotu vakua). U většiny materiálů je saturace prudká, u práškových a SMC materiálů je pozvolná, což umožňuje plynulejší regulaci magnetického pole v celém rozsahu [15].

Na obr. 11 je zřetelně vidět hlavní nevýhoda feritů – velmi malá mez nasycení. Mezi ostatními materiály vysokou mezí nasycení naopak vynikají oceli a kobaltové slitiny, které dosahují až 2,4 T [10-17].



Obr. 11 Mez nasycení jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17]

Důležitým parametrem pro využití materiálu v MR tlumiči je však i jeho remanence (zbytkový magnetismus po vypnutí cívky), který omezuje dynamický rozsah tlumiče. Bohužel v případě kompozitních materiálů výrobci remanenci neudávají, takže obr. 12 pouze potvrzuje výhodnost využití oceli a kobaltových slitin.



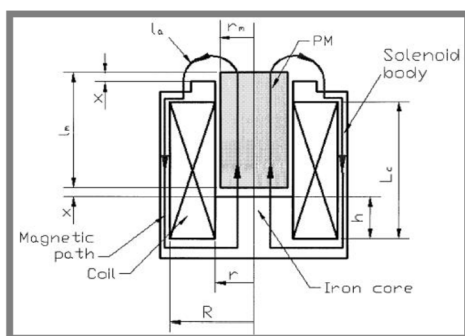
Obr. 12 Remanence odečtená od meze nasycení jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17]

## 2.3 Používané konstrukce magnetických obvodů

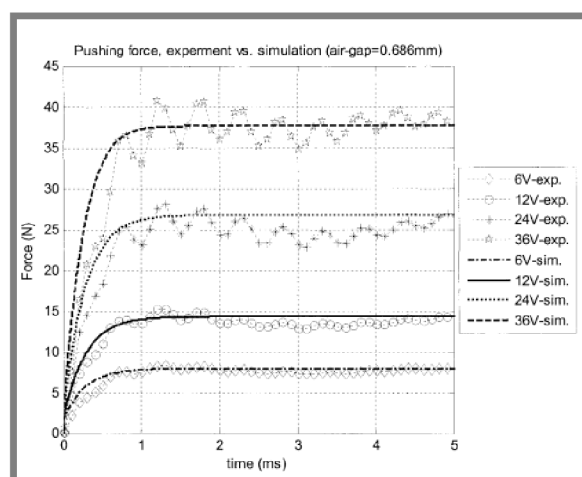
Elektromagnety se používají zejm. tam, kde je nutné vytvářet silné magnetické pole a toto pole regulovat. Aplikace jsou velmi široké – pohon strojů, záznam dat, indukční ohřev, využívání MR efektu, ovládání trajektorie pohybujících se částic a další. Protože obvod MR tlumiče musí zajistit rychlé změny silného magnetického pole, dále budou probírána některá zařízení, ve kterých jsou na magnetický obvod kladeny podobné požadavky.

### 2.3.1 Vstřikovače paliva

První dvě generace systému přímého vstřikování paliva do válců spalovacích motorů „Common rail“ využívaly ventil ovládaný elektromagnetem. He [18] navrhl obousměrný aktuátor pro vstřikovače s využitím neodymových permanentních magnetů (PM - NdFeB<sup>3</sup>) pro konstrukci pístu, který běžně bývá vyroben z nízkouhlíkové oceli. Statorové jádro He zkonstruoval ze železa – obr. 13.



Obr. 13 Řez ovládacím prvkem vstřikovače s permanentním magnetem [18]



Obr. 14 Rychlost regulace vstřikovače s permanentním magnetem [18]

He dosáhl krátkých regulačních časů (pod 1 ms – obr. 14). V simulacích přitom zanedbal vliv vířivých proudů a hystereze, což se ovšem projevilo jen mírně – hladké čáry na obr. 14 jsou výsledky z výpočetního modelu, spojnicové čáry byly zjištěny experimentálně [18]. V MR tlumiči by se však magnet musel pohybovat s mnohem větším zdvihem, což by zpomalovalo regulaci. Navíc uzpůsobení pístu MR tlumiče pro pohyb magnetu by zásadně zvýšilo složitost konstrukce a snížilo spolehlivost.

### 2.3.2 Pevné disky

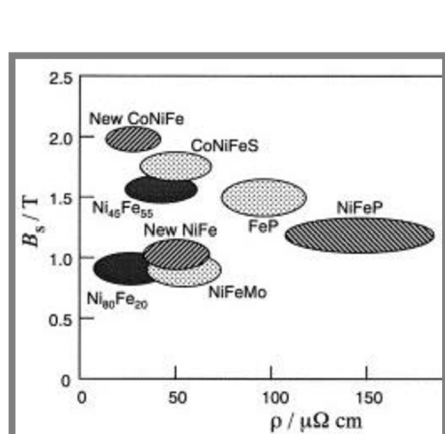
Magnetické jádro čtecí/zapisovací hlavy pevného disku bývá tvořeno tenkými magneticky měkkými vrstvami. Výhodná je co nejvyšší hodnota saturace a elektrický odpor. Porovnání používaných materiálů je na obr. 15 [19]. Konstrukce spojené čtecí/zapisovací hlavy využívající magnetorezistivní<sup>4</sup> princip je v řezu znázorněna na obr. 16.

Jako nejvhodnější pro MR tlumiče se jeví skupina materiálů FeP s vysokou saturací i el. odporem, ale pro výrobu z těchto materiálů nejsou komerčně dostupné polotovary

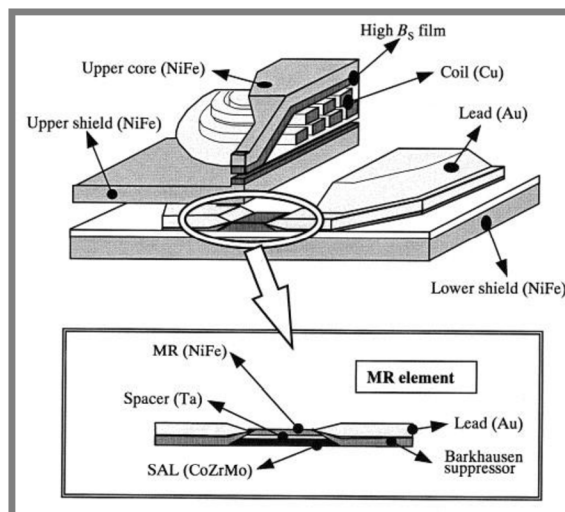
<sup>3</sup> NdFeB magnety mají měrný elektrický odpor podobný amorfním slitinám – kolem  $1,4 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$  [37]

<sup>4</sup> změna el. odporu materiálu v závislosti na magnetické indukci

(je pravděpodobné, že nemají dostatečné mechanické vlastnosti). Magnetorezistivní principu by se ale v budoucnu mohlo využít pro měření indukce přímo v tlumiči, což by umožnilo jeho online diagnostiku (ta by byla vhodná např. pro posouzení sedimentace MR kapaliny).



Obr. 15 Srovnání materiálů jader magnetických hlav [19]

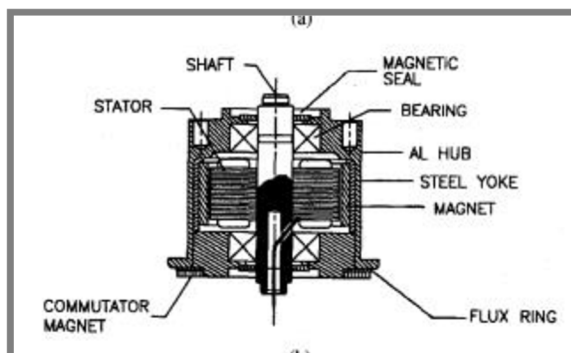


Obr. 16 Konstrukce čtecí/zapisovací hlavy [19]

### 2.3.3 Elektromotory

V motorcích pevných disků se běžně používají jádra z laminované křemíkové oceli (obr. 17) [20]. Byl ovšem navržen i motor s vinutím na plošném spoji [21].

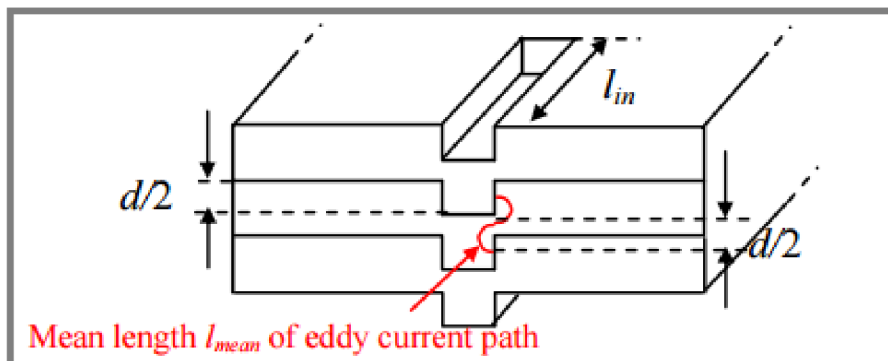
2.3.3



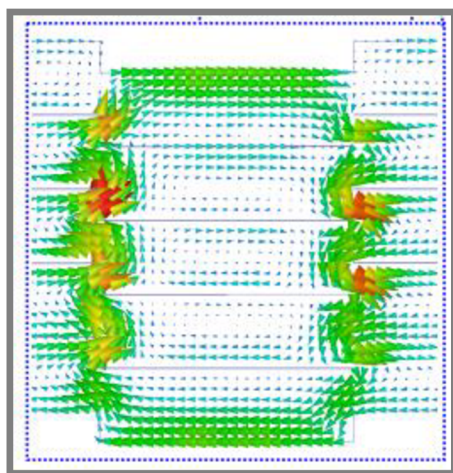
Obr. 17 Standardní motorek pevného disku [20]

Statory větších motorů jsou také vyráběny laminací. Mezi nejčastější způsoby sestavování jader patří svařování, lisování do kostry a tzv. „interlocking“, při kterém do sebe zapadají prolisy v jednotlivých pleších (obr. 18). V místě spojení však vzniká vodivé spojení, které je cestou pro vířivé proudy - obr. 19 [22].

Tým Wanga při své inovativní konstrukci motoru s axiální vzduchovou mezerou využil amorfních materiálů: jádro navinul do toroidního tvaru, zapouzdřil v pryskyřici a z tohoto toroidu nařezal požadované výseče (obr. 20) [23]. Podobný technologický postup by bylo možné použít i při sestavení jádra MR tlumiče z amorfních plechů.



Obr. 18 Schéma spojení 3 plechů tzv. „interlockem“ [22]



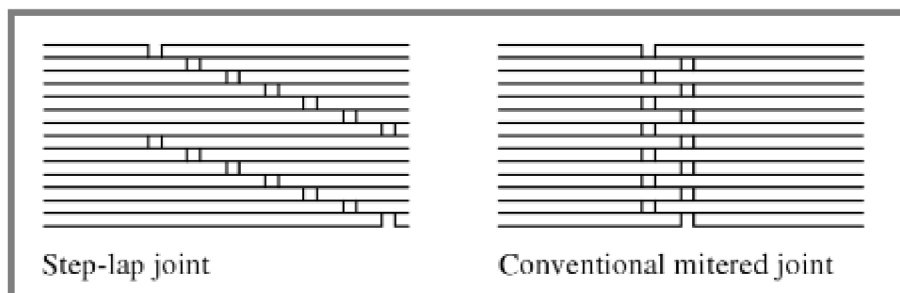
Obr. 19 Schéma hustoty vířivých proudů ve spojení interlockem [22]



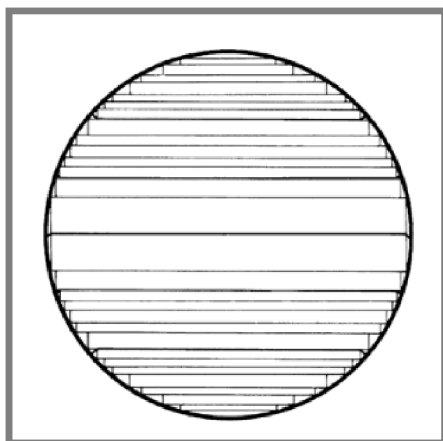
Obr. 20 Řezané jádro statoru [23]

### 2.3.4 Transformátory

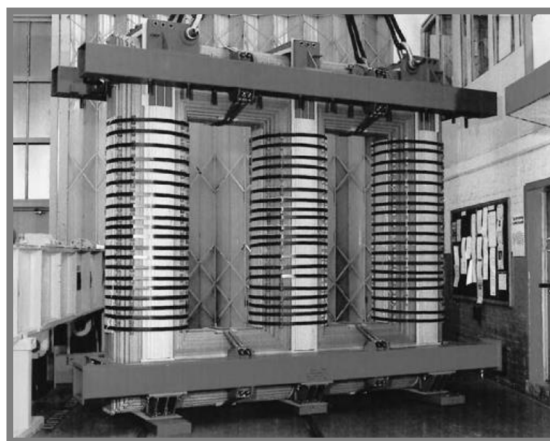
Jádra transformátorů se zpravidla skládají z plechů o odstupňovaných rozměrech (průřez na obr. 22), které v místě spoje vzájemně přesahují tak, aby co nejméně narušily magnetický tok (obr. 21). Jádro se skládá do rámu zpravidla ve vodorovné poloze a spojuje se páskami tak, aby nebyl narušen magnetický tok např. dírami pro šrouby (obr. 23) [24].



Obr. 21 Způsoby spojení plechů v jádře [24]



Obr. 22 Typický průřez jádrem transformátoru [25]



Obr. 23 Složené jádro transformátoru [25]

Některá jádra transformátorů se pro dosažení nižších ztrát vyrábí z amorfních plechů. Není nezbytné přidávat mezi laminace další izolaci, protože ta je zajištěna povrchovou oxidickou vrstvou [26]. Běžně se jádra složí do požadovaného tvaru a pokryjí se epoxidem, kromě jednoho konce, který umožňuje rozevření pro nasunutí cívek či pro opravy (je spojen pouze mechanickým propojením) – obr. 24 [27]. Zalití do epoxidu by mohlo být vhodné i v případě plechového magnetického obvodu MR tlumiče.



Obr. 24 Transformátorové jádro z amorfních plechů [27]

### 2.3.5 MR spojky

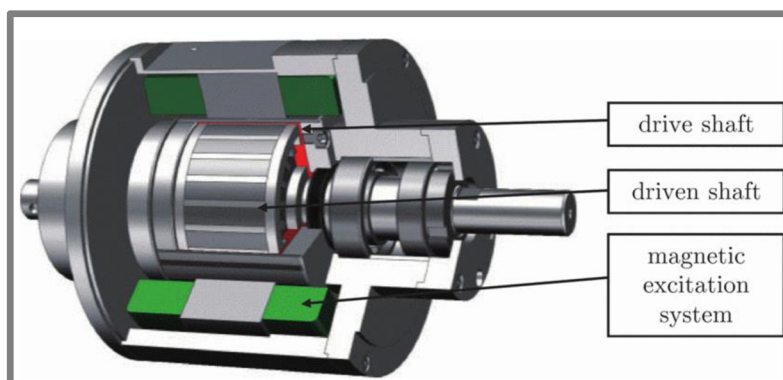
2.3.5

Jednou z aplikací magnetoreologických kapalin s velkým potenciálem jsou spojky – oproti konvenčním spojkám mohou zajistit jemnější a hladší regulaci krouticího momentu, tišší provoz, zmenšené zástavbové prostory a zejm. dobu odezvy síly na regulační signál v řádu milisekund<sup>5</sup> [28].

Güth et al. [29] navrhli MR spojku (s běžným statorem z elektromotoru Levitec, rotorové laminace byly sestaveny z plechů z niklové slitiny Permenorm 5000V5 pro dosažení většího dynamického rozsahu při současném omezení vířivých proudů.

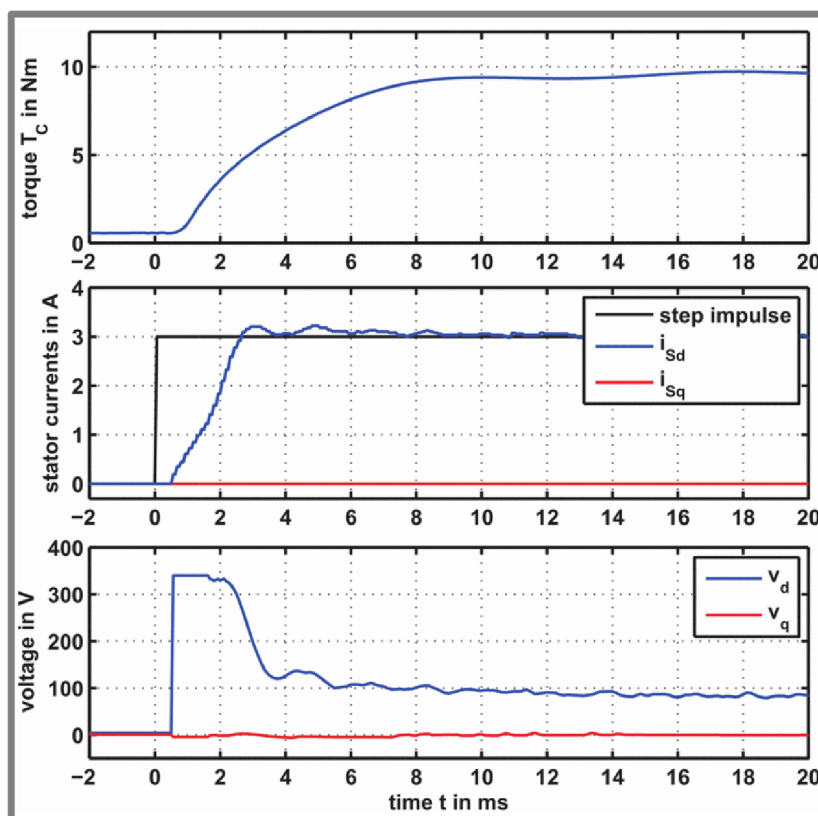
<sup>5</sup> Těchto vlastností lze s výhodou využít i v případě MR brzd, které mohou být konstrukčně podobné spojkám.





Obr. 25 3D model MR spojky [29]

Tato spojka při napájení cívek 8 A dokázala vytvořit max. krouticí moment 17 N·m. Při napájení proudem 3 A byl limitní moment 9,5 N·m a spojka ho dosáhla za méně než 8 ms (obr. 26). Tato rychlost regulace byla kromě využití rotorových plechů zajištěna také přebuzením cívek: dokud hodnota proudu nedosáhla požadované hodnoty (3 A), byla napájena napětím 330 V – poté bylo napětí sníženo na 90 V (obr. 26). V případě MR tlumiče bude pro zajištění rychlé regulace také nutné aplikovat přebuzení cívky, které zajistí proudový regulátor.

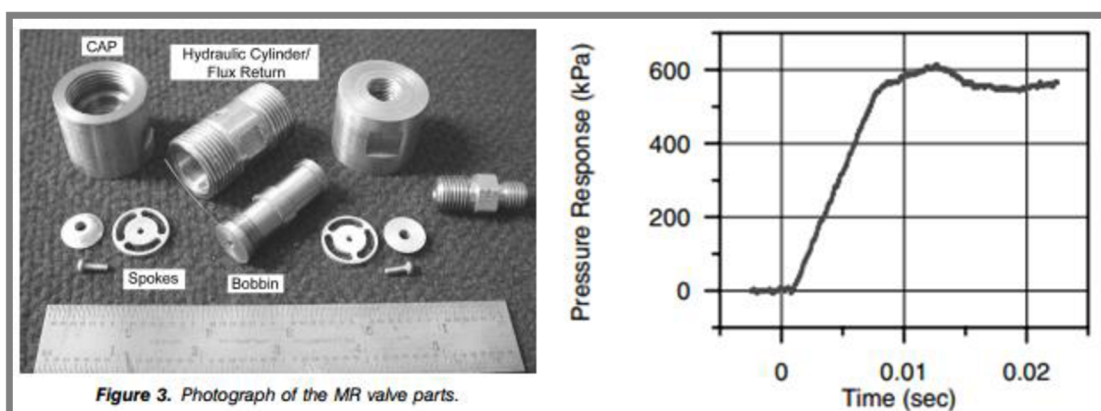


Obr. 26 Odezva MR spojky na skok proudu z 0 A na 3 A [29]

### 2.3.6 MR tlumiče

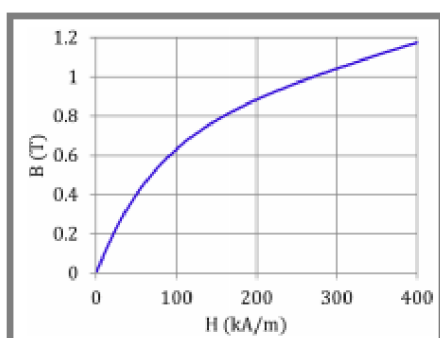
Byly navrženy MR tlumiče různých konstrukcí a z různých materiálů. Yoo [30] využil kobaltovou slitinu s vysokou mezí nasycení (Hiperco 50-A), což umožnilo rozměrově

zmenšení tlumiče. Dosáhl však pouze relativně pomalé časové odezvy (cca 10 ms) – obr. 27.

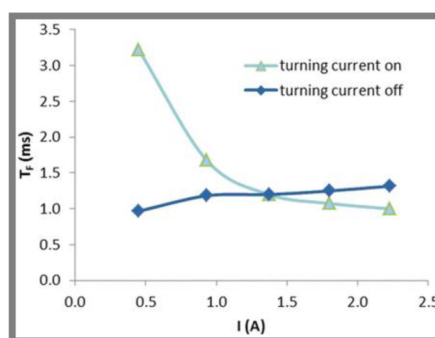


Obr. 27 MR tlumič využívající Hiperco 50-A [30]

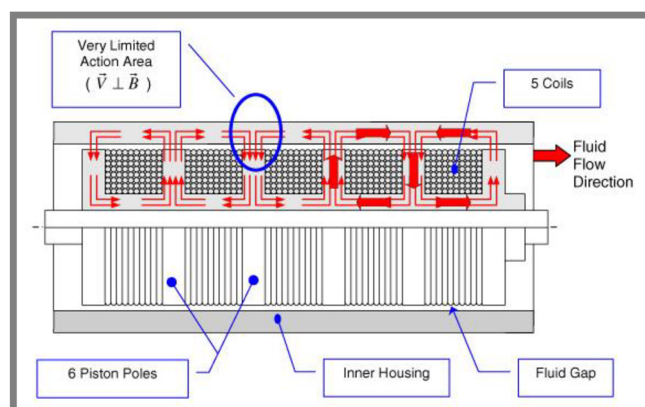
Golinelli [31] použil feritickou nerezovou ocel AISI 430 s vysokým el. odporem a max. relativní permeabilitou kolem 600 – její B-H křivka je na obr. 28. Zcela netradiční konstrukci elektromagnetického obvodu navrhl Sassi [32] - závitky cívký umístil rovnoběžně s osou místo kolmo na ni, aby rozšířil prostor, ve kterém je působeno na MR kapalinu (údajná standardní konstrukce je na obr. 30). Jádru přitom sestavil z 65 svařených ocelových plíšků o tloušťce 2 mm, aby snížil ztráty vířivými proudy (obr. 31 a 33).



Obr. 28 B-H křivka oceli AISI 430 [31]

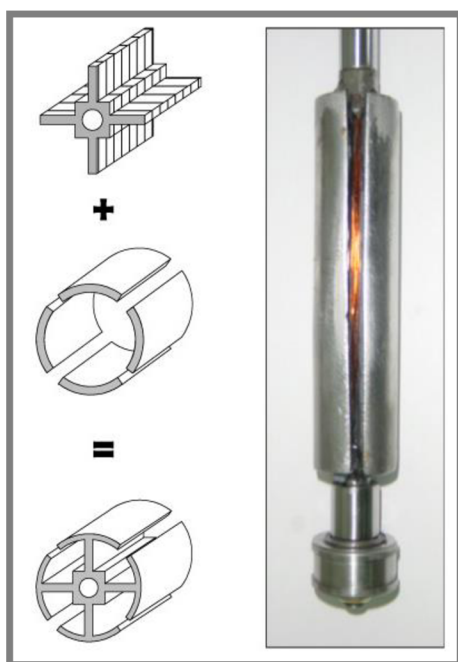


Obr. 29 Časová odezva tlumiče ÚK [1]

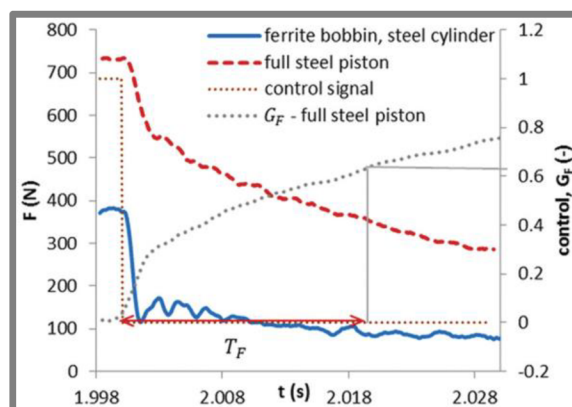


Obr. 30 Běžný MR tlumič s omezeným MR prostorem [32]

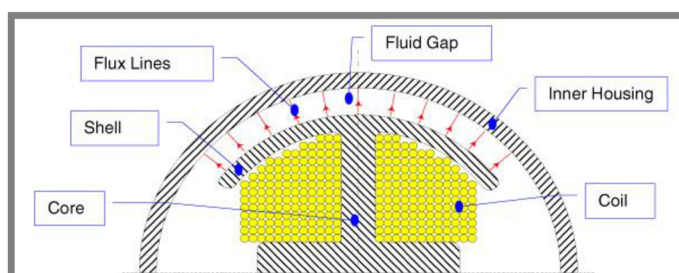
Tým na ÚK zkonstruoval a otestoval upravený tlumič s feritovým vnitřním jádrem a ocelovým pláštěm. S touto konstrukcí bylo dosaženo časové odezvy magnetické indukce na skok elektrického proudu na 2 A kolem 1,5 ms (obr. 29). Časová odezva stejného tlumiče s ocelovým jádrem byla 5 až 17 ms. Zásadní nevýhodou feritové varianty však byla malá maximální tlumicí síla – pouze cca 400 N (ve srovnání s ocelovou variantou téměř poloviční) - obr. 32 [1]. Proto je nutné vyvinout nový magnetický obvod s velmi rychlou odezvou, který ale zároveň dokáže vytvořit max. sílu srovnatelnou s ocelovou variantou.



Obr. 31 MR tlumič s podélnými cívkami [32]



Obr. 32 Porovnání transienčního chování tlumících sil pro variantu s feritovým a ocelovým jádrem



Obr. 33 MR tlumič s podélnými cívkami [32]



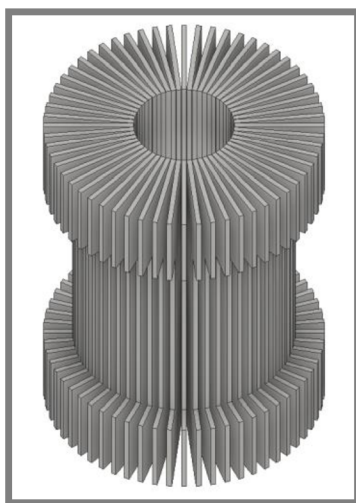
### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Cílem práce je konstrukční návrh pístní skupiny rychlého magnetoreologického tlumiče bez použití feritových materiálů<sup>6</sup>. Za rychlý je považován tlumič s prakticky okamžitou odezvou magnetického pole na změnu proudu (v řádu desetin milisekundy) a odezvou síly tlumiče kolem 1 ms. Aby bylo dosaženo takto rychlé regulace a aby byl získán požadovaný regulační rozsah, musí materiál magnetického obvodu v kombinaci s jeho konstrukcí splňovat toto:

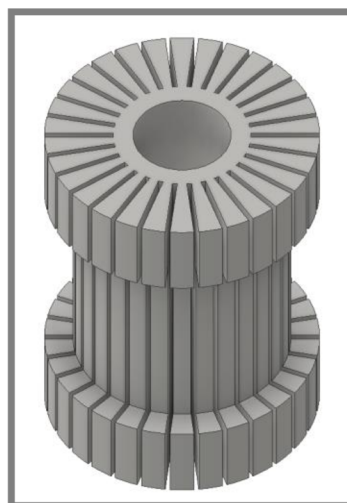
- velmi vysoký odpor proti vířivým proudům
- dostatečná permeabilita
- vysoká mez nasycení
- nízká remanence
- dobré mechanické vlastnosti a obrobitelnost

Nejjednodušším řešením by byla volba materiálu, který by všechny tyto vlastnosti zajistil bez jakýchkoliv konstrukčních úprav – takto optimální materiál však zatím neexistuje. Kovové materiály mají příliš nízký elektrický odpor, ferity nízkou mez nasycení a špatné mechanické vlastnosti (příloha 1). Jako nejvhodnější řešení se jeví magneticky měkké kompozity – mají vysoký elektrický odpor a mez nasycení. Jejich nevýhodou je však nízká permeabilita a ve srovnání s oceli horší mechanické vlastnosti, proto bude nutné výpočty a případně experimenty ověřit jejich vhodnost pro aplikaci v rychlých MR tlumičích.

Dalším možným řešením je konstrukce mag. obvodu z jednotlivých kovových plechů, mezi kterými je vysoký elektrický odpor, ale bohužel i určitý magnetický odpor. Z těchto dvou důvodů je pravděpodobně nutné, aby plechy byly orientovány rovnoběžně s osou pístu, což z principu způsobuje vznik rozsáhlého prostoru nevyplněného materiálem (obr. 34) a tím pádem razantní pokles indukce ve škrtní štěrbině a tím dynamického rozsahu tlumiče. Plechy by tedy musely mít proměnlivou tloušťku, což by eliminovalo hlavní výhodu – nízkou cenu plechů. Navíc získání relevantních výsledků z MKP simulací tenkých plechů je velmi výpočetně náročné (a započítání anizotropních vlastností plechů problematické) a samotné sestavení takového plechového jádra by bylo značně technologicky obtížné.



Obr. 34 Varianta z plechů



Obr. 35 Drážkovaná varianta

<sup>6</sup> S použitím feritů byl již rychlý tlumič otestován, ale mechanické ani magnetické vlastnosti nebyly dostatečné pro komerční aplikaci tlumiče.

Jako vhodnější varianta se proto jeví výroba vhodných zářezů do dílů magnetického obvodu tlumiče (obr. 35) – tenké zářezy ztlačí indukci ve štěrbině, a protože bude tloušťka materiálu relativně velká a díly celistvé, nebude problém provést relevantní MKP výpočty a navrhnout vhodné drážkování. Jedinou technologickou výzvou pak bude zalití tenkých drážek nevodivým materiálem, aby nebyl ovlivněn hydraulický průřez tlumiče – na zalití pro účely experimentu však nebudou kladeny vysoké nároky na kvalitu - cílem bude pouze porovnatelnost s ostatními variantami. Hlavním cílem diplomové práce bude zanalyzovat a případně zrealizovat tyto dvě výše popsané varianty mag. obvodu rychlého MR tlumiče (z mag. měkkého kompozitu a z kovu s vyhotovenými drážkami). Dílčími cíli pak budou:

- definování vhodných materiálů na konstrukci těchto 2 mag. obvodů
- provedení elektromagnetických MKP simulací, na základě kterých bude ověřena vhodnost materiálů a zvoleno drážkování
- ověření magnetických obvodů měřením statického a transientního chování magnetického pole ve škrťací štěrbině tlumiče
- experimentální ověření vlastností MR tlumičů s nově navrženými obvody

## 4 MATERIÁL A METODY

Základem návrhu magnetického obvodu budou MKP simulace v počítačovém programu ANSYS Electronics Desktop. Pomocí statické simulace magnetického pole bude ověřen regulační rozsah magnetického obvodu. Dynamická simulace bude použita pro posouzení vlivu elektrického odporu materiálu na rychlost regulace tlumiče. Pro obvod z elektricky vodivého materiálu (kovu) bude na základě simulací určena závislost rychlosti regulace na geometrii drážek a bude zvolena nejvhodnější varianta drážkování.

Celkem budou navrženy, vyrobeny a změřeny 3 magnetické obvody:

- 1) z magneticky měkkého kompozitu
- 2) z kovového materiálu s vhodným drážkováním
- 3) z kovového materiálu bez drážek (pro porovnání)

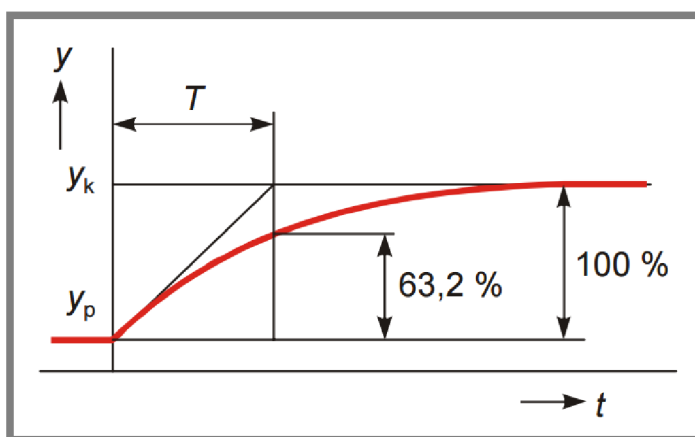
### 4.1 Dynamická odezva systému prvního řádu

Z hlediska elektromagnetické regulace odpovídá MR píst dynamickému systému prvního řádu. Regulovanou veličinou  $y$  je magnetická indukce, vstupní veličinou  $x$  je elektrický proud procházející cívkou. Pak při skokové změně vstupní veličiny platí rovnice (3) – přechodová rovnice.

$$y = y_p + (x_k - x_p) \cdot k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (3)$$

$x_p$  a  $y_p$  jsou hodnoty těsně před skokovou změnou,  $x_k$  je hodnota po skokové změně,  $k$  je zesílení,  $t$  je čas počítaný od skokové změny vstupní veličiny a  $T$  je časová konstanta systému 1. řádu. Protože se jedná o exponenciální průběh, který teoreticky nikdy nedosáhne maximální hodnoty (pouze se k ní limitně blíží), je časová konstanta  $T$  vhodným parametrem pro popis rychlosti odezvy.

$T$  odpovídá času, při kterém tečna závislosti regulované veličiny na čase v počátečním bodě protne tečnu této funkce v nekonečnu (obr. 36). V případě systému prvního řádu se jedná o čas dosažení 63,21 % maximální hodnoty regulované veličiny [33].



Obr. 36 Časová odezva systému prvního řádu [33]

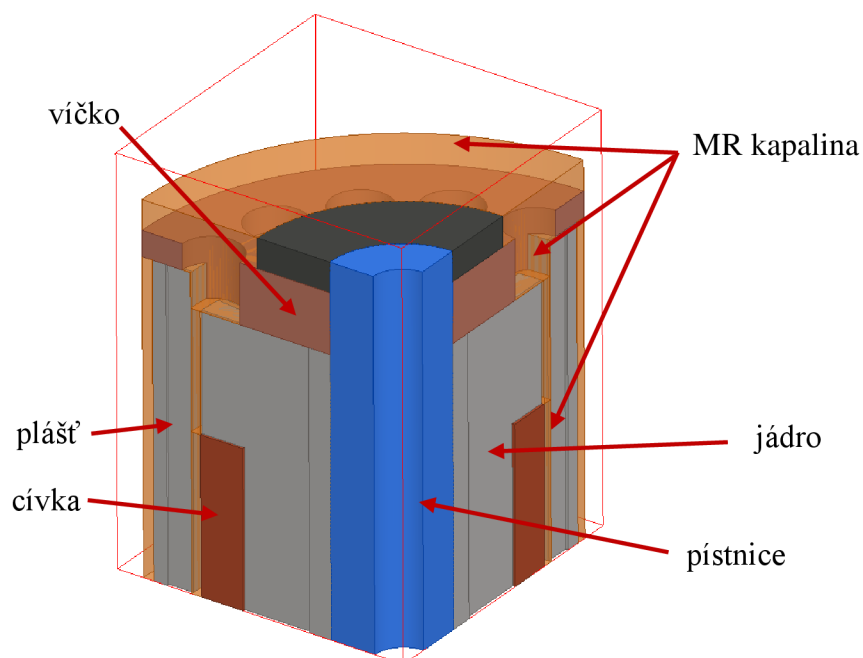
Pro určení  $T$  však musíme znát maximální hodnotu, které je při náběhu dosaženo až po dlouhé době. Proto v simulacích bude použit pokles a jako doba odezvy bude brána

doba dosažení 36,79 % původní magnetické indukce. Experimentálně však budou měřeny jak poklesy, tak náběhy.

## 4.2 Elektromagnetický model pístu

Pro elektromagnetické simulace pístu MR tlumiče byl využit software ANSYS Electronics Desktop 2016.1 – Electromagnetics Suite 17.1, který je nástupcem softwaru ANSOFT Maxwell 16 a patří mezi špičkové softwary určené pro tento druh MKP výpočtů. Umožňuje přesné statické i transientní simulace se zahrnutím vlivu vířivých proudů.

Vzhledem k nutnosti zkoumání drážkované geometrie musel být vytvořen trojrozměrný model. Pro zkrácení výpočetních časů byla v softwaru řešena pouze osmina pístu (obr. 37) – polovina v axiálním směru s čtvrtinovým obvodem. Skládá se z pístnice, jádra, cívky, pláště, víčka, podložky, okolního vzduchu a případně MR kapaliny. Z geometrie jsou odstraněny konstrukční detaily (např. drážka pro průchod drátu, všechna zaoblení a zkosení, díra pro upevnění drátu, atd.), což zajistí zjednodušení konečněprvkové sítě a tím pádem zkrátí výpočetní časy.



Obr. 37 Osminový model pístu MR tlumiče v ANSYS Maxwell

V tab. 1 je nastavení parametrů jednotlivých dílů modelu. Vířivé proudy nemá smysl počítat u elektricky nevodivých materiálů a také u cívky, protože se skládá z tenkých, vzájemně izolovaných drátů. To platí i pro použitou MR kapalinu MRF 132-DG, která má vodivost cca  $0,01 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$  – používaný MKP software považuje materiály s vodivostí nižší než  $1 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$  za nevodivé.

Tab. 1 Nastavení parametrů modelu v ANSYS Electronics

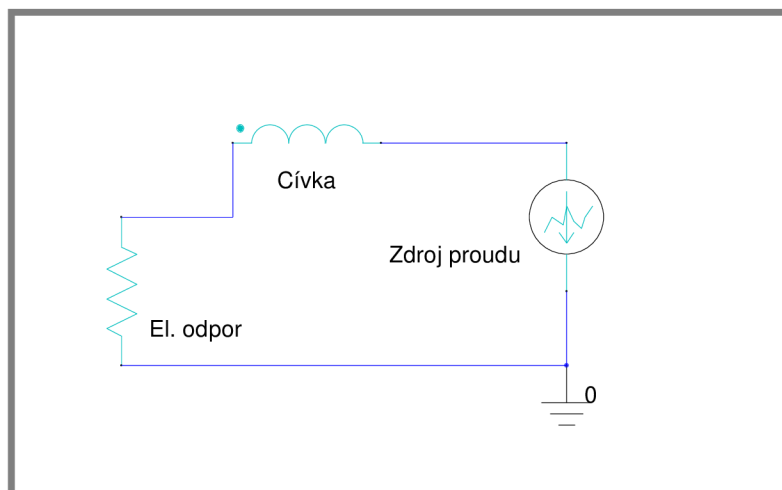
	Typ materiálu	Elektrická vodivost	Vířivé proudy	Permeabilita
<b>Pístnice</b>	S235JRG	$6,3 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$	ANO	BH křivka <sup>7</sup>
<b>Jádro</b>	Dle simulace <sup>7</sup>	Dle materiálu <sup>7</sup>	ANO	BH křivka <sup>7</sup>
<b>Cívka</b>	Měď	$58 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$	NE	1
<b>Plášť</b>	Dle simulace <sup>7</sup>	Dle materiálu <sup>7</sup>	ANO	BH křivka <sup>7</sup>
<b>Víčko</b>	Bronz	$10 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$	ANO	1
<b>Okolní vzduch</b>	Vakuum	$0 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$	NE	1
<b>MR kapalina</b>	MRF 132-DG	$0,01 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$	NE	BH křivka <sup>7</sup>

#### 4.2.1 Okrajové podmínky

4.2.1

Je nastavena elektrická izolace cívky od jádra (obr. 39) a „sudá“ symetrie (s normálovým magnetickým tokem) na ploše axiálního řezu (obr. 40). Symetrie po obvodu není nutná (bylo ověřeno, že na výsledek výpočtu nemá vliv).

Napájení je simulováno cívkou (modelovanou plným objemem s nastavením „stranded“ – z 60 závitů - a vstupu a výstupu - obr. 41 a obr. 42) a externím elektrickým obvodem (obr. 38). Změna proudu z minimální na maximální hodnotu a naopak probíhá za 0,3 ms (přibližná hodnota max. rychlosti regulace proudu s využitím patentovaného proudového regulátoru). V simulacích určených pro porovnání s experimenty pak bude proud nastaven dle jeho naměřeného průběhu – dá se předpokládat, že rychlost regulace proudu bude záviset na indukčnosti jednotlivých obvodů, která bude odlišná kvůli různé permeabilitě materiálů i kvůli vzniku vířivých proudů. Simulovat samotnou proudovou regulaci by ale bylo velmi náročné (přesahuje rozsah této diplomové práce) a výsledek by mohl být nepřesný, takže proud bude zadán podle dat z experimentů s cílem co nejpřesněji posoudit transienční magnetické vlastnosti obvodů.



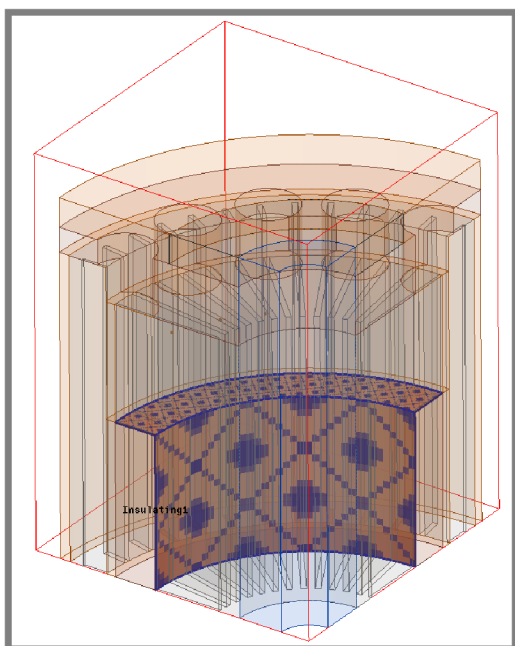
Obr. 38 Externí elektrický obvod nastavený v elektromagnetickém modelu

Konečněprvková síť bude zjemněna tak, aby byla v transienční analýza zajištěna stabilita (při statickém proudu) a hladkost průběhu magnetické indukce (za tímto účelem bude regulován i časový krok). Předpokládá se zejména zjemnění v jádře

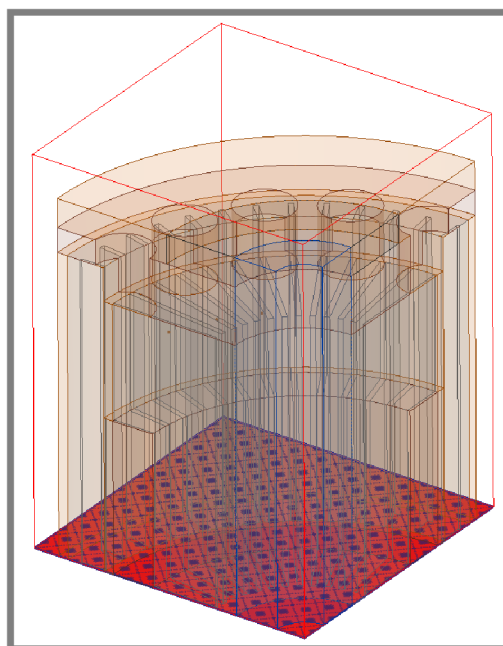
<sup>7</sup> viz příloha 2

a v plášti, případně v pístitnici (těmito díly protéká drtivá většina magnetického toku a tudíž tam také vzniká většina vířivých proudů).

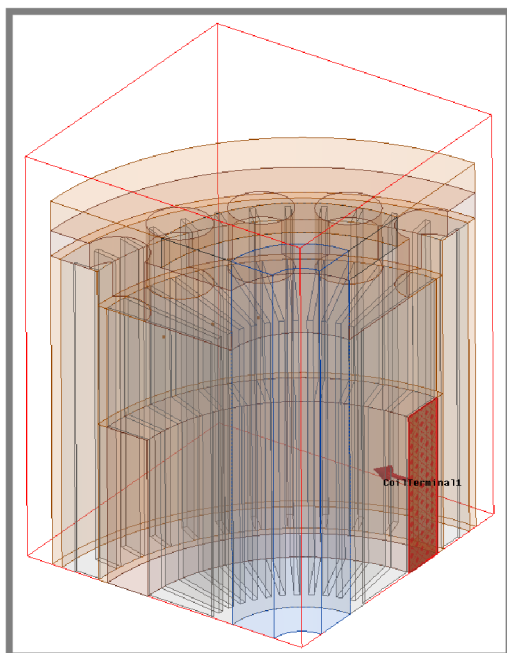
Počáteční simulace pro posouzení vlivu elektrického odporu a drážkování pak budou všechny provedeny se stejným nastavením časového kroku a MKP sítě, aby nebyla znehodnocena jejich porovnatelnost. Jedinou odlišností bude rozdělení jádra na 2 díly: část s drážkami a bez drážek (druhá začne zhruba 1 mm za patou drážek - obr. 43) – síť částí s drážkami bude zjemněna více, část bez drážek stejně jako nedrážkovaný plášť.



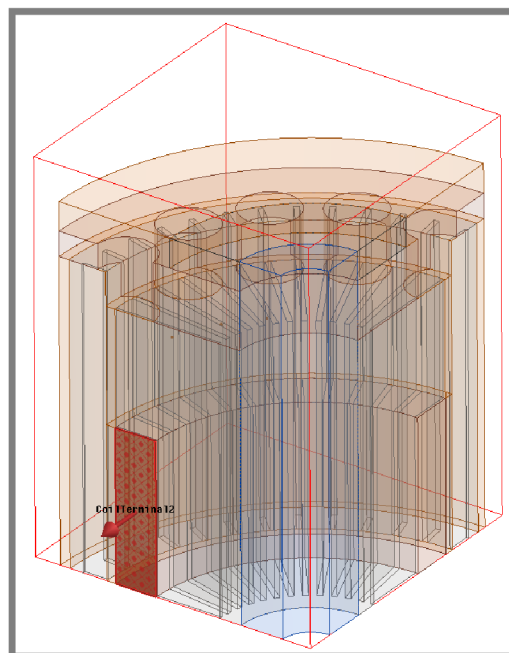
Obr. 39 Elektrická izolace cívky



Obr. 40 Normálová symetrie



Obr. 41 Vstup el. proudu do cívky



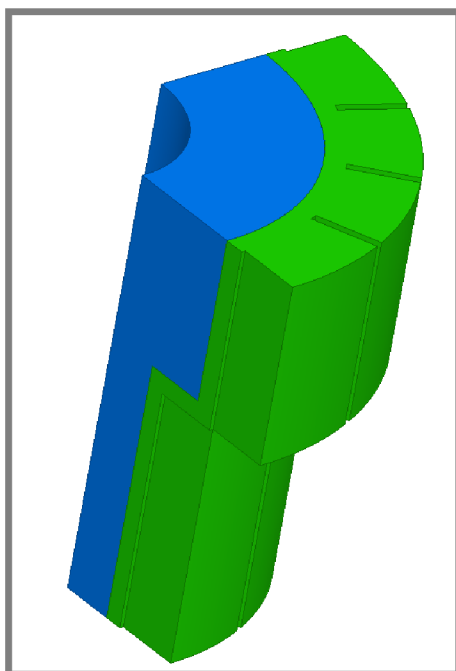
Obr. 42 Výstup el. proudu z cívky



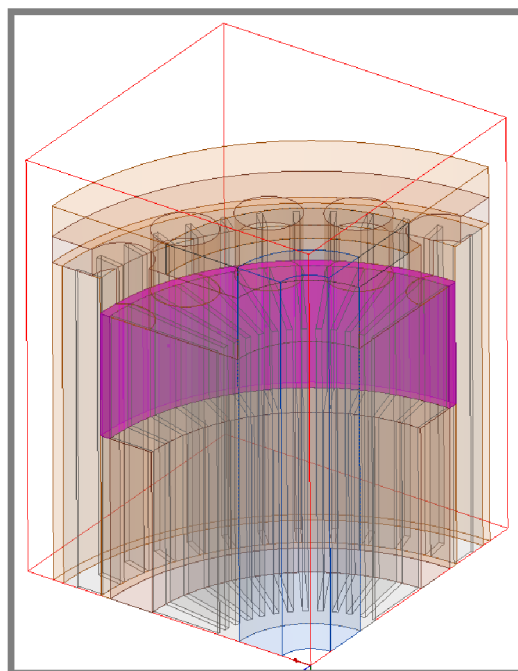
Sledovaná hodnota magnetického toku je určena integrálem magnetického toku v objemu vymezeném ve škrticí šterbině mezi jádrem a pláštěm (obr. 44). Průměrná magnetická indukce se tedy v programu numericky počítá dle vzorce (4).

$$B = \frac{\iiint |\vec{B}| dV}{V} \quad (4)$$

$B$  je magnetická indukce a  $V$  je objem.



Obr. 43 Nedrážkovaná (modrá) a drážkovaná část (zelená) jádra MR tlumiče



Obr. 44 Objem škrticí šterbiny

### 4.3 Zalívání drážek

Pro zalívání drážek plastem budou soustružením vyrobeny hliníkové formy s vnitřními úkosi (výkresy jsou přiloženy k diplomové práci), aby bylo možné vylisování odlitků. Díly forem budou slepeny a zatěsněny tavnou pistolí běžným plastem. Odlívání bude provedeno ve vakuové komoře materiálem PR 700, který má podobné vlastnosti, jako rozšířený plast ABS (dobré mechanické vlastnosti a tepelná odolnost). Samotné odlívání bude provedeno dle standardního postupu:

- 1) složky A i B plastu PR 700 budou protřepány v plastových nádobách, ve kterých jsou skladovány
- 2) bude odváženo 40 ml složky A a 50 ml složky B
- 3) obě složky budou půl hodinu vakuovány pro odstranění bublin při tlaku 0 až 10 mbar
- 4) formy s díly obvodu budou zahřáty na 70 °C
- 5) tlak bude zvýšen na 100 mbar a bude provedeno automatické slití složek a míchání speciální vrtulkou po dobu 30 sekund
- 6) pro vytvrzení budou odlitky ponechány po dobu jedné hodiny v peci při teplotě 70 °C

Poté budou odlitky vylišovány z forem a díly očištěny od přebytečného plastu:

- 1) ručním lisem budou odlitky vylišovány z forem
- 2) soustruhem bude plast obroben tak, aby zůstala vrstva cca 0,2 mm (aby nedošlo k poškození funkčních částí)
- 3) nožem a brusným papírem bude zbylý přebytečný plast odlámán a díly očištěny

---

## 4.4 Experimentální určení vlastností

Účelem experimentů bude ověřit teoretické předpoklady a výsledky simulací. Cílem je dokázat předpokládaný vliv vlastností materiálu a geometrie (drážek) na časovou odezvu MR tlumiče.

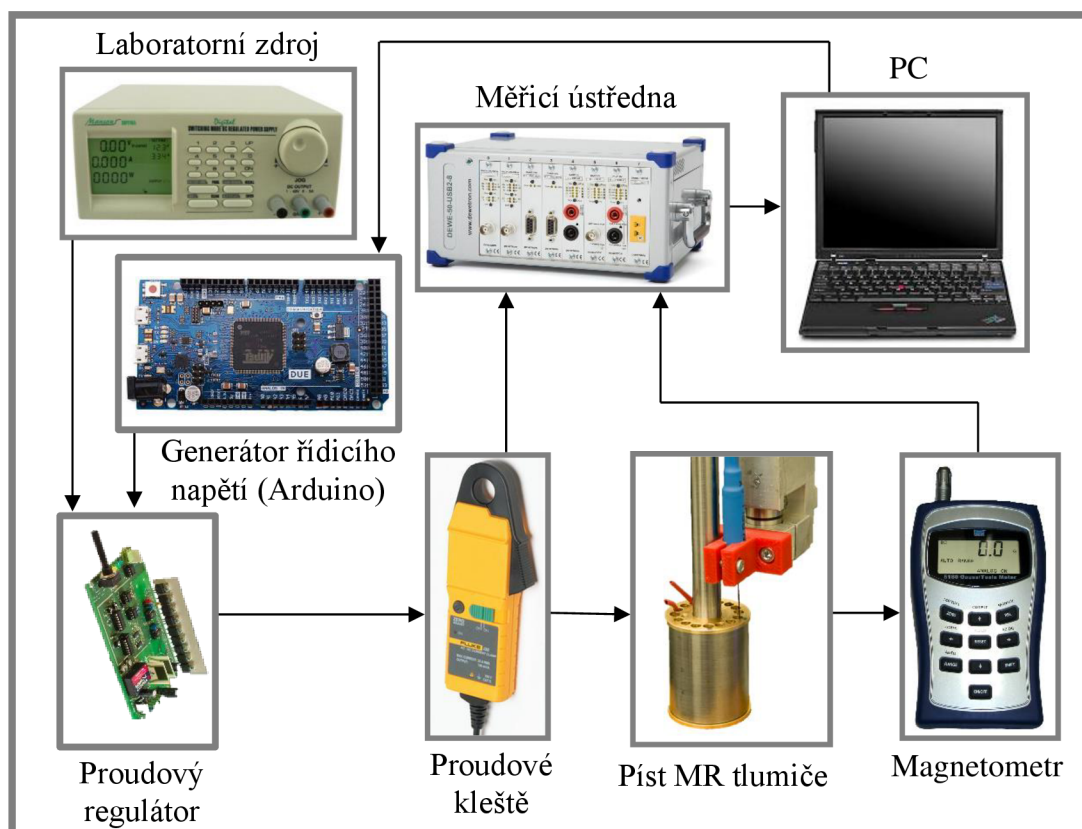
---

### 4.4.1 Měření odezvy magnetické indukce

Odezva magnetické indukce tlumiče bude měřena bez MR kapaliny (na vzduchu). To neodpovídá uspořádání v tlumiči, avšak MR kapalina má relativní permeabilitu větší než vzduch, což znemožňuje přímé měření mag. indukce Hallovy sondou. Měření na vzduchu však budou použita pro porovnání s modelem MR pístu na vzduchu a lze předpokládat, že pokud budou výsledky simulací odpovídat realitě na vzduchu, budou odpovídat i s MR kapalinou. Pro lepší magnetické vlastnosti bude provedeno tepelné zpracování kovových dílů.

Experimenty budou realizovány pomocí měřicího okruhu schematicky znázorněného na obr. 45. Pro statická měření BI křivek bude pomocí laboratorního zdroje nejdříve magnetický obvod odmagnetován, poté bude pozvolna nastavováno 0 A až 5 A, a poté -5 A a znovu 0 A (5 A je maximum laboratorního zdroje a lze předpokládat, že při tak silném proudu by již mělo začít docházet k saturaci obvodu). Při transientních měřeních rychlosti regulace bude Arduinem DUE nastavován skok proudu z 0 A na 2 A a naopak. Přitom na proudovém regulátoru budou postupně nastaveny 3 různé módy – ten totiž může fungovat buď v napěťovém módu s přesným nastavením budicího napětí (měřeno bude při 12 V a 30 V), ale také v režimu přepětí, ve kterém s využitím kondenzátoru vytváří napětí až 150 V (napětí zdroje bude pro režim přepětí 12 V). Elektrický proud bude měřen proudovými kleštěmi Fluke i30s, magnetická indukce pomocí Hallovy sondy STB1X-0201 (průměr aktivní oblasti 0,64 mm, tloušťka sondy 0,55 mm) a magnetometru Tesla meter FW Bell 5180. Záznam bude proveden měřicí ústřednou DEWE-50 vzorkovací frekvencí 200000 Hz.





Obr. 45 Schéma měřicího okruhu pro měření mag. indukce na vzduchu

#### 4.4.2 Měření silové odezvy tlumiče

Klíčovým parametrem MR tlumiče je rychlost regulace tlumicí síly. Zásadní vliv na rychlost regulace má rychlost změny magnetické indukce ve škrtníci štěrbině, ale přímé měření magnetické indukce v tlumiči naplněném MR kapalinou není možné (permeabilita MR kapaliny je mnohonásobně větší než Hallovy sondy). Z toho důvodu je možné jedině přímé měření tlumicí síly, které bude provedeno na pulzačním testeru tlumičů Inova (obr. 46).

Strecker a spol. již v roce 2015 provedli měření s totožným tlumičem, ale s jádrem bez drážek z oceli a z feritu (obr. 47) [1]. Aby bylo možné porovnání s jejich výsledky, bude použita podobná metodika měření a vyhodnocení.

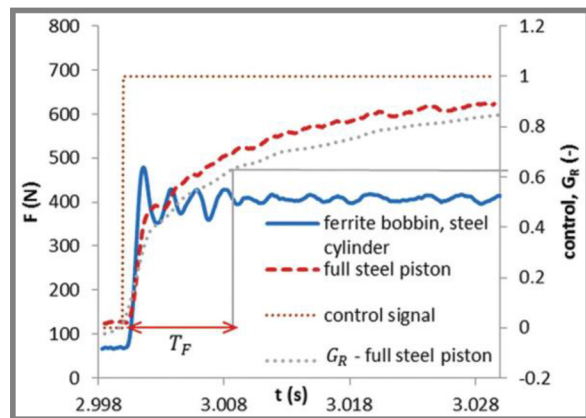
Síla bude měřena siloměrem HBM U2AD1/2 a pozice pístu odporovým senzorem MM VLP15\$A150 (obr. 49). Data budou zaznamenávána měřicí ústřednou Dewetron DEWE-800 s vzorkovací frekvencí 50 kHz. Pohyb pístu bude harmonický a trojúhelníkový s takovými frekvencemi, aby bylo dosaženo při obou tvarech průběhu stejných max. rychlostí. Řídicí proud bude střídavě 2 periody kmitání tlumiče vypnutý a 2 periody zapnutý (obr. 48) a bude měřen proudovými kleštěmi Fluke i30s (obr. 45) – proud bude sepnut vždy ve chvíli max. rychlosti pístu. Díky tomu bude určena časová závislost síly při maximálním vybuzení tlumiče a bez buzení, a při přechodu mezi těmito stavy bude možné určit, za jak dlouho tlumič dosáhne 63,21 % cílového stavu. Toto vyhodnocení bude provedeno skriptem, který bude porovnávat hodnotu síly po sepnutí s hodnotou síly o periodu později tak dlouho, dokud síla po sepnutí nedosáhne 63,21 % síly v trvale sepnutém stavu.

Dále bude kontrolována teplota teplotním čidlem PT100, protože příliš velký teplotní rozdíl by omezoval opakovatelnost experimentů – měření tedy bude pozastaveno při překročení teploty 40 °C. Vyrovňovací část jednoplášťového tlumiče bude při všech

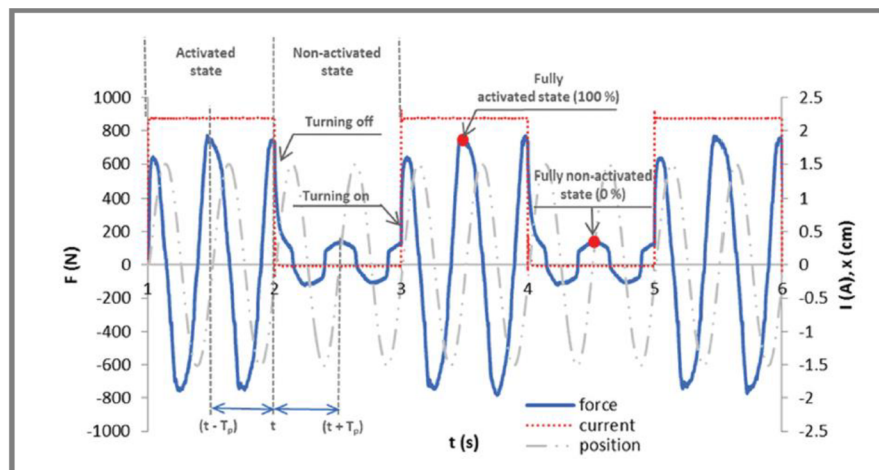
testech natlakovaná vzduchem na 2 MPa, takže při stlačování bude tlumič působit větší silou než při uvolňování (o cca 400 N).



Obr. 46 Tester tlumičů Inova [34]



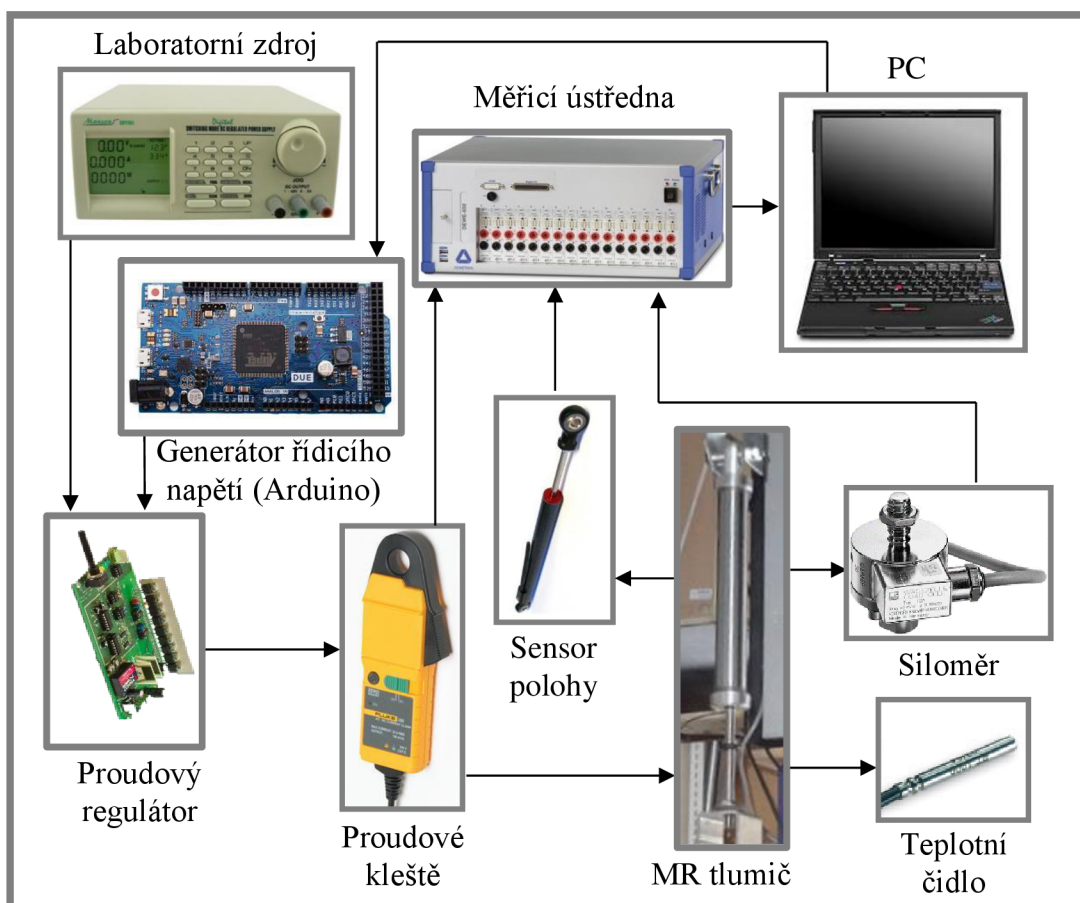
Obr. 47 Silové odezvy MR tlumiče s ocelovým a feritovým jádrem bez drážek [1]



Obr. 48 Průběh proudu a síly tlumiče při měření Streckera a spol. [1]

Tab. 2 Konfigurace měření silové odezvy

<b>Max. rychlost pístu [m·s<sup>-1</sup>]</b>	0,1; 0,2; 0,3
<b>Budicí proud [A]</b>	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5
<b>Tvar průběhu polohy</b>	Harmonický; Trojúhelníkový
<b>Materiál jádra/pláště</b>	Feritové jádro/S235JRG plášť Jádro i plášť z el. vodivého materiálu Jádro i plášť z mag. měkkého kompozitu Jádro i plášť z el. vodivého materiálu s drážkami



Obr. 49 Schéma měřicího okruhu pro měření MR tlumiče za provozu

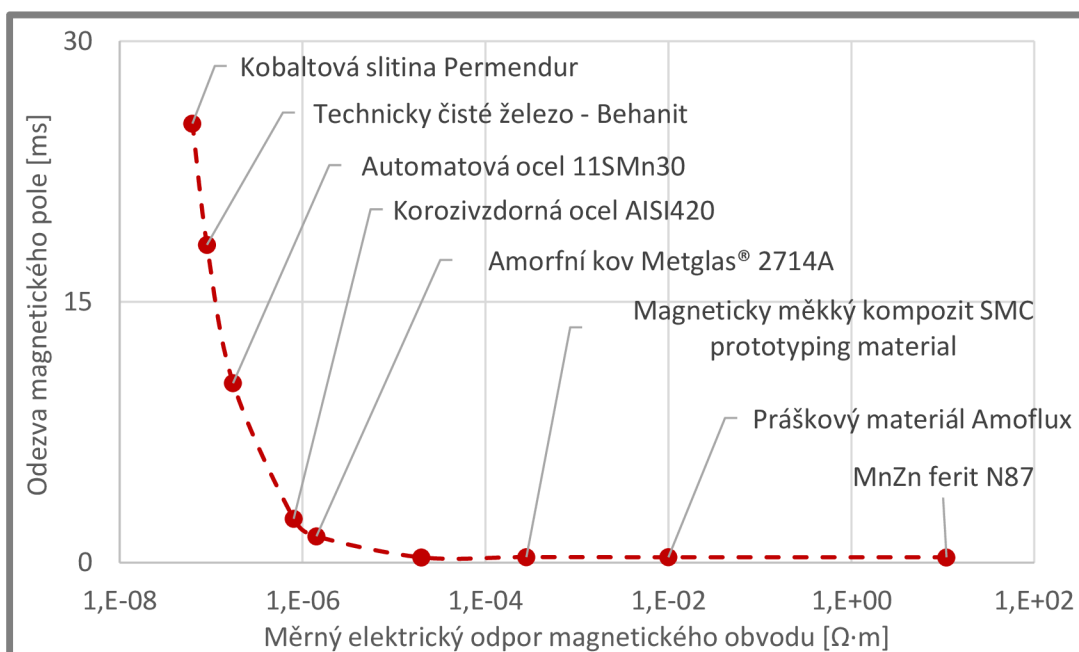
Protože měření MR tlumiče Streckera a spol. [1] bylo zaznamenáváno přímo datovým systémem pulsátoru Inova, bude nyní vhodné přeměřit původní variantu feritového tlumiče. Očekává se lepší synchronizace měřicích kanálů, která přinese jednodušší vyhodnocení získaných dat.

Silová odezva tlumiče bude změřena pro všechny kombinace variant nastavení uvedených v tab. 2. Rychlost pístu  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  byla zvolena dle metod Streckera a spol., navíc bude změřena silová odezva i při poloviční a dvojnásobné rychlosti (pro ověření hydrodynamických vlivů na rychlost regulace tlumiče). Přebuzení bude nastaveno na max. hodnotu, kterou dovolí regulátor (při příliš velkém přebuzení dochází k oscilaci elektrických obvodů regulátoru, což znehodnocuje experiment). Protože měření Streckera a spol. dokázalo zásadní závislost doby odezvy na budícím proudu, bude měření provedeno při 0,5 až při 2,5 A. Se všemi kombinacemi výše uvedených nastavení budou změřeny tlumiče s magnetickými obvody se 4 různými konfiguracemi materiálů (tab. 2) – celkem je tedy plánováno provést měření silové odezvy při 120 různých konfiguracích.

Nejdůležitějšími kritérii budou rychlost odezvy (nárůst síly na 63,21 % a na 90 % cílové hodnoty) a dynamický rozsah (poměr síly při určitém proudu a rychlosti pístu ku síle při stejné rychlosti, ale bez napájení proudem).

## 5 VÝSLEDKY

Předpokladem vhodné volby materiálu magnetického obvodu rychlého MR tlumiče je znalost vlivu el. odporu materiálu na dobu odezvy tlumiče. Z toho důvodu byly provedeny MKP simulace pro obvod se stále stejnou B-H charakteristikou (odpovídající standardní automatové oceli 11SMn30), ale proměnlivým el. odporem tak, aby byly zastoupeny všechny běžné typy magneticky měkkých materiálů. Byla sledována odezva poklesu mag. indukce v MR kapalině na pokles proudu z 2 A na 0 A za 0,3 ms. Z výsledků (obr. 50) vyplývá, že magneticky měkké kompozity a ferity svým vysokým el. odporem zajišťují okamžitou časovou odezvu. Naopak pokud odpor materiálu poklesne pod  $10^{-6} \Omega \cdot m$ , vlivem vířivých proudů se odezva výrazně prodlužuje až k téměř 30 milisekundám.

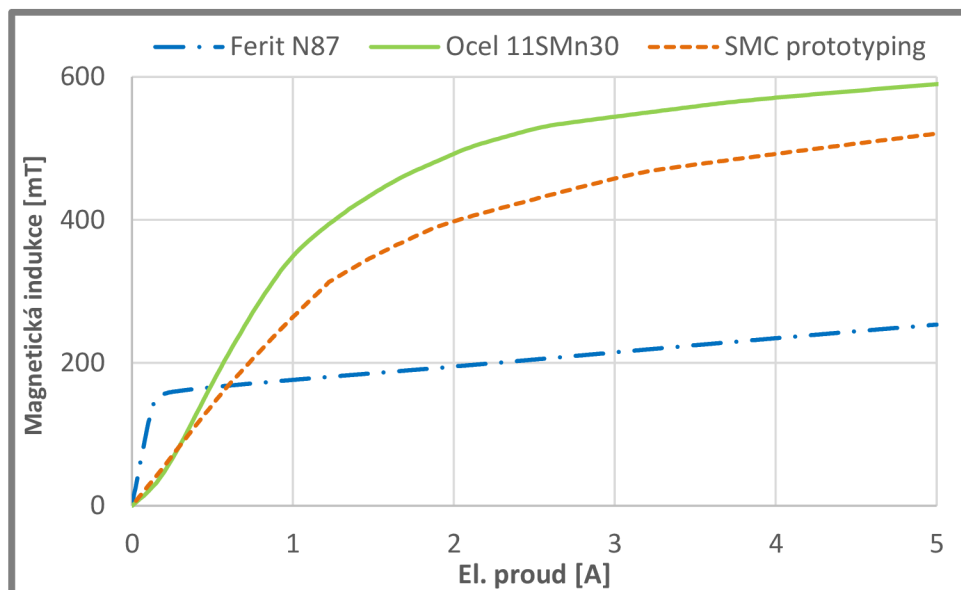


Obr. 50 Odezva mag. pole tlumiče v závislosti na elektrickém odporu mag. obvodu

Z tohoto hlediska se tedy jako nejvhodnější varianta jeví využití magneticky měkkých kompozitů (SMC). Jejich hlavními možnými nevýhodami jsou však nízká permeabilita, která by mohla vést k zásadnímu snížení dynamického rozsahu, a také horší mechanické vlastnosti a problematická obrobitelnost. Obavy z první nevýhody byly zmírněny statickou simulací - v porovnání s běžnou ocelí (která se komerčně používá v MR tlumičích) sice má SMC prototyping materiál s MR kapalinou MRF 132-DG při provozních 2 A o cca 20 % nižší mag. indukci, ale vůči feritu N87 se stále jedná o dvojnásobné zlepšení (obr. 51). Další výhodou oceli a SMC materiálů je pozvolná saturace – skoková saturace feritu způsobuje komplikace při regulaci tlumiče v okolí bodu saturace<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Ferit N87 není vhodný pro tuto konstrukci tlumiče, protože má příliš velkou permeabilitu – vykazuje příliš velkou citlivost na změnu proudu. Jeho použití by vyžadovalo konstrukční změny (např. snížený počet závitů), ale kvůli nízké mezi nasycení ferity nemohou zajistit dynamický rozsah srovnatelný s SMC nebo ocelmi





Obr. 51 Statické B-I charakteristiky zvolených materiálů porovnané s feritem

Pro posouzení obrobitelnosti byly zajištěny vzorky materiálu Kool M $\mu$  od firmy Magnetics a SMC prototyping od firmy Sintex. Oba vzorky bylo možné bez problémů soustružit běžnými nástroji, avšak po odstranění povrchové ochrany vzorku z materiálu Kool M $\mu$  docházelo k drolení materiálu a povrch měl nedostatečnou kvalitu (obr. 52). Naopak obrobený povrch SMC prototyping materiálu byl soudržný, ale s velkým množstvím pórů (obr. 53)<sup>9</sup>. Vzhledem k tomu, že oba materiály mají podobné magnetické vlastnosti, byl vzhledem k nesoudržnosti povrchu Kool M $\mu$  zvolen SMC prototyping materiál<sup>10</sup>.



Obr. 52 Vzorek Kool M $\mu$  po obrobení



Obr. 53 Vzorek SMC prototyping po obrobení

Oproti běžné oceli má však zvolený SMC materiál několik nevýhod – menší dynamický rozsah, horší mechanické vlastnosti a nízkou kvalitu povrchu.

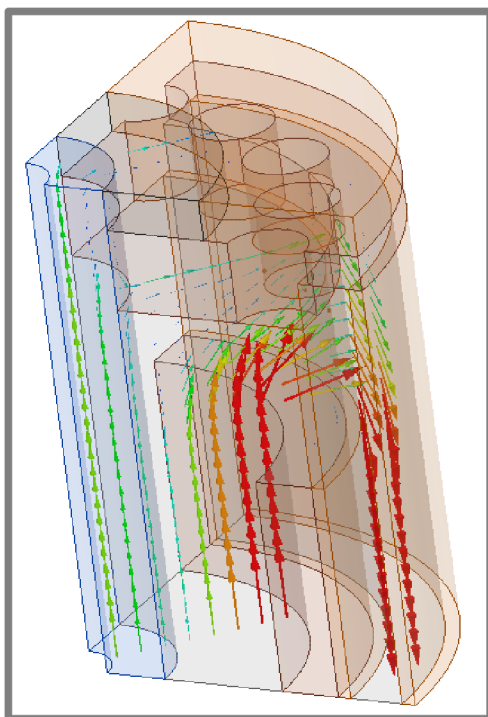
<sup>9</sup> Soustružení bylo provedeno nožem z rychlořezné oceli

<sup>10</sup> Dalším důvodem byla i problematická dostupnost materiálu Kool M $\mu$  v požadovaných rozměrech.

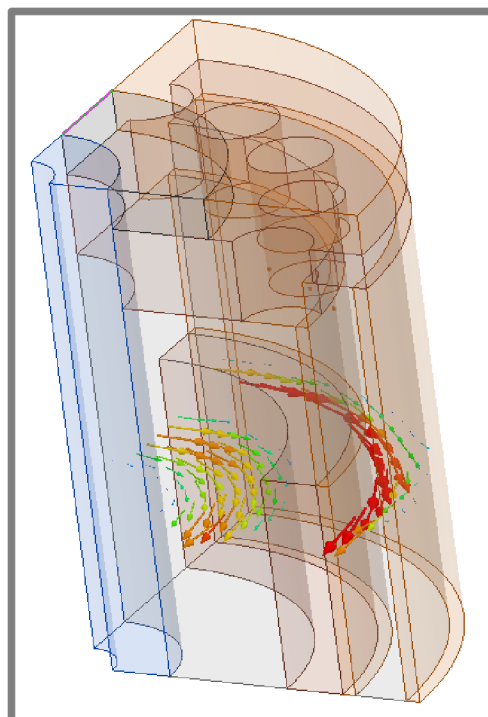
Druhou možností dosažení krátké odezvy a velkého dyn. rozsahu je vyhotovení vhodně uspořádaných drážek do kovového mag. obvodu – tím by teoreticky mohly být zajištěny výborné vlastnosti po všech relevantních stránkách.

Protože hlavním cílem v této fázi výzkumu bylo ověření vlivu drážkování na odezvu a dynamický rozsah, byla zvolena automatová ocel 11SMn30, vyznačující se výbornou obrobitelností, dobrými mechanickými a magnetickými vlastnostmi a mezi kovy středním elektrickým odporem (to je výhodné – příliš nízký odpor by pravděpodobně znemožnil okamžitou odezvu i s drážkami, ale příliš vysoký odpor by omezoval možnost rozlišení vlivu drážkování magnetického obvodu).

Pro volbu vhodného drážkování byla provedena řada MKP simulací. Drážky musí být vodorovné s osou pístu, protože v tomto směru probíhá magnetický tok (obr. 54). Vířivé proudy pak tečou v rovině kolmé (obr. 55), takže drážky v axiálním směru je omezují. Jiná konstelace drážek by omezovala magnetický tok nebo by nebránila vířivým proudům.



Obr. 54 Vektory magnetického toku vykreslené v rovině jeho směru



Obr. 55 Vektory elektrického proudu vykreslené v rovině jeho toku

Vzhledem k principu funkce tlumiče je nutné, aby drážky byly co nejužší – naproti širokým drážkám by ve škrtkové šterbině vznikaly oblasti slabého magnetického pole, kterými by MR kapalina volně protékala, což by mělo za následek výrazné snížení dynamického rozsahu tlumiče. Technologií, která dokáže zajistit kvalitní výrobu takto úzkých drážek i ve velké tloušťce (plášť musí být z jednoho kusu<sup>11</sup> a je dlouhá 41,6 mm) je elektrojiskrové obrábění. Jedná se o přesnou, avšak málo produktivní výrobní metodu, která na rozdíl od laserového řezání umožňuje výrobu drážek i do materiálu o tloušťce výrazně větší než 20 mm. Je možné běžně vyrábět drážky o šířce

<sup>11</sup> Jedná se o jednu z nevýhod současného MR tlumiče – plášť z více dílů by nezajistil dostatečnou tvarovou přesnost.

0,14 mm (např. ve firmě DI Industrial spol. s.r.o.). Řezání tenčím drátem je však mnohonásobně pomalejší – proto např. řezání drátem  $\varnothing 0,15$  mm je mnohonásobně dražší, než řezání drátem  $\varnothing 0,25$  mm (např. ve firmě Tvarsteel je cena za prořzlý  $\text{mm}^2$  0,15 Kč, respektive 0,60 Kč).

Elektrojiskrové drátové řezání není vhodné pro sériovou výrobu. Vzhledem k nákladům tedy bylo předpokládáno řezání drátem  $\varnothing 0,25$  mm, kterým je možné kvalitně vyrobit drážky o šířce 0,35 mm. Takové drážky by po změně konstrukce mohly být vyráběny i laserovým řezáním.

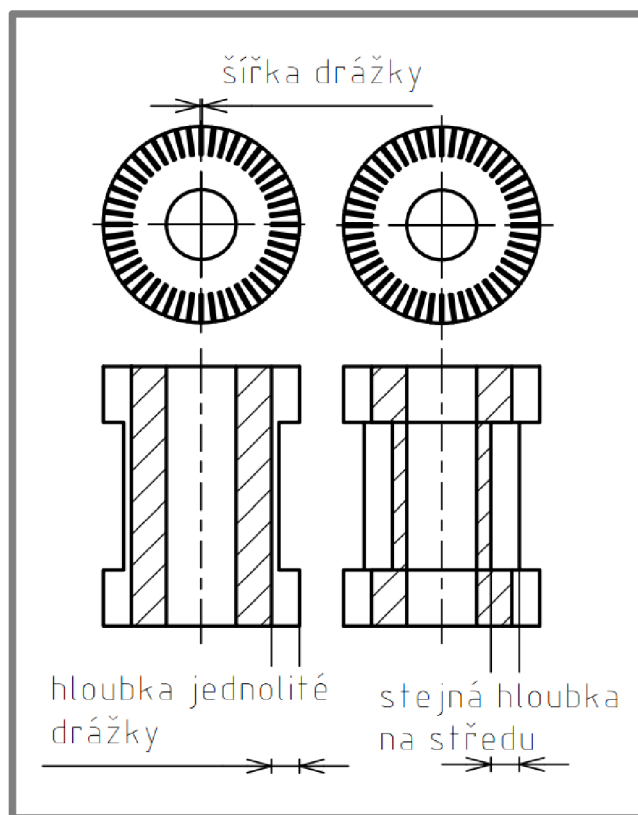
Pro posouzení výhodnosti úzkých drážek vzhledem k elektromagnetickým vlastnostem bylo rozhodnuto, že budou provedeny i simulace pro šířku drážek 0,7 mm. Dále bude zkoumán vliv konfigurace drážek, jejich hloubky a počtu.

### 5.1 Drážkování jader

5.1

Drážkování jádra i pláště zároveň by komplikovalo posouzení vlivu daného drážkování a navíc je výpočetně velmi náročné (je nutné výrazně zjemnit konečněprvkovou síť obou dílů). Z toho důvodu byly nejdříve provedeny MKP simulace v ANSYS Electromagnetics pro jádro s kombinacemi drážek uvedenými v tab. 3 a pláštěm bez drážek. Význam rozměrových parametrů je zřejmý z obr. 56.

Protože maximální zvolená hloubka drážky na středním díle jádra je 5 mm a protože byla provedena i referenční simulace bez drážek, jedná se celkem o 97 kombinací. Příloha 3 obsahuje všechny výsledky simulací drážkovaných jader. V této kapitole bude dále rozebrán konkrétní vliv jednotlivých parametrů.



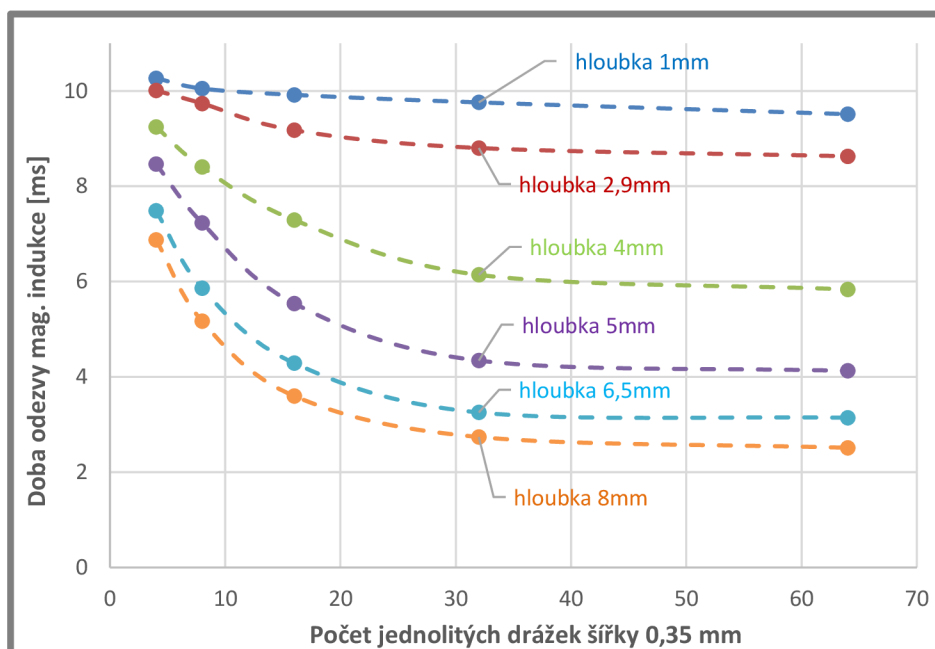
Obr. 56 Zakótování zkoumaných typů drážkování jádra



Tab. 3 Testované varianty drážkovaných jader

<b>Šířka [mm]</b>	0,35; 0,70
<b>Hloubka [mm]</b>	1; 2,9; 4; 5; 6,5; 8
<b>Drážek po obvodě</b>	4; 8; 16; 32; 64
<b>Typ drážek</b>	Jednotlivá drážka; Stejná hloubka na pólech i na středu

Bylo zjištěno, že hloubka drážek má výrazný pozitivní vliv na dobu odezvy (obr. 57) – je tedy výhodné zvolit co nejhlubší drážky, které technologie a požadavek na mechanickou soudržnost jádra povolí. Výhodnost velké hloubky drážek je způsobena tím, že magnetické pole prochází celým průřezem jádra, ale i pístnicí (obr. 54) – z toho důvodu by mohlo být výhodné i drážkování pístnice, které však není při současné konstrukci technologicky proveditelné.



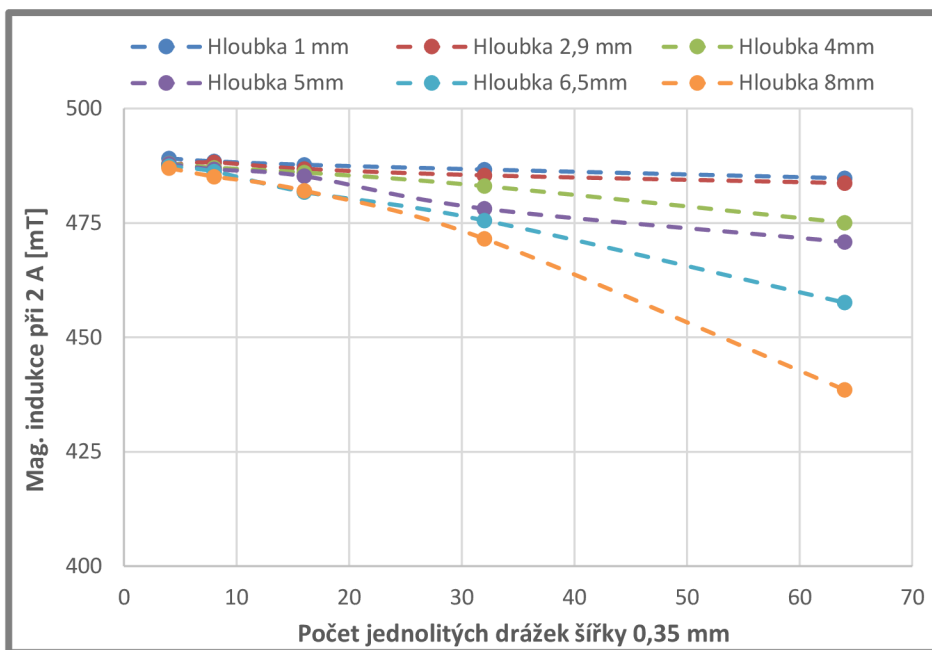
Obr. 57 Doba odezvy s jádry s jednotlivými drážkami šířky 0,35 mm

Vyšší počet drážek také zajišťuje zkrácení odezvy (obr. 57), ale s jejich rostoucím počtem tento efekt klesá (až zhruba u 50 při hloubce 8mm již nedochází k dalšímu zkrácení odezvy). Dostatečný počet drážek zřejmě eliminuje vířivé proudy v drážkované oblasti a odezvu již zpomalují jen vířivé proudy mimo tuto oblast.

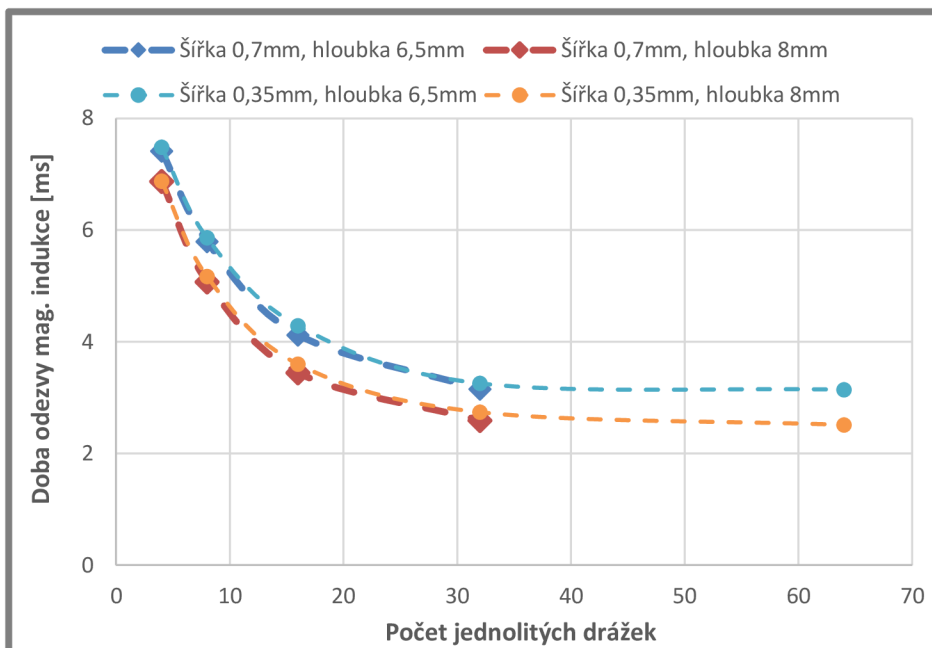
Vyšší počet drážek i jejich hloubka však logicky mají negativní dopad na maximální indukci, kterou obvod vytváří ve škrtní šterbině (obr. 58). Zvláště, pokud mezi drážkami zbyde již jen malé množství materiálu, dochází ke zřetelnému poklesu indukce (např. ve variantě 64 jednotlivých drážek šířky 0,35 mm a hloubky 8 mm se jedná o cca 10% pokles).

Dále byly zkoumány drážky o šířce 0,7 mm. Již bylo vysvětleno, že větší šířka drážek má negativní vliv na dynamický rozsah tlumiče vzhledem k nerovnoměrnému magnetickému poli. Dalo se ale předpokládat, že širší drážky zajistí rychlejší odezvu – to se ale téměř nestalo (obr. 59). Navíc se potvrdilo, že větší šířka drážek způsobí výrazné snížení magnetické indukce (obr. 60). Šířka drážek v jádře tedy nemá žádný

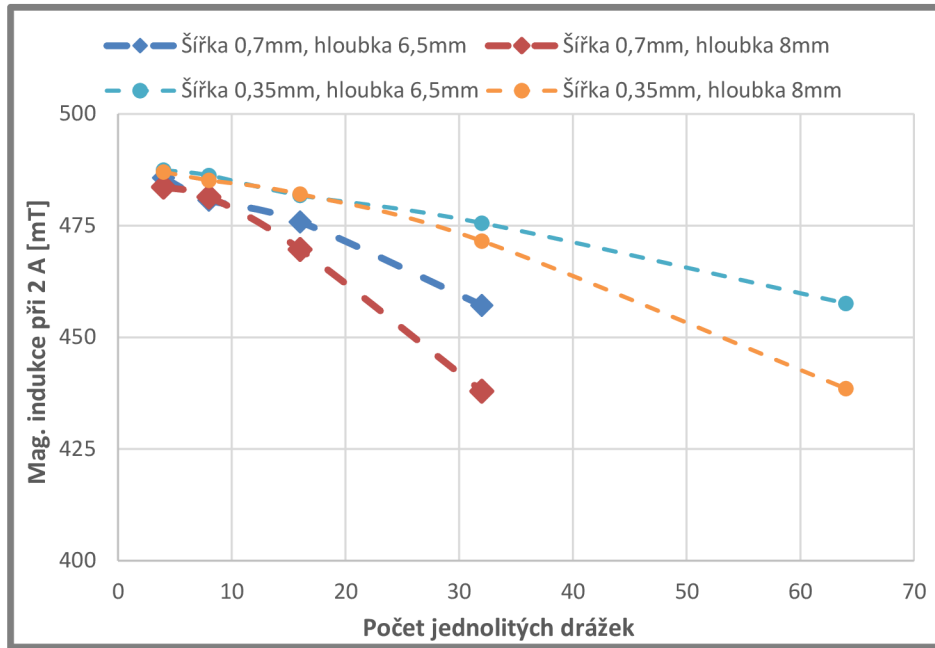
pozitivní dopad na vlastnosti MR tlumiče, ale výrazně snižuje jeho dynamický rozsah – proto je nutné využívat co nejužší drážky v rámci technologických možností.



Obr. 58 Magnetická indukce s jádry s jednotlivými drážkami šířky 0,35 mm

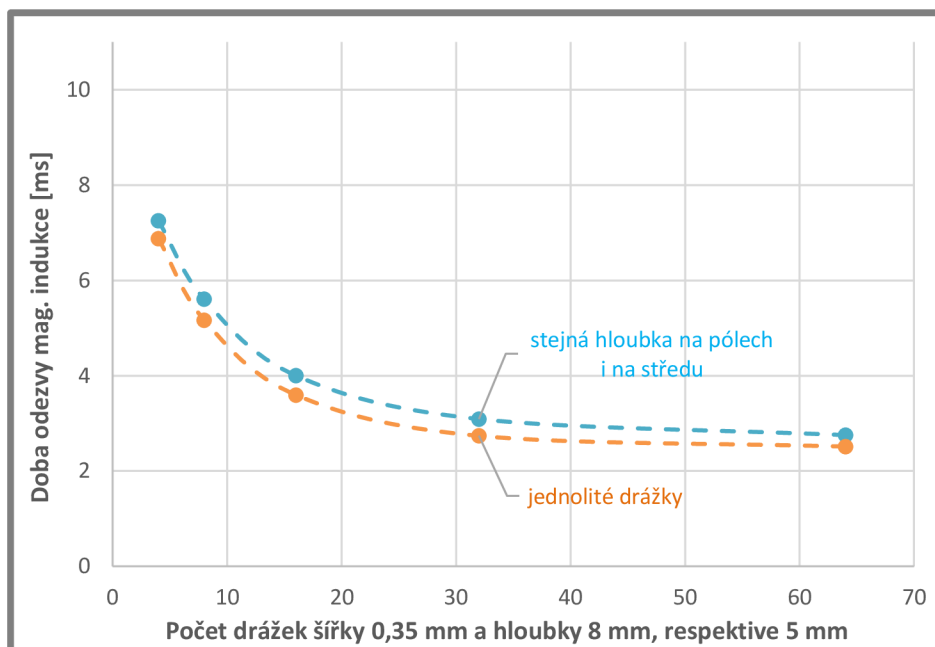


Obr. 59 Doba odezvy s jádry s jednotlivými drážkami velkých hloubek



Obr. 60 Magnetická indukce s jádry s jednotlivými drážkami velkých hloubek

Protože ocelové jádro bylo vyrobeno ze třech dílů (což umožní při experimentech kombinovat póly a středy jádra s drážkami a bez drážek, ale výhodou mělo být i snadné nasouvání cívky, které se ale nakonec kvůli nedostatku prostoru nezdařilo realizovat<sup>12</sup>), znatelnou ekonomickou úsporou mohla zajistit nižší hloubka drážek na pólech (obr. 56) – ta však při variantě s nejkratší odezvou vede k jejímu prodloužení (obr. 61), takže byla zavrhnuta.



Obr. 61 Porovnání jednotlivých drážek s drážkami se stejnou šířkou na pólech i na středu

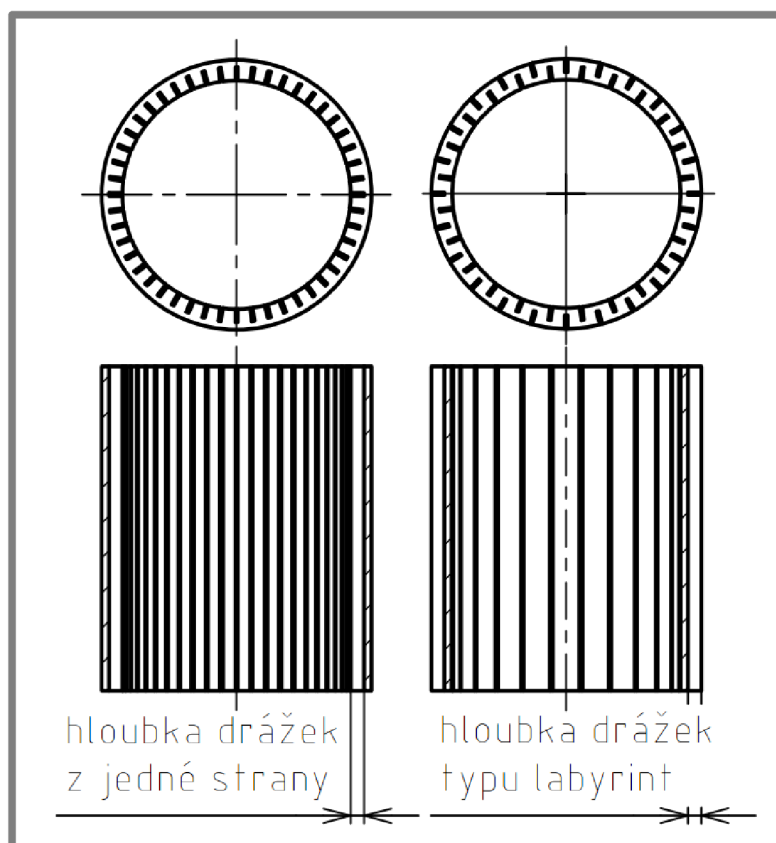
<sup>12</sup> Z toho důvodu bylo bohužel nutné na každé jednotlivé experimentální jádro navíjet cívku.

## 5.2 Drážkování pláště

Plášť je charakteristický tím, že má oproti jádru menší průřez (takže úběr materiálu drážkami bude výrazněji snižovat mag. indukci ve štěrbině) a zároveň větší poloměr a drážky od povrchu se rozbíhají, takže je možné jich vyřezat větší množství.

Byly vypočteny odezvy pístů s jádrem bez drážek a pláště s 2 druhy drážkování – z jedné strany a z obou stran – „labyrint“ (obr. 62).

Zkoušeny byly všechny kombinace uvedené v tab. 4. Příloha 4 obsahuje všechny získané výsledky – dále bude rozebrán vliv jednotlivých parametrů drážkování.

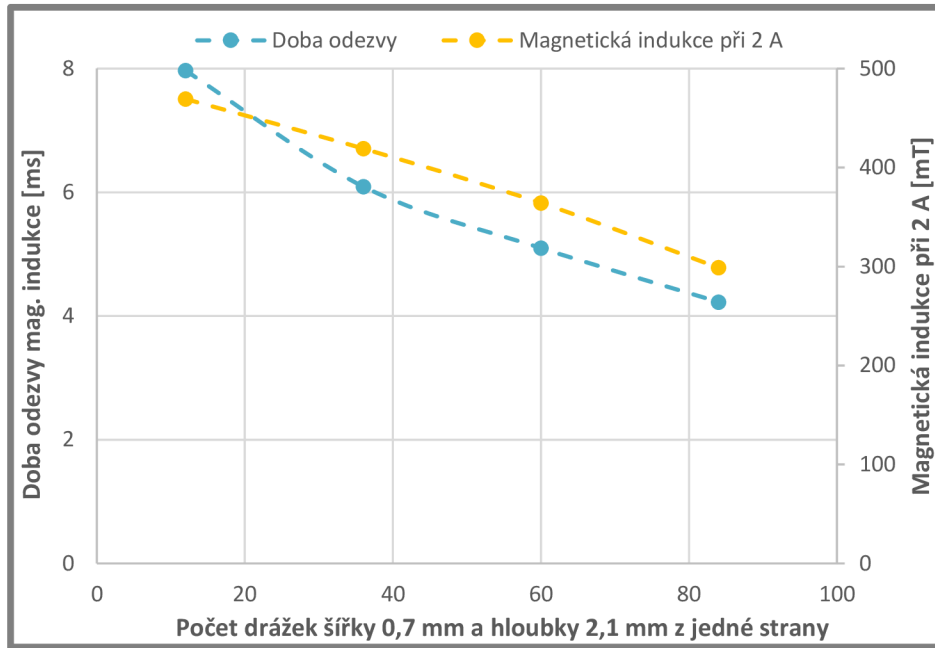


Obr. 62 Zakótování zkoumaných typů drážkování pláště

Tab. 4 Zkoušené varianty drážkování pláště

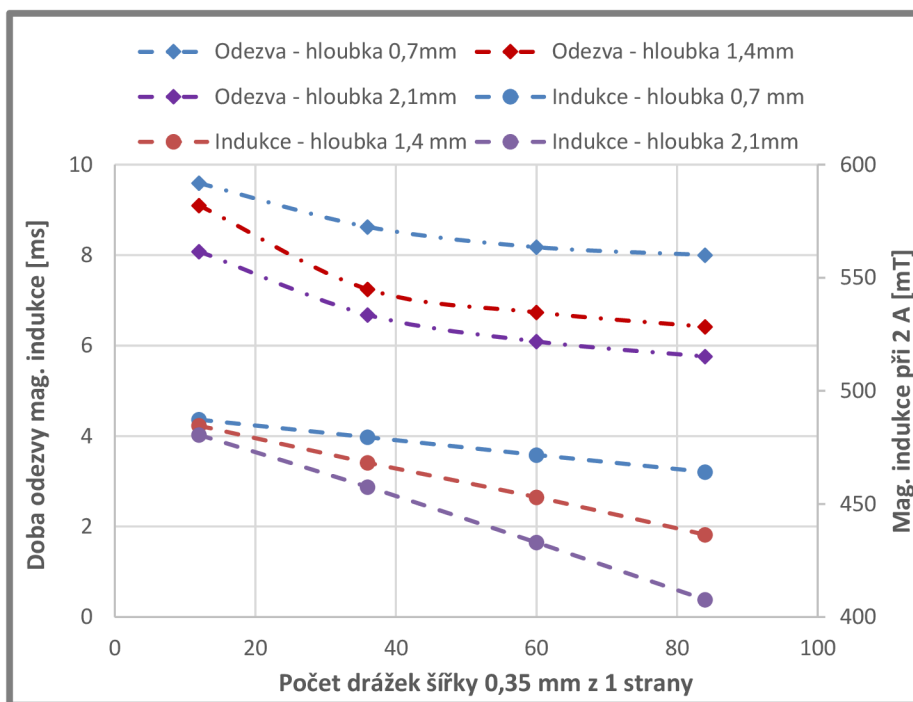
Šířka drážek [mm]	0,35; 0,70
Hloubka drážek [mm]	0,7; 1,4; 2,1
Drážek po obvodě	12; 36; 60; 84
Typ drážek	Z 1 strany; Labyrint

Posouzení přínosu drážkování pláště komplikuje fakt, že hlavní část prodloužení odezvy způsobují vířivé proudy v jádře - to je potvrzeno tím, že nejvíce drážkovaná varianta pláště zajistila odezvu 4,23 ms, kdežto jádra 2,51 ms. Navíc v případě nejrychlejšího pláště došlo k poklesu max. indukce ve štěrbině o 39 % (v případě jádra pouze o 10 %). To napovídá tomu, že ke zkrácení doby odezvy v případě drážkování pláště dochází zejm. snížením magnetické indukce a tím i vířivých proudů v jádře – silná závislost doby odezvy a magnetické indukce ve štěrbině je vidět také na obr. 63.



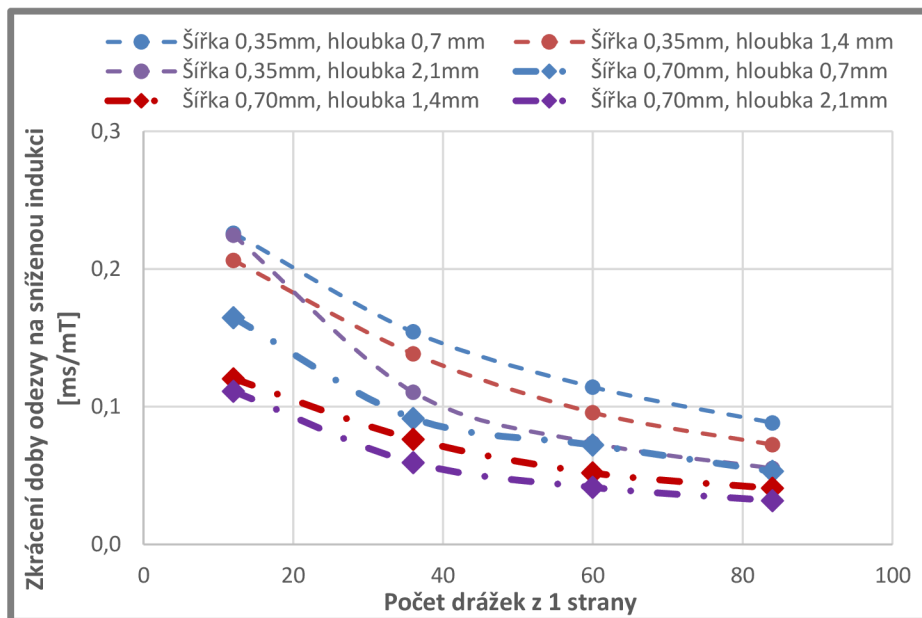
Obr. 63 Srovnání zkrácení doby odezvy a poklesu magnetické indukce obvodu s pláštěm s drážkami šířky 0,7 mm a hloubky 2,1 mm

Tomu dále napovídá i obr. 64, ze kterého je zřejmé, že do cca 40 drážek a do hloubky cca 1,4 mm dochází k výraznému zkrácení doby odezvy, ale další zvětšování počtu drážek a jejich hloubky již příliš dobu odezvy nezkracuje, ale naopak výrazně snižuje magnetickou indukci ve šterbině. Vhodným kritériem pro porovnání různých typů drážkování je tedy poměr zkrácení doby odezvy vůči poklesu magnetické indukce.



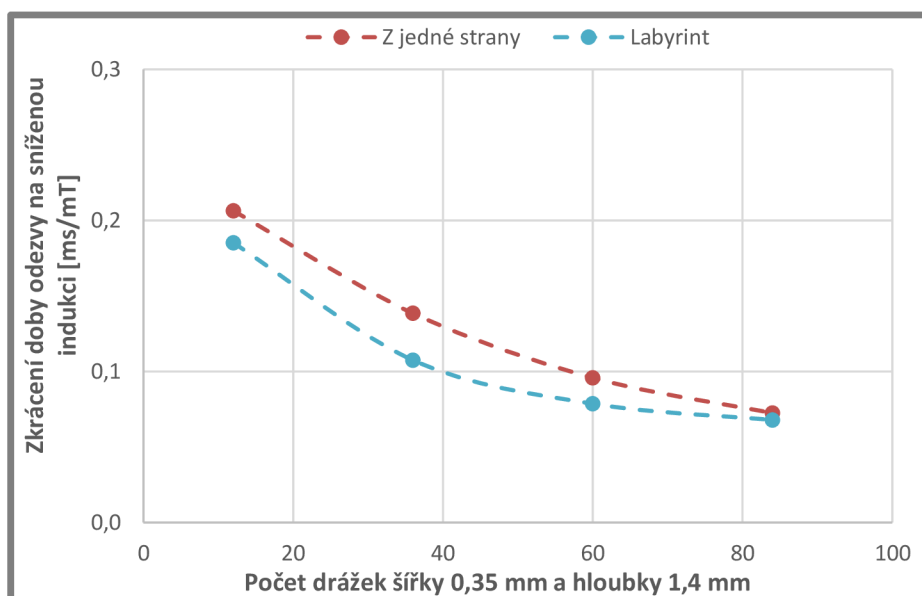
Obr. 64 Odezva a indukce obvodu s drážkami šířky 0,35 mm z jedné strany v plášti

S využitím tohoto kritéria byly nejdříve porovnány drážky o šířce 0,35 a 0,70 mm (obr. 65). Znovu se potvrdila nevýhodnost širokých drážek – dvojnásobně širší drážky zajišťují pouze zhruba poloviční zkrácení odezvy vůči snížení indukce ve srovnání s drážkami o šířce 0,35 mm.



Obr. 65 Zkrácení doby odezvy ku snížení indukce obvodů s pláští drážkoványi z jedné strany

Pro porovnání drážek typu labyrint s drážkami z jedné strany byly zvoleny zatím nejvýhodnější drážky o šířce 0,35 mm a hloubce 1,4 mm (obr. 66). Drážky typu labyrint jsou méně výhodné zřejmě z toho důvodu, že magnetické pole teče více po vnitřním povrchu pláště. Pouze při velmi velkém počtu drážek jsou obě varianty drážkování stejně nevýhodné.



Obr. 66 Zkrácení doby odezvy ku snížení indukce obvodů s pláští s drážkami o šířce 1,4 mm

### 5.3 Výroba vzorků

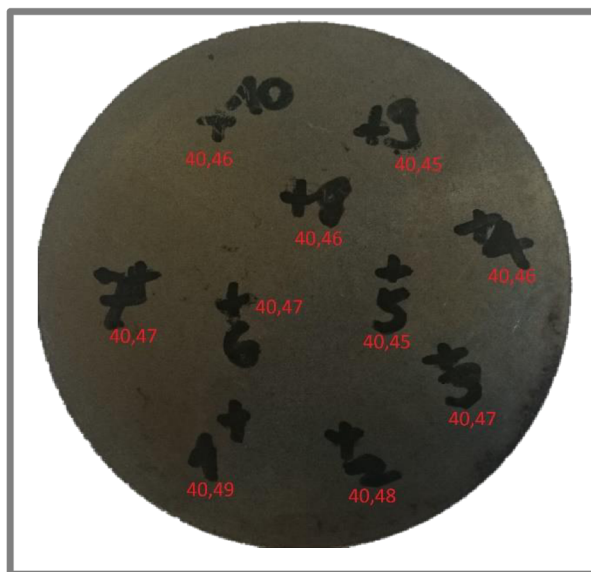
Z výsledků MKP simulací drážkovaných jader a plášťů plyne, že takováto úprava obou dílů může zajistit výrazné zkrácení odezvy bez výrazného snížení indukce. Bylo však nutné zvolit vhodné drážkování pro jádro i pro plášť a následně vyrobené drážky zalít elektricky nevodivým plastem tak, aby jimi v tlumiči neprotékala MR kapalina, čímž by měření drážkové varianty bylo nesrovnatelné s ostatními variantami.

Dále bylo nutné vyrobit obvod z SMC materiálu. O přípravě těchto dvou vzorků a jejich vlastnostech předpokládaných dle MKP pojednává zbytek této kapitoly.

#### 5.3.1 Vzorek z SMC materiálu

Protože píst MR tlumiče neodpovídá tvarově běžným aplikacím SMC materiálů (ty mají typicky menší rozměry), povedlo se v limitovaném čase zakoupit pouze polotovary o rozměrech cca  $\text{Ø}80 \times 40$  mm. Ve skutečnosti měl polotovary výšku kolem 40,47 mm (obr. 67), přičemž délka pláště je standardně 41,60 mm. Na jádře tak byl zkrácen průměr pro cívku o cca 1,1 mm – pro 120 závitů cívky ale zůstalo i tak dostatečné množství místa a díky zachování délky polů by tato úprava neměla mít měřitelný vliv na vlastnosti tlumiče.

Bylo rozhodnuto také otestovat možnost elektrojiskrového řezání tohoto SMC materiálu – byl vyříznut plášť a polotovary pro jádro, přičemž bylo dosaženo mimořádné přesnosti a minimálního odpadu. Na jádře pak byl běžným soustružnickým nožem obroběn průměr pro cívku a také bylo jádro zkráceno na potřebnou délku.



Obr. 67 Měření délky polotovaru z SMC materiálu

#### 5.3.2 Drážkovaný vzorek z automatové oceli 11SMn30

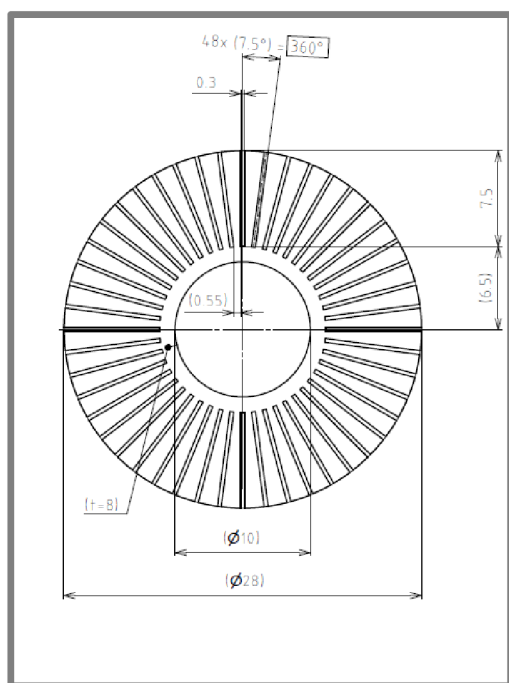
Z předchozích kapitol (5.1 a 5.2) jasně vyplynulo, že nejvýhodnější jsou drážky o šířce 0,35 mm o maximální hloubce vytvořené ze strany škrťací štěrbin. Vzhledem k souvislosti poklesu indukce a zkrácení odezvy však není možné jednoznačně určit nejvýhodnější hloubku a počet drážek.

V předchozích kapitolách se ukázalo, že výhodnější jsou drážky v jádře. Protože je hlavním cílem ověřit, zda je možné dosáhnout okamžité odezvy i s vodivým materiálem, bude za tímto účelem tolerován pokles indukce způsobený drážkováním jádra, dokud dochází ke zkrácení doby odezvy. Z konzultace s dodavatelskou firmou

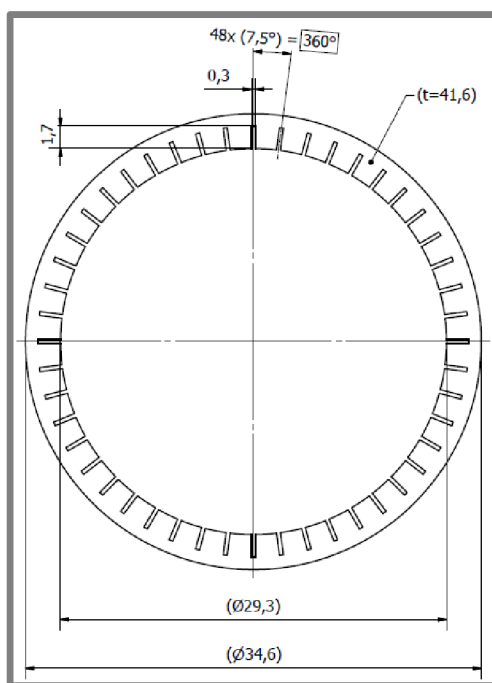


Tvarsteel vyplynul požadavek, aby pro kvalitní upnutí nebyla drážka vyrobena blíže ke středové díře jádra, než 1,5 mm – výhodnost hloubky je zřejmá z obr. 57. Protože při hloubce 8 mm nedošlo zdaleka k tak velkému zlepšení oproti 6,5 mm jako oproti 5 mm, je jasné, že výsledky pro hloubku 7,5 mm budou podobné, jako pro 8 mm. Ke znatelnému zlepšení také nedochází při překročení cca 50 drážek – vzhledem ke čtvrtinové symetrii modelu bylo zvoleno 48 drážek (obr. 68), aby bylo možné porovnání simulací s experimentem.

Plášť nemá tak zásadní vliv na odezvu jako jádro (kap. 5.2). Lze předpokládat, že nejvyšší průměrné indukce ve štěrbině bude dosaženo, pokud po celém obvodu budou drážky na plášti a jádře naproti sobě – při zachování rovnoměrné rozteče drážek je toto možné např. při počtu 24 nebo 48 drážek<sup>13</sup>. Dle obr. 64 byl zvolen počet drážek 48, protože zajišťuje výrazné zkrácení odezvy oproti 24 drážkám. Větší zkrácení zajišťují hlubší drážky, ale vzhledem k mechanickým vlastnostem bylo rozhodnuto ponechat bezpečnou tloušťku 1 mm (hloubka drážek 1,7 mm - obr. 69). Výhodou je, že oproti hloubce 2,1 mm bude zachována větší indukce ve štěrbině.



Obr. 68 Náčres prořezání jádra



Obr. 69 Náčres prořezání pláště

Před montáží do tlumiče bylo provedeno zalití vyrobených drážek plastem dle metod popsanych v kapitole 4.3. Při vakuování nesmíchaných složek však postupem času začalo u složky B při příliš nízkém tlaku docházet k varu, takže byl tlak zvýšen až na 30 mbar. Po cca minutě od smíchání složek bylo zalito jádro, po cca 3 minutách plášť – při jeho zalévání však začal smíchaný plast také vařit a z toho důvodu byl tlak přenastaven na 200 mbar, což problém ne zcela eliminovalo.

Toto selhání materiálu (var v podtlaku během doby zpracovatelnosti, která má být 6-7 minut) způsobilo výraznou pórovitost odlitého plastu. Na té se vzhledem k relativně

<sup>13</sup> Takováto konfigurace drážek navíc v budoucnu umožní zkoumat vliv nerovnoměrnosti mag. pole ve štěrbině na dynamický rozsah tlumiče – bude možné např. plášť pootočit o část rozteče a tím vznikne mezi všemi drážkami po obvodu stejná vzdálenost.

vysokému tlaku při odlévání mohl podílet i chybějící odvod vzduchu z forem. Nicméně pro posouzení kvality byly díly obvodu očištěny od přebytečného plastu. Výsledná kvalita zalití drážek není optimální (obr. 70, obr. 71), ale protože drážky jsou až na jednotlivé póry zality, lze předpokládat, že tato nedokonalá kvalita nebude mít měřitelný vliv na experimenty s drážkovaným tlumičem.



Obr. 70 Jádru z 11SMn30 s drážkami zalitými plastem PR 700



Obr. 71 Plášť z 11SMn30 s drážkami zalitými plastem PR 700

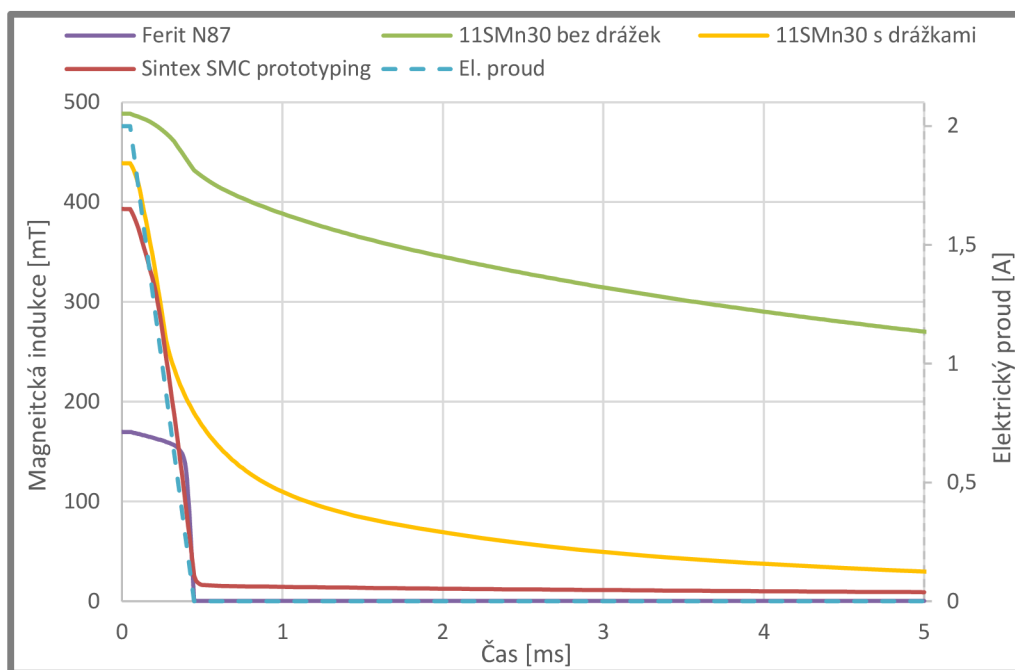
### 5.3.3 Porovnání navržených obvodů s feritovým obvodem

Vhodnost navržených obvodů pro MR tlumič byla ověřena MKP simulací – jako referenční varianty posloužily obvody z feritu a z 11SMn30 bez drážek (obr. 72). SMC materiál i drážkovaná varianta z automatové oceli zajišťují prakticky okamžitou odezvu, ale nevýhodou drážkované varianty je, že 10 % indukce dosahuje až po 3,4 ms, kdežto SMC prakticky okamžitě.

Výhodou drážkované varianty je mírně vyšší indukce – dosahuje 90 % indukce nedrážkované varianty, SMC pouze 80 %. V obou případech se však jedná o více než dvojnásobné zlepšení dynamického rozsahu oproti feritové variantě (tab. 5).

Tab. 5 Odezva navržených experimentálních obvodů na pokles proudu ze 2 A za 0,4 ms

	Doba odezvy [ms]	Max. indukce [mT]
<b>Ferit N87</b>	0,38	170
<b>11SMn30 bez drážek</b>	10,33	490
<b>11SMn30 s drážkami</b>	0,52	439
<b>Sintex SMC</b>	0,30	393



Obr. 72 Odezva navržených experimentálních obvodů na pokles proudu ze 2 A za 0,4 ms

#### 5.4 Výsledky měření magnetické indukce na vzduchu

5.4

Na vzduchu je indukce ve škrtníci štěrbině výrazně nižší, protože MR kapalina má zhruba 8x větší permeabilitu. Z toho důvodu i v magnetickém obvodu je při změně proudu menší změna magnetické indukce, vznikají slabší vířivé proudy a odezva je tím kratší.

Měření bylo provedeno dle metodiky popsané v kap. 4.4.1 při 3 různých módech přebuzení cívky. Avšak i při stejném módu proudového regulátoru se u jednotlivých variant magnetických obvodů výrazně lišila rychlost náběhu i poklesu proudu (tab. 6). U rychlého módu má na této odlišnosti největší podíl rozsah budících napětí, který byl u toho kterého magnetického obvodu regulátor schopen zajistit. U módů se shodným přebuzením 12 a 30 V odlišnou rychlost změny proudu způsobují indukované vířivé proudy, které brání změně magnetického pole v obvodu – čím k pomalejší změně magnetického pole pak dochází, tím je zdánlivě indukčnost cívky nižší (změna protékajícího proudu nezpůsobuje změnu magnetického pole) – proto je proud nejrychleji regulován v případě nejlépe elektricky vodivého magnetického obvodu (11SMn30 bez drážek) a nejpomaleji s nejméně vodivým (Sintex SMC prototyping material).

Zajímavé také je, že při 30 V a při maximálním přebuzení má změna proudu po celou dobu náběhu či poklesu přibližně stejnou rychlost. Při 12 V však dochází při náběhu ke zlomu a od určitého okamžiku se změna proudu výrazně zpomalí (to je zřejmě způsobeno vybitím kondenzátoru regulátoru, ve kterém je jinak při větším přebuzením uloženo větší množství energie, a tak se nestihne vybit).

Tab. 6 Doba změny proudu mezi hraničními hodnotami 0 a 2 A

Mód regulátoru	Nejpomalejší náběh proudu (materiál obvodu)	Nejrychlejší náběh proudu (materiál obvodu)	Nejpomalejší pokles proudu (materiál obvodu)	Nejrychlejší pokles proudu (materiál obvodu)
Pomalý (12 V)	1,85 ms (11SMn30 drážkované)	1,07 ms (11SMn30 bez drážek)	0,50 ms (Sintex SMC)	0,25 ms (11SMn30 bez drážek)
Stabilní (30 V)	0,63 ms (Sintex SMC)	0,19 ms (11SMn30 bez drážek)	0,41 ms (Sintex SMC)	0,18 ms (11SMn30 bez drážek)
Rychlý (max. V)	0,31 ms (Sintex SMC)	0,18 ms (Sintex jádro, 11SMn30 plášť bez drážek)	0,19 ms (Sintex SMC)	0,04 ms (11SMn30 bez drážek)

Nejrychlejší dobu odezvy magnetické indukce samozřejmě vykazují magnetické obvody, ve kterých je nejvíce zabráněno vířivým proudům (přestože odezvu prodlužuje pomalejší regulace proudu). Hodnoty odezev v tab. 7 až tab. 9 jsou uvedeny dle doby odezvy 1. řádu (dosažení 63,21 % max. indukce při náběhu, resp. 36,79 % při poklesu) a je v nich zahrnuto i zpoždění magnetometru (kolem 0,07 ms). Obvod z SMC prototyping materiálu a drážkovaný obvod z 11SMn30 vykazují srovnatelnou dobu odezvy, obvod z 11SMn30 bez drážek je výrazně pomalejší, než zbylé varianty. Co se týká jádra, je mnohem přínosnější drážkování jeho středu, než jeho okrajů (zrychlení odezvy při náběhu o cca 0,25 ms). Varianty s pláštěm bez drážek pak zaostávají zhruba o 0,3 ms za variantami s drážkovaným pláštěm.

Tab. 7 Doba odezvy při přebuzení 12 V

Jádro	Plášť	Doba náběhu B [ms]	Doba poklesu B [ms]
Sintex SMC	Sintex SMC	0,96	0,52
11SMn30 drážkované	11SMn30 drážkovaný	1,17	0,57
11SMn30 drážkovaný střed, plné kroužky	11SMn30 drážkovaný	1,33	0,68
11SMn30 drážkované	11SMn30 bez drážek	1,46	0,79
Sintex SMC	11SMn30 bez drážek	1,54	0,78
11SMn30 plný střed, drážkované kroužky	11SMn30 drážkovaný	1,61	1,15
11SMn30 bez drážek	11SMn30 bez drážek	1,98	1,81

Tab. 8 Doba odezvy při přebuzení 30 V

Jádro	Plášť	Doba náběhu B [ms]	Doba poklesu B [ms]
Sintex SMC	Sintex SMC	0,56	0,44
11SMn30 drážkované	11SMn30 drážkovaný	0,59	0,48
11SMn30 drážkovaný střed, plné kroužky	11SMn30 drážkovaný	0,72	0,68
11SMn30 drážkované	11SMn30 bez drážek	0,74	0,74
Sintex SMC	11SMn30 bez drážek	0,75	0,72
11SMn30 plný střed, drážkované kroužky	11SMn30 drážkovaný	0,95	1,09
11SMn30 bez drážek	11SMn30 bez drážek	1,64	1,74

Tab. 9 Doba odezvy při max. přebuzení

Jádro	Plášť	Doba náběhu B [ms]	Doba poklesu B [ms]
Sintex SMC	Sintex SMC	0,34	0,29
11SMn30 drážkované	11SMn30 drážkovaný	0,35	0,35
11SMn30 drážkovaný střed, plné kroužky	11SMn30 drážkovaný	0,60	0,59
Sintex SMC	11SMn30 bez drážek	0,64	0,61
11SMn30 drážkované	11SMn30 bez drážek	0,68	0,62
11SMn30 plný střed, drážkované kroužky	11SMn30 drážkovaný	0,84	1,00
11SMn30 bez drážek	11SMn30 bez drážek	1,43	1,61

Dle očekávání nejnižší magnetickou indukci (ale i remanenci) vytvořil obvod z SMC prototyping materiálu. V případě drážkovaných variant výrazně závisí na místě měření a na tom, jak jsou vůči sobě drážky na okraji jádra a na plášti pootočené. Pokud jsou pootočené, bylo naměřeno stabilnější pole (ale měření není zcela relevantní vzhledem k nemalým rozměrům Hallovy sondy<sup>14</sup>, která způsobí značné zprůměrování). Nejméně očekávaným výsledkem je to, že nejvyšší indukce bylo dosaženo kombinací SMC jádra a 11SMn30 pláště bez drážek – to může být způsobeno tím, že je SMC jádro o cca 1,1 mm kratší, než by mělo být při použití s 11SMn30 pláštěm.

<sup>14</sup> Aktivní oblast sondy je válcová o průměru průřezu 0,64 mm, přitom drážky mají šířku jen 0,35 mm



Tab. 10 Indukce při 2,05 A a následné remanence

Jádro	Plášť	Indukce min/max při 2,05 A [mT]	Remanence min/max po 2,05 A [mT]
Sintex SMC	Sintex SMC	152/156	12/12
11SMn30 drážkované	11SMn30 drážkovaný – drážky naproti sobě	156/181	17/16
11SMn30 drážkované	11SMn30 drážkovaný – drážky potočeny o $\frac{1}{2}$ rozteče	167/173	19/20
11SMn30 drážkované	11SMn30 bez drážek	neměřeno/172	neměřeno/19
11SMn30 bez drážek	11SMn30 bez drážek	173	14
11SMn30 drážkovaný střed, plné kroužky	11SMn30 drážkovaný	neměřeno/183	neměřeno/14
11SMn30 plný střed, drážkované kroužky	11SMn30 drážkovaný	neměřeno/183	neměřeno/19
Sintex SMC	11SMn30 bez drážek	190	14

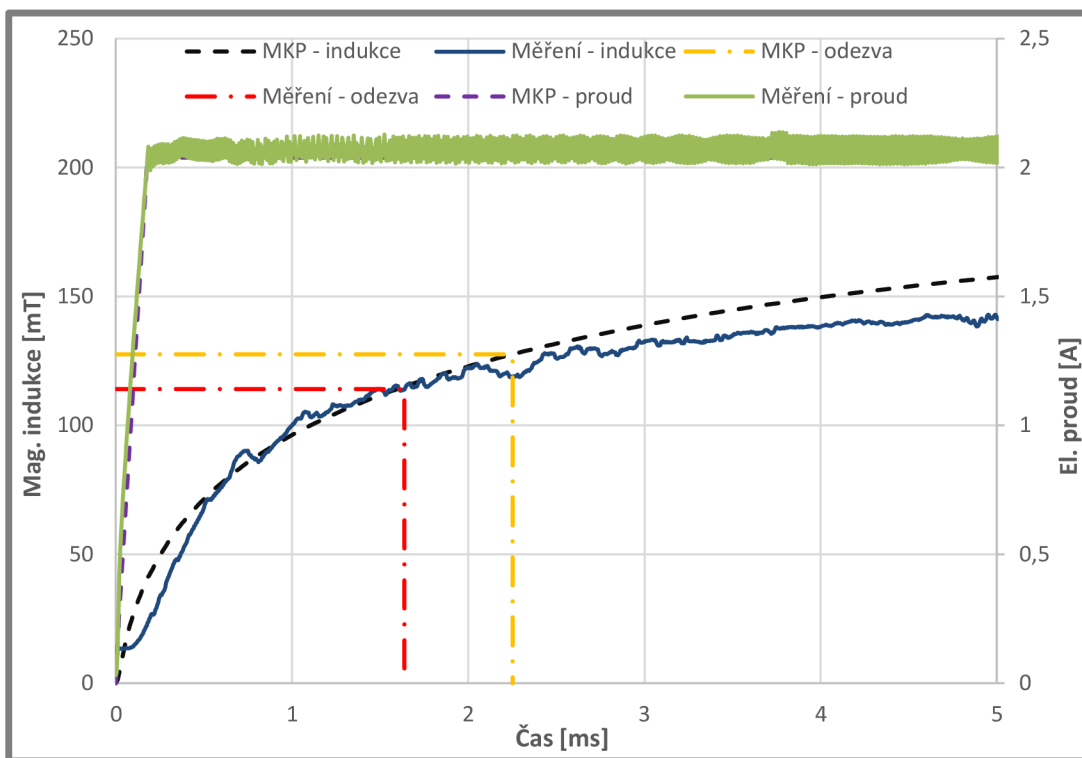
#### 5.4.1 Srovnání měření na vzduchu s MKP modelem

Hlavním cílem měření na vzduchu je přímé srovnání chování magnetického pole při experimentu s MKP simulacemi (to není možné s MR kapalinou, protože s tou není možné přímo měřit magnetické pole ve škrtní štěrbině). Vzhledem k velkým odlišnostem rychlosti změny proudu nebyly simulace provedeny s jedním průběhem proudu, ale pro každou variantu s průběhem proudu dle měření s přebuzením 30 V (toto přebuzení bylo zvoleno kvůli nejlepší stabilitě proudové regulace. Příloha 5 obsahuje shrnutí všech získaných výsledků.

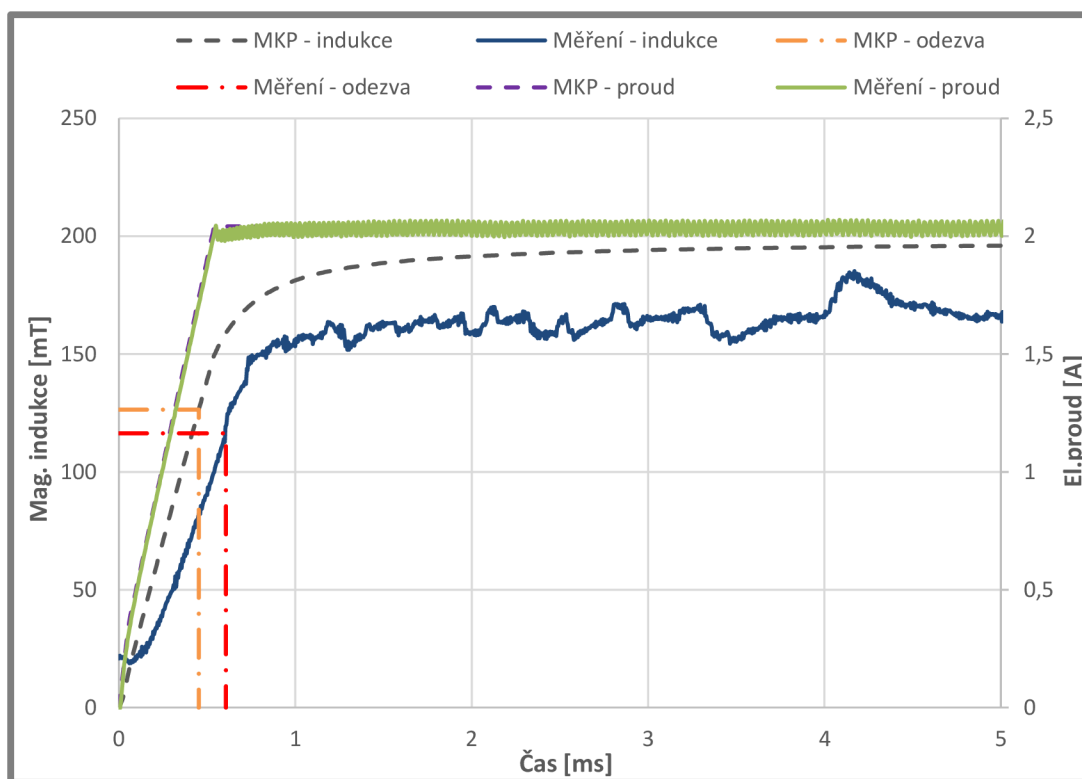
Z porovnání vyplývá, že byla naměřena o 10 až 18 % nižší indukce oproti výsledkům z MKP (obr. 74 a obr. 75). To má negativní dopad i na přesnost doby odezvy, protože při nižší indukci vznikají slabší vířivé proudy a odezva v měření je u pomalé nedrážkované varianty kratší (obr. 74). V jediném případě došlo k velmi dobré shodě MKP a simulace – SMC jádro a 11SMn30 plášť – to může být způsobeno tím, že v MKP byla zanedbána nižší délka SMC jádra, a shodou okolností to vedlo k anulování nepřesností způsobených výše zmíněnými jevy.

U variant s rychlou regulací je pak odezva v měření pomalejší než MKP. Nejdříve nastává prodleva cca 0,07 ms, po které teprve měřená indukce zareaguje na nárůst proudu. I poté je však nárůst indukce pomalejší, než nárůst proudu – k tomu by zvláště u SMC varianty neměl být důvod (srovnej obr. 50 a obr. 75). To je zřejmě způsobeno nedostatečnou šířkou pásma magnetometru, která je pouhých 25 kHz, přitom odezva náběhu proudu SMC varianty s 30V přebuzením je 0,41 ms.

Zejm. nižší měřená indukce stojí za další výzkum – zřejmě se jedná o nevyužitý potenciál, který by mohl zajistit zvýšení dynamického rozsahu tlumiče až o 20 %. Pro dosažení výhodnějších B-H křivek je možné magnetické obvody tepelně zpracovávat a pokud jsou problémem magnetické odpory mezi jednotlivými díly, je možné vyrobit jednodušší jádro nebo lisovat jádro na pístitnici s větším přesahem. Dále by pro budoucí měření bylo vhodné zjistit, zda pomalejší odezvy rychlejších variant v měření jsou skutečně způsobeny pouze nepřesností magnetometru.

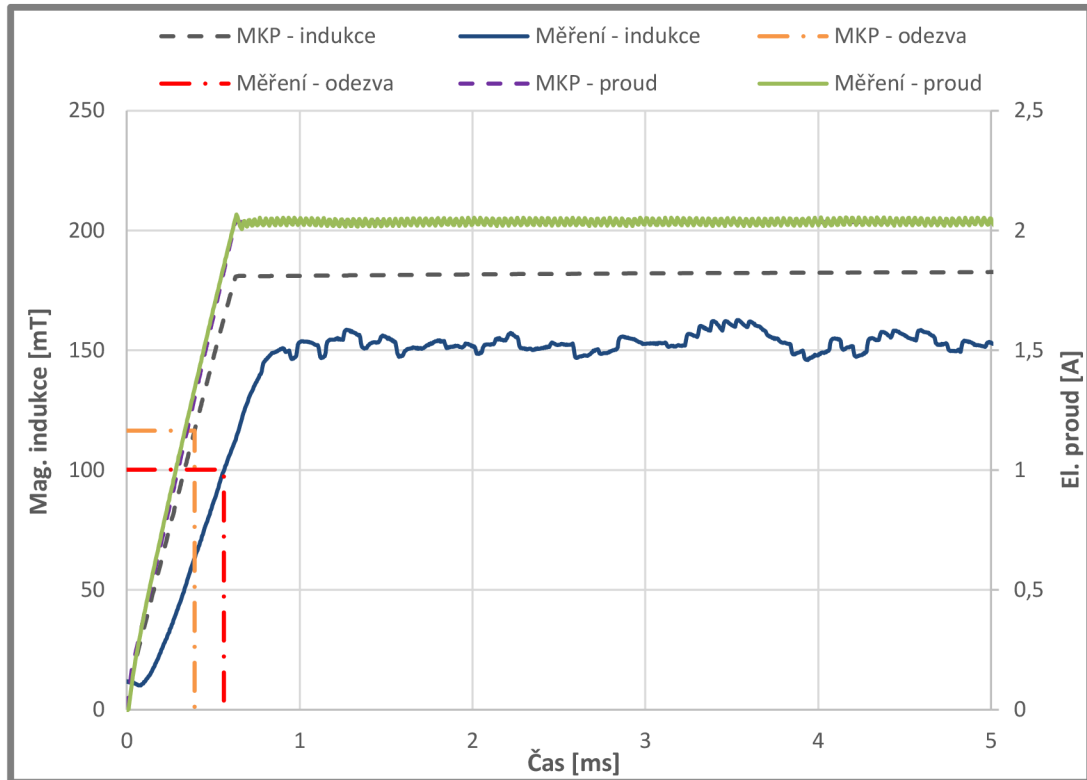


Obr. 73 Srovnání MKP a měření drážkované varianty z automatové oceli na vzduchu (přebuzení magnetometru 30 V)



Obr. 74 Srovnání MKP a měření drážkované varianty z automatové oceli na vzduchu (přebuzení magnetometru 30 V)





Obr. 75 Srovnání MKP a měření varianty z SMC materiálu na vzduchu (přebuzení magnetometru 30 V)

## 5.5 Výsledky měření na pulsátoru Inova

Celkem byly na pulsátoru Inova testovány 4 varianty tlumiče – 3 nové (11SMn30 bez drážek a s drážkami, SMC materiál) s upravenou konstrukcí a 1 s předchozí konstrukcí (ferit N87 jádro a S235JRG plášť). Předchozí konstrukce má o 0,6 mm větší průměr pístnice a víčka s obtokem, proto není možné tuto konfiguraci přímo srovnávat s novými.

Maximální rychlosti tlumiče byly v rozsahu 0,1 až 0,3 m/s, přičemž průběh polohy byl buď harmonický, nebo trojúhelníkový. Proudů procházející cívku byly nastavovány od 0,5 do 2,5 A, přičemž některá měření byla vynechána, aby nebyla překročena bezpečnostní mez upevnění tlumiče (2500 N).<sup>15</sup>

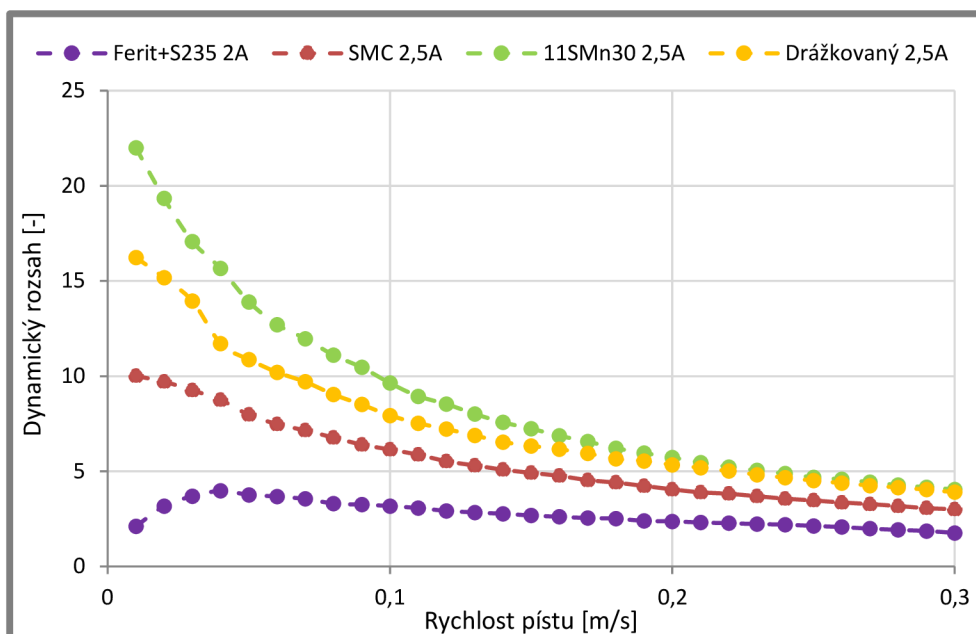
Bylo zjištěno, že tvar průběhu polohy nemá na výsledky znatelný vliv – i v případě harmonického průběhu je po dostatečně dlouhou dobu zachována max. rychlost. Všechny zbylé parametry však mají vliv na dynamický rozsah tlumiče a jeho odezvu.

### 5.5.1 Dynamický rozsah testovaných tlumičů

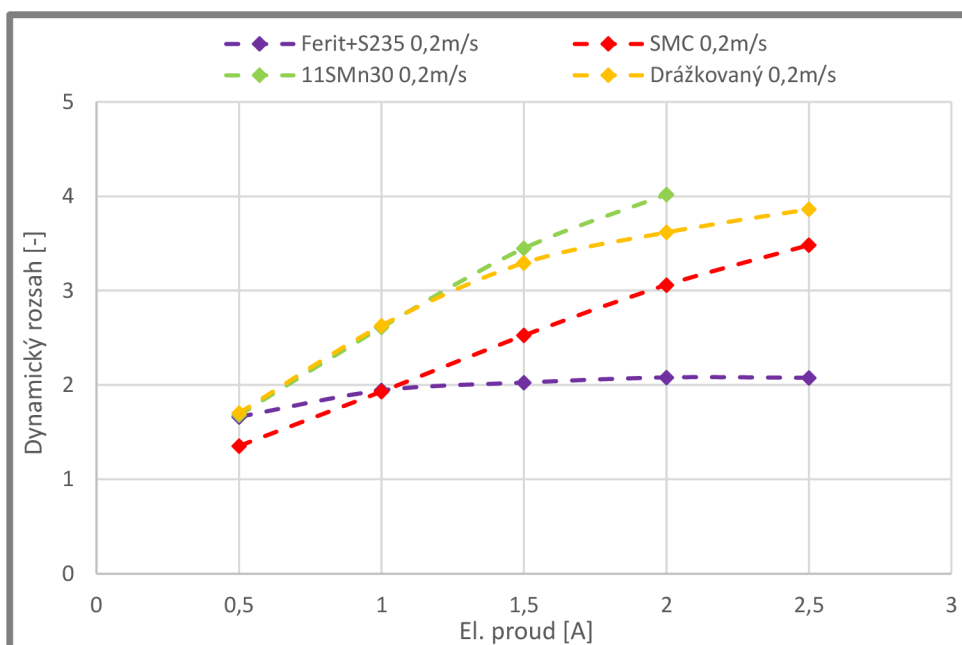
Podle očekávání vykazuje feritová varianta nejnižší dynamický rozsah, který navíc kvůli nízké mezi nasycení a obtoku víček výrazně neroste s proudem a kvůli obtoku víček při nejmenších rychlostech klesá (obr. 76). SMC materiál pak dle očekávání vykazuje zhruba 75% dynamický rozsah ve srovnání s 11SMn30 bez drážek (indukce ve štěrbině je dle MKP s MR kapalinou 82%). Nečekaným výsledkem je však fakt, že drážkovaná varianta vykazuje v některých případech (při vysokých rychlostech či nízkých prouděch) stejný dynamický rozsah jako nedrážkovaná (obr. 77), přitom její

<sup>15</sup> Všechny použité parametry jsou v tab. 2.

průměrná indukce ve šterbině by měla být dle MKP o 11 % nižší. To však lze přesvědčivě vysvětlit nedokonalým zalitím drážek, které rozšiřuje průřez pro průtok kapaliny a tím snižuje sílu vypnutého tlumiče. Přestože pak jsou maximální síly vybuzeného tlumiče s drážkami menší (obr. 78), dynamický rozsah jako poměr nevybuzeného a vybuzeného stavu vyjde větší<sup>16</sup>. Dalším vlivem může být přesnost škrťací šterbiny, která také může mít větší vliv na nevybuzenou, než na vybuzenou sílu.

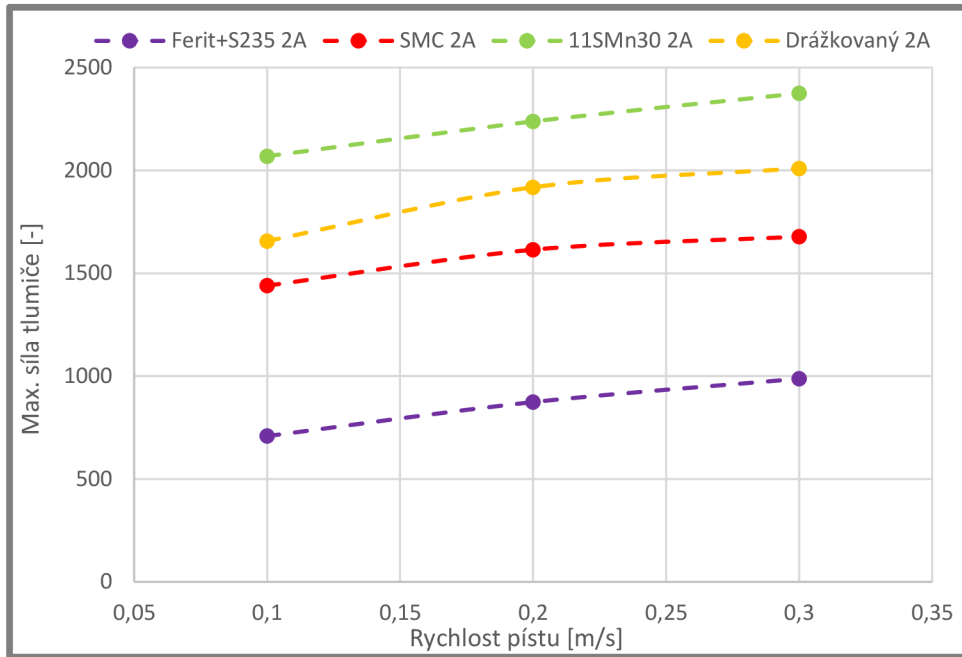


Obr. 76 Dynamický rozsah testovaných tlumičů při 2,5 A

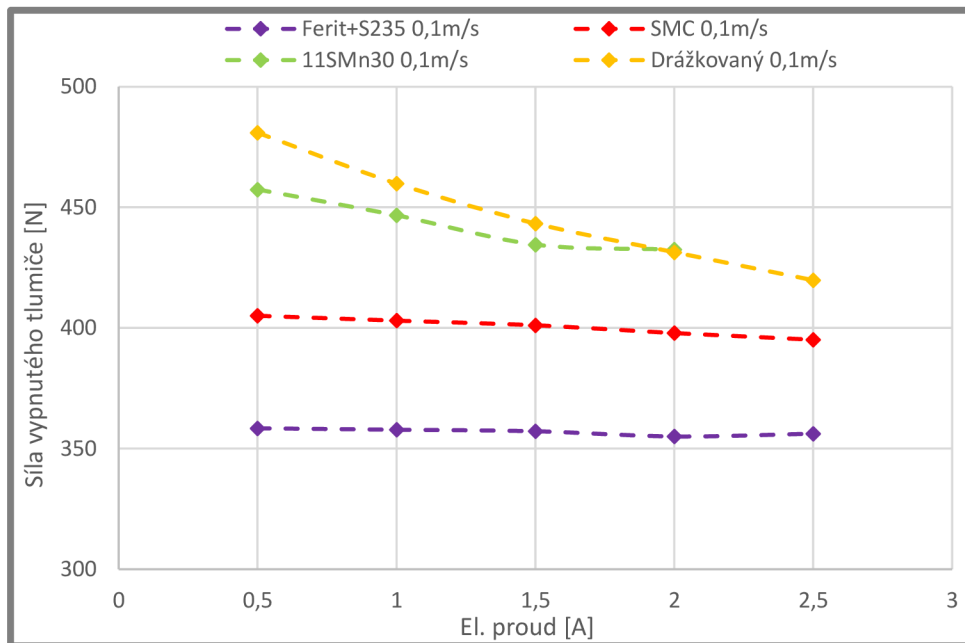


Obr. 77 Dynamický rozsah testovaných tlumičů při 0,2 m/s

<sup>16</sup> Více viz příloha 6 - závislosti dynamického rozsahu pro všechny rychlosti a proudy



Obr. 78 Max. síla testovaných tlumičů při 2 A

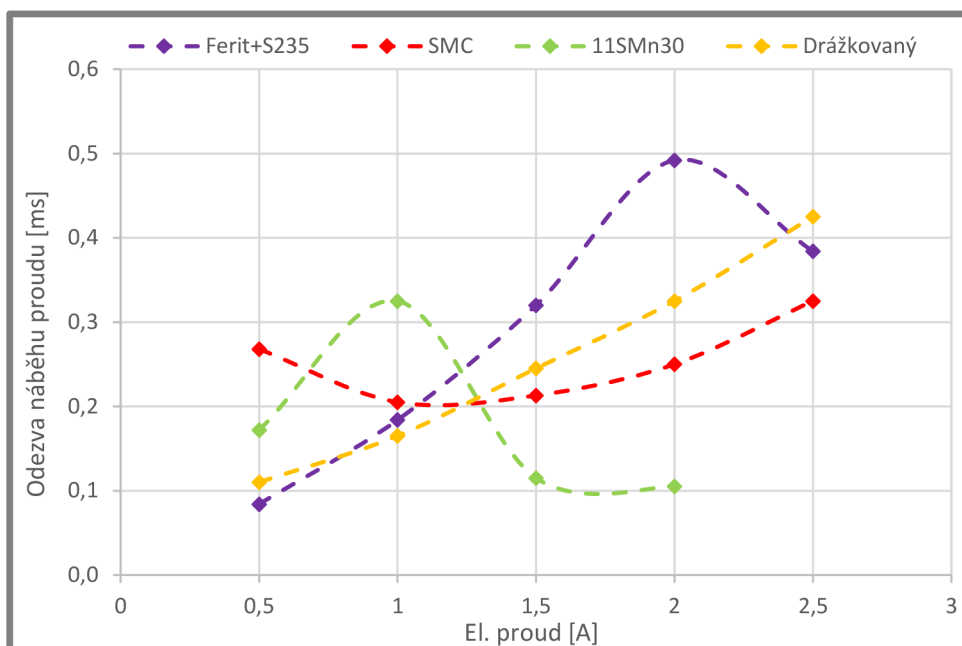


Obr. 79 Síla testovaných tlumičů ve vypnutém stavu při rychlosti 0,1 m/s po průchodu dvěma periodami s cívkou buzenou daným proudem

Neočekávaným jevem je však pokles síly ve vypnutém stavu, pokud byl předtím tlumič buzen silnějším elektrickým proudem (obr. 79) – tento pokles je navíc nejvýraznější u variant z automatových ocelí, u kterých se předpokládá větší remanence, která by po vypnutí silnějšího proudu měla mít za následek větší sílu ve vypnutém stavu. Menší síla však může být způsobena zahřátím tlumiče, protože měření vždy byla prováděna postupně od nejmenšího proudu.

### 5.5.2 Odezva testovaných tlumičů dle systému prvního řádu

Dále byla zkoumána odezva tlumičů. Na tu může mít vliv i odezva proudu, ale bylo zjištěno, že v případě tlumiče zřejmě pouze minimální, protože náběhy proudu jsou velmi rychlé (obr. 80) a navíc dochází k určité prodlevě síly způsobené zřejmě dobou odezvy samotné MR kapaliny (obr. 84 a obr. 85), která je u všech variant tlumiče zhruba 0,7 ms. Dle očekávání u rychlých variant s vysokou indukčností je náběh proudu pomalejší, čím vyšší je proud, a naopak u pomalé varianty je náběh rychlejší při větším proudu, protože vznikají vířivé proudy a indukčnost je nízká (obr. 80).

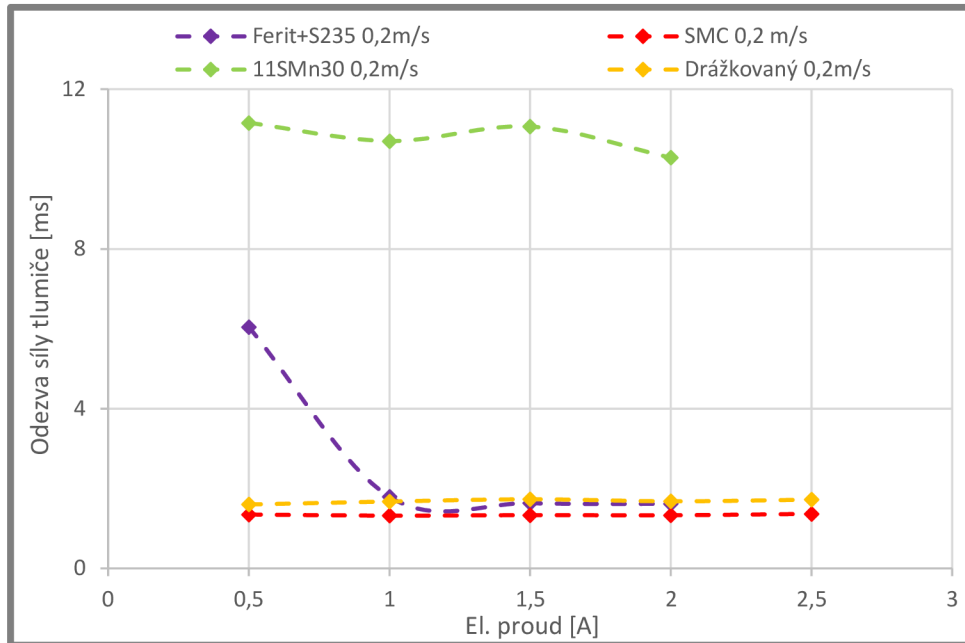


Obr. 80 Odezva náběhu proudu pístů s MR kapalinou

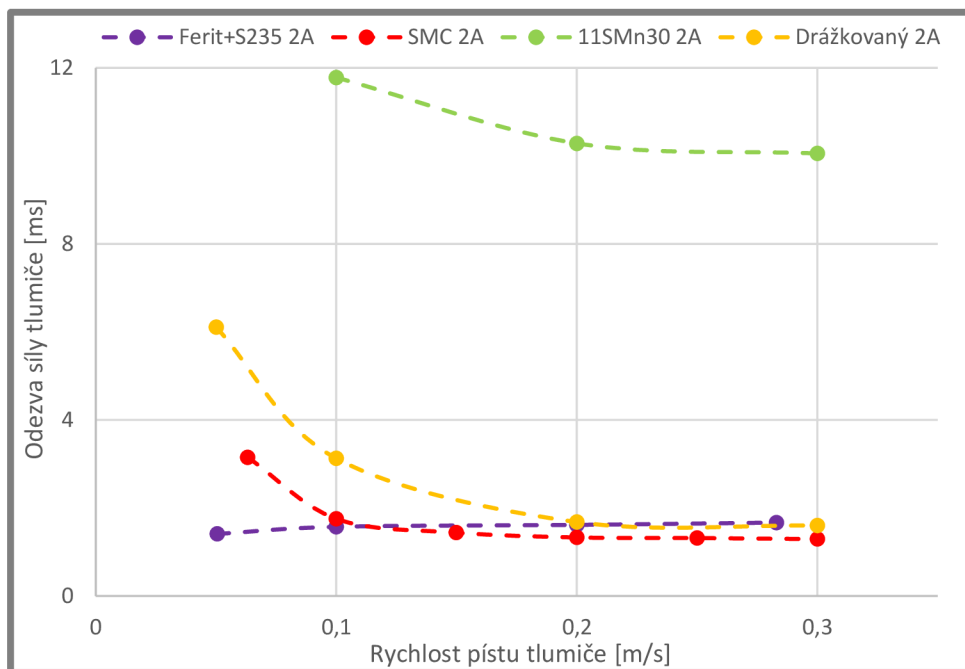
Dle předpokladů jsou odezvy síly všech rychlých variant podobně rychlé (obr. 81 a obr. 82), protože jejich odezva magnetické indukce je dle MKP prakticky okamžitá. Výraznou odlišností je pomalejší odezva drážkované varianty při nízkých max. rychlostech tlumiče 0,1 m/s (obr. 82), která může být způsobena tím, že vinou nedokonalého zalití je tlumič zavzdušněn a určitý čas trvá, než přiteče dostatečné množství MR kapaliny, která bubliny vzduchu stlačí. Čím se píst pohybuje rychleji, tím je toto stlačování rychlejší a při rychlosti 0,3 m/s je už odezva drážkované varianty prakticky shodná s SMC variantou. U té může docházet ke zpomalení odezvy při malých rychlostech pístu ze stejného důvodu – zavzdušnění v pórech, které byly odhaleny obráběním (obr. 53)<sup>17</sup>.

Druhou významnou odlišností je výrazně pomalejší odezva feritového tlumiče při nízkém proudu, avšak výsledky není možné přímo srovnávat kvůli výše popsaným odlišným obtokům víček pístu.

<sup>17</sup> více viz příloha 7 - silová odezva tlumiče při rychlostech 0,1 m/s a 0,3 m/s



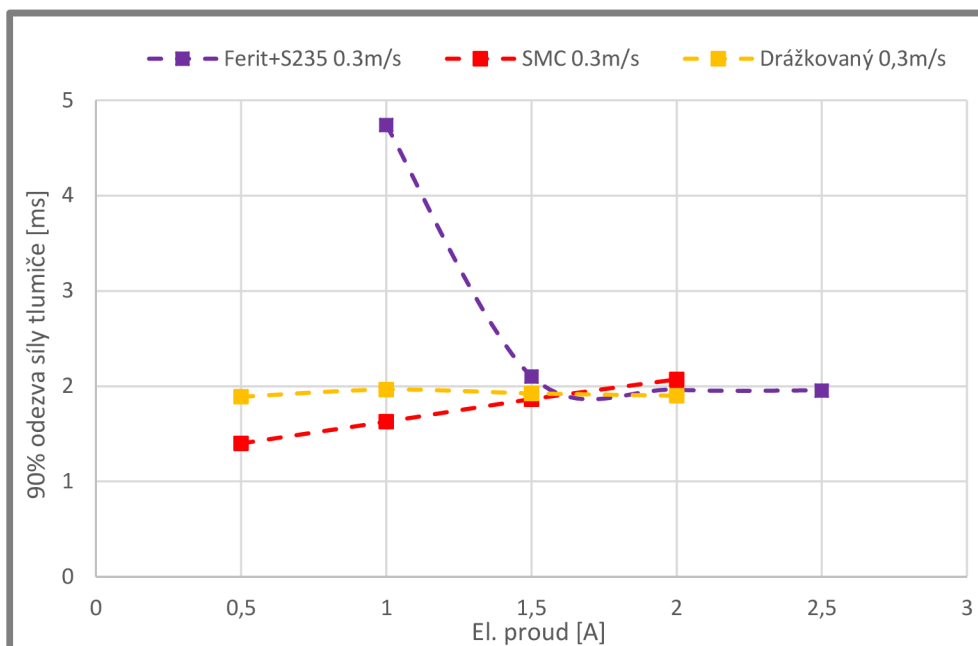
Obr. 81 Silová odezva tlumiče při rychlosti 0,2 m/s



Obr. 82 Silová odezva tlumiče při rychlosti 2 A

### 5.5.3 90% odezva testovaných tlumičů

Za zmínění stojí také 90% odezva síly tlumiče (obr. 83 – z grafu byla vynechána pomalá nedrážkovaná 11SMn30 varianta, která má tuto odezvu 32 až 46 ms). V případě SMC se očekávalo, že tato odezva bude velmi rychlá (indukce ve šterbině dle MKP prakticky kopíruje lineární průběh proudu), překvapivá je však velmi rychlá 90% odezva drážkované varianty – dle MKP je náběh exponenciální (obr. 84) a 90 % max. indukce by mělo být dosaženo až po cca 2,5 ms. „Předčasný“ nárůst na 90 % síly může být způsobem překmitem síly na konci náběhu (obr. 85), který se u drážkované varianty opticky neobjeví – zřejmě pouze dojde k rychlejšímu náběhu na 100 % síly.

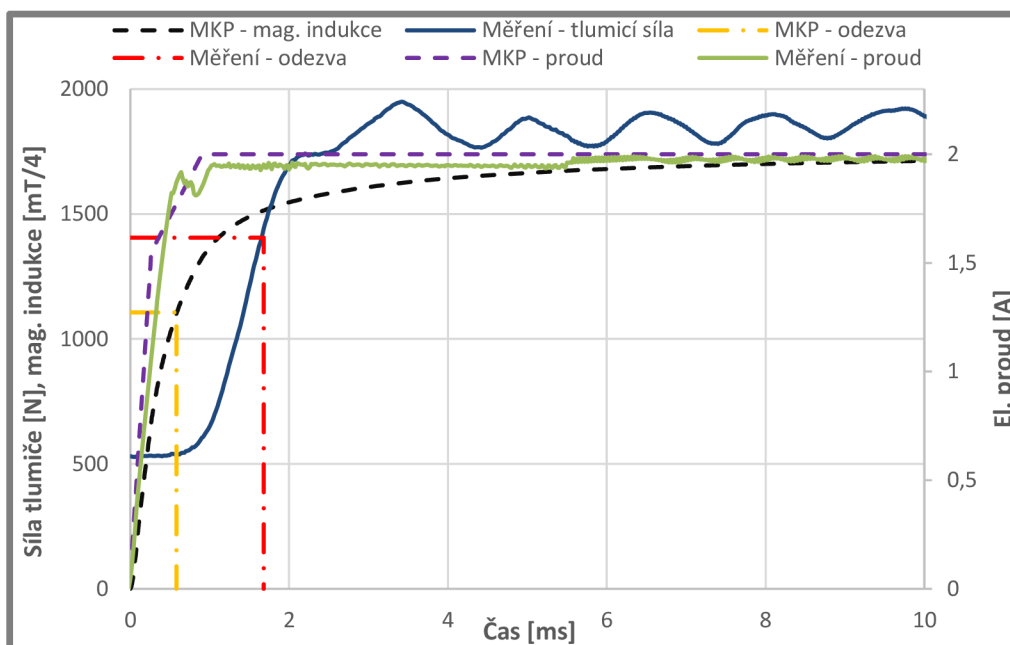


Obr. 83 90% silová odezva tlumiče při rychlosti 0,3 m/s

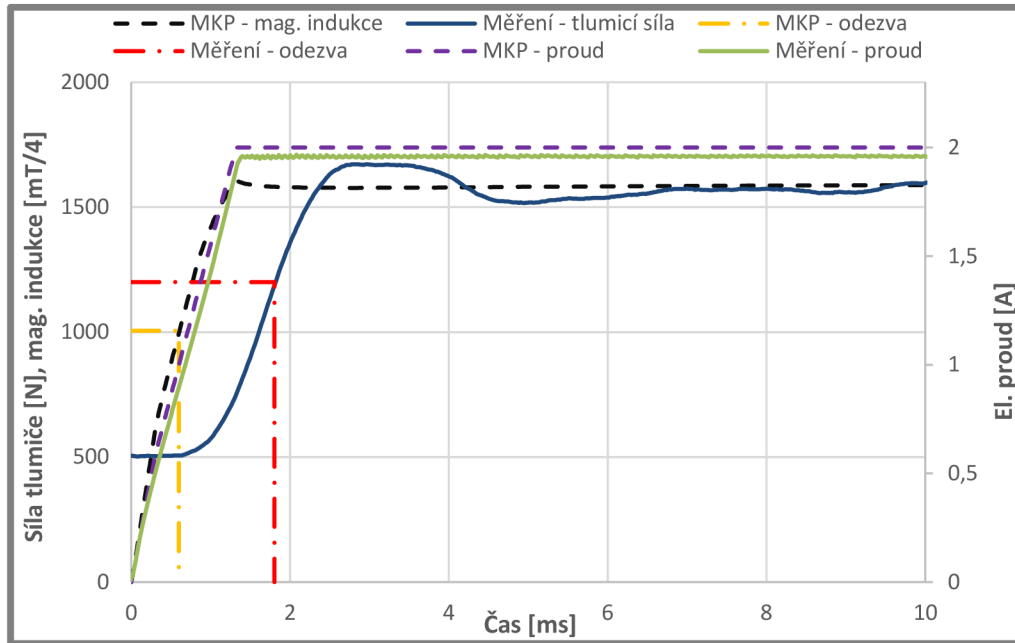
#### 5.5.4 Srovnání měření tlumiče se simulacemi

5.5.4

Doposud nevysvětleným jevem je překmit síly, ke kterému dochází na konci náběhu nejrychlejších variant (ferit, SMC - obr. 85). Pravděpodobně by tento jev mohl být způsoben doposud nepopsanou vlastností MR kapaliny při přechodových dějích.

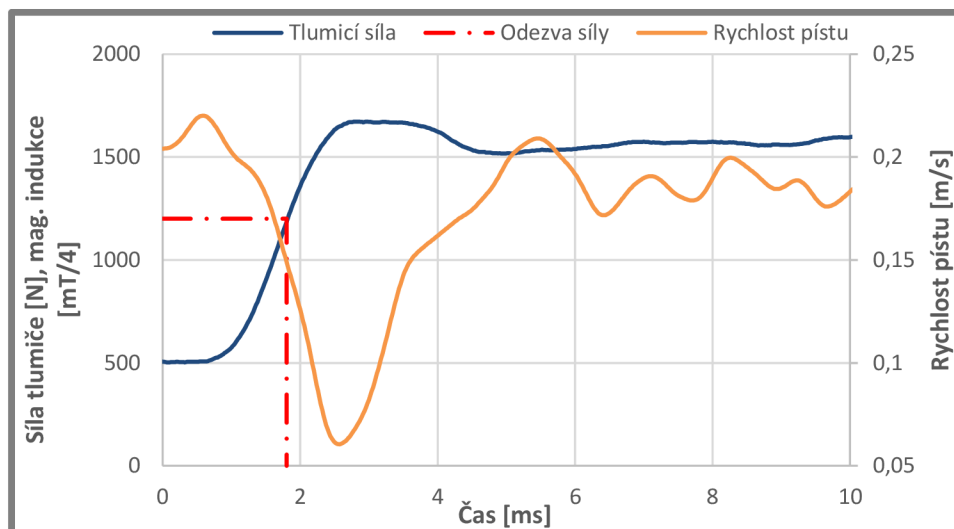


Obr. 84 Porovnání MKP a měření tlumiče s drážkovaným obvodem při 2 A a 0,2 m/s



Obr. 85 Porovnání MKP a měření tlumiče s SMC obvodem při 2 A a 0,2 m/s

Změřená odezva tlumicí síly rychlých variant (drážkovaná, SMC) je zhruba o 1,1 ms pomalejší oproti odezvě magnetického pole dle MKP. Za zhruba 0,7 ms je zřejmě zodpovědná odezva MR kapaliny (popsaná v úvodním odstavci kapitoly 5.5.2), která způsobuje, že síla nezačne růst okamžitě s počátkem nárůstu proudu. Další zpoždění je způsobeno nedostatečnou rychlostí hydraulického regulačního systému, který nestíhá reagovat na prudkou změnu síly a dochází k poklesu rychlosti (obr. 86).



Obr. 86 Pokles rychlosti pístu při měření s SMC obvodem při 2 A a 0,2 m/s

Je tedy možné tvrdit, že v případě obou rychlých variant je regulace magnetického pole ve šterbině natolik rychlá, že hlavním omezením je odezva MR kapaliny. Další zkrácení doby odezvy (dosažené například díky MR kapalině s kratší dobou odezvy) by však zřejmě bylo možné změřit pouze testerem tlumičů s rychlejší regulací síly.



## 6 DISKUZE

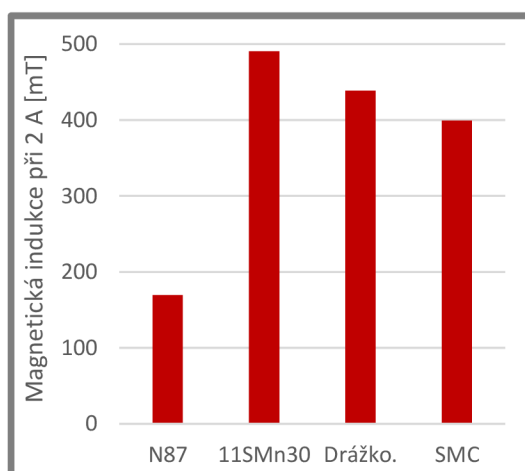
Byly navrženy 2 nové verze rychlého magnetického obvodu – z magneticky měkkého kompozitu Sintex SMC prototyping material a z automatové oceli 11SMn30 s drážkami. Jako referenční varianty sloužily předchozí verze rychlého MR tlumiče s jádrem z feritu N87 a pláštěm z oceli S235JRG a druhou variantou byl obvod z oceli 11SMn30 bez drážek (sloužil zejm. pro porovnání s drážkovanou variantou). Přehled variant je v tab. 11. Elektromagnetické vlastnosti všech variant byly simulovány v MKP softwaru ANSYS Electronics Desktop 2016.1 – Electromagnetics Suite 17.1. Dále byla změřena magnetická indukce ve škrťací šterbině na vzduchu a také byly změřeny vlastnosti tlumiče s jednotlivými variantami obvodu – shrnutím výsledků simulací a experimentů se bude zabývat zbytek této kapitoly.

Tab. 11 Experimentální varianty MR tlumiče

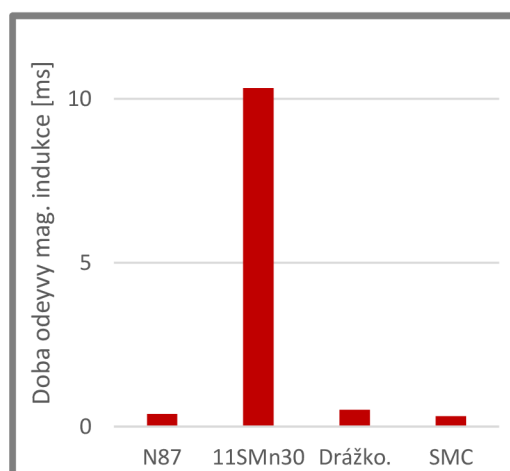
	Jádro magnetického obvodu	Plášť magnetického obvodu	Zkratka v tabulkách grafch této kapitoly
Předchozí verze rychlého MR tlumiče	Ferit Epcos N87	S235JRG	N87
Referenční verze z oceli bez drážek	11SMn30	11SMn30	11SMn30
Drážkovaná varianta z oceli	11SMn30 s navrženými drážkami	11SMn30 s navrženými drážkami	Drážko.
Obvod z magneticky měkkého kompozitu	Sintex SMC prototyping	Sintex SMC prototyping	SMC

### 6.1 MKP simulace s MR kapalinou

Účelem magnetického obvodu MR tlumiče je vytvářet požadované magnetické pole ve škrťací šterbině. Proto byly provedeny MKP simulace tohoto pole a posouzena rychlost regulace a síla magnetické indukce.



Obr. 87 Magnetické indukce experimentálních mag. obvodů s MR kapalinou v MKP při 2 A

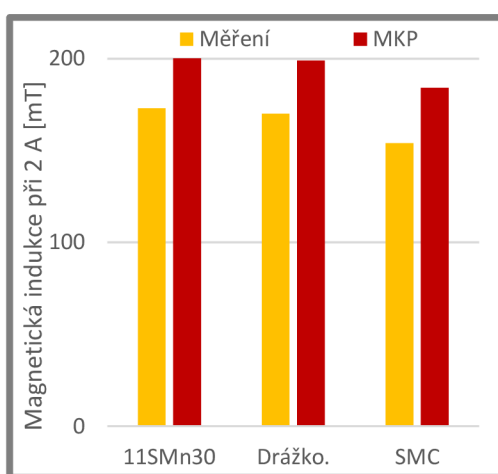


Obr. 88 Odezvy experimentálních mag. obvodů s MR kapalinou v MKP při poklesu z 2 A za 0,3 ms

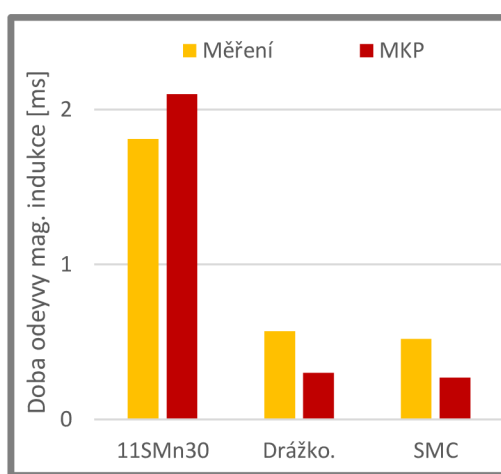
V případě obou nových obvodů by dle MKP měla být více než dvojnásobně zvýšena indukce ve šterbině (obr. 87). Odezva magnetického pole drážkované varianty je sice asi o 0,2 ms pomalejší než v případě magneticky měkkého kompozitu (obr. 88), ale vzhledem k dalším vlivům na rychlost regulace tlumiče je to zanedbatelné (např. odezva MR kapaliny MRF 132-DG je cca 0,7 ms).

## 6.2 Magnetická indukce na vzduchu

Protože s MR kapalinou nelze měřit magnetickou indukci, měření pro porovnání MKP modelu s experimentem byla provedena na vzduchu (s výjimkou feritového obvodu, jehož další vývoj se nepředpokládá, takže není nutné ověřovat přesnost modelu). Vzduch klade cca 8x větší magnetický odpor než MR kapalina MRF-132DG, takže indukce v magnetickém obvodu jsou nižší, vznikají slabší vířivé proudy a odezvy jsou díky tomu kratší.



Obr. 89 Porovnání měřené a simulované magnetické indukce s indukci na vzduchu při 2 A



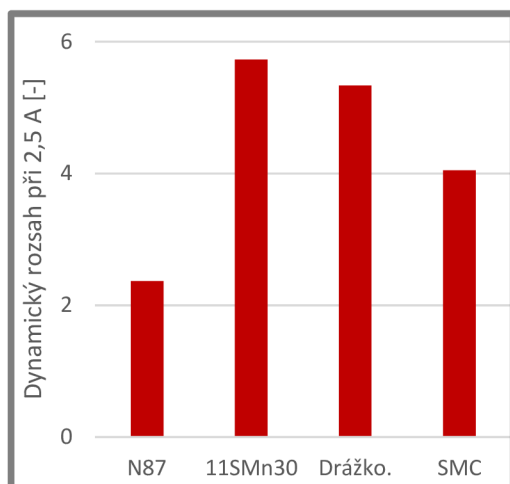
Obr. 90 Porovnání měřené a simulované doby odezvy na vzduchu při poklesu z 2 A na 0 A s přebuzením 30 V

Je zřejmé, že indukce v experimentu je proti výpočtům nižší o cca 20 % (obr. 89). To může být způsobeno nedokonalým kontaktem mezi pístnicí a jádrem, který vytváří magnetický odpor (ten je v simulaci zanedbán). Dále to může být způsobeno nepřesností B-H křivek zadaných v simulacích – reálná permeabilita může být nižší například vinou tepelného ovlivnění při obrábění. Dále v případě ocelových variant může mít na nepřesnosti podíl magnetický odpor mezi jednotlivými díly jádra (skládá se ze 3 dílů). Zde by byl vhodný další výzkum s cílem dosažení předpokládaných (vyšších) indukci i v praxi.

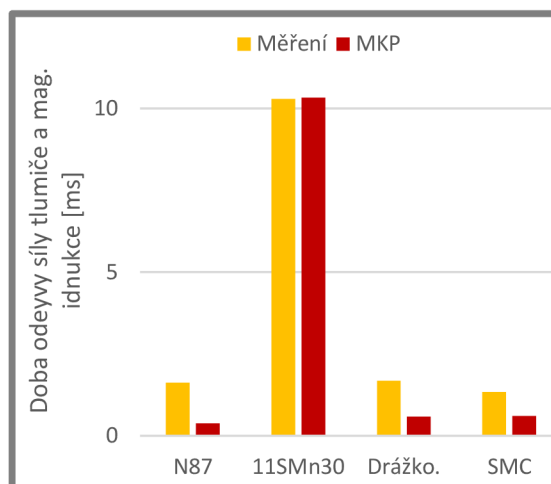
Doba odezvy (obr. 90) nedrážkované oceli je oproti MKP kratší zřejmě vinou nižší reálné indukce (v realitě vznikají slabší vířivé proudy – tomu přispívá i remanence, která při experimentu zmenší rozdíl krajních indukci, ale v MKP není zahrnuta). Naopak odezva drážkované a SMC varianty je v měření delší vinou prodlevy použitého magnetometru, který má nedostatečnou šířku pásma (pouze 25 kHz). Pro další výzkum rychlých mag. obvodů je tedy zřejmě nutné provádět měření na vzduchu s rychlejším magnetometrem.

### 6.3 Vlastnosti MR tlumičů

Cílem celé této práce bylo zkoumání MR tlumičů s rychlou odezvou. Byla provedena řada měření na hydraulickém pulsátoru Inova při různých rychlostech pístu a napájecích proudech, ale výsledky srovnání byly pro většinu konfigurací podobné. Zde jsou porovnány výsledky pro 2,5 A a rychlost pístu 0,2 m/s (max. stálý proud, na který je tlumič konstruován, a běžná rychlost pístu). Důležitým parametrem tlumiče je dynamický rozsah (poměr síly tlumiče napájeného určitým elektrickým proudem a síly tlumiče bez proudu - obr. 91). Rozložení max. tlumících sil odpovídá rozložení magnetických indukcí dle MKP (např. tlumicí síla s ocelí s drážkami je nižší o 14 % než s ocelí bez drážek, průměrná indukce je nižší o 10 % - rozdíl zřejmě způsobují oblasti ve škrťací šterbině s nižší indukcí naproti zářezům o šířce 0,35 mm v magnetickém obvodu – vliv této nerovnoměrnosti pole na sílu tlumiče vyžaduje další výzkum nad rámec této práce). Dynamický rozsah SMC tlumiče je však o 30 % nižší než nedrážkované 11SMn30, přitom indukce dle MKP by měla být nižší pouze o 19 % - projevil se pozitivní vliv tepelného zpracování, které bylo provedeno v případě ocelových variant (v případě SMC nebylo tepelné zpracování realizováno, protože není znám jeho vliv na vlastnosti materiálu).



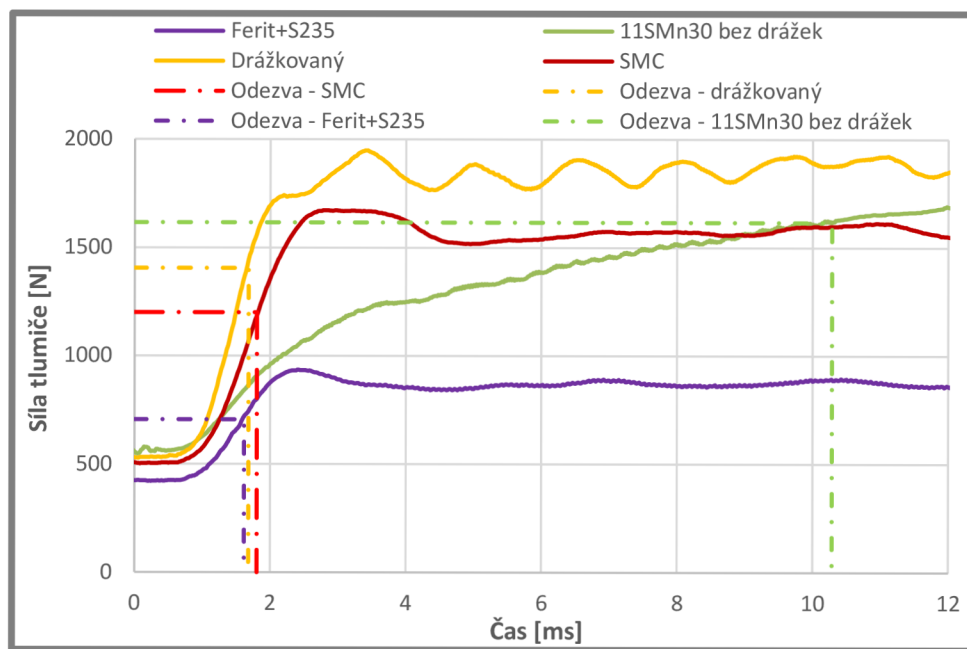
Obr. 91 Tlumicí síla MR tlumičů při 2,5 A a rychlosti pístu 0,2 m/s



Obr. 92 Srovnání odevy MR tlumičů při 2 A a 0,2 m/s s odezvou mag. indukce dle MKP

Odezva nedrážkované varianty se velmi dobře shoduje s odezvou mag. indukce dle MKP (obr. 92). V případě rychlých variant tlumičů se výrazně projevuje prodleva tlumicí síly za magnetickým polem způsobená zejm. vlivem odevy MR kapaliny (zhruba 0,7 ms trvá, než v MR kapalině dojde ke zformování řetězců pevných částic, které zvýší tlumicí sílu). Další zpoždění způsobuje i zpomalení pohybu pístu vinou nedostatečně rychlé regulace pohybu hydraulického pulsátoru, na kterém byly testy provedeny.

Zajímavým jevem, který se doposud nepodařilo objasnit, je překmit síly na konci náběhu, který nastává u nejrychlejších variant mag. obvodů (ferit a SMC - obr. 93). Tento překmit zajišťuje rychlejší 90% odezvu i v případě drážkované varianty (přestože indukce dle MKP dosáhne 90 % až za 2,4 ms, síla dosáhne 90 % již za 2,0 ms). Tento překmit by mohl mít značný vliv při regulaci tlumicí síly za provozu, proto by bylo vhodné dalším výzkumem objasnit jeho příčinu a důsledky na funkci MR tlumičů.



Obr. 93 Porovnání náběhů síly při sepnutí proudu na 2 A a rychlosti pístu 0,2 m/s

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala návrhem nové generace magnetických obvodů rychlých magnetoreologických (MR) tlumičů s dobou odezvy kolem 1 ms. Takto krátké odezvy výzkumná skupina na Odboru technické diagnostiky Ústavu konstruování v předchozí verzi tlumiče dosáhla s využitím feritů – ve srovnání s komerční verzí však nebyl dosažen dostatečný dynamický rozsah a ferity nemají vhodné mechanické vlastnosti (velmi špatná obrobitelnost, křehkost). Proto bylo cílem této diplomové práce navrhnout takový magnetický obvod, který by také zajistil velmi krátkou odezvu, ale zároveň zvýšil dynamický rozsah, měl by lepší mechanické vlastnosti a jeho sériová výroba by byla levnější. Aby bylo možné výsledky porovnávat a posoudit co nejobektivněji samotný vliv materiálu a uspořádání magnetického obvodu, bylo rozhodnuto zachovat vnější rozměry magnetického obvodu (zejm. škrťací šterbinu).

Na základě rešerše byly navrženy rovnou dva způsoby vhodného řešení magnetického obvodu. Prvním způsobem je využití relativně mladé skupiny materiálů – magneticky měkkých kompozitů. Ty mají výborné elektromagnetické vlastnosti a některé z nich jsou dobře obrobitelné. Jako druhá, srovnatelně nadějná cesta, se jevila segmentace jader, která může zajistit okamžitou odezvu tlumiče i při použití běžného kovového materiálu. Jako konstrukčně výhodnější se pak ukázalo segmentaci provést výrobou drážek místo skládání obvodu z jednotlivých plechů.

Provedené MKP simulace následně ukázaly, že obě varianty řešení mají potenciál zajistit splnění cílů práce, ale varianta z magneticky měkkého kompozitu Sintex SMC prototyping material zajišťuje mírně rychlejší 90% odezvu magnetického pole a drážkovaná varianta z automatové oceli 11SMn30 vykazuje mírně vyšší dynamický rozsah. Proto bylo rozhodnuto vyrobit obě varianty obvodu a srovnat je s komerčním řešením (obvod z oceli bez segmentace) a s předchozí výzkumnou variantou rychlého tlumiče s feritovým magnetickým jádrem.

Experimenty realizované na hydraulickém pulsátoru Inova potvrdily teoretické předpoklady – obě nové konstrukce zajistily rychlost odezvy prakticky shodnou s feritovou variantou a zároveň zásadní zvýšení dynamického rozsahu. Největší dynamický rozsah samozřejmě vykazovala nedrážkovaná ocelová varianta, ale drážkovaná varianta za ní jen mírně zaostávala. Potenciál magneticky měkkého kompozitu nebyl současnou konstrukcí zcela využit, protože při maximálním proudu ještě nezačínalo docházet k jeho saturaci. Cíle diplomové práce však byly nad očekávání splněny oběma variantami.

Pro sériovou výrobu s navrženými řešeními magnetického obvodu by bylo výhodné provést úpravy konstrukce pístu tlumiče (kterými se tato práce záměrně nezabývala). Magneticky měkký materiál má potenciál zajistit větší dynamický rozsah, pokud bude mít elektromagnetický obvod větší indukčnost (větší indukčnost cívky, menší magnetické odpory). Dále by bylo vhodné vzhledem k ceně kompozitního materiálu sériově lisovat polotovary tak, aby byl odpad při obrábění co nejmenší. Drážky segmentované varianty pro použitý prototyp byly vyrobeny elektrojiskrovým drátovým řezáním – řádově levnější by bylo řezání laserovým paprskem, ale to vzhledem k maximální řezné tloušťce laseru také vyžaduje konstrukční úpravy pístu tlumiče. Dále je pravděpodobné, že jinou volbou materiálu by mohlo být dosaženo zlepšení některých vlastností drážkované varianty (v rámci této práce bylo stanoveno jako dílčí cíl zkoumání vlivu drážkování, k čemuž byla automatová ocel nejvýhodnější).

Pro další výzkum by bylo vhodné vylepšení experimentální aparatury, aby bylo možné rozlišit i velmi malé změny doby odezvy v případě rychlých magnetických obvodů. Vhodné by bylo využít magnetometr s větší šířkou pásma (alespoň 200 kHz) a také hydraulický pulsátor s rychlejší regulací či větší setrvačností, aby nedocházelo k výraznému poklesu rychlosti pístu v okamžiku aktivaci MR tlumiče.

Důležitým zjištěním této diplomové práce bylo také určení prodlevy magnetické kapaliny - pro další zrychlení regulace MR tlumičů má zkrácení této odezvy značný potenciál, a proto by bylo dobré na ně zaměřit další výzkum.

Cíle diplomové práce tedy byly splněny, a navíc byl otevřen prostor pro sériovou výrobu a komerční aplikaci navržených magnetických obvodů. Zároveň byl nastíněn směr dalšího výzkumu s potenciálem ke zrychlení regulace tlumiče a zvýšení jeho dynamického rozsahu.



- [1] STRECKER, Z., J. ROUPEC, I. MAZUREK, O. MACHACEK, M. KUBIK a M. KLAPKA. Design of magnetorheological damper with short time response. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015, **26**(14), 1951-1958. DOI: 10.1177/1045389X15591381. ISSN 1045-389x. Dostupné také z: <http://jim.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1045389X15591381>
- [2] K. KAZIMIERCZUK, Marian. *High-Frequency Magnetic Components*. 2013. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. ISBN 978111871779.
- [3] CULLITY, B a C GRAHAM. *Introduction to magnetic materials*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: IEEE/Wiley, 2009, xvii, 544 p. ISBN 978-047-1477-419.
- [4] FURLANI, Edward. *Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications*. San Diego, Calif.: Academic, 2001, xvii, 518 p. Electromagnetism. ISBN 01-226-9951-3.
- [5] FINK, Donald a Donald CHRISTIANSEN. *Electronics engineers' handbook*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1989, 1 v. (various paginations). ISBN 00-702-0982-0.
- [6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, Petr DUB, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 2 sv. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [7] GÖNEN, Turan. *Electrical machines with MATLAB*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. ISBN 14-398-7799-8.
- [8] *BWI Group* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.bwigroup.com/>
- [9] CHEN, Wai-Kai. *The electrical engineering handbook*. London: Elsevier Academic Press, 2005. ISBN 0-12-170960-4.
- [10] ARAI, Ken Ichi a Kazushi ISHIYAMA. Rolled texture and magnetic properties of 3% silicon steel. *Journal of Applied Physics*. 1988, **64**(10), 5352-5354.
- [11] Magnetic properties of stainless steels: applications, opportunities and new developments. In: *COGNE: Cogne Acciai Speciali* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://steelmehdipour.net/wp-content/uploads/2017/02/Magnetic-properties-of-stainless-steels.pdf>
- [12] G. W., Elmen. Magnetic Alloys of Iron, Nickel, and Cobalt. *Bell System Technical Journal*. 1936, (15), 113-135.
- [13] SUNDAR, R. S. a S. C. DEEVI. Soft magnetic FeCo alloys: alloy development, processing, and properties. *International Materials Reviews*. 2013, **50**(3), 157-192. DOI: 10.1179/174328005X14339. ISSN 0950-6608. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174328005X14339>
- [14] Metglas® 2826MB Magnetic Alloy. *Metglas* [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: [http://metglas.com/products/magnetic\\_materials/2826mb.asp](http://metglas.com/products/magnetic_materials/2826mb.asp)
- [15] *MAGNETICS* [online]. 2016 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://www.mag-inc.com>



- [16] Technical data - Soft Magnetic Composites. *Sintex: YOUR STRONG PARTNER* [online]. Denmark, b.r. [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <https://www.sintex.com/en/magnetic-technologies/technical-data>
- [17] Ferrite Materials: Ferrite Cores. *MAGNETICS®* [online]. 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <https://www.mag-inc.com/products/ferrite-cores>
- [18] *Permanent Magnet Plunger: Bi-directional Solenoid Actuator for Direct Alternatic Fuel Injector*. Montreal, 2005.
- [19] OSAKA, Tetsuya. Recent development of Magnetic recording head core materials by plating method. *Electrochimica Acta*. 1999, **44**(21-22), 3885-3890. DOI: 10.1016/S0013-4686(99)00095-X. ISSN 00134686. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001346869900095X>
- [20] JABBAR, M.A. Disk drive spindle motors and their controls. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996, **43**(2), 276-284. DOI: 10.1109/41.491351. ISSN 02780046. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=491351>
- [21] JANG, G.H. a J.H. CHANG. Development of an axial-gap spindle motor for computer hard disk drives using PCB winding and dual air gaps. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002, **38**(5), 3297-3299. DOI: 10.1109/TMAG.2002.802292. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1042530>
- [22] LAMPRECHT, Erik, Martin HOMME a Thomas ALBRECHT. Investigations of eddy current losses in laminated cores due to the impact of various stacking processes. *2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. IEEE, 2012, , 1-8. DOI: 10.1109/EDPC.2012.6425097. ISBN 978-1-4673-3008-4. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6425097>
- [23] ZHUONAN WANG, , R MASAKI, S MORINAGA, Y ENOMOTO, H ITABASHI, M ITO a S TANIGAWA. Development of an Axial Gap Motor With Amorphous Metal Cores. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011, **47**(3), 1293-1299. DOI: 10.1109/TIA.2011.2127430. ISSN 0093-9994. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5730490>
- [24] KULKARNI, S. a S. KHAPARDE. *Transformer engineering: design, technology, and diagnostics*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 978-143-9853-771.
- [25] MARTIN J. HEATHCOTE., . *The J*. 13th ed. Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2007. ISBN 978-008-0551-784.
- [26] Advanced Materials for Motor Laminations: Past, Present and Future. In: *Metglas®* [online]. 2016 [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://www.metglas.com/assets/pdf/Advanced%20Materials%20for%20Motor%20Laminations.pdf>
- [27] AMORPHOUS CORES FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS. In: *ENPAY* [online]. 2012 [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://www.travek.elektrozavod.ru/sites/default/files/images/production/enpay/Amorphous%20Core%20Catalogue.pdf>

- [28] MAAS, Jürgen, Mehrdad N. GHASEMI-NEJHAD, Dirk GÜTH a Ansgar WIEHE. MRF-actuator concepts for HMI and industrial applications. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 7977. San Diego, California, USA, 2011, s. 797714-1 - 797714-12. DOI: 10.1117/12.886376. ISSN 0277-786X. Dostupné také z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.886376>
- [29] GUTH, Dirk, Dennis CORDING a Jurgen MAAS. MRF based clutch with integrated electrical drive. In: *2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* [online]. Budapest: IEEE, 2011, s. 493-498 [cit. 2017-05-16]. DOI: 10.1109/AIM.2011.6027038. ISBN 978-1-4577-0838-1. ISSN 2159-6255. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6027038/>
- [30] Design of a High-efficiency Magnetorheological Valve. *JOURNAL OF INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS AND STRUCTURES*. 2002, **2002**(00), 1-7. DOI: 10.1106/104538902031988.
- [31] Design of a novel magnetorheological damper with internal pressure control. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2015, **2015**(32), 13-23. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.32.02.
- [32] SASSI, Sadok, Khaled CHERIF, Lotfi MEZGHANI, Marc THOMAS a Asma KOTRANE. An innovative magnetorheological damper for automotive suspension: from design to experimental characterization. *Smart Materials and Structures*. 2005, **14**(4), 811-822. DOI: 10.1088/0964-1726/14/4/041. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/14/i=4/a=041?key=crossref.2f47017a333f67aac37247a51f7802f1>
- [33] STATICKÉ A DYNAMICKÉ VLASTNOSTI ZAŘÍZENÍ. In: *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze* [online]. Praha, b.r. [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: [https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/stat\\_dyn.pdf](https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/stat_dyn.pdf)
- [34] Nejsi obyčejný konstruktér!. *Konstrukting* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <http://www.konstrukting.cz/nebud-obycejny-konstrukter/>
- [35] STX SMC PROTOTYPING MATERIAL. In: *Sintex* [online]. Jyllandsvej 9500 Hobro Denmark, 2016 [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: <http://onfly.dk/pdf/sintex/?id=11>
- [36] Free BH Curves. *MagWeb* [online]. 2011 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://magweb.us/free-bh-curves/>
- [37] ION BOSTAN...[ET AL.],. *Resilient energy systems renewables: wind, solar, hydro*. Dordrecht: Springer, 2013. ISBN 94-007-4189-8.
- [38] ELLIOT, J.F., S. LEGVOLD a F. H. SPEDDING. Some Magnetic Properties of Gadolinium Metal. *Physics Review* [online]. 1953, (91), 28-30 [cit. 2017-05-15]. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.91.28>. Dostupné z: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.91.28>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
B	bor
Co	kobalt
Fe	železo
MKP	metoda konečných prvků
Mn	mangan
MR	magnetoreologický
MRF	magnetorheological fluid
Nd	neodym
Ni	nikl
P	fosfor
PM	permanentní magnet
S	síra
SMC	Soft Magnetic Composite
Zn	zinek

Symbol	Jednotka	Veličina
B	T	magnetická indukce
f	Hz	frekvence
$\Phi_B$	Wb	magnetický tok
F	N	síla
G	S	elektrická vodivost
H	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole
I	A	elektrický proud
l	m	délka
M	$N \cdot m$	kroučící moment
p	Pa	tlak
$\rho$	$\Omega \cdot m$	měrný elektrický odpor
R	$\Omega$	elektrický odpor
t	s	čas
$\mu$	$N \cdot A^{-2}$	permeabilita
$\mu_r$		relativní permeabilita
T	s	časová konstanta systému 1. řádu
$T_p$	$^{\circ}C$	teplota
U	V	elektrické napětí
v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost
V	$m^3$	objem
$x_k$		konečná hodnota řídicí veličiny
$x_p$		počáteční hodnota řídicí veličiny
$y_k$		konečná hodnota řízené veličiny
$y_p$		počáteční hodnota řízené veličiny

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Písty MR tlumiče navržené na ÚK [1] .....	13
Obr. 2 Řez MR ventilem [1].....	14
Obr. 3 B-H křivka magneticky měkkého (souvislá čára) a tvrdého (čárkovaně) materiálu [3] .....	14
Obr. 4 Možnosti upořádání kovových jader [3] .....	16
Obr. 5 Modrý proud $I$ a zelená magnetická indukce $B$ [6] .....	16
Obr. 6 Drážkovaný mag. obvod [8].....	16
Obr. 7 Orientace vířivých proudů [7] .....	16
Obr. 8 Rozdělení magneticky měkkých materiálů .....	17
Obr. 9 Permeabilita jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17].....	18
Obr. 10 Měrný el. odpor jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17] .....	18
Obr. 11 Mez nasycení jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17] ..	19
Obr. 12 Remanence odečtená od meze nasycení jednotlivých druhů magneticky měkkých materiálů [10-17] .....	19
Obr. 13 Řez ovládacím prvkem vstřikovače s permanentním magnetem [18] .....	20
Obr. 14 Rychlost regulace vstřikovače s permanentním magnetem [18].....	20
Obr. 15 Srovnání materiálů jader magnetických hlav [19] .....	21
Obr. 16 Konstrukce čtecí/zapisovací hlavy [19] .....	21
Obr. 17 Standardní motorek pevného disku [20] .....	21
Obr. 18 Schéma spojení 3 plechů tzv. „interlockem“ [22].....	22
Obr. 19 Schéma hustoty vířivých proudů ve spojení interlockem [22].....	22
Obr. 20 Řezané jádro statoru [23] .....	22
Obr. 21 Způsoby spojení plechů v jádře [24] .....	22
Obr. 22 Typický průřez jádrem transformátoru [25].....	23
Obr. 23 Složené jádro transformátoru [25].....	23
Obr. 24 Transformátorové jádro z amorfních plechů [27] .....	23
Obr. 25 3D model MR spojky [29].....	24
Obr. 26 Odezva MR spojky na skok proudu z 0 A na 3 A [29] .....	24
Obr. 27 MR tlumič využívající Hiperco 50-A [30].....	25
Obr. 28 B-H křivka oceli AISI 430 [31].....	25
Obr. 29 Časová odezva tlumiče ÚK [1] .....	25
Obr. 30 Běžný MR tlumič s omezeným MR prostorem [32] .....	25
Obr. 31 MR tlumič s podélnými cívkami [32] .....	26
Obr. 32 Porovnání transientního chování tlumících sil pro variantu s feritovým a ocelovým jádrem .....	26
Obr. 33 MR tlumič s podélnými cívkami [32] .....	26
Obr. 34 Varianta z plechů.....	27
Obr. 35 Drážkovaná varianta.....	27
Obr. 36 Časová odezva systému prvního řádu [33].....	29
Obr. 37 Osminový model pístu MR tlumiče v ANSYS Maxwell.....	30
Obr. 38 Externí elektrický obvod nastavený v elektromagnetickém modelu.....	31
Obr. 39 Elektrická izolace cívky .....	32
Obr. 40 Normálová symetrie .....	32
Obr. 41 Vstup el. proudu do cívky .....	32
Obr. 42 Výstup el. proudu z cívky .....	32



Obr. 43 Nedrážkovaná (modrá) a drážkovaná .....	33
Obr. 44 Objem škrticí šterbiny .....	33
Obr. 45 Schéma měřicího okruhu pro měření mag. indukce na vzduchu.....	35
Obr. 46 Tester tlumičů Inova [34] .....	36
Obr. 47 Silové odezvy MR tlumiče s ocelovým a feritovým jádrem bez drážek [1]	36
Obr. 48 Průběh proudu a síly tlumiče při měření Streckera a spol. [1] .....	36
Obr. 49 Schéma měřicího okruhu pro měření MR tlumiče za provozu.....	37
Obr. 50 Odezva mag. pole tlumiče v závislosti na elektrickém odporu mag. obvodu .....	38
Obr. 51 Statické B-I charakteristiky zvolených materiálů porovnané s feritem.....	39
Obr. 52 Vzorok Kool M $\mu$ po obrobení.....	39
Obr. 53 Vzorok SMC prototyping po obrobení .....	39
Obr. 54 Vektory magnetického toku vykreslené v rovině jeho směru .....	40
Obr. 55 Vektory elektrického proudu vykreslené v rovině jeho toku .....	40
Obr. 56 Zakótování zkoumaných typů drážkování jádra.....	41
Obr. 57 Doba odezvy s jádry s jednodílnými drážkami šířky 0,35 mm .....	42
Obr. 58 Magnetická indukce s jádry s jednodílnými drážkami šířky 0,35 mm.....	43
Obr. 59 Doba odezvy s jádry s jednodílnými drážkami velkých hloubek.....	43
Obr. 60 Magnetická indukce s jádry s jednodílnými drážkami velkých hloubek .....	44
Obr. 61 Porovnání jednodílných drážek s drážkami se stejnou šířkou na pólech i na středu.....	44
Obr. 62 Zakótování zkoumaných typů drážkování pláště .....	45
Obr. 63 Srovnání zkrácení doby odezvy a poklesu magnetické indukce .....	46
Obr. 64 Odezva a indukce obvodu s drážkami šířky 0,35 mm z jedné strany v plášti .....	46
Obr. 65 Zkrácení doby odezvy ku snížení indukce obvodů s plášti drážkovanými z jedné strany .....	47
Obr. 66 Zkrácení doby odezvy ku snížení indukce obvodů s plášti s drážkami o šířce 1,4 mm .....	47
Obr. 67 Měření délky polotovaru z SMC materiálu .....	48
Obr. 68 Nákres prořezání jádra .....	49
Obr. 69 Nákres prořezání pláště .....	49
Obr. 70 Jádro z 11SMn30 s drážkami zalitými plastem PR 700 .....	50
Obr. 71 Plášť z 11SMn30 s drážkami zalitými plastem PR 700 .....	50
Obr. 72 Odezva navržených experimentálních obvodů na pokles proudu ze 2 A za 0,4 ms.....	51
Obr. 73 Srovnání MKP a měření drážkované varianty z automatové oceli na vzduchu (přebuzení magnetometru 30 V).....	55
Obr. 74 Srovnání MKP a měření drážkované varianty z automatové oceli na vzduchu (přebuzení magnetometru 30 V).....	55
Obr. 75 Srovnání MKP a měření varianty z SMC materiálu na vzduchu (přebuzení magnetometru 30 V).....	56
Obr. 76 Dynamický rozsah testovaných tlumičů při 2,5 A .....	57
Obr. 77 Dynamický rozsah testovaných tlumičů při 0,2 m/s.....	57
Obr. 78 Max. síla testovaných tlumičů při 2 A.....	58
Obr. 79 Síla testovaných tlumičů ve vypnutém stavu při rychlosti 0,1 m/s po průchodu .....	58
Obr. 80 Odezva náběhu proudu pístů s MR kapalinou.....	59

Obr. 81 Silová odezva tlumiče při rychlosti 0,2 m/s .....	60
Obr. 82 Silová odezva tlumiče při rychlosti 2 A .....	60
Obr. 83 90% silová odezva tlumiče při rychlosti 0,3 m/s .....	61
Obr. 84 Porovnání MKP a měření tlumiče s drážkovaným obvodem při 2 A a 0,2 m/s .....	61
Obr. 85 Porovnání MKP a měření tlumiče s SMC obvodem při 2 A a 0,2 m/s .....	62
Obr. 86 Pokles rychlosti pístu při měření s SMC obvodem při 2 A a 0,2 m/s .....	62
Obr. 87 Magnetické indukce experimentálních mag. obvodů s MR kapalinou v MKP při 2 A .....	63
Obr. 88 Odezvy experimentálních mag. obvodů s MR kapalinou v MKP při poklesu z 2 A za 0,3 ms .....	63
Obr. 89 Porovnání měřené a simulované magnetické indukce s indukcí na vzduchu při 2 A .....	64
Obr. 90 Porovnání měřené a simulované doby odezvy na vzduchu při poklesu z 2 A na 0 A s přebuzením 30 V .....	64
Obr. 91 Tlumicí síla MR tlumičů při 2,5 A a rychlosti pístu 0,2 m/s.....	65
Obr. 92 Srovnání odezvy MR tlumičů při 2 A a 0,2 m/s s odezvou mag. indukce dle MKP .....	65
Obr. 93 Porovnání náběhů síly při sepnutí proudu na 2 A a rychlosti pístu 0,2 m/s ..	66

---

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Nastavení parametrů modelu v ANSYS Electronics .....	31
Tab. 2 Konfigurace měření silové odezvy .....	36
Tab. 3 Testované varianty drážkovaných jader .....	42
Tab. 4 Zkoušené varianty drážkovaných plášťů .....	45
Tab. 5 Odezva navržených experimentálních obvodů na pokles proudu ze 2 A za 0,4 ms .....	50
Tab. 6 Doba změny proudu mezi hraničními hodnotami 0 a 2 A .....	52
Tab. 7 Doba odezvy při přebuzení 12 V .....	52
Tab. 8 Doba odezvy při přebuzení 30 V .....	53
Tab. 9 Doba odezvy při max. přebuzení .....	53
Tab. 10 Indukce při 2,05 A a následné remanence .....	54
Tab. 11 Experimentální varianty MR tlumiče .....	63



**12 SEZNAM PŘÍLOH****Svázané přílohy:**

Příloha 1 Porovnání elektromagnetických vlastností magneticky měkkých materiálů

Příloha 2 Nastavené parametry v MKP modelu

Příloha 3 Výsledky MKP simulací drážkovaných jader s pláští bez drážek

Příloha 4 Výsledky MKP simulací drážkovaných plášťů s jádry bez drážek

Příloha 5 Srovnání měření mag. indukce na vzduchu s výsledky MKP simulací

Příloha 6 Dynamické rozsahy a max. síly měřených tlumičů v závislosti na proudu a rychlosti pístu

Příloha 7 Sílové odezvy tlumičů při rychlostech 0,1 m/s a 0,3 m/s

Příloha 8 Článek Design of fast magnetorheological damper using soft magnetic composites

Příloha 9 Funkční vzorek Soft magnetic composite píst magnetoreologického tlumiče s rychlou odezvou a velkým dynamickým rozsahem

**Oddělené přílohy:**

Příloha 10 Výrobní výkresy

**Elektronické přílohy:**

Příloha 11 Protokol všech měření mag. indukce na vzduchu

Příloha 12 Výsledky všech měření MR tlumičů na hydraulickém pulsátoru

Příloha 13 Dewesoft data z měření

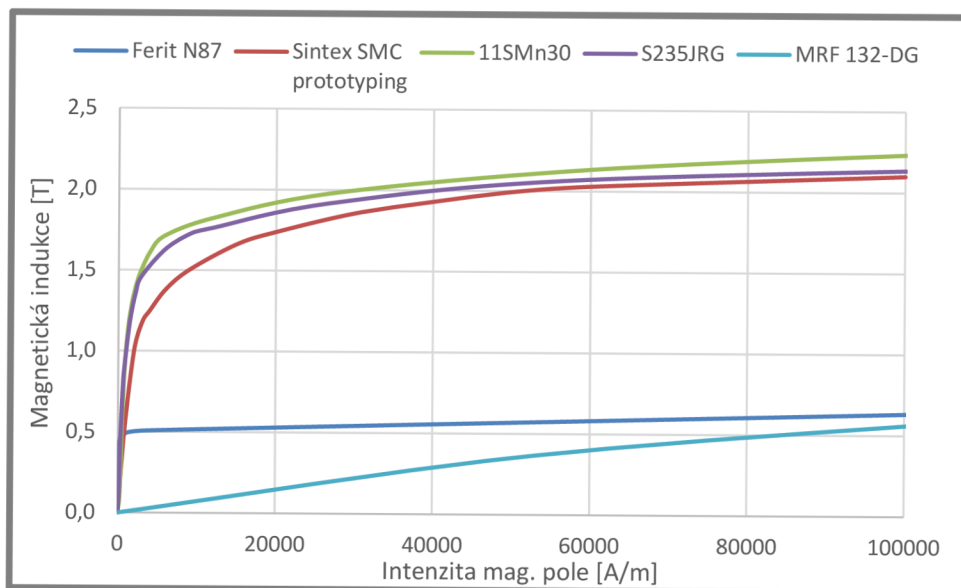
Příloha 14 Skripty pro automatické vyhodnocení Dewesoft dat

# PŘÍLOHY

Příloha 1 Porovnání elektromagnetických vlastností magneticky měkkých materiálů [10-17]

Skupina materiálů	Typ materiálu	Složení	Permeabilita	Měrný odpor [Ω·m]	Mez nasycení [T]	Remanence [T]	Mez pevnosti [MPa]
Keramické	MnZn ferity		2300-15000	0,01-11	0,24-0,55	0,04-0,18	30
	NiZn ferity		80-800	1,0E+05	0,31		
Fe	Behanit	99,5% Fe	3800-7100	9,0E-08	1,75-1,85	0,9-1,4	
	S235JRG ČSN 11375	97,5% Fe 0,2% C, 1,5% Mn, 0,5% Cu	1700	1,0E-07	1,80	0,70	
	1% Si ocel	98,5% Fe, 0,9% Si, 0,2% Mn	7700-14800	2,5E-07	1,90	0,7-1,1	
	3% Si ocel	95,5% Fe, 3,0 % Si, 0,4% Al	7000-40000	4,2E-07	1,6-1,95	0,8-1	
	4% Si ocel	96% Fe, 4% Si	5000-18500	5,0E-07	2,00	1,20	
	AISI420 DIN1.4021	84% Fe, 13% Cr	950	6,0E-07	1,70	1,17	950
Ni	45 Permalloy	45% Ni, 55% Fe	23000	4,5E-07	1,60	0,80	
	78 Permalloy	78% Ni, 22% Fe	100000	1,6E-07	1,10	0,60	
	Mumetal	77% Ni, 16% Fe, 5% Cu, 2% Cr	240000	5,8E-07	0,80	0,40	
	Supermalloy	79% Ni, 16% Fe, 5% Mo	1000000	6,0E-07	0,85	0,35	
Co	45-25 perminvar	45% Ni, 30% Fe, 25% Co	2000	1,9E-07	1,55	0,0-0,3	
	7-45-25 Mo-perminvar	7% Mo, 45% Ni, 23% Fe, 25% Co	3700	8,0E-07	1,05	0,40	
	Permendur	50% Fe, 50% Co	7900	6,0E-08	2,40	1,40	
	1,7 V-permendur	1,7% V, 49,15% Fe, 49,15% Co	7900	2,4E-07	2,40	1,40	
	Hiperco® 50 Alloy	1,9% V, 49,25% Fe, 48,75% Co	3900	4,0E-07	2,40	1,50	
Práškové mat.	Kool Mμ (standardně Sendust)	85% Fe, 9% Si, 6% Al	14-125	4,0E-03	1,00		
	MPP (Molypermalloy powder)	79% Ni, 17% Fe, 4% Mo	14-550	1,0E-02	0,75		
	High Flux	50% Fe, 50% Ni	14-160	5,0E-03	1,50		
	XFlux	93,5% Fe, 6,5% Si	26-60	2,0E-03	1,60		
	Amoflux	Fe, Si, B	60	1,0E-02	1,50		
SMC	STX S7 SMC		750	2,0E-04	1,65		125
	STX S7B SMC		630	6,0E-04	1,60		120
	STX S10 SMC		850	7,0E-05	1,60		140
	STX M7 SMC		540	4,0E-04	1,30-1,65		40
	STX B7 SMC		440	1,0E-03	1,60		35
	STX B7X SMC		600	7,0E-04	1,65		60
	STX H3 SMC		289	8,0E-03	1,45		33
	STX H1 SMC		220	7,6E-03	1,40		34
	Sintex SMC prototyping		430	2,8E-04	1,55		75
Amorfni kovy	Metglas® 2605SA1	90% Fe, 7,5% Si, 2,5% B	45000-600000	1,3E-06	1,55	1/1,4	
	Metglas® 2605S3A	90% Fe, 5% Si, 2,5% B, 2,5% Cr	20000-35000	1,4E-06	1,40	0,3/1,15	
	Metglas® 2705M	80% Co, 4,5% Si, 2,5% B, 2,5% Fe, 2,5% Mo, 2,5% Ni	290000	1,4E-06	0,77	0,70	
	Metglas® 2714A	79% Ni, 16% Fe, 5% Mo	80000-1000000	1,4E-06	0,57	0,25/0,5/0,55	
	Metglas® 2826MB	45% Fe, 45% Ni, 7,5% Mo, 2,5% B	50000-1000000	1,4E-06	0,88	0,1/0,35/0,65	





BH křivky použité v elektromagnetickém modelu

Elektrické vodivosti nastavené v elektromagnetickém modelu

	<b>Elektrická vodivost</b>
<b>Ferit N87</b>	0,1 S·m <sup>-1</sup>
<b>Sintex SMC prototyping</b>	3570 S·m <sup>-1</sup>
<b>11SMn30</b>	5,75 MS·m <sup>-1</sup>
<b>S235JRG</b>	6,30 MS·m <sup>-1</sup>

Příloha 3 Výsledky MKP simulací drážkovaných jader s pláští bez drážek

č.	šířka drážek [mm]	hloubka drážek [mm]	počet drážek [-]	typ drážek	Časová odezva [ms]	Max. indukce ve štěrbině [mT]	Max. indukce v jádře [T]	Max. indukce v plášti [T]	Počet prvků sítě [-]
1	0	0	0	bez drážek	10,33	490,5	1,71	1,71	111097
2	0,35	1	4	jednolitá	10,27	489,1	2,18	2,46	78894
3	0,35	2,9	4	jednolitá	10,01	487,7	2,37	2,37	95246
4	0,35	4	4	jednolitá	9,25	488,0	2,12	2,12	101125
5	0,35	5	4	jednolitá	8,47	487,9	2,21	2,21	102792
6	0,35	6,5	4	jednolitá	7,49	487,4	2,21	2,21	101604
7	0,35	8	4	jednolitá	6,87	487,0	2,11	2,11	101210
8	0,35	1	8	jednolitá	10,05	488,5	2,23	2,23	77252
9	0,35	2,9	8	jednolitá	9,74	488,2	2,23	2,52	97582
10	0,35	4	8	jednolitá	8,40	487,1	2,38	2,38	102850
11	0,35	5	8	jednolitá	7,23	486,7	2,22	2,22	107205
12	0,35	6,5	8	jednolitá	5,86	486,2	2,27	2,27	108315
13	0,35	8	8	jednolitá	5,17	482,2	2,31	2,31	111156
14	0,35	1	16	jednolitá	9,92	487,7	2,43	2,43	78970
15	0,35	2,9	16	jednolitá	9,18	486,8	2,28	2,28	102224
16	0,35	4	16	jednolitá	7,29	486,0	2,25	2,25	110847
17	0,35	5	16	jednolitá	5,54	485,2	2,20	2,20	117772
18	0,35	6,5	16	jednolitá	4,29	481,8	2,47	2,47	124388
19	0,35	8	16	jednolitá	3,60	482,1	2,14	2,14	133999
20	0,35	1	32	jednolitá	9,76	486,7	2,22	2,22	79099
21	0,35	2,9	32	jednolitá	8,80	485,4	2,30	2,30	109121
22	0,35	4	32	jednolitá	6,14	483,1	2,21	2,21	123583
23	0,35	5	32	jednolitá	4,34	478,1	2,25	2,48	135695
24	0,35	6,5	32	jednolitá	3,25	475,6	2,30	2,30	155585
25	0,35	8	32	jednolitá	2,74	471,6	2,20	2,20	170448
26	0,35	1	64	jednolitá	9,51	484,8	2,25	2,25	82488
27	0,35	2,9	64	jednolitá	8,63	483,7	2,30	2,30	121431
28	0,35	4	64	jednolitá	5,84	475,1	2,22	2,22	139741
29	0,35	5	64	jednolitá	4,13	470,9	2,24	2,24	156326
30	0,35	6,5	64	jednolitá	3,14	457,6	2,33	2,33	188545
31	0,35	8	64	jednolitá	2,51	438,5	2,25	2,25	204141
32	0,7	1	4	jednolitá	10,06	488,2	2,28	2,28	78430
33	0,7	2,9	4	jednolitá	9,93	487,5	2,33	2,33	94994
34	0,7	4	4	jednolitá	9,30	487,3	2,26	2,26	100596
35	0,7	5	4	jednolitá	8,43	486,8	2,28	2,28	101710
36	0,7	6,5	4	jednolitá	7,42	485,7	2,19	2,19	101793
37	0,7	8	4	jednolitá	6,87	483,6	2,43	2,43	99416
38	0,7	1	8	jednolitá	10,02	486,9	2,33	2,33	77240
39	0,7	2,9	8	jednolitá	9,50	487,3	2,32	2,32	98458
40	0,7	4	8	jednolitá	8,40	485,9	2,41	2,41	105020
41	0,7	5	8	jednolitá	7,15	485,0	2,24	2,24	106693
42	0,7	6,5	8	jednolitá	5,79	480,7	2,38	2,71	110749
43	0,7	8	8	jednolitá	5,07	481,4	2,41	2,41	112366
44	0,7	1	16	jednolitá	9,90	485,7	2,37	2,37	77522
45	0,7	2,9	16	jednolitá	9,00	485,2	2,42	2,42	103142
46	0,7	4	16	jednolitá	7,19	482,6	2,39	2,39	111654
47	0,7	5	16	jednolitá	5,32	477,1	2,75	2,75	119367
48	0,7	6,5	16	jednolitá	4,12	475,8	2,37	2,37	129934
49	0,7	8	16	jednolitá	3,44	469,7	2,32	2,32	135834
50	0,7	1	32	jednolitá	9,34	482,3	2,38	2,38	78850
51	0,7	2,9	32	jednolitá	8,57	480,3	2,43	2,43	111460
52	0,7	4	32	jednolitá	6,00	474,6	2,32	2,32	125264
53	0,7	5	32	jednolitá	4,28	469,1	2,36	2,36	139981
54	0,7	6,5	32	jednolitá	3,15	457,2	2,38	2,38	159702

55	0,7	8	32	jednolitá	2,59	438,0	2,32	2,32	177826
56	0,7	1	64	jednolitá	8,84	475,4	2,44	2,44	82244
57	0,7	2,9	64	jednolitá	8,09	460,7	2,44	2,44	118591
58	0,7	4	64	jednolitá	6,50	426,4	2,40	2,44	138119
59	0,7	5	64	jednolitá	5,16	365,7	2,32	2,32	161527
60	0,35	1	4	stejná	10,10	488,3	2,37	2,37	101897
61	0,35	2,9	4	stejná	8,41	487,5	2,52	2,52	104046
62	0,35	4	4	stejná	7,79	487,3	2,07	2,07	102664
63	0,35	5	4	stejná	7,25	486,8	2,09	2,09	101570
64	0,35	1	8	stejná	9,44	487,7	2,28	2,28	104512
65	0,35	2,9	8	stejná	7,22	486,4	2,82	2,82	108398
66	0,35	4	8	stejná	6,22	486,4	2,04	2,04	108640
67	0,35	5	8	stejná	5,61	483,3	2,42	2,42	109373
68	0,35	1	16	stejná	8,78	486,7	2,24	2,24	106711
69	0,35	2,9	16	stejná	5,71	481,5	2,80	2,80	118515
70	0,35	4	16	stejná	4,56	483,2	2,37	2,37	120433
71	0,35	5	16	stejná	4,00	482,1	2,40	2,40	128513
72	0,35	1	32	stejná	7,83	484,9	2,17	2,17	110357
73	0,35	2,9	32	stejná	4,57	479,7	2,68	2,68	136214
74	0,35	4	32	stejná	3,51	476,3	2,33	2,33	149460
75	0,35	5	32	stejná	3,09	471,2	2,29	2,29	157426
76	0,35	1	64	stejná	7,45	480,1	2,50	2,66	116732
77	0,35	2,9	64	stejná	4,29	468,6	2,94	2,94	157001
78	0,35	4	64	stejná	3,25	458,5	2,35	2,35	173465
79	0,35	5	64	stejná	2,75	444,9	2,29	2,29	186641
80	0,7	1	4	stejná	9,81	487,4	2,21	2,21	102419
81	0,7	2,9	4	stejná	8,37	486,7	2,35	2,35	102693
82	0,7	4	4	stejná	7,79	483,1	2,45	2,49	103620
83	0,7	5	4	stejná	7,08	481,6	2,64	2,65	102978
84	0,7	1	8	stejná	9,32	486,5	2,38	2,38	102309
85	0,7	2,9	8	stejná	7,18	482,3	2,35	2,56	108973
86	0,7	4	8	stejná	6,08	479,6	2,51	2,51	110824
87	0,7	5	8	stejná	5,49	481,8	2,31	2,31	111126
88	0,7	1	16	stejná	8,54	483,9	2,36	2,36	105173
89	0,7	2,9	16	stejná	5,45	479,6	2,44	2,44	118470
90	0,7	4	16	stejná	4,38	476,2	2,45	2,45	126092
91	0,7	5	16	stejná	3,69	473,0	2,42	2,42	131396
92	0,7	1	32	stejná	7,65	476,4	2,64	2,66	108513
93	0,7	2,9	32	stejná	4,42	466,9	2,36	2,36	141415
94	0,7	4	32	stejná	3,34	456,6	2,36	2,36	154499
95	0,7	5	32	stejná	2,84	444,2	2,37	2,37	166571
96	0,7	1	64	stejná	7,92	467,0	2,44	2,44	114907
97	0,7	2,9	64	stejná	5,47	419,6	2,43	2,43	159787

Příloha 4 Výsledky MKP simulací drážkovaných pláští s jádry bez drážek

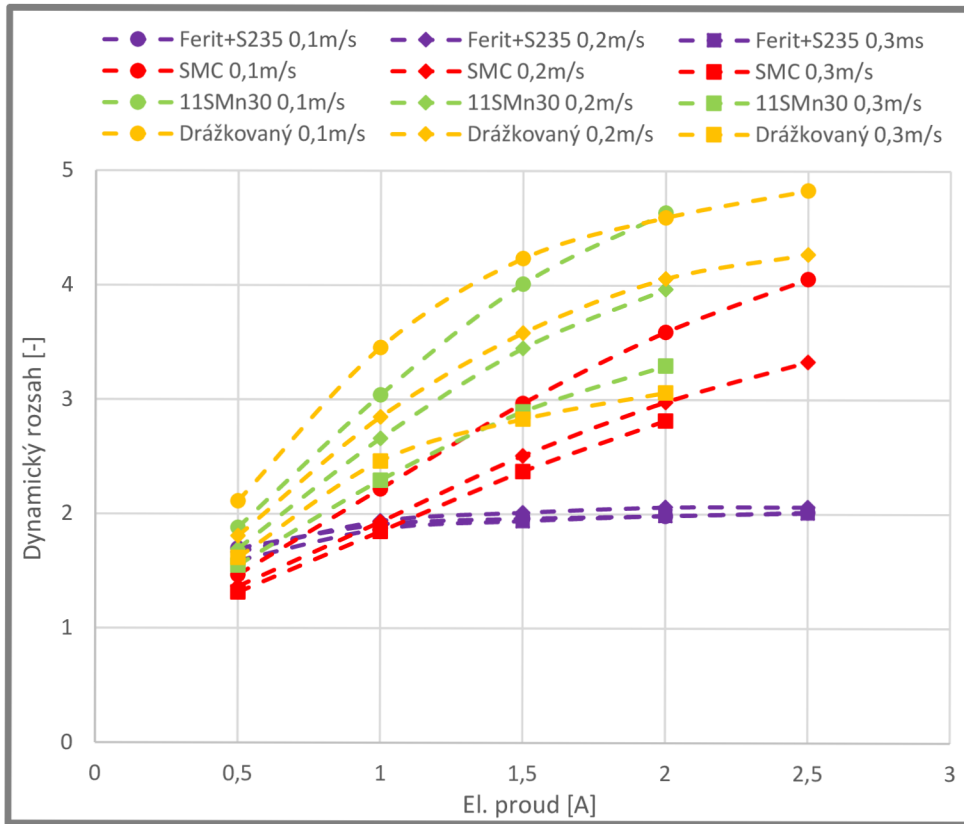
č.	šířka drážek [mm]	hloubka drážek [mm]	počet drážek [-]	typ drážek	Časová odezva [ms]	Max. indukce ve štěrbině [mT]	Max. indukce v jádře [T]	Max. indukce v plášti [T]	Počet prvků sítě [-]
1	0,35	0,7	12	1 strana	9,59	487,2	1,94	1,97	112990
2	0,35	1,4	12	1 strana	9,10	484,5	2,53	2,07	118147
3	0,35	2,1	12	1 strana	8,08	480,5	2,16	1,85	120749
4	0,35	0,7	36	1 strana	8,63	479,5	1,81	2,29	123176
5	0,35	1,4	36	1 strana	7,24	468,2	1,77	2,42	134484
6	0,35	2,1	36	1 strana	6,68	457,5	1,83	2,52	137360
7	0,35	0,7	60	1 strana	8,18	471,7	1,97	2,22	126678
8	0,35	1,4	60	1 strana	6,73	453,0	2,30	2,12	147559
9	0,35	2,1	60	1 strana	6,09	432,9	1,90	1,97	151385
10	0,35	0,7	84	1 strana	8,00	464,1	2,14	2,19	137763
11	0,35	1,4	84	1 strana	6,42	436,4	1,84	1,84	161148
12	0,35	2,1	84	1 strana	5,76	407,7	1,96	2,25	163648
13	0,7	0,7	12	1 strana	9,09	483,0	2,45	2,03	115518
14	0,7	1,4	12	1 strana	8,59	476,0	1,79	1,93	117121
15	0,7	2,1	12	1 strana	7,97	469,3	1,77	1,74	119838
16	0,7	0,7	36	1 strana	8,13	466,5	2,14	1,96	122291
17	0,7	1,4	36	1 strana	6,76	443,8	1,78	1,90	135339
18	0,7	2,1	36	1 strana	6,09	419,1	1,86	1,79	141286
19	0,7	0,7	60	1 strana	7,35	449,1	2,21	2,43	128023
20	0,7	1,4	60	1 strana	6,09	408,9	2,02	2,24	154179
21	0,7	2,1	60	1 strana	5,10	364,3	2,09	2,41	153611
22	0,7	0,7	84	1 strana	7,08	429,3	1,82	2,43	134774
23	0,7	1,4	84	1 strana	5,41	369,7	2,07	2,57	156538
24	0,7	2,1	84	1 strana	4,23	298,8	2,45	2,32	165324
25	0,35	0,7	12	labyrint	9,83	488,4	1,80	1,81	113237
26	0,35	1,4	12	labyrint	9,33	485,1	2,11	1,99	118256
27	0,35	2,1	12	labyrint	8,69	481,7	1,81	1,80	119914
28	0,35	0,7	36	labyrint	9,36	480,7	1,97	2,11	122302
29	0,35	1,4	36	labyrint	8,11	469,9	1,94	2,32	134648
30	0,35	2,1	36	labyrint	7,50	457,5	2,02	2,40	138561
31	0,35	0,7	60	labyrint	8,73	473,5	2,05	2,20	127690
32	0,35	1,4	60	labyrint	7,46	454,0	1,96	2,18	148639
33	0,35	2,1	60	labyrint	6,56	433,8	2,36	2,58	155227
34	0,35	0,7	84	labyrint	8,22	465,7	2,10	2,27	136446
35	0,35	1,4	84	labyrint	6,74	437,6	1,81	1,82	166251
36	0,35	2,1	84	labyrint	5,97	408,0	1,86	2,43	166914
37	0,7	0,7	12	labyrint	9,71	483,8	2,09	2,06	113938
38	0,7	1,4	12	labyrint	9,17	477,4	2,21	1,90	119333
39	0,7	2,1	12	labyrint	8,48	469,9	2,06	1,92	120204
40	0,7	0,7	36	labyrint	8,82	469,3	2,17	1,89	124214
41	0,7	1,4	36	labyrint	7,60	446,0	2,05	2,03	136502
42	0,7	2,1	36	labyrint	6,73	420,7	1,80	2,14	141689
43	0,7	0,7	60	labyrint	8,01	453,2	1,76	1,88	130649
44	0,7	1,4	60	labyrint	6,58	411,8	2,40	1,92	151347
45	0,7	2,1	60	labyrint	5,45	365,7	1,85	2,12	154629
46	0,7	0,7	84	labyrint	7,53	435,4	2,11	2,34	136064
47	0,7	1,4	84	labyrint	5,62	375,1	1,80	2,38	160220
48	0,7	2,1	84	labyrint	4,49	301,9	1,80	2,59	164150



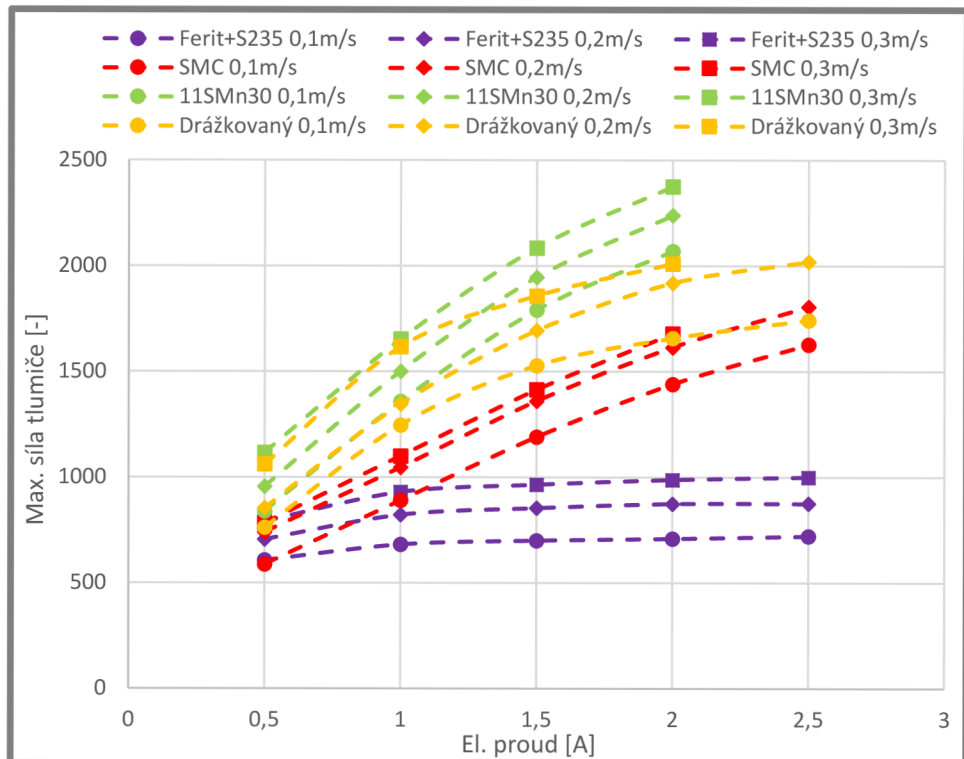
**Příloha 5** Srovnání měření mag. indukce na vzduchu s výsledky MKP simulací

	MKP - max. indukce [mT]	Měření - max. indukce [mT]	MKP - odezva náběhu [ms]	Měření - odezva náběhu [ms]	MKP - odezva poklesu [ms]	Měření - odezva poklesu [ms]	Počet prvků MKP sítě	Min. časový krok náběhu [ms]	Min. časový krok poklesu [ms]
<b>11SMn30 bez drážek</b>	201,9	172,5	2,25	1,64	2,10	1,74	45883	0,0098	0,0125
<b>Drážkovaná varianta bez drážek na pólech</b>	200,5	181,4	0,68	0,72	0,52	0,68	184496	0,0085	0,0125
<b>Drážkované jádro, plášť bez drážek</b>	200,8	171,6	0,89	0,74	0,63	0,74	187938	0,0075	0,0125
<b>Drážkovaná varianta s pootočením drážek na plášti o půl rozteče</b>	198,2	175,0	0,47	0,61	0,31	0,49	238281	0,0039	0,0125
<b>Drážkovaná varianta bez drážek na středu jádra</b>	201,0	181,4	1,31	0,95	0,99	1,09	200637	0,0096	0,0125
<b>Drážkovaná varianta</b>	200,0	171,3	0,45	0,61	0,30	0,48	242250	0,0047	0,0125
<b>SMC jádro, 11SMn30 plášť</b>	197,0	190,0	0,80	0,75	0,57	0,72	45883	0,0087	0,008739
<b>SMC obvod</b>	184,2	151,8	0,39	0,56	0,27	0,45	51181	0,0005	0,000526

Příloha 6 Dynamické rozsahy a max. síly měřených tlumičů v závislosti na proudu a rychlosti pístu

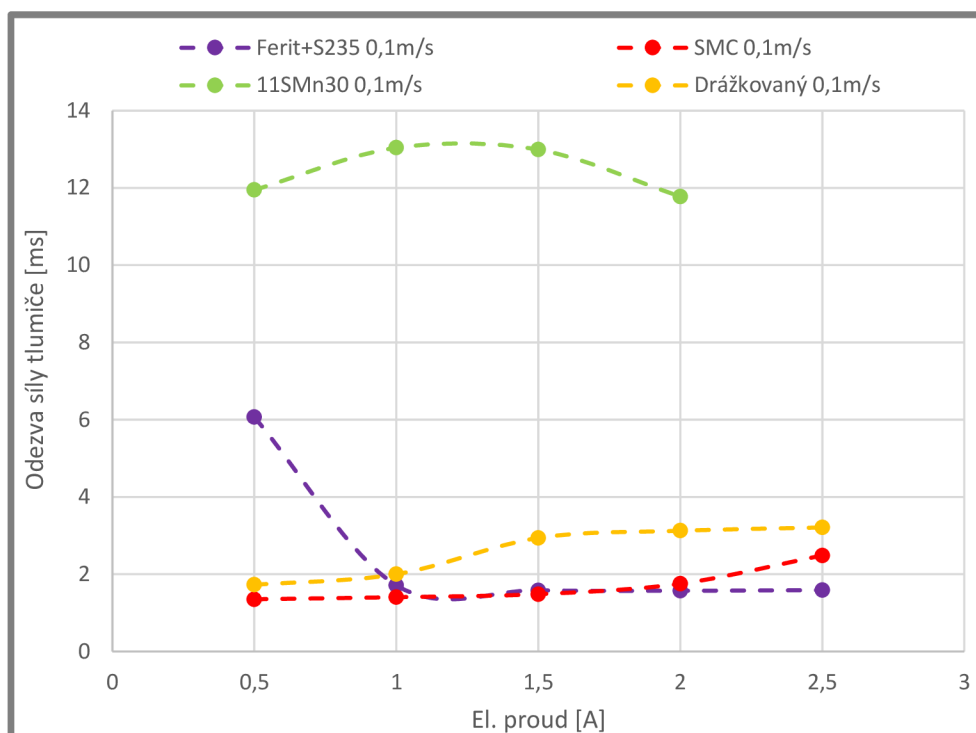


Dynamický rozsah testovaných tlumičů

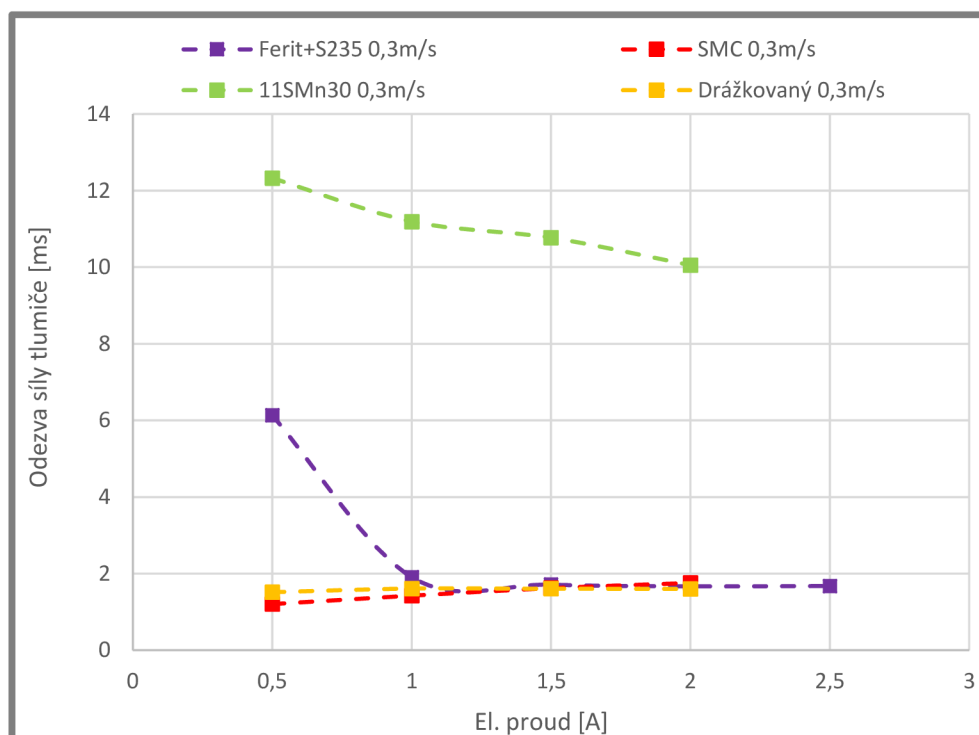


Max. síla testovaných tlumičů

Příloha 7 Sílové odezvy tlumičů při rychlostech 0,1 m/s a 0,3 m/s



Sílová odezva tlumiče při rychlosti 0,1 m/s



Sílová odezva tlumiče při rychlosti 0,3 m/s



## DESIGN OF FAST MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER USING SOFT MAGNETIC COMPOSITES

Z. Strecker\*, T. Strmiska, J. Roupec, M. Kubík, O. Macháček

**Abstract:** *The article investigates the suitability of soft magnetic composite (SMC) material for construction of magnetorheological damper piston. The SMC materials have, in comparison with steel, high electric resistance, which secures very short response time of magnetic induction in the magnetic circuit. In comparison with ferrite materials, the SMC materials have better mechanical properties and high magnetic saturation level, which secures high dynamic range. The disadvantage of SMC material is low permeability. The measurements and simulations showed that MR damper piston made of SINTEX STX SMC prototyping material achieves high magnetic flux density in the MR damper piston gap (only 20% lower than piston made of steel) and very short response time of magnetic flux density in the gap (more than 20 times shorter than in case of steel piston).*

**Keywords:** MR damper, fast response, soft magnetic composite, SMC

### 1. Introduction

The response time and the dynamic range of Magnetorheological (MR) damper is one of the key factors influencing performance of semiactive suspension. Strecker (2015) described the dependence of MR damper response time on the passenger car semiactive suspension controlled by Modified groundhook algorithm. The simulations and measurements showed that the response time 8 ms (usual for commercial MR dampers) is too long for efficient semiactive control. Therefore it is necessary to develop MR dampers with short response time. Reasons of long response time of MR devices were described in Maas (2011). One of the most important sources of long response time of MR dampers are eddy-currents. They can be eliminated using material with high electrical resistivity. Strecker (2015) designed a fast MR damper, with response time of damper force on control signal up to 1.5 ms. The magnetic circuit of the MR damper was made of ferrite material Epcos N87. Ferrites have good permeability ( $\mu_r = 2200$ ) and very high electrical resistivity 10  $\Omega\text{m}$ . This material, however, has bad mechanical properties, very poor machinability and low magnetic saturation (490 mT). Therefore, the dynamic range of MR damper made of ferrite material is much smaller in comparison with the piston made of steel. Another way of reducing the eddy currents while keeping high dynamic range seem to be the use of structured cores made of steel. The steel cores with a structure preventing eddy currents can be printed from pure iron by 3D SLM print (Palousek 2017). It is, however, very difficult to design the appropriate structure. Soft magnetic composites (SMC) seem to be suitable material for construction of MR damper piston. The electrical resistivity of SMC materials can be more than thousand times higher than the resistivity of steel, which practically eliminates eddy-currents (Shokrollahi 2007). The magnetic saturation level of SMC materials is much higher than in case of ferrites, which allows designing of MR dampers with higher dynamic range. Some SMC materials are easily machinable. However, SMC materials have very small relative permeability. Therefore it is necessary to evaluate the suitability of this material for the design of MR damper.

### 2. Methods

The objective was to design a new MR damper piston which eliminates eddy currents induced in the magnetic circuit of the MR damper and which enables large control range of achievable magnetic flux

---

\* All authors: Institute of Machine and Industrial Design, Brno Technical University, Technická 2896/2; 616 69, Brno; CZ, [\\*strecker@fme.vutbr.cz](mailto:*strecker@fme.vutbr.cz)

density in the gap of MR piston. The performance of the new piston made of soft magnetic composite material was compared to the piston made of 11SMn30 steel.

The geometry of the MR damper piston used for measurements is in Fig.1. The new piston was made of SMC material SINTEX STX prototyping material with relative permeability  $\mu_r = 430$ , electrical resistivity  $280 \mu\Omega\text{m}$  and magnetic saturation  $B_s = 1.46 \text{ T}$ . In order to verify magnetic FEM model, transient and static magnetic flux density dependencies in the gap filled by air were measured. The model is necessary for estimating the dependency of magnetic flux density on the current in the gap filled by MR fluid, because this dependency can not be measured directly by Hall probe.

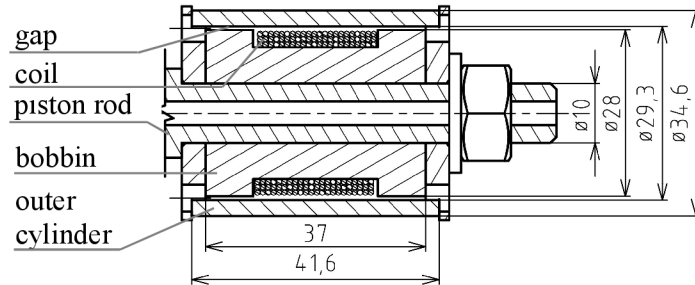


Fig. 1: Dimensions of MR piston

### 2.1. Magnetic model

Magnetic model was done in Ansys electronics desktop 17.1. The magnetic circuit was modeled in 3D. Because of magnetic circuit symmetry, it was enough to simulate only 1/8 of the magnetic circuit. The time step of transient analysis was 0.0125 ms, the length based mesh consisted of 53779 elements.

### 2.2. Measurement of response time of B

The response time of the magnetic flux density on electric current step was considered as the time needed for reaching 63.2 % of the steady state magnetic flux density at 2 A. The current was generated by fast current controller of our construction. Magnetic flux density in the gap was measured by Tesla meter FW Bell 5180. All the signals were collected by DEWE 50 data acquisition station (Fig. 2).

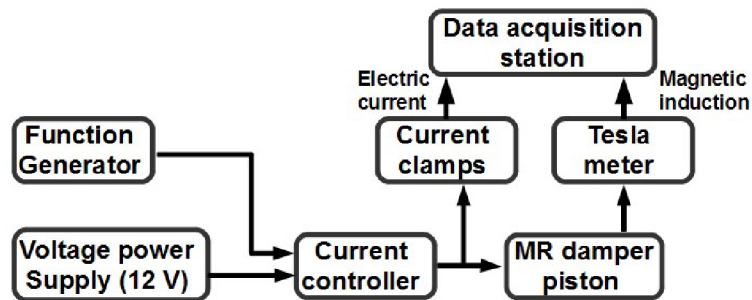


Fig. 2: Block scheme of measurement

## 3. Results

### 3.1. Static analysis

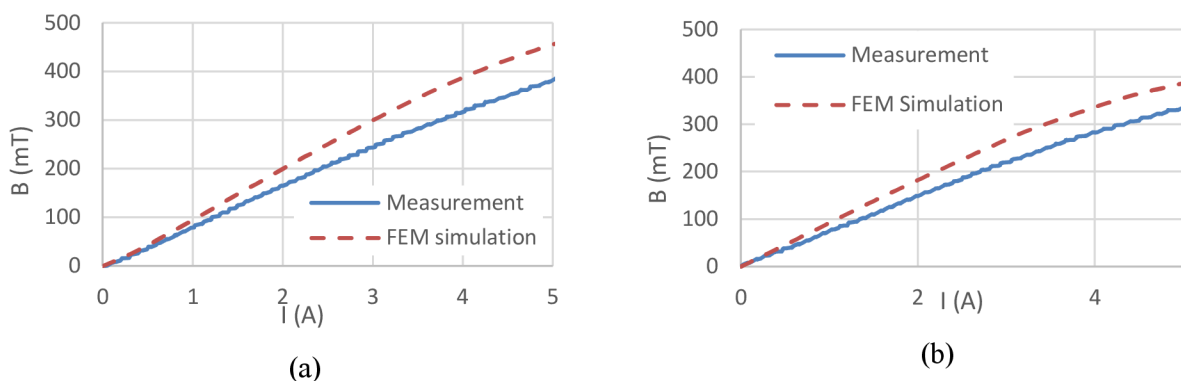


Fig. 3: Magnetic flux density in the gap with air for piston made of (a) steel, (b) SMC Sintex

Fig. 3 compares the dependencies of magnetic flux density in the gap filled by air on the electric current in the coil. The differences between measured and simulated values are up to 15%. It can be seen that magnetic flux density in the piston made of SMC material is lower than in the piston made of steel. The magnetic circuits with air in the gap are not saturated even at 5 A.

Fig. 4 shows the simulated values of magnetic flux density in the gap filled with MR fluid. The magnetic flux density in the gap of the piston made of SMC is about 15% lower than for steel variant.

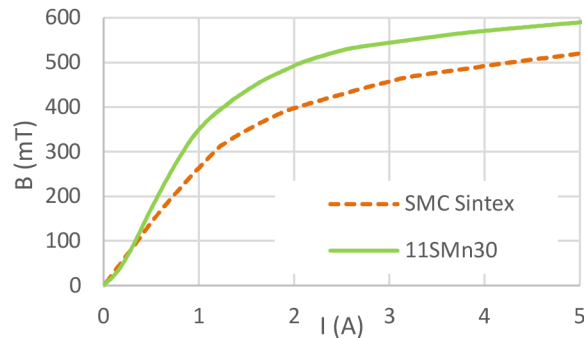


Fig. 4: FEM simulation of magnetic flux density in the gap filled by MR fluid

### 3.2. Transient analysis

Fig.5 compares measured and simulated responses of magnetic flux density on the electric current for the piston made of steel and with air in the gap. The measured response time of the magnetic flux density on current step is 1.7 ms. The response time of the current is 0.12 ms.

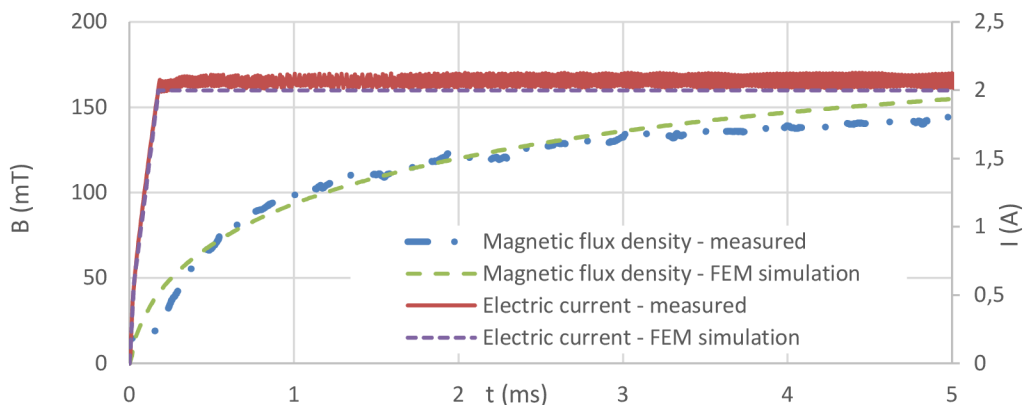


Fig. 5: Transient response of magnetic flux density in the gap with air on electric current – piston made of 11SMn30

Fig. 6 compares measured and simulated responses of magnetic flux density on the electric current for the piston made of SMC Sintex material and with air in the gap. The response time of the magnetic flux density on current step is 0.56 ms. The measured response time of the current in this case is 0.37 ms.

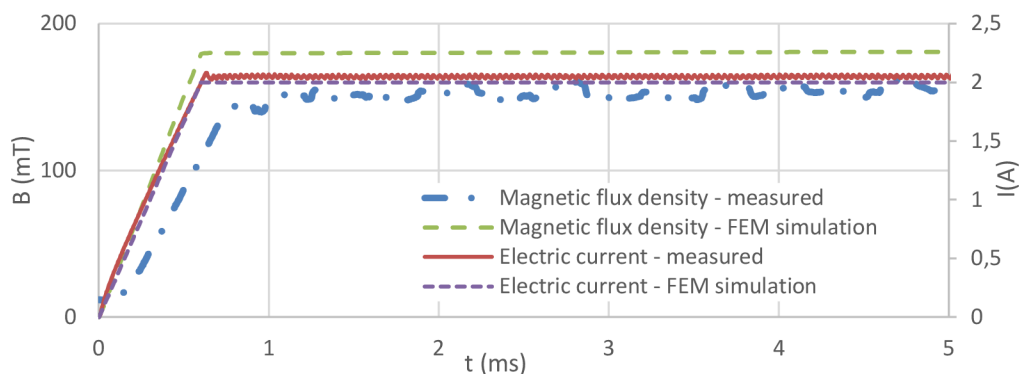


Fig. 6: Transient response of magnetic flux density in the gap with air on electric current – piston made of SMC Sintex material



Fig. 7 shows the simulation of magnetic flux density in the piston gap filled by MR fluid for piston made of SMC Sintex and piston made of steel. The simulation shows that the predicted response time of magnetic flux density in the gap of steel piston is 8.1 ms. The course of magnetic flux density for piston made of SMC is similar with electric current. The predicted response time is 0.3 ms. The overall response time of MR damper force on control signal can be expected longer because of response time of MR fluid (time needed for forming MR particles chains). The response time of MR fluid was measured between 0.45 – 0.6 ms (Goncalves et al., 2005). The overall response time of the MR damper with piston made of SMC material can be therefore expected shorter than 1 ms.

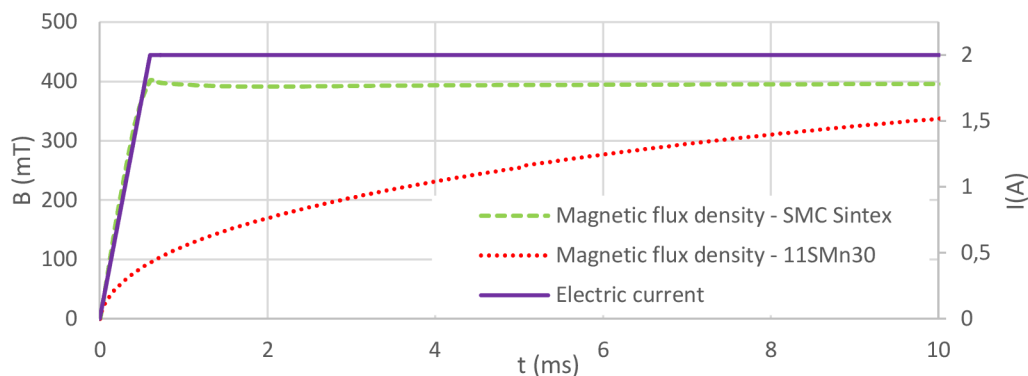


Fig. 7: Transient response of magnetic flux density in the gap with air on electric current – piston made of SMC Sintex

#### 4. Conclusions

Measurements and simulations clearly showed that the use of SMC material can significantly improve the performance of MR damper. The FEM model was verified by measurements of the magnetic flux density in the piston gap filled by air. The measurements proved very good agreement of simulations and measurements. Despite much smaller relative permeability of SMC Sintex material, the FEM simulation showed that magnetic flux density in the gap of piston made of SMC material filled with MR fluid is only 20% lower than in case of piston made of steel. The response time of the magnetic flux density in the piston made of steel is 8.1 ms. Such value corresponds to the force response time measured by Strecker (2015). The use of SMC Sintex material reduces the response time of magnetic flux density in the gap filled by MR fluid to 0.3 ms, which is more than 20 times shorter than in case of steel piston.

#### Acknowledgement

This experiment could be provided thanks to the kind sponsorship of various grants and numerous agencies. We would like to explicitly thank to the GAČR 17-10660J, GAČR 17-26162S, FSI-S-17-4428 and FCH/FSI-J-17-4534.

#### References

- Goncalves, F.D., Ahmadian, M. and Carlson, J.D. (2005) Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*, 15, 1, pp. 75–85.
- Maas, J. and Güth, D. (2011) Experimental investigation of the transient behavior of MR fluids. in: *ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2011*, pp. 229–238.
- Palousek, D., Pantelejev, L., Zikmund, T., et al. (2017) Processing of nearly pure iron using 400W selective laser melting - initial study. *MM Science Journal*: 1738–1743.
- Shokrollahi, H. and Janghorban, K. (2007) Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 1-3, pp. 1-12.
- Strecker, Z., Roupec, J., Mazurek, I., et al. (2015) Design of magnetorheological damper with short time response, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26, 14, pp. 1951–1958.
- Strecker, Z., Mazurek, I., Roupec, J., et al. (2015) Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency, *Meccanica*, 50, 8, pp. 1949–1959.

Soft magnetic composite píst magnetoreologického tlumiče s rychlou odezvou a velkým dynamickým rozsahem



**Apollo ID:** 135300  
**Datum:** 3.5.2017  
**Typ projektu:** G - funkční vzorek  
**Autoři:** Ing. Zbyněk Strecker, Bc. Tomáš Strmiska

**Technický popis:**

Tento píst je vyroben z soft magnetic composite (SMC) materiálu SINTEX, který díky malé elektrické vodivosti a vysoké hodnoty magnetické saturace umožňuje dosažení časové odezvy srovnatelné s feritovým pístem, ale s větším dynamickým rozsahem. Tento materiál má navíc lepší mechanické vlastnosti a je lehce obrobitelný třískovým obráběním.

## **Základní technické parametry**

Časová odezva MR tlumiče se SMC pístem menší než 1.6 ms

Dynamický rozsah větší než 8

## **Způsob realizace**

Píst je vyroben z polotovaru s průměrem 80, výška 40 mm pomocí elektroerozivního obrábění a následné obrobení na soustruhu. Píst se skládá ze dvou částí (cívka a vnější plášť) vyrobených ze SMC materiálu které jsou sevřeny bronzovými víčky.

## **Výsledky zkoušek, použití**

Výsledky jsou publikovány v diplomové práci Bc. Tomáše Strmisky

## **Vazba na projekt**

FSI-S-17-4428

## **Umístění**

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

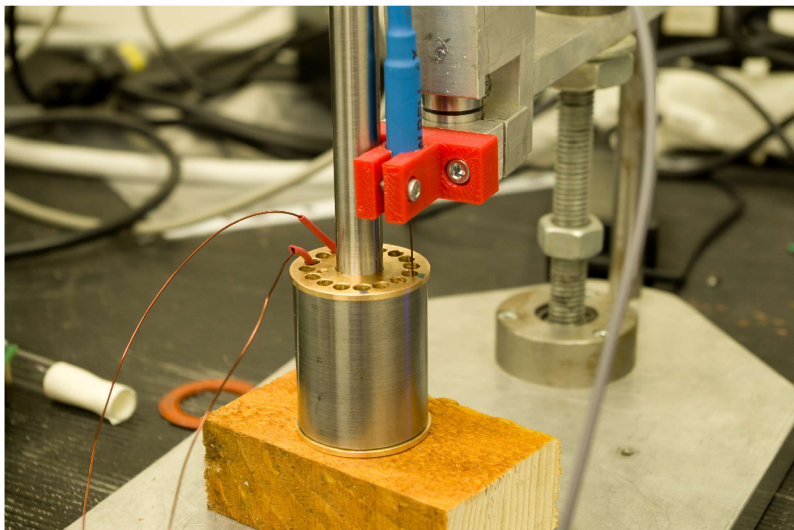
Technická 2896/2

místnost A2/412

## **Kontaktní osoba**

Zbyněk Strecker, strecker@fme.vutbr.cz, +420 54114 3216

## **Fotografická dokumentace**



Prohlašuji, že popsaný výsledek naplňuje definici uvedenou v Příloze č. 2 Metodiky hodnocení výsledků výzkumu, experimentálního vývoje a inovací pro rok 2017, a že jsem si vědom důsledků plynoucích z porušení § 14 zákona č. 130/2002 Sb. (ve znění platném od 1. července 2009). Prohlašuji rovněž, že na požádání předložím technickou dokumentaci výsledku.

---

Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.