



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MAGNETOREOLOGICKÝ TLUMIČ S KRÁTKOU ČASOVOU ODEZVOU PRO PODVOZEK KOLEJOVÉHO VOZIDLA

MAGNETORHEOLOGICAL SHOCK ABSORBER WITH SHORT RESPONSE TIME FOR TRAIN
BOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Karel Šebesta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubík, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Karel Šebesta**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Kubík, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Magnetoreologický tlumič s krátkou časovou odezvou pro podvozek kolejového vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Volba hladiny tlumení v tlumiči podvozku kolejového vozidla je vždy kompromisem mezi jízdní stabilitou ve vyšších rychlostech a opotřebením tratě. Současné konstrukce bohužel změnu hladiny tlumení během provozu neumožňují. Z tohoto pohledu se jeví výhodné použití magnetoreologického tlumiče, který umožňuje přepínat hladiny tlumení pomocí elektrického signálu v závislosti na řídicím algoritmu. Předpokládá se, že s vhodným řídicím algoritmem lze dosáhnout i výrazného zvýšení komfortu či zlepšení jízdních vlastností (snížení brzdné dráhy či zvýšení trakce).

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: Aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, R)

Projekt: MPO

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je konstrukční návrh magnetoreologického tlumiče s krátkou časovou odezvou pro podvozek kolejového vozidla.

Dílčí cíle diplomové práce:

- sestavení současného stavu poznání v oblasti adaptivních a semiaktivně řízených hydraulických tlumičů používaných v podvozcích kolejových vozidel,
- vytvoření potřebných simulačních modelů a jejich experimentální verifikace (magnetických, hydraulických či pevnostních),
- navrhnutí několika koncepčních variant uspořádání magnetoreologického ventilu s ohledem na krátkou časovou odezvu,
- konstrukční řešení, výroba a testy finální varianty magnetoreologického ventilu,
- návrh strukturovaného magnetického obvodu magnetoreologického ventilu s krátkou časovou odezvou vyrobitelného za pomoci metody 3D kovového tisku,
- konstrukční úpravy tlumiče s ohledem na efektivní sériovou výrobu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

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

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

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

GOLDASZ, Janusz a Bogdan SAPINSKI. Insight into magnetorheological shock absorbers. 2014, New York: Springer. ISBN 978-3-319-13232-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zbývá návrhem magnetoreologického tlumiče s krátkou časovou odezvou tlumící síly pro podvozek kolejového vozidla. Největší složkou, která zpomaluje odezvu, jsou vzniklé vířivé proudy v pístové skupině MR tlumiče. Rychlého náběhu tlumící síly je dosaženo použitím tvarového přístupu u návrhu magnetického obvodu. Tvarový přístup navyšuje vzdálenost, kterou vířivé proudy musí urazit, a tím dosahuje jejich snížení. Navýšení vzdálenosti je realizováno drážkováním jádra i pláště MR tlumiče. Navrhnutá rychlá verze MR tlumiče je měřena na hydraulickém pulsátoru a její výsledky prokazují dostatečnou časovou odezvu síly pro tlumení. Tato odezva nepřesahuje 8 ms pro primární náběh tlumící síly. Nová rychlá konstrukce MR tlumiče spojuje největší výhody technologie a umožňuje splnit nové požadavky na tlumící prvky do podvozku kolejových vozidel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologický tlumič, podvozek kolejového vozidla, rychlá odezva, vířivé proudy,

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design of a magnetorheological damper with a short response time of the damping force for the bogie of a rail vehicle. The largest component, which slows down the response, is the eddy currents generated in the piston group of the MR damper. A rapid onset of damping force is achieved by using a shape approach in magnetic circuit design. The shape approach increases the distance that the eddy currents must travel, and therefore it helps to reduce them. The shape approach is realized by grooving the core and the shell of the MR damper. The proposed fast version of the MR damper is measured on a hydraulic pulsator and its results show a sufficient time response of the damping force. This response does not exceed 8 ms for the primary onset of the damping force. The new fast design of the MR damper combines the greatest advantages of the technology and enables to meet new requirements for damping elements in the rolling stock chassis.

KEY WORD

Magnetorheological damper, train bogie, fast response, eddy current

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEBESTA, Karel. *Magnetoreologický tlumič s krátkou časovou odezvou pro podvozek kolejového vozidla*. Brno, 2020. 125 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124664>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Michal Kubík.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu, Ing. Michalu Kubíkovi, Ph.D., za jeho ochotu, pomoc a odborné rady při tvorbě diplomové práce. Rád bych také poděkoval rodině, která mě po celou dobu studia podporovala. V neposlední řadě bych rád poděkoval všem těm, které jsem během svého studia měl to štěstí potkat, a kteří mi byli oporou a inspirací v těžkých chvílích. Konkrétní poděkování patří Ing. Sabelovi a Ing. Bražinovi.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....
Podpis autora

OBSAH

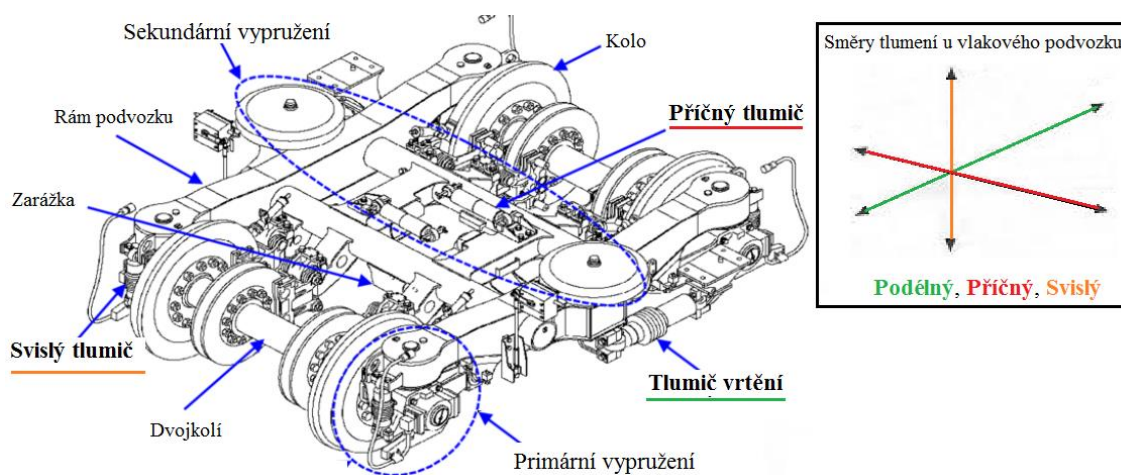
1	ÚVOD	9
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	9
2.1	Podvozky kolejových vozidel	10
2.2	Vypružení podvozku kolejových vozidel	11
2.2.1	Popis jednotlivých vypružení	12
2.2.2	Směry tlumení	12
2.2.3	Konstrukční provedení vybraných podvozků	13
2.2.4	Rozdělení systémů vypružení podle způsobu řízení	15
2.3	Vznik natáčení skříně vůči podvozku	17
2.4	Tlumiče vrtivých pohybů	21
2.4.1	Pasivní tlumiče vrtění	22
2.4.2	Semi-aktivní tlumiče vrtění	24
2.4.3	Systémy aktivního vypružení u kolejových vozidel	27
2.5	Magnetoreologický tlumič	30
2.5.1	Konstrukce MR tlumiče	31
2.5.2	Časová odezva magnetoreologického tlumiče	38
2.5.3	Dynamický rozsah Magnetoreologického tlumiče	43
2.6	Tvarový přístup k návrhu jádra pomoci technologie 3D tisku metodou SLM	44
2.6.1	Materiály vyráběné technologií SLM vhodné pro magnetické obvody	45
2.6.2	Přístup k návrhu geometrie tisknutých součástí	46
2.6.3	Využití 3D technologie u návrhu magnetického obvodů	46
3	ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	52
3.1	Analýza problému	52
3.2	Analýza a zhodnocení rešerše	52
3.3	Cíl práce	53
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	55
4.1	Postup řešení	55
4.2	Vstupní parametry pro návrh koncepčních variant	57
4.3	Přístupy při návrhu magnetického obvodu MR tlumiče	60
4.4	Nastavení magnetické simulace pro koncepční řešení	60
4.5	Koncepční řešení magnetického obvodu pístové skupiny	61

4.5.1	Varianta A – Jedna cívky	62
4.5.2	Varianta B – Dvě cívky	64
4.5.3	Varianta C – Změna materiálu jádra cívky	66
4.5.4	Výběr nejvhodnější koncepční varianty	67
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	67
5.1	3D magnetické přechodové simulace	68
5.1.1	Geometrie pro 3D simulace	68
5.1.2	Nastavení sítě a ověření výsledků vzhledem k 2D simulacím	69
5.1.3	Drážky jádra a pláště MR tlumiče	70
5.1.4	Závislost geometrie drážek na časové odezvě	71
5.1.5	Volba optimální geometrie drážek	74
5.2	Ochrana drážek a pláště MR tlumiče	74
5.3	Experimentální část	77
5.3.1	Quasi statické magnetické vlastnosti	77
5.3.2	Měření časové odezvy magnetického pole	80
5.3.3	Měření F - v charakteristik	86
5.3.4	Měření odezvy síly MR tlumiče	88
5.4	Návrh 3D tisknutého strukturovaného jádra	91
5.4.1	Strukturované jádro magnetického obvodu	92
5.5	Konstrukční úpravy magnetoreologického tlumiče	98
5.5.1	Úpravy vycházející ze změny na rychlou verzi MR tlumiče	98
5.5.2	Úpravy k zjednodušení konstrukce pro sériovou výrobu	103
6	DISKUZE	107
7	ZÁVĚR	110
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	113
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	118
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	120
11	SEZNAM TABULEK	127
12	SEZNAM PŘÍLOH	128

1 ÚVOD

Efektivnost vypružení podvozku kolejového vozidla je především dána tuhostí použitých pružin a velikostí hladiny tlumení v tlumičích, ať už v primární a sekundární části, nebo u tlumičů vrtivých pohybů. Použití a uspořádání tlumičů závisí na daném typu pojezdu kolejového vozidla. V případě podvozkového typu také záleží na jeho konstrukci – např. kolébková nebo bezkolébková. Na obr. 1-1 schéma podvozku se směry tlumení [1].

U tlumičů vrtění je jejich tlumící síla vždy kompromisem mezi stabilitou–bezpečností při vyšších rychlostech a opotřebením tratě, které vzniká především při průjezdu S obloukem, popřípadě výhybkami. V dnešní době je na kolejovou dopravu kladen požadavek v podobě navyšování rychlosti a snižování provozních nákladů. Tyto požadavky vedou k návrhu nových přístupů pro řešení vypružení kolejových vozidel.



Obr. 1 - 1 Schéma bezkolébkového podvozku vysokorychlostního kolejového vozidla, upraveno. [1]

Ideální tlumič vrtění pro kolejová vozidla by pro dvě výše zmíněné situace vyžadoval proměnlivou tlumící charakteristiku. Pro vysoké rychlosti vlaků je třeba vysoké tlumící hladiny, a naopak pro rychlosti nízké. Většina současných tlumičů podvozků vlaků je pasivních, a proto je jejich tlumící síla závislá pouze na rychlosti stlačování/roztahování pístu. V posledních letech jsou pro podvozky kolejových vozidel ojediněle používány adaptivní elektromagnetické (solenoidové) hydraulické tlumiče. Ve srovnání s tlumiči magnetoreologickými jsou solenoidové tlumiče podstatně složitější a pomalejší (časové zpoždění tlumení se pohybuje v desítkách milisekund) [2]. Z tohoto pohledu se jeví výhodné použití magnetoreologického (MR) tlumiče, který umožňuje rychleji měnit tlumící sílu, a to za pomoci el. proudu. Obecně platí, že čím nižší je rychlost změny tlumící síly, tím je nižší přenos vibrací do konstrukce vlaku, čímž lze dosáhnout lepších jízdní vlastností [3].

Při použití MR tlumiče v podvozku kolejového vozidla jako tlumiče vrtění lze využít velmi rychlou změnu hladiny tlumení během jízdy tak, aby ideálně splňovala dříve zmíněné podmínky. Použití MR tlumiče povede ke snížení opotřebení v kontaktu kola-kolejnice, možnosti navýšení provozních rychlostí a zlepšení komfort cestujících.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

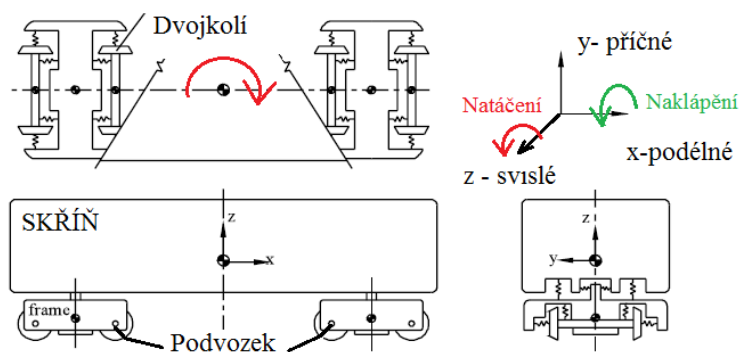
Tlumič je strojní zařízení, které slouží k tlumení nežádoucích kmitů. Princip jeho funkce spočívá v transformaci kinetické energie vlivem tření na teplo. Tlumič představuje důležitý člen podvozku kolejového vozidla, kde v kombinaci s pružinou snižuje přenos vibrací do skříně–pojezdu železničního vozidla, čímž přispívá k větší bezpečnosti jízdy a komfortu cestujících. V podvozcích vlaků existuje několik typů tlumičů, jejichž konstrukce je závislá na směru, ve kterém tlumí, a typu provedení podvozku.

V případě tlumiče s magneteorologickou kapalinou, tzv. MR tlumiče, je k absorpci vibrací použita disipace energie způsobená třením zřetězených feromagnetických částic (obr. 2-28). Jedná se nejčastěji o částice železa v nosném oleji, které jsou vlivem magnetického pole zřetězeny do řad, a tím zvětšují svůj odpor vůči relativnímu pohybu. Odpor částic tedy vytváří tlumící sílu, kterou lze regulovat vhodnou změnou magnetického pole.

V případě tlumičů vrtění jde o tlumení natočení skříně vlaku vůči jeho podvozku. Nejproblematictější natáčení skříně vůči podvozku vzniká vlivem vrtivého pohybu na rovných úsecích. Při vyšších rychlostech se frekvence příčného pohybu podvozku zvětšuje, při překročení kritické rychlosti může dokonce dojít k vymezení volného kanálu a poté k vykolejení kolejového vozidla. Kromě parametru vlaků závisí vrtivý pohyb také na kvalitě tratě. U nových vysokorychlostních tratí dochází k významnějšímu vlivu vrtění než na starších úsecích, tento nežádoucí pohyb je třeba eliminovat použitím tlumičů vrtění. Další natáčení skříně vůči podvozku vzniká při průjezdu obloukem, toto natočení je žádoucí a je ovlivněno poloměrem oblouku, parametry kolejového vozidla (hmotnost, typ podvozku, konstrukce vypružení) a rychlostí vozidla v ní projíždějícího.

2.1 Podvozky kolejových vozidel

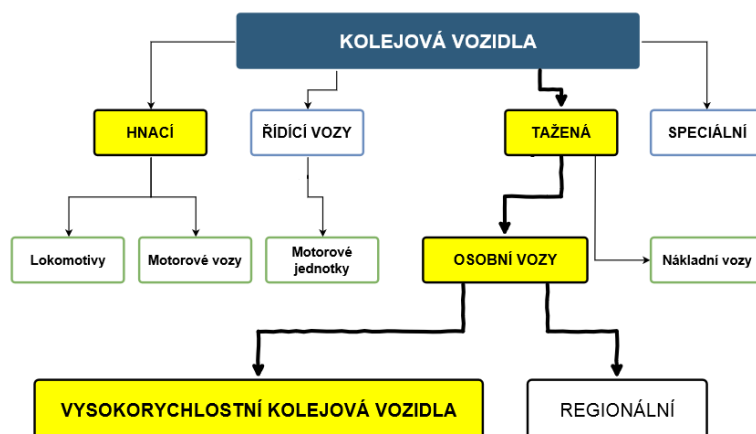
Obecně se každé kolejové vozidlo skládá z pojezdu a skříně, viz obr. 2-1 [4]. V případě hnacího vozidla obsahuje také hnacího ústrojí. Součástí pojezdu je dvojkolí se speciálním jízdním obrysem (kónického tvaru). Dvojkolí slouží k převádění valivého pohybu na pohyb posuvný, zajišťuje vedení kol po kolejnicích a přenáší síly mezi kolejí a skříní vozidla. Je uloženo buď přímo v rámu (rámové pojezdy: pro jednodušší konstrukce, starší typy vlaků, dopravní vlaky) nebo nejčastěji v podvozku (Podvozkové pojezdy) [5]. Podvozek je dvou i více nápravový vozík, vložený otočně mezi kolej a spodní část vozu, má jistou pohyblivost vzhledem ke spodku vozidlové skříně, lze na něm realizovat sekundární vypružení a jeho součástí jsou i tlumiče vrtění [6].



Obr. 2 - 1 Konfigurace kolejového vozidla a směry tlumení, upraveno [4]

Rozdělení podvozků kolejových vozidel

Kolejová vozidla, i jejich použité podvozky, se rozdělují podle různých hledisek (např. dle účelu obr. 2-2) [5]. Jednotlivé typy tvoří originální konstrukce s mnoha specifikacemi, které poté ovlivňují použití daných typů tlumičů. Například kolébková nebo bezkolébková konstrukce podvozku ovlivňuje vhodnost použití flexi-coil pružin, kluznic (u kolébkové konstrukce místo tlumiče vrtění) nebo pneumatických pružin. Při průjezdu zatáčkou se pneumatické pružiny používají jako prvek aktivního naklápění skříně (obr. 2-1, zelená šipka) pro snížení přenosu dostředivého zrychlení na cestující (Pendolino). Tlumiče vrtění se nepoužívají u nákladních ani u starších osobních kolejových vozidel.



Obr. 2 - 2 Členění kolejových vozidel [5]

2.1.1 Vypružení podvozku kolejových vozidel

Pojezdy železničních vozů mohou mít vypružení buď jednoduché, nebo dvojité. Jednoduché vypružení má velmi omezené možnosti využití, a proto je používáno u nákladních vozů, popřípadě u jednonápravových konstrukcí. Dvojitě vypružení, které lze realizovat pouze u podvozkového uspořádání pojezdu, umožňuje realizovat plnohodnotné utlumení ve všech směrech, tj. podélném, příčném i svislém směru tlumení. Proto se pro přepravu osob musejí konstrukce s dvojitým vypružením pojezdu používat (viz obr. 1-1) [7].

Úkolem vypružení kolejového vozidla je [9]:

- zajistit svislé a příčné vypružení mezi rámem podvozku a dvojkolím,
- rovnoměrně rozložení váhy vozidla na jednotlivá kola,
- snižování dynamických účinků v styku kola-kolejnicí (eliminaci nerovností koleje),
- snížit rázy mezi vozidly vlaku při posunu i při jízdě vlaku,
- zajistit dostatečný komfort pro cestující a ochranu převáženého nákladu,
- udržení stejné výšky podlahy (plně naložené – prázdné).

2.1.2 Popis jednotlivých vypružení

Primární vypružení

Největší požadavky jsou kladeny na svislé vypružení, které bývá často konstruováno tak, aby zajistilo rovněž příčné nebo podélné vypružení (tzv. flexi-coil uložení pružin v patkách). Primární vypružení má za cíl odlehčit mech. vlastnímu podvozku od vibrací způsobených nerovnostmi trati, např. vypružení pomocí úhlovou patkou, ojníčkovým vedením. [7]

Sekundární vypružení

Sekundární vypružení je systém tlumení uložený mezi rámem podvozku a skříní kolejového vozidla. Slouží zejména k navýšení komfortu cestujících a to tím, že tlumí vibrace mezi podvozkem a skříní kolejového vozidla, součástí tohoto vypružení jsou tlumiče vrtění [6].

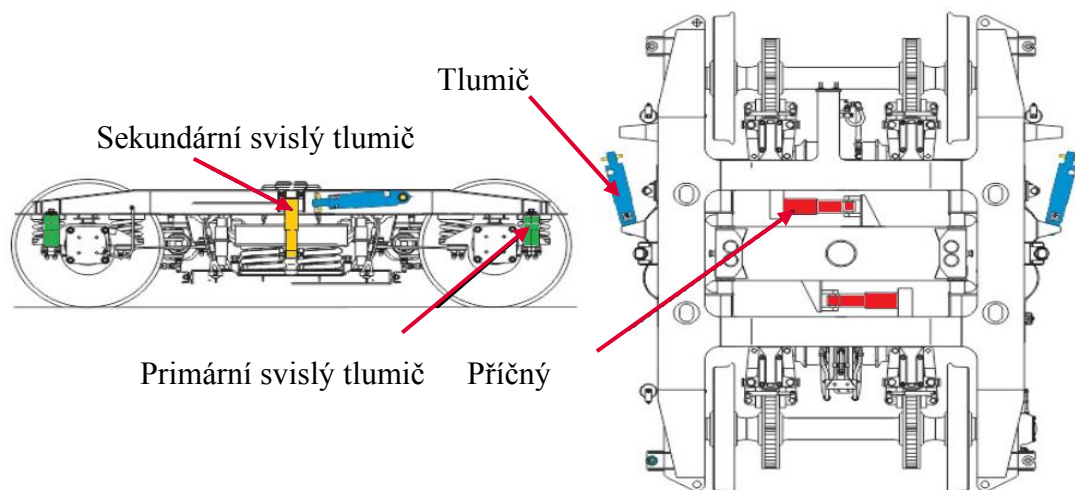
2.1.3 Směry tlumení

Podvozky osobních kolejových vozidel umožňují konstrukci dvojitého vypružení (primární, sekundární). V těchto konstrukčních celcích se nacházejí tlumiče sloužící k disipaci energie v daných směrech. Dle obr. 1-1 lze tyto směry definované jako svislý, podélný a příčný směr tlumení. Tlumiče také slouží ke snížení natáčení a naklápění skříně vozidla, obr. 2-3 [9].

Svislé tlumiče tlumí síly vzniklé převážně z pohybu vozidla v koleji, a to vlivem nerovností, nepřesností v kontaktu kola – kolejnice a celkové konstrukce. **Podélné** tlumiče tlumí síly vzniklé při brzdění, zrychlování a průjezdem zatáčkou. **Příčné** tlumiče tlumí především síly vzniklé při průjezdu obloukem [10].

Natáčení vozidla a tlumiče vrtění, které ho eliminují, jsou popsány v kapitole 2.3, co se týče **naklápění** vozidla, k němu dochází především při průjezdu vlaku obloukem, a to z důvodu rozdílné výšky vnitřní a vnější koleje, tzv. převýšení. To je vytvořeno z důvodu snížení dostředivého zrychlení na cestující a tím zlepšení komfortu [10]. Naklápění je u osobních vozidel řešeno například vzduchovými aktuátory (Pendolino).

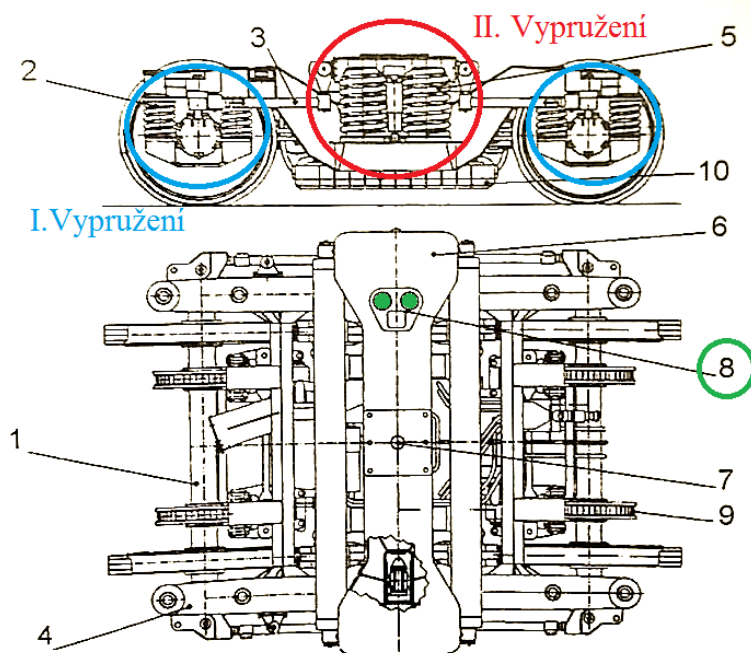
Diplomová práce se zabývá konstrukcí MR tlumiče, jakožto tlumiče vrtivého pohybu (natáčení skříně vůči podvozku) tudíž je mu v dalších částech věnována hlavní pozornost.



Obr. 2 - 3 Podvozek kolejového vozidla, upraveno [9]

2.1.4 Konstrukční provedení vybraných podvozků

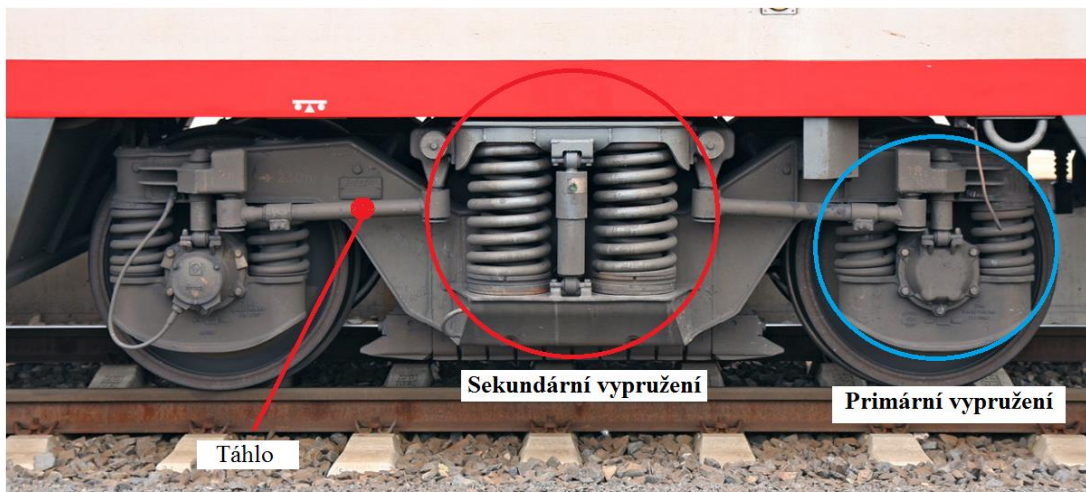
Podvozek SGP 300 pro vysokorychlostní vlaky umožňuje bezpečnou jízdu i při 300 km/h (reálná provozní rychlost je mnohem nižší). Na obr. 2-4 [6] je zobrazeno dvojkolí (1), kde primární vypružení reprezentují dvě šroubové pružiny a s nimi paralelně uložené hydraulické tlumiče (2 - modré kroužky). Vedení dvojkolí je zprostředkováno pomocí vodících čepů (4) zalisovaných do podélníku rámu. Rám podvozku má dva podélníky (6), hlavní příčník a dva pomocné příčníky pro konzoly brzdových jednotek, je do tvaru tzv. H. Sekundární vypružení je tvořeno flexi-coil pružinou (5 - červený kroužek, při natáčení skříně se pružiny deformují a vytváří vratný moment) s paralelním hydraulickým tlumičem.



Obr. 2 - 4 Podvozek SGP 300 pro vysokorychlostní železniční vozidla [6]

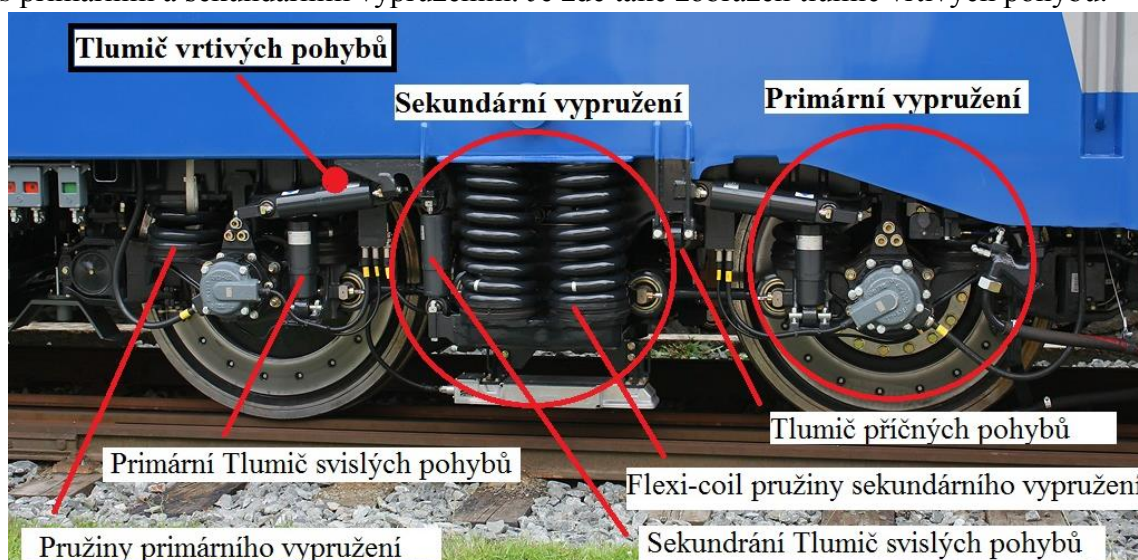
Podvozek SGP 300 má **kolébkovou konstrukci**, jež je přes čep (7) spojena se skříní, která zároveň leží na kluznicích (8), **tato konstrukce tlumí vrtění podvozku pomocí tření spodních ploch skříně s kluznicemi** (nemá tlumič vrtění). Podélné síly jsou přenášeny pomocí táhla (3). Pozice 9-10 jsou brzdné systémy kotoučové a kolejnicové brzdy [6].

Reálný podvozek SGP 300 je zobrazen na obr. 2-5. Při provozní rychlosti 200 km/hod tento podvozek nepoužívá pro tlumení vrtivých pohybů tlumič ale kluznice (pozice 8. obr. 2-4) a také podélná táhla (obr. 2-5). Přestože primární funkce podélných táhel tkví v přenosu podélných sil mezi kolébkou a rámem, slouží také k tlumení vrtivých pohybů rámu podvozku vůči kolébce (na kolébce je pomocí čepu umístěna skříň) [10].



Obr. 2 - 5 Podvozek SGP 300; upraveno [10]

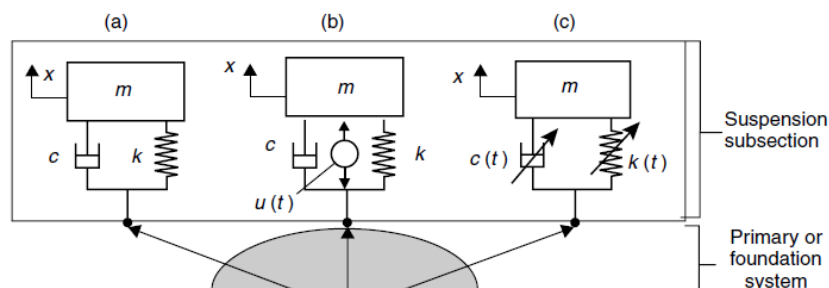
Podstatně modernější konstrukce podvozku kolejového vozidla je zobrazena na obr.2-6. Jedná se o podvozek pro lokomotivu ŠKODA 109 E [11]. Zde je vidět nejčastější konstrukční uspořádání podvozku osobního kolejového vozidla. Jedná se tedy o podvozek s primárním a sekundárním vypružením. Je zde také zobrazen tlumič vrtivých pohybů.



Obr. 2 - 6 Podvozek Lokomotivy 109 E s označeným vypružením podvozku [11]

2.1.5 Rozdělení systémů vypružení podle způsobu řízení

Obecně lze systémy vypružení dělit do tří základních skupin, a to podle toho jaké množství energie potřebují k tlumení. Nejběžnější rozdělení vypružení (tlumicích systémů) dle tohoto kritéria je na pasivní, aktivní a semi-aktivní (S/A), schématicky znázorněné na obr. 2-7 [12].



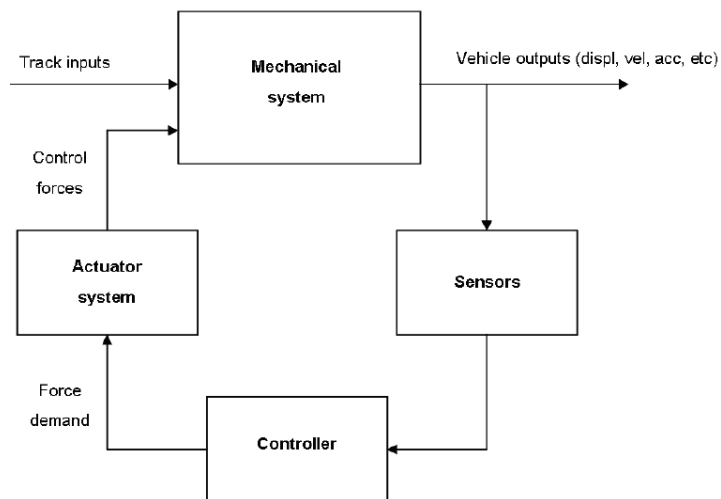
Obr. 2 - 7 Rozdělení tlumicích systému a) pasivní b) aktivní c) semi-aktivní [12]

Všechny tlumicí systémy se skládají z pružiny definované svojí tuhostí c (N/m), tlumiče s hodnotou útlumu b (Ns/m) a pohybující se hmotností m (kg). V případě aktivního či S/A systému vypružení, jsou součástí také snímače a zdroj energie. Aktivní systémy navíc obsahují také aktuátor, který má velkou spotřebu elektrické energie (kW). Využívají se hydraulické, pneumatické nebo elektor-mechanické aktuátory (často se jedná o kombinaci).

Pasivní systémy jsou nejjednodušší a nejpoužívanější. Jedná se o kombinaci vinuté pružiny a hydraulického tlumiče. Tento systém nepotřebuje pro svoji funkci zdroj energie ani řídicí systém. Hladina tlumení je dána pouze rychlostí pohybu pístnice tlumiče.

Při montáži tlumiče je možnost nastavení tlumicí hladiny uspořádáním planžet škrťacího ventilu nebo škrčení průtoku hydraulické kapaliny, pomocí stavicích šroubů (pokud tyto konstrukční prvky tlumič obsahuje). Pokud je změna časově náročná a nelze ji provést v průběhu provozu, jedná se stále o **pasivní** prvky systému vypružení. Pokud změnu lze při provozu realizovat, tlumič tedy obsahuje také mechanismus ovládní, jedná se o prvek **adaptivní**. Dle časové odezvy, potřebné energie pro tuto změnu a řídicího systému (mechanismu), lze dále tyto prvky rozdělit na **aktivní**, popřípadě **semi/aktivní (S/A)**.

Aktivní systémy se vždy řídí dle měřeného signálu (rychlost, zrychlení pozorované části), který určuje tlumicí parametry systému. Jinak řečeno na základě rychlosti pozorované součásti se buď zvětšuje nebo zmenšuje silové působení. Aktuátor tedy do systému dodává energii, aby silově působil proti nežádoucímu pohybu. Systém je podstatně složitější a z toho vyplývají další nedostatky (cena, údržba). Schéma toho, jak může řídicí systém vypadat, je na obr. 2-8. Jeho využití je nejčastější v sekundární části, kde je použita pneumatická pružina, jež upravuje svoji tuhost v závislosti na parametrech trati [12].



Obr. 2 - 8 Koncept aktivního systému vypružení [12]

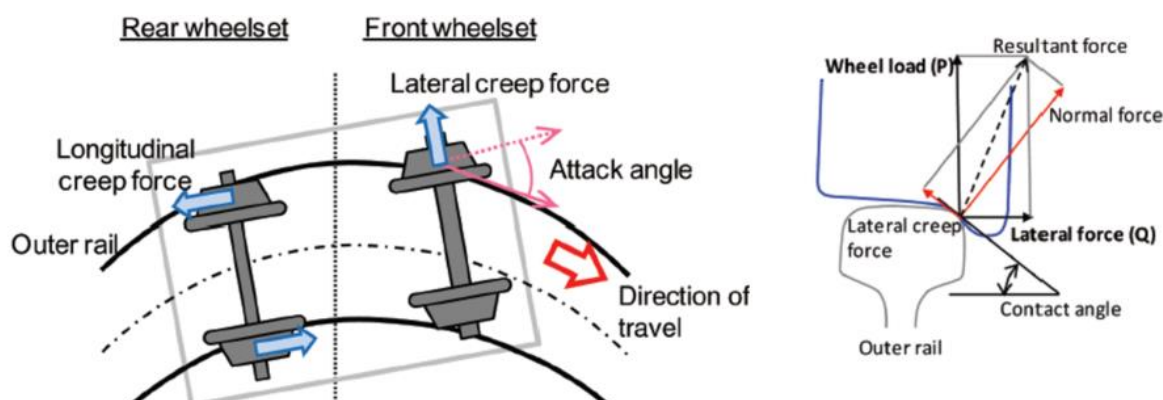
Podle Goodall [13] a Mei [14] existuje pět oblastí systému aktivního vypružení pro kolejové podvozky. Jedna z těchto kategorií zmiňuje tzv. **Secondary Yaw Control (SYC)**, kde je aplikována síla (kroučící moment) na podvozek pomocí aktuátoru mezi skříní a rámem. Tento systém prokazatelně vede ke zlepšení jízdy při průjezdu zatáčkou i stability při vyšších rychlostech [12]. Tuto problematiku dále zkoumají Braghin [15], kteří tyto výhody systému potvrzují. Také Hughes [16] zkoumal využití elektro-magnetických aktuátorů při tlumení podvozku, tato technologie byla poté využita na dalších modelech s potvrzeným zlepšením jízdních vlastností.

V posledních letech bylo provedeno mnoho výzkumů v oblasti použití aktivních systému pro kolejová vozidla. Tyto systémy byly často porovnávány ze semi-aktivními, což ukázalo, že mají lepší výsledky v daných oblastech použití, např. Ballo [17], Norinao [18]. Avšak když přijde na implementaci těchto aktivních systému do reálného provozu, ukazují se jako příliš složité a pro svoji funkci cenově nerentabilní, navíc je lze často nahradit právě semi-aktivními systémy. Problematické je také v řešení fail-safe stavu, tedy kdy dojde k přerušení energie do systému.

Semi-aktivní systémy vypružení jsou podobné aktivním systémům, ovšem neobsahují aktuátor a z pravidla jsou jednodušší. Také ovšem obsahují snímače a řídicí algoritmus, který často bývá řízen na základě proměnné, která není závislá na dynamickém systému, jenž je kontrolován, jak uvádí Goodall [19]. Standardním řešením je pouze dvou stavový provoz on/off. V případě MR tlumičů, jež se řadí do systému S/A, lze velikost *on* stavu nastavit dle vstupního proudu, který ovlivní výslednou tlumicí sílu. Změna stavu se používá tehdy, kdy je vyžádána změna charakteristiky – průjezd obloukem, výhybkou, překročení kritické rychlosti.

2.2 Vznik natáčení skříně vůči podvozku

Dvojice železničních kol upevněných na nápravě tvoří značně tuhý celek zvaný železniční dvojkolí. Při průjezdu vozidla obloukem je nutné, aby vnější kolo urazilo delší dráhu než kolo vnitřní, které se pohybuje na menším poloměru. Řešením je tvar jízdního obrysu kol dvojkolí, konkrétně kuželovitost jízdní plochy, viz obr. 2-9 (b) [20]. Při průjezdu vozidla obloukem se dvojkolí vlivem působení odstředivé síly posune směrem k vnější kolejnici a tím dojde k relativnímu vyrovnání uražené dráhy mezi vnějším a vnitřním kolem [9].

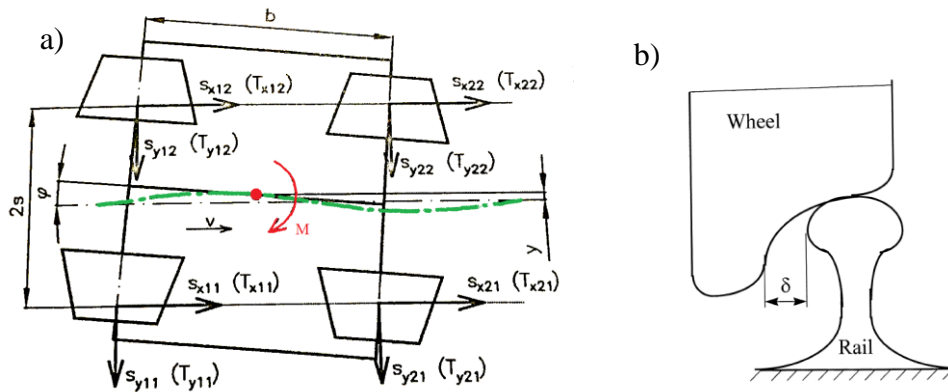


Obr. 2 - 9 Chování podvozku při průjezdu obloukem – detail kontaktu kola/kolejnice [20]

Geometrie jízdního profilu má i své nedostatky. Při jízdě v přímé koleji vykonává při valení volné dvojkolí s křivkovým jízdním obrysem vlnivý pohyb, obr. 2-10 [8], jehož parametry jsou závislé na charakteristikách kontaktní geometrie dvojkolí – kolej. Pokud je dvojkolí součástí pojezdu kolejového vozidla, je jeho výsledný pohyb v koleji ovlivňován ještě tuhostí vazby k rámu podvozku [10]. Nežádoucí „**vertivý**“ pohyb vázaného dvojkolí se přenáší na podvozek i skřín vozidla a je tedy ovlivňován celou řadou faktorů: tvaru jízdních obrysů kol, hlav kolejnic, velikostí volného kanálu a zejména rychlostí jízdy [8].

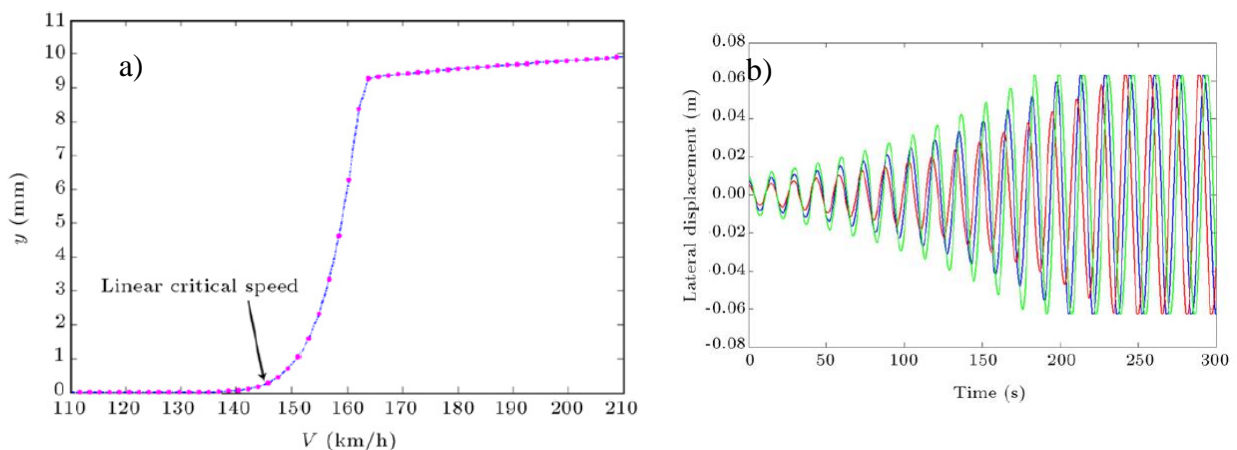
Nežádoucí pohyb podvozku je znázorněn na obr. 2–10 (a) [8], zelený sinus je představuje pohyb těžiště. Vrtění (vlnivý pohyb), je nežádoucí nelineární vibrace, která mimo jiné způsobuje natáčení skříně vůči podvozku. V roce 1972 zveřejnil Cooperrider [21] článek popisující vrtění (*Hunting Oscillation*), jako nežádoucí trvale boční oscilace, které vznikají vlivem konického jízdního profilu kola a při překročení kritické rychlosti mohou způsobit vykolejení vozidla. Tato kritická rychlost se dá navýšit vhodným nelineárním jízdním profilem (v závěru uvádí jako teoretickou možnost, dnes již obvyklá praxe). Problematiku popisuje pro značně zjednodušenou situaci. Dochází k závěru, že vznik vrtění závisí také na kontaktu kola-kolejnice (tvar jízdního profilu, velikost volného kanálu) a jejich přilnavosti. Při nízké adhezi například v deštivém počasí k *Huntingu* nedochází, jak už v roce 1965 uvádí Matsudaira [22].

Při zmenšování vůle mezi okolkem a kolem, neboli zmenšování volného kanálu (viz obr. 2-10 (b), kóta δ) dochází k snižování vrtění, což ukazují výsledky Daviese [23]. Vliv použití tlumiče vrtění zkoumal například Ahmadian [24]. Tlumič vrtění se používá především u osobních kolejových vozidel. Autor také uvádí, že navýšení tlumící síly natáčení může zvýšit kritickou rychlost. Pokud se však přesáhne určitá hranice tohoto tlumení (příliš velká tlumící síla) dochází naopak: k značnému zhoršení jízdních vlastností vozidla při průjezdu obloukem, ke snížení kritické rychlosti. Tím pádem k dřívějšímu vzniku kritického vrtění a větší pravděpodobnosti vykolejení kolejového vozidla [24].



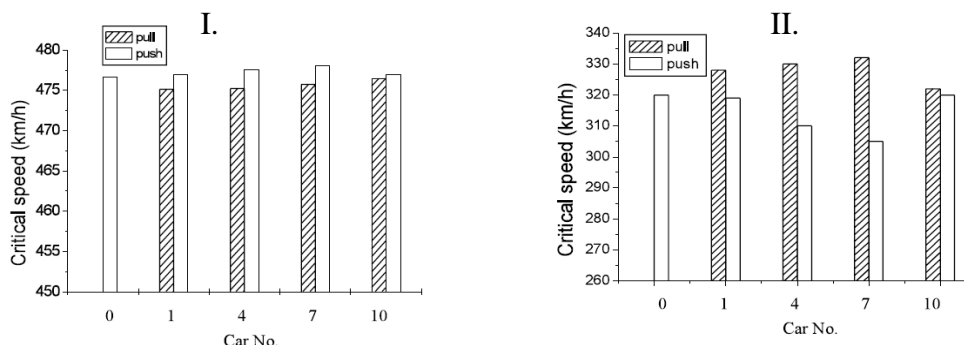
Obr. 2 - 10 a) Pohyb podvozku v přímé koleji, upraveno [8]; b) Detail kontaktu kola-kolejnice [23]

K podobným závěrům dochází i Sedighi [25], na obrázku 2-11 (a) lze vidět kritickou rychlost v závislosti na pohybu dvojkolí v příčném směru, při překročení kritické rychlosti dochází k značnému nárstu pohybu podvozku v příčném směru. Na grafu 2-11 (b) je zobrazen příčný posuv v čase při přechodu přes kritickou rychlost. Dochází k zvětšování amplitudy, než se vymezí vůle zobrazena na obr. 2-10 (b) $\delta = \pm 0,06 \text{ m}$ a dojde k nárazu okolku do boku kolejnice. To vede k značnému nárstu třecích sil a možnému vykolejení vlaku (data jsou pouze z numerického modelu).



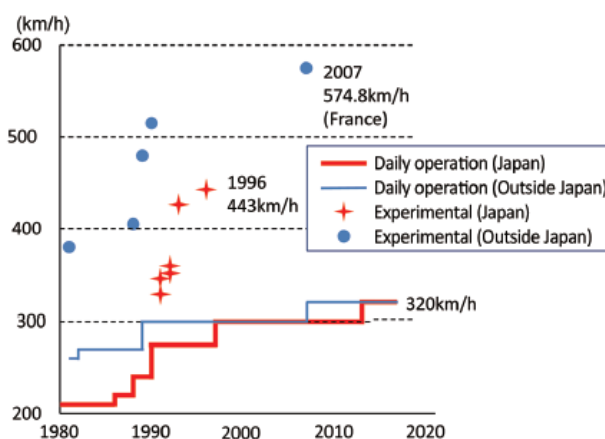
Obr. 2 - 11 a) Maximální pohyb v příčném směru v závislosti na rychlosti vlaku, b) Příčný posuv v čase při přechodu přes kritickou rychlost [25]

Kritická rychlost a s tím související stabilní jízda kolejového vozidla je ovlivněna umístěním vozidla ve vlakové soupravě, což popisuje Zenga [4]. Závislost kritické rychlosti na pořadí v soupravě při tažené nebo tlačené variantě v přímé trati (obr. 2-12 I.) a při průjezdu obloukem (obr. 2-12 II.) Lze tedy tvrdit že pro ideální stav by každá souprava potřebovala tlumiče s odlišným nastavením tlumicí síly, které by se měnily v průběhu pohybu



Obr. 2 - 12 Závislost kritické rychlosti na řazení vozu pro tažná, tlačená vozidla; I. přímá trať; II. oblouk [4]

Na obr. 2-13 jsou zobrazeny maximální rychlosti vlaku (experimentální i denní provoz). Umožnění navyšování provozních rychlostí vychází ze zlepšování jízdního profilu se složitějším tvarem (křivkový profil), zkvalitňování samotné tratě a zmenšení velikosti volného kanálu (amplitudy vrtění), jak uvádí Koizumi [26]. Dále prezentuje, že problematická oblast je v nastavení ideální tlumicí síly pro stabilitu při vysokých rychlostech a zároveň při jízdě v oblouku. To platí především pro nové tratě a vysokorychlostní vlaky. Řešením mohou být systémy s proměnlivou tlumicí charakteristikou.

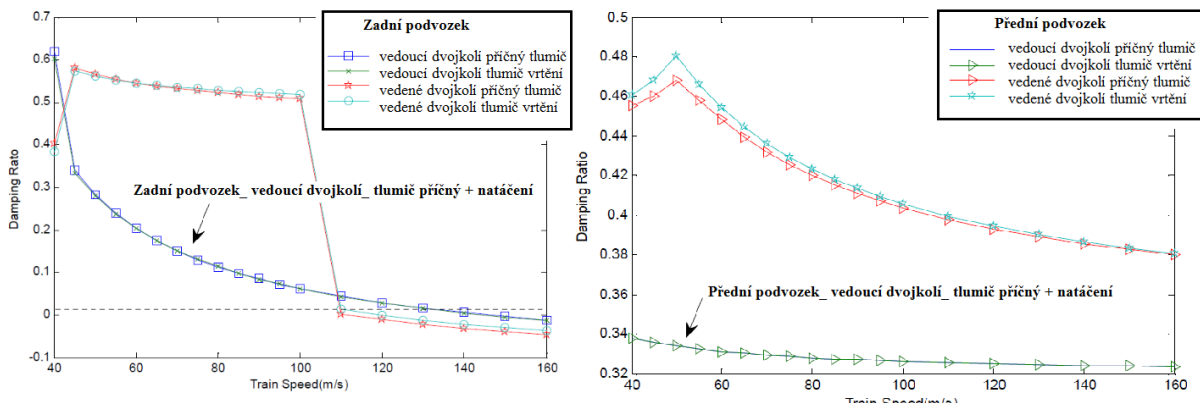


Obr. 2 - 13 Historické zobrazení maximální rychlosti kolejových vozidel (osobní, vysokorychlostní) [26]

Závislost tlumení a tuhosti prvků vypružení kolejového vozidla na kritické rychlosti
 Z výše uvedeného je jasné, že kritická rychlost je značně problematická hodnota, která závisí na mnoha proměnných. Pokud se určuje kritická rychlost soupravy kolejových vozidel tedy vlaku, bere se v potaz vždy **nejnižší kritická rychlost jednotlivých součástí**, které mají vliv na vznik nestabilního vrtění. Tedy na laterální pohyb, který vede k značnému nárůstu třecí síly v kontaktu kola-kolejnice a může vést k vykolejení železničního vozidla.

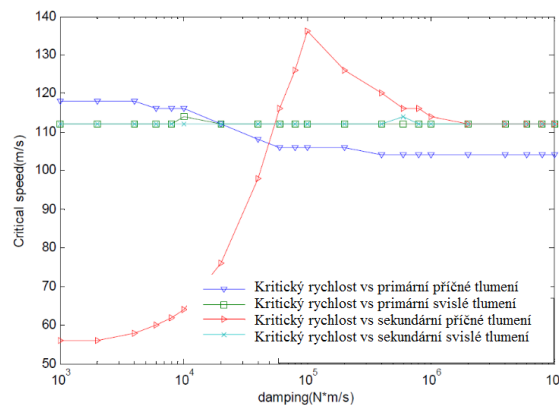
Tato problematika určení kritické rychlosti pro kolejovou soupravu je rozebírána například Sunem [27], který se zabývá zvýšením kritické rychlosti pro vysokorychlostní vozidla použitím MR technologie. V práci nejdříve popisuje matematický model, řeší tedy dynamiku vysokorychlostního vlaku a to s 17 stupni volnosti.

Obr. 2-14 určují závislost rychlosti vlaku na tlumícím poměru jednotlivých tlumičů. Když tento tlumící poměr překročí nulovou čáru dochází k překročení kritické rychlosti pro daný prvek a vlak se stává nestabilním. Graf porovnává přední a zadní podvozek, na každém podvozku také zobrazuje uvedeny vztah pro vedoucí a vedené dvojkolí, konkrétně pro jeho tlumič vrtění a tlumič příčného pohybu. Jde vidět, že pro zadní i přední dvojkolí, ať už pro přední nebo zadní podvozek, nám dává jiné kritické rychlosti při daném tlumícím poměru. Jakmile dosáhne jedna část vlaku kritické rychlost, dosáhne kritické rychlosti celý vlak. Dle obr. 2-14 obecně platí, že nejdříve je potřeba zvětšovat tlumící sílu pro tu součást, jejíž křivka je v dané rychlosti nejnižší. Vzhledem ke kritické rychlosti je nerizikovější zadní podvozek (simulace jedné vlakové soupravy) a jeho příčný tlumič umístěný na vedoucím dvojkolí.



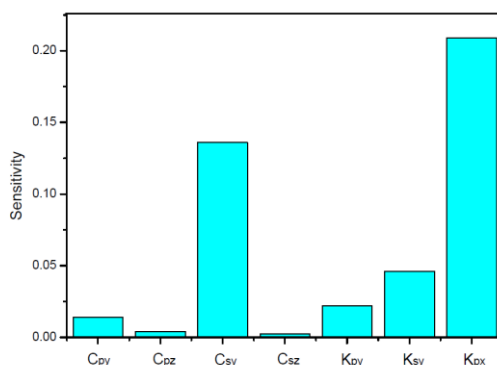
Obr. 2 - 14 Závislost kritické rychlosti na tlumícím poměru pro jednotlivé součásti podvozku vlaku [27]

Na obr. 2-15 lze vidět změnu tlumící síly v závislosti na kritické rychlosti jednotlivých částí. Zobrazeno pro jednotlivé směry tlumení v rozdílných částech vypružení [27]. Lze vidět, že navyšování tlumící síly je neefektivní pro navýšení kritické rychlosti ve všech směrech tlumení až na sekundární příčné tlumení.



Obr. 2 - 15 Ovlivnění kritické rychlosti při navýšení tlumení v dané části [27]

Sekundární příčné tlumení a primární podélná tuhost je nejcitlivější vzhledem ke kritické rychlosti (C_{sy} a K_{px}), jak je ukázáno na obr. 2-16. Pro navýšování kritické rychlosti se tedy nejvíce hodí zvýšení buď tlumicí síly v sekundárním příčném tlumení, nebo snížení podélné primární tuhosti. Práce se také zabývá přímou aplikací MR tlumiče na podvozek vysokorychlostního vlaku a jeho následné testování na statickém testeru. Výsledky jsou uvedeny v kapitole MR tlumiče pro kolejová vozidla kapitola 2.5[27].



Obr. 2 - 16 Citlivostní analýza tuhosti pružin a tlumení tlumičů [27]

Tento výsledek částečně zdůvodňuje, proč jsou veškeré výzkumné práce v oblasti použití MR tlumičů zaměřeny na zkoumání aplikace semi-aktivního tlumení na příčný (laterální) směr v sekundární části vypružení. Tam má dle analyzovaných článků navýšení tlumicí síly největší smysl – v případě, že hlavním cílem je navýšení kritické (provozní) rychlosti.

Frekvence vrtění kolejových vozidel

Pro navrhnutí semi-aktivního MR tlumiče je nejpodstatnější správně určit frekvenci pohybu tlumených kmitů. Z této frekvence pohybu totiž vychází i požadovaná časová odezva tlumicí síly MR tlumiče. Ta by měla být minimálně desetkrát rychlejší, než je maximální frekvence tlumeného pohybu.

Dle Tanifuji [28] je frekvence pohybu skříně vůči podvozku v rozsahu od 1 do 5 Hz. Další autor uvádí například rozsah 4-8 Hz [29]. Braghin pracuje s frekvencí aktivního vypružení 8 Hz [15]. Další analyzovaný článek, předpokládá, že vrtění má vždy nižší frekvenci než 6 Hz a amplituda tlumičů vrtění se při jeho parametrech pohybuje pod 1 mm [30].

Pracovní frekvence je silně závislá na typu vozidla, především na jeho hmotnosti-momentu setrvačnosti, konstrukci vypružení. Dále pracovní frekvenci ovlivňuje rychlost vozidla a podmínky tratě (počet zatáček, poloměr oblouku, stoupání, nerovnosti).

Při návrhu je vhodné brát v úvahu maximální frekvenci, jež zdroje uvádí, byť je tato frekvence pravděpodobně příliš vysoká. Obecně MR tlumiče mají vynikající hodnoty časové odezvy, s využitím správného přístupu k návrhu magnetického obvodu není problém dosáhnout odezvy v jednotkách ms.

2.3 Tlumiče vrtivých pohybů

Jak už bylo zmíněno, tlumiče vrtění se tedy nachází v části sekundárního vypružení a slouží k eliminaci natáčení skříně vůči podvozku. V naprosté většině konstrukcí podvozků kolejových vozidel jsou jako tlumiče vrtění používány hydraulické teleskopické tlumiče. Jejich tlumící sílu nelze v průběhu provozu (pohybu) měnit a je dána svojí stálou F - v (závislost tlumící síly na rychlosti pohybu pístitice) charakteristikou.

Existuje několik adaptivních řešení tlumičů vrtění, u nichž je změna tlumící síly řešena mechanickými ventily, popřípadě v kombinaci s elektromagnetický (CDC tlumiče), pneumatickými systémy řízení (PDC). Lze také objevit několik aktivních systémů tlumení natáčení skříně [15]. Použití aktivních, semi-aktivních systému tlumení natáčení skříně vůči podvozku je v reálném provozu výjimečné a zatím se objevuje spíše ve výzkumných oblastech. Detailnější rozdělení systému odpružení na obr. 2-17 dle Vlka [31].

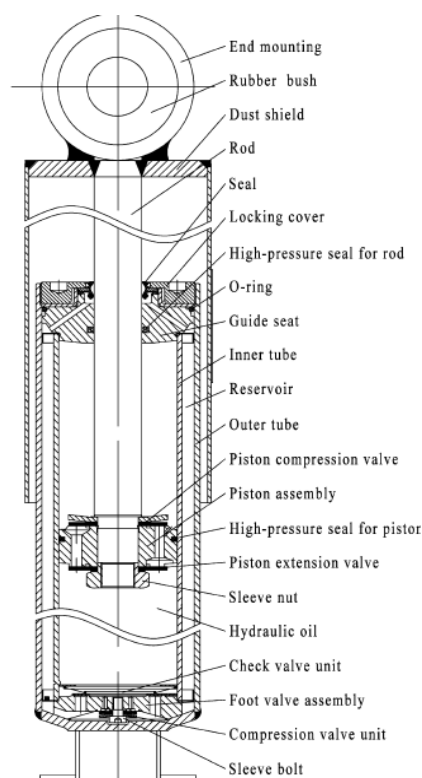
	síly	frekvenční oblast	potřeba energie	model
pasivní		—	—	
adaptivní		menší než vlastní frekvence nastavby	malá	
semiaktivní		větší než vlastní frekvence nastavby	malá	
aktivní		a) pomalá: menší než vlastní frekvence nastavby b) rychlá: větší než vlastní frekvence nastavby	vysoká	

Obr. 2 - 17 Porovnání systému odpružení; zobrazení kvadrantů působení sil; frekvenční oblasti, potřebné energie a modelu [31]

Vzhledem k tomu, že MR tlumičům je věnována celá kapitola 2.5. V této kapitole 2.4 jsou popsány pouze tlumiče vrtění jiných konstrukcí (pasivní, hydraulické, CDC, PDC).

2.3.1 Pasivní tlumiče vrtění

Jedná se o nejjednodušší a zároveň nejpoužívanější typ tlumičů vrtění v podvozku kolejového vozidla. V naprosté většině případu se jako tlumící prvek používá hydraulický teleskopický tlumič. Existují dva základní typy – a to jednovlášťové a dvouvlášťové. Výrobou těchto typů tlumičů se zabývá celá řada firem. Ve spodní tabulce jsou uvedeny jejich tlumiče společně s maximální tlumící silou, zdvihem a základními informacemi ohledně konstrukce



Obr. 2 - 18 Dvouplášťový tlumič [32]

Na obr. 2-18 lze vidět konstrukčního řešení dvouplášťového tlumiče s jeho kompletním popisem jednotlivých částí. Tlumič se vždy skládá z pístnice (někdy průchozí) a pístu. V pístu jsou většinou otvory. V těchto otvorech se nachází ventily (planžetové popřípadě ventily s kuličkou a pružinou). Ty slouží k snížení průtoku kapaliny, kladou jí odpor a tím dochází k zvýšení tlumicí síly. Existují základní dva typy ventilů – škrťací a přepouštěcí. Škrťací slouží přímo k vytvoření tlumicí síly. Zatímco přepouštěcí ventil brání kapalině téct jedním směrem, v druhém směru jí klade minimální odpor. U dvouplášťové konstrukce je typickým znakem objem sloužící ke kompenzaci zanořující se pístnice [32].

Tab 2- 1 Pasivní tlumiče vrtění a některé základní parametry

Název Tlumiče	Výrobce	Max. tlumicí síla	Rozsah zdvihu	Typ tlumiče
R110	Strojírna Oslavany	10-25 (kN)	70-560 (mm)	Dvouplášťový tlumič (čerpádlový typ)
Endurance line 02	KONI	12-15 kN (TYP 02)	-	Dvouplášťový tlumič (čerpádlový typ)
Yaw Damper	HITACHI	12-20 kN (dle typu)	-	Jednoplášťový tlumič

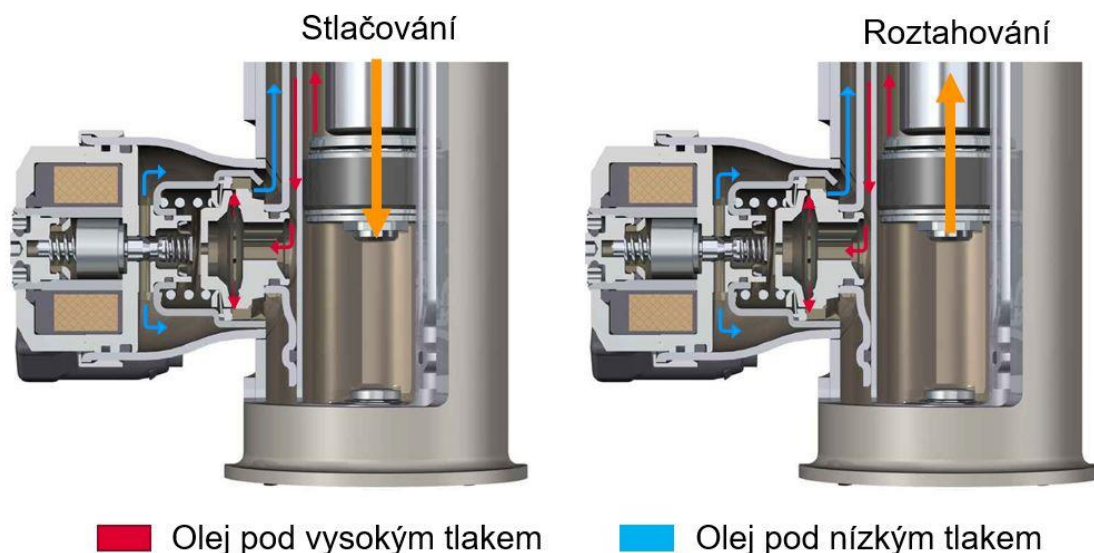
Dle tab. 2-1 je rozsah tlumících sil 10-25 kN a je umožněný velký zdvih. Ten se využije převážně při průjezdu obloukem, při tlumení vrtění je pracovní zdvih nižší.

2.3.2 Semi-aktivní tlumiče vrtění

S/A tlumič umožňuje v průběhu jízdy změnu tlumicí charakteristiky, tato změna je ovládaná řídicím systémem. Způsobu, jak toho dosáhnout, existuje celá řada, například mechanickým odlehčením škrticích prvků, vytvořením obtokové cesty s uzavíratelným ventilem. Kapalina v tomto případě raději poteče cestou s menším odporem a tím vytvoří charakteristiku s nižší tlumicí silou. U S/A tlumičů typu CDC je tato cesta otvírána/uzavírána například pomocí elektromagnetické cívky. Předpokládají se rychlé odezvy změny tlumicí síly (řádek desítek, stovek ms). Mezi S/A systémy se řadí i MR tlumiče.

Solenoidové - Elektromagnetické tlumiče

Tlumič **Continuous Damping Control** (CDC) využívá řízený škrticí ventil, který v tlumiči ovlivňuje průtok oleje z vnitřního válce s vysokým tlakem do vnějšího válce s nízkým tlakem. Vytváří tedy pro kapalinu cestu menšího odporu. Solenoidový ventil pohybuje mechanickou součástí a tím otvírá/zavírá obtokovou cestu, obr. 2-19. Tímto způsobem se samozřejmě mění také tlumicí síla. V některých případech jsou tlumiče pouze dvoustavové on/off. Je také běžné, že jsou tlumiče plně nastavitelné od měkkého naladění až po tvrdou tlumicí charakteristiku. V komerční oblasti se CDC tlumiče vyskytují jak v provedení jednoplášťovém, tak v provedení dvouplášťovém [33]. Dvouplášťový tlumič vybavený CDC ventilem znázorňuje obr. 2-19. Zároveň také zobrazuje směr toku hydraulického oleje při stačování a roztahování. Jelikož je tlumič čerpadlového typu, směr toku je v obou případech stejný. Konstrukční úprava tlumiče spočívá především v zajištění průtoku oleje škrticím členem během pohybu pístu. Kvůli tomu je tlumič prakticky tříplášťový, což komplikuje jeho vnitřní konstrukci [33].

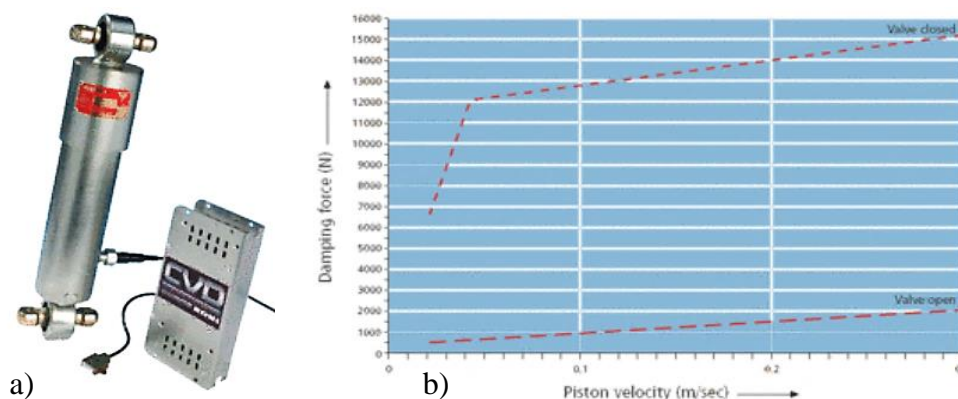


Obr. 2 - 19 Dvouplášťový tlumič CDC; pohyb oleje označen červeně, modře; pohyb pístnice oranžově [33]

Přivedením elektrického napětí na cívku v solenoidovém ventilu se v ní vyvolá proud, který následně vytvoří magnetické pole. Toto magnetické pole hýbe šoupátkem, které vytváří škrtení. Díky tomu je možné dosáhnout různých tlumících charakteristik.

CDC ventily vyžadují velmi nízký příkon k ovládání – asi 15 W. Potřebný proud se pohybuje v rozmezí 0 až 1,8 A. V případě poruchy, kvůli které se ztratí napětí na cívce, ztrácí systém adaptivní funkci a pružina nastaví škrtkovací ventil do polohy, která zajistí tvrdou charakteristiku, a to z důvodu zajištění Fail-safe režimu [33].

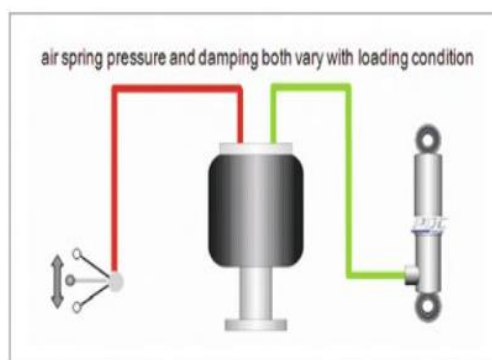
Adaptivní tlumič od firmy KONY, s označením **Continuously Variable Damping (CVD)**. KONY nabízí jak dvoustavové řešení (on/off), tak i plynule nastavitelnou konstrukčně složitější verzi tlumiče. Systém také využívá elektromagnetického ventilu, jenž mění průtok kapaliny a tím i tlumící sílu řešení společně s $F-v$ charakteristikou na obr. 2-20 [34].



Obr. 2 - 20 a) Dvouplášťový tlumič CVD s kontrolním panelem; b) jeho dvoustavová $F-v$ charakteristika [34]

Adaptivní tlumiče s pneumatickým řízením

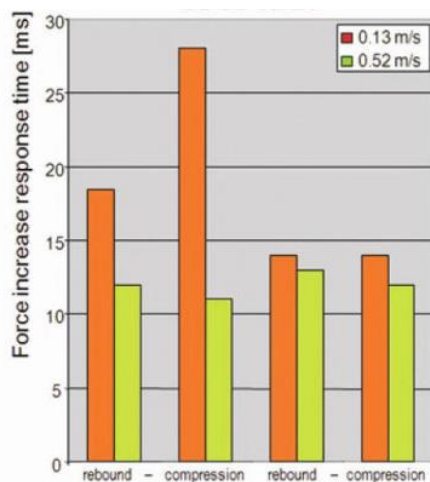
Při použití **Pneumatic Damping Control (PDC)**, obr.2-21, je princip podobný jako u CDC, ovšem místo ovládání otvírání ventilu pomocí elektromagnetického přístupu je zde použit tlak vzduchu. Lze také dosáhnout libovolné tlumící charakteristiky. Tyto systémy se nejčastěji používají v kombinaci s vzduchovými pružinami v sekundární části vypružení. Využívají stejný zásobník vzduchu i jeho rozvody [35].



Obr. 2 - 21 PDC tlumič; vlevo ovládací mechanismus; uprostřed rozvod stlačeného vzduchu, vpravo tlumič[35]

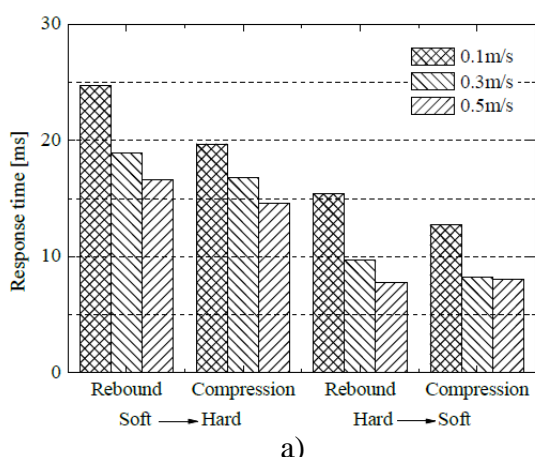
Dle obrázku 2-22 (a) lze vidět časovou odezvu tlumiče CVD konstrukcí při pohybu pístnice (stlačování, roztáhnutí kompenzačního objemu). Při dvou stavech nastavení tlumící síly tedy soft (měkká, nízká tlumící síla) a Hard (vysokou tlumící síla). Časová odezva se pohybuje od 12,5 do 28 ms a to v závislosti na směru změny síly [35].

Na obr. 2-22 (b) lze vidět sestavu testovaného S/A CDC tlumiče společně s pulsátorem [35].



Obr. 2 - 22 Časová odezva tlumicí síly tlumiče CDC; pro roztahování/stlačování [35]

Časovou odezvu CDC tlumiče od firmy ZF SACHS zkoumala také skupina vědců kolem Qina [36]. Jejich práce se zabývá porovnáváním řídicích algoritmu tlumiče. Odezvě připisují značný vliv na jízdní vlastnosti vozidla. Výsledné časové odezvy jsou zjištěny při testování na pulsátoru, obr. 2-23 (c). Časové odezvy se liší pro přechod z vyšší tlumicí síly na nižší, stejně tak při stlačování a roztahování pístnice obr. 2-23 (a). Další veličinou, která ovlivňuje časovou odezvu je rychlost tlumiče. Z grafu lze odhadnout, že se časová odezva snižuje při zvyšující se pracovní rychlosti tlumiče.



b)

c)

Obr. 2 - 23 Časová odezva tlumiče dle rozdílných přechodů (a), sestava tlumiče (b); testovací pulsátor (c)[35]

Lze říci, že CDC a CVD konstrukce jsou si velmi podobné a jedná se o označení jednotlivých firem pro stejné řešení tlumiče, kde je využit elektromagneticky ovládaný ventil pro snížení/zvětšení průtoku a tím zvětšení/zmenšení tlumic síly. Také lze konstatovat, že tyto systémy vypružení nejsou častým řešením u podvozku kolejových vozidel. Jedná se spíše o vědeckou a výzkumnou oblast, většinou se neuvádí podrobné parametry konstrukce (časová odezva, dynamický rozsah atd.). Ovšem je třeba zmínit, že v současné době dochází k zrychlení časové odezvy a zefektivnění řešení pro průmyslové použití.

2.3.3 Systémy aktivního vypružení u kolejových vozidel

Přestože mají aktivní systémy vypružení množství výhod, jsou v dnešní době používány zřídka (viz kap. 2.2.4). Je to dáno složitostí systému, potřebou externího el. zdroje a problematickým řešením fail-safe stavu. Aktivní systémy pro podvozky kolejových vozidel lze rozdělit do pěti skupin podle Goodall [19], na 2-23 zobrazeny jednotlivé použití.

- ASW: Aktivní pevné dvojkolí (2-24 a)
- AIRW: Aktivní nezávislé rotující kola (2-24 b)
- DIRW: Poháněná nezávislé rotující kola (2-24 c)
- DSW: Přímé ovládání dvojkolí (2-24 d)
- SYC: Sekundární kontrola natáčení (2-25 a 2-26)

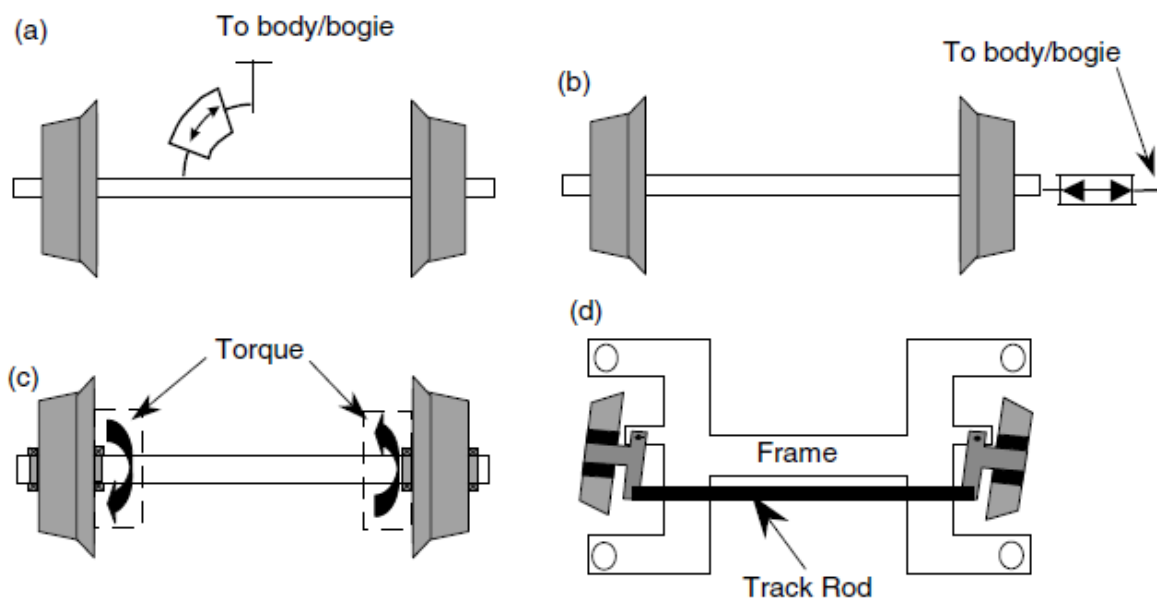
Všechny tyto systémy jsou zajímavým řešením, které vylepšují jízdní vlastnosti kolejového vozidla. Vzhledem k tématu DP jsou zmíněny ty, které přímo ovlivňují použití tlumiče vrtění nebo vrtění jako takové.

Koncepce **AIRW** (obr. 2-24 b.) obsahuje aktuátor pro ovládání soukolí v primárním vypružení v podélném směru. Také obsahuje nezávislý pohon kol, tento přístup **minimalizuje vznik nestability při vyšších rychlostech (vrtění)**. Dříve pevné dvojkolí má nyní dvě samostatně upevněná kola, které se mohou otáčet na požadovaném poloměru bez toho, aniž by se navzájem ovlivňovaly. Nevýhodou této konstrukce je snížení schopnosti řízení v zatáčkách, právě kvůli neexistující vazbě mezi koly (nejedná se už o pevné dvojkolí). Podélné síly při průjezdu zatáčkou jsou nulové, což znamená, že požadovaná síla pro aktuátor (pohon) bude mnohem menší než u systému ASW[19].

Řešení **DIRW** (obr. 2-24 c.) je aktivní řízení dosaženo trakčními motory aplikovanými na nezávisle se otáčející kola. Stejně jako u AIRW velmi dobrá stabilita během vysokých rychlostech. Na druhou stranu je toto řešení značně nákladné, je totiž vyžadován jeden trakční motor na každé kolo vozidla[19].

Návrh **DSW** (obr. 2-24 d.) je dalším zjednodušením konceptu ASW, se dvěma nezávisle rotujícími koly místo pevného soukolí. Kola jsou aktivně řízena, aby bylo dosaženo radiální řízení v zatáčkách. Nezávislou rotací kol je dosaženo stability ve vysokých rychlostech na přímě trati. Chybějící pevná náprava umožňuje konstrukci nízkopodlažního karoserie, což je zvláště výhodné pro městskou dopravu, jako jsou tramvaje[19].

Poslední přístup k použití aktivního systému v podvozku kolejového vozidla je **SYC**. Jedná se o použití aktuátorů v sekundární části podvozku. Aktuátor (nejčastěji el. motor) bude sloužit k natočení skříně, jedna část aktuátoru je upevněna v pojezdu a druhá ke skříně. V podstatě přímo nahrazující tradiční pasivní tlumiče. Dle autora článku SYC, systém není nejúčinnějším způsobem, jak se vypořádat s rozdílnými požadavky na stabilitu při vysokých rychlostech a jízdní parametry při průjezdu obloukem. Lze je ale nejspíše implementovat do konstrukcí kolejových vozidel[19].



Obr. 2 - 24 Možnosti aktivního řízení dvojkolí [18]

Výše popsané oblasti použití aktivních systému v podvozcích **přímo ovlivňují vznik vrtění** (některé ho naprosto eliminují) a tím i stabilitu při vysokých rychlostech. Také mají vliv na parametry při průjezdu křivkou. Systém SYC je ve svojí podstatě stejný jako použití MR tlumiče namísto tlumiče vrtění. Samozřejmě podstatným rozdílem je použití aktivního přístupu řízení naproti semi-aktivnímu. Ostatní přístupy jsou bezesporu zajímavé a ovlivňují použití tlumiče vrtění. Například v případě poháněných a individuálně uložených kol, je použití MR tlumiče naprosto nadbytečné. Níže jsou uvedeny dvě řešení, která odpovídají oblasti **SYC**.

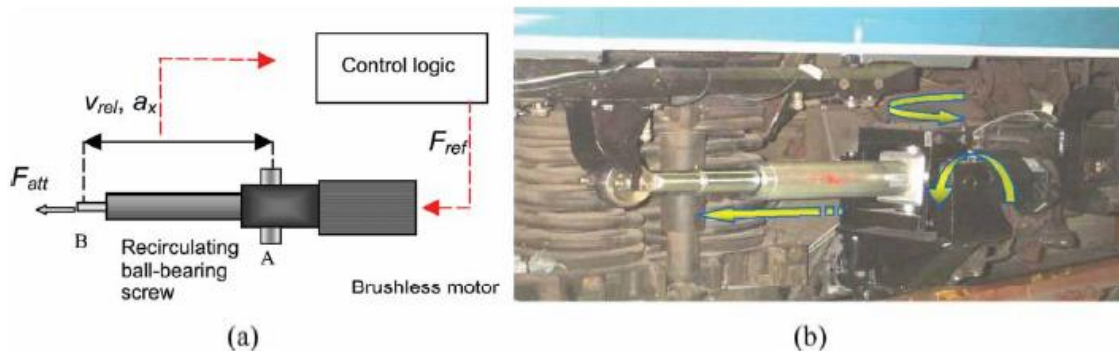
Secondary Yaw Control (SYC) – Sekundární kontrola natáčení

Elektro-hydraulický systém (EHA) aktivního vypružení od firmy Liebherr se v dnešní době používá na lokomotivách Siemens Vectron. Dle uvedených informací se jedná o bezúdržbový systém skládající se z čerpadla, zásobníku oleje, senzorů, elektrického řídicího systému. Je uveden prokazatelné snížení opotřebení. Informace ohledně pracovních sil, rychlosti či odezvy nebyly uvedeny reálné uložení aktuátoru na obr. 2-25 [37].



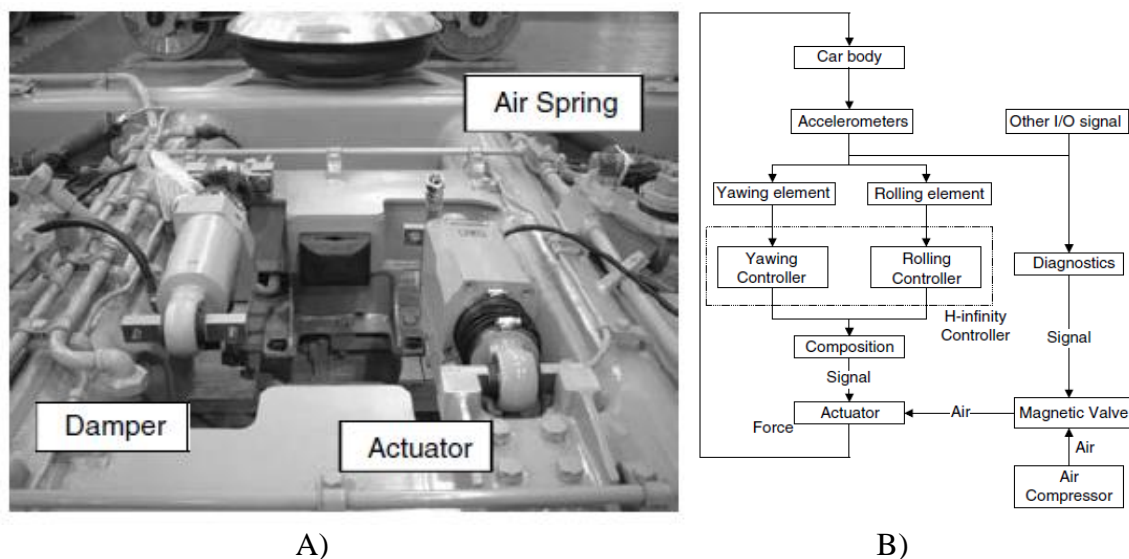
Obr. 2 - 25 Aktivní systém natáčení; reálné zobrazení na podvozku SIEMENS VECTRON [37]

Další reálné řešení SYC natáčení skříně vůči podvozku je zobrazen na obr. 2–26. Součástí tohoto systému je motor schéma na obr. 2-26 (a). Oproti pasivnímu tlumiči zlepšení parametrů tlumení průměru o 20 % [15].



Obr. 2 - 26 Schéma řízení aktivního systému natáčení skříně (a), uložení u testovacího vozu (b)

Obr. 2-27 A) zobrazuje použití aktivního systému vypružení na sérii E2-1000 Shinkansen. Systém slouží primárně k snížení příčných vibrací. Dle výsledků se podařilo snížit tyto vibrace o 50% a to na frekvenčním rozsahu 1-5 Hz [28]. Mimo vzduchovou pružinu sekundárního vypružení lze vidět i pneumatický aktuátor a s ním paralelně uložený tlumič. Tlumič lze nastavovat pomocí off/on el. ventilu na měkkou nebo tvrdou charakteristiku. Podle článku tento systém zabraňuje také natáčení (natáčení) ale nejsou uvedeny bližší detaily [19]. Na obr. 2-26 B) lze vidět systém řízení.



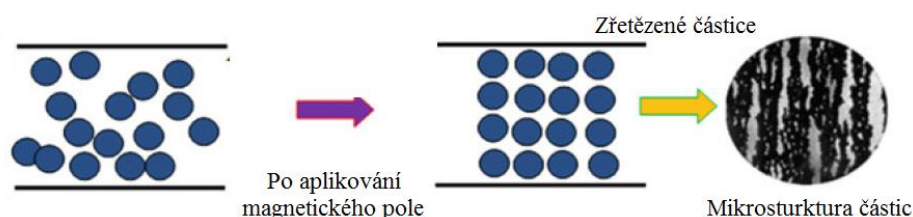
Obr. 2 - 27 Aktivní řízení v podvozku E2-1000 Shinkansen; vpravo obecné schéma řízení [17]

2.4 Magnetoreologický tlumič

Magnetoreologický (MR) tlumič konstrukčně vychází z jednoplášťového hydraulického tlumiče. Avšak kapalina (nejčastěji olej) je nosičem drobných částecek většinou čistého železa. MR kapalina a její viskozita je závislá na velikosti působícího mag. pole. Toto pole je vytvořeno elektrickým proudem pomocí cívky, která je nejčastěji zabudována v pístu tlumiče obr. 2-30. El. proud je přiveden na cívku v pístu přes průchozí pístnici. Na základě vyhodnocování signálu o stavu vozidla (rychlost) se řídí proud v cívce, čímž se nastavuje hladina tlumení. Vlivem zvětšené viskozity dochází k navýšení tření při průtoku otvory v pístnici a tím pádem k disipaci energie ve formě tepla [38]. Výhodou MR tlumičů je rychlá odezva neboli změna rychlosti tlumící síly, na pokyn vstupního signálu (v jednotkách až desítkách ms). Výhodou je také konstrukce, která neobsahuje žádné pohyblivé díly. MR tlumič má široký dynamický rozsah. Cenově nejnákladnější je MR kapalina.

Magnetoreologické kapalina

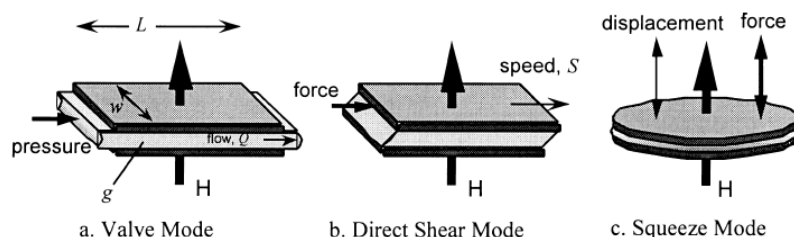
Magnetické kapaliny jsou suspenze velmi jemných feromagnetických částic v nosné kapalině (voda, olej). Částice tvoří 20-40 % celkového objemu. Tyto částice mají přibližně kulový tvar a průměr v rozsahu mikrometru až nanometrů (obr. 2-28). Součástí MR kapaliny jsou také aditiva, jenž slouží ke zlepšení vlastností kapaliny, zabraňují sedimentaci (detergenty) a zlepšují mísivost (disperzanty), snižují degradaci (antioxidanty) [38].



Obr. 2 - 28 Efekt magnetického pole na částice, upraveno [38]

Mody MR kapaliny

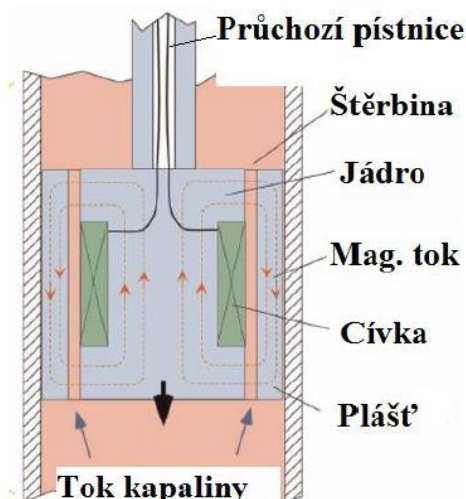
MR kapalina obecně operuje v několika módech, které se od sebe liší a jsou používány v rozdílných aplikacích. Jedná se o tlakový (c), smyková (b) a ventilový mód (a), který je použit pro tlumiče. Schéma těchto modů lze vidět na obr. 2-29. Princip ventilového módu spočívá v tom, že se kapalina nachází v prostoru mezi dvěma nehybnými póly. Odpor proudění kapalinou je řízen, změnou mag. pole, které je kolmé na proudění kapaliny [39]



Obr. 2 - 29 Základní operační módy MR kapaliny; a) ventilový; b) smykový; c) tlakový [39]

2.4.1 Konstrukce MR tlumiče

Princip funkce MR tlumiče byl popsán výše, typickou konstrukcí lze vidět na obr. 2-30. Konstrukce je rozdělena pístem na dvě komory, které jsou zcela vyplněny MR kapalinou. Během pracovního pohybu protéká MR kapalina otvorem v pístu o stálém rozměru, ve kterém působí elektromagnetické pole. To je tvořeno cívkou a jeho siločáry mají v místě štěrbin kolmý směr na pohyb MR kapaliny [40]. Pracovní prostor a venek pístu je vždy oddělen těsněním, a to buď O kroužky, popřípadě břitovými těsněním.

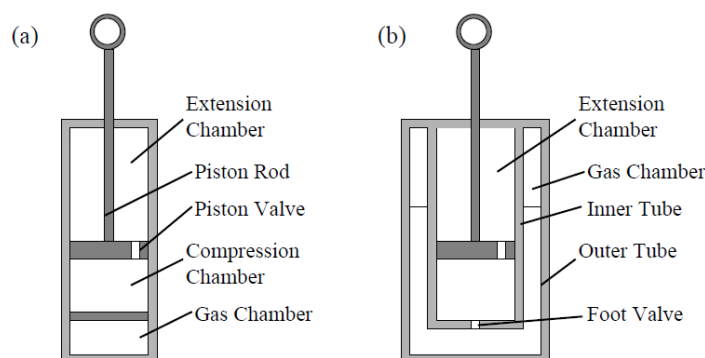


Obr. 2 - 30 MR tlumič jednoplášťový typu; popsány jednotlivé části a znázorněn magnetický tok [40]

Existuje celá řada konstrukčních typu MR tlumičů např. na obr. 2-31. Je třeba dodat, že jejich použití v podvozku kolejových vozidel je zatím omezeno pouze na vědecké oblasti, a to pouze v laterálním (příčném) směru v sekundární části vypružení viz kap. 2.3.

Rozdělení konstrukcí MR tlumičů:

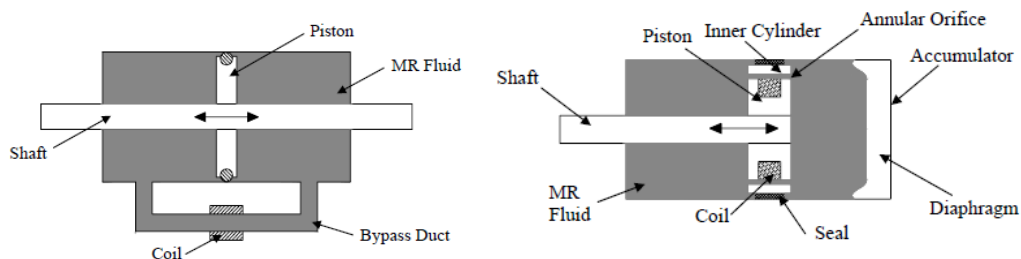
- jednoplášťová vs. dvouplášťová konstrukce,
- konstrukce s průchozí pístnicí,
- externí řešení škrtkového ventilu – bypass.
- dle počtu a tvaru použitých cívek



Obr. 2 - 31 Základní rozdíl mezi jednoplášťovým a dvouplášťovým tlumičem [41]

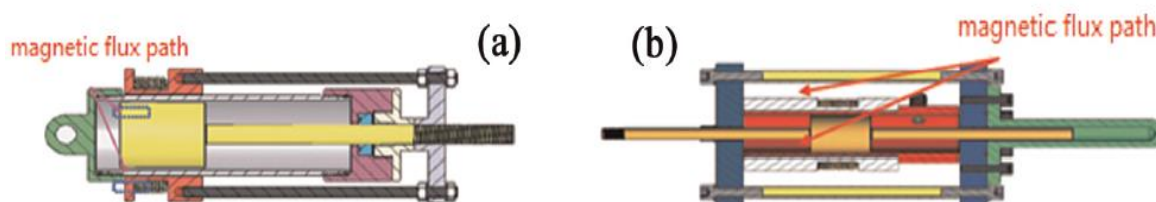
Základním principiálním rozdílem mezi konstrukcí jednoplášťovou a dvouplášťovou je řešení kompenzace objemu vstupující pístnice viz obr. 2-31 [41]. Jednoplášťové provedení používá kompenzační plynový objem (tlak musí být větší než max. pracovní) přímo ve vnitřním válci. Naproti tomu dvouplášťové řešení má kompenzační objem ve vnějším plášti (proto dvouplášťové). Tyto rozdíly poté souvisí s počtem ventilů (zpětných, škrtících, MR ventilů) nároky na utěsnění a vhodnosti pracovní pozice tlumiče (kolmá, vodorovná).

Výše uvedené konstrukční rozdělení lze mezi sebou částečně kombinovat, jak lze vidět na obr. 2-32 vlevo [42]. Zde se jedná o bypass MR tlumič s průchozí pístnicí. Výhody bypass provedení jsou v externím provedení MR jednotky. To přináší primárně snadnější přístup k opravám. Dále se jedná o menší objem pro MR kapalinu (podstatné snížení ceny). Co se týče průchozí pístnice, odpadá kompenzování objemu vstupující pístnice. Další její výhody spočívají v snadném řešení symetrické síly při stlačování i roztahování tlumiče. Také se jedná o dosažení vyšších tlumících sil, nevýhodou je nutné zdvojnásobení těsnících prvků a zvětšení zástavbových prostorů [42]. Na obr. 2-32 vpravo jednoplášťová konstrukce.



Obr. 2 - 32 MR tlumič základní konstrukce, vlevo bypass double tube, vpravo mono-tube [42]

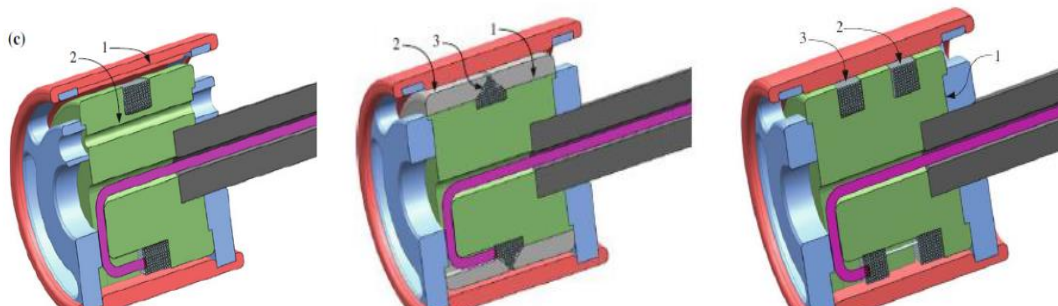
Dále existuje celá řada odlišností v konstrukčním řešení MR tlumiče například: v počtu cívek a jejich tvaru-průřezu obr.2-33 (ovlivňuje výsledné mag. pole). Také v umístění cívky, ta může být umístěna nejčastěji v pístu tlumiče ale také v plášti, popřípadě v patě-hlavě [43].



Obr. 2 - 33 a) cívka mimo pracovní válec, b) nepohyblivá cívka v plášti [43]

V dnešní době jsou na MR tlumiče kladeny nároky na fail-safe funkci. Tzv. jde o to, aby tlumič plnil dostatečně svoji funkci i při ztrátě elektrického proudu, do konstrukce MR tlumiče se přidávají permanentní magnet, toto řešení je velmi ojedinělé.

Na obr. 2-34 jsou zobrazeny tři řezy rozdílnými konfiguracemi pístové skupiny MR tlumiče. Vlevo je konfigurace s průtokovým kanálem, který ovlivňuje skok F-v char. v aktivovaném stavu. Uprostřed je cívka s trojúhelníkovým průřezem (ovlivní mag. pole) a vpravo je konfigurace s dvěma cívkami [44], která má významný vliv na časovou odezvu mag. indukce. Změnou tvaru, cívky lze efektivně ovlivnit také mag. indukci ve štěrbině tlumiče.

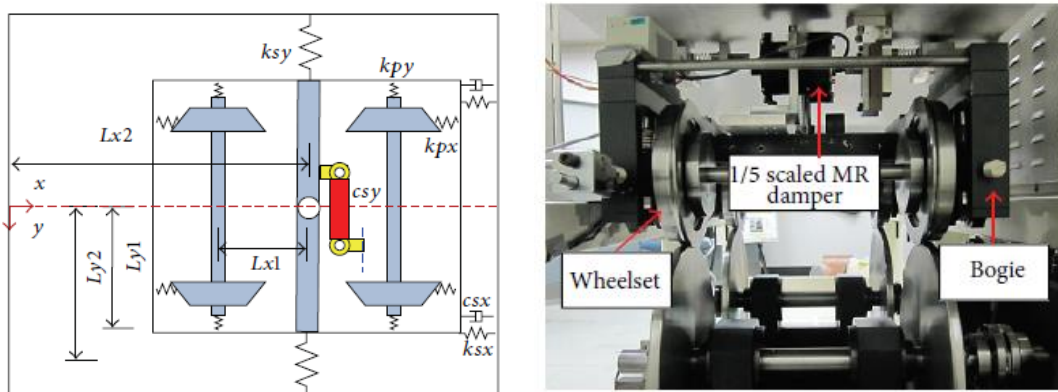


Obr. 2 - 34 Rozdílné konfigurace pístové skupiny MR tlumiče [44]

MR tlumiče v podvozcích kolejových vozidel

Všechny níže uvedené články testují MR tlumič umístěný v příčném (laterárním) směru, a to v sekundárním vypružení kolejového vozidla. Důvodem je největší efekt tohoto tlumení na kritickou rychlost (viz kap. 2.3). Souvisí to tedy s efektivním potlačením vrtivého pohybu. Všechny články se ovšem shodují na výrazném zlepšení měřených jízdných vlastností (v řádu desítek procent). Výsledky závisí na způsobu měření, použitém algoritmu, popřípadě na vyhodnocovacím přístupu (zrychlení skříně, dvojkolí, komfort cestujících).

MR tlumič obr.2-35 s průchozí pístitnicí navrhovala skupina vědců okolo Yu-Jeonga Shina [45] na toto téma vydali několik článků. Zabývající se matematickým modelem s 17 stupni volnosti, který obsahoval MR tlumič v příčném směru sekundárního vypružení. Dle výsledků ze simulace byla navržena reálná konstrukce, kterou nejdříve testovali na zmenšením (1:5) modelu testovacího podvozku a poté na full-scale testovací plošině.



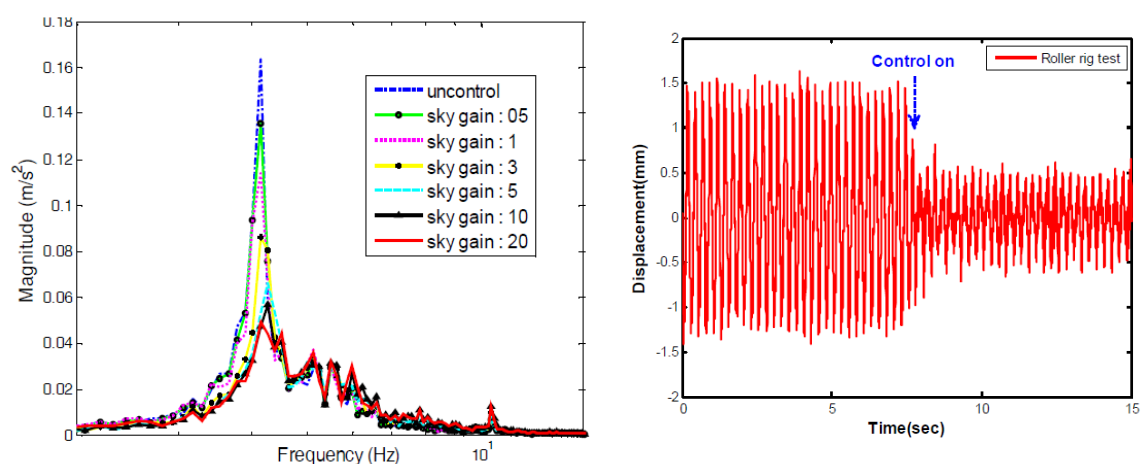
Obr. 2 - 35 Vlevo schéma pro dynamické simulace, vpravo 1/5 testovací zařízení [45]

V experimentu v plném měřítku tlumič pracoval se zdvihem ± 15 mm při rychlosti 0.3 m/s, maximální síla tlumení je uváděna na 15 kN. Jako řídicí algoritmus byla použita kontrola *Skyhook*, vibrace byly sníženy o 23,6 % ve srovnání s použitím pasivního tlumiče při stejných provozních podmínkách obr. 2-37. V ostatních člancích výzkumné skupiny se autoři zabývají testováním různých algoritmů pro kontrolu MR tlumiče např. *Skyhook* nebo H_∞ kontrol.



Obr. 2 - 37 Celková sestava s jednotlivými díly, vlevo testovací stanice s vozidlem [45]

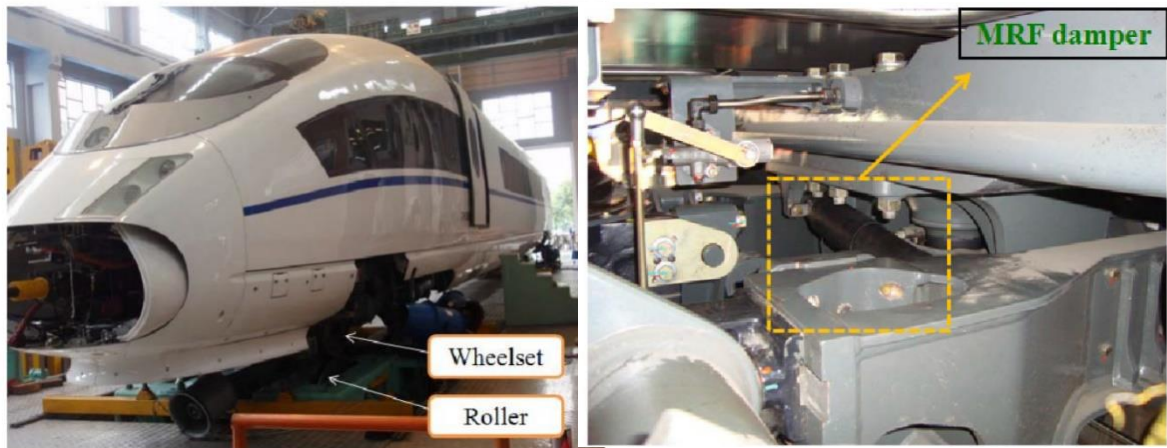
Graf dole ukazuje naměřené hodnoty zrychlení skříně kolejového vozidla vůči podvozku při určité frekvenci (poměrová hodnota). Na pravé straně jsou ukázány důsledky zpuštění kontroly MR tlumiče. Dochází zde k snížení amplitudy v příčném směru. Snížení vibračního zrychlení skříně proti podvozku při nejlepší kontrolním algoritmu dosáhlo 67 % v porovnání s pasivními tlumiči obr. 2-36.



Obr. 2 - 36 Vibračního zrychlení skříně při použití skyhook řízení, vlevo posun skříně on/off kontroly [45]

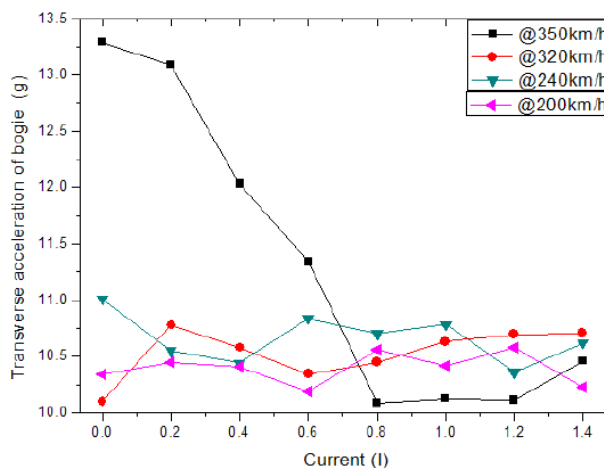
Rychlost testovacího vozidla byla zhruba 180 km/hod. Jak lze z grafu nahoře vlevo vidět, čím větší je kontrolní nárůst (sky gain) tím jsou vibrace nižší v rozmezí 3-5 Hz. Vibrační zrychlení naroste kolem hodnoty 11 Hz což je vlastní frekvence testovacího podvozku. Modrá křivka znázorňuje pasivní tlumení.

Článek [27], který popisoval závislost kritické rychlosti na soukolí a podvozku u kolejového vozidla v kapitole 2.3. Testoval samotný MR tlumič v laterárním směru sekundárního vypružení. Testovací zařízení a vlak společně s detailem umístění MR tlumiče na obr. 2-39.



Obr. 2 - 39 Testovací vozidlo, napravo detail umístění MR tlumiče [27]

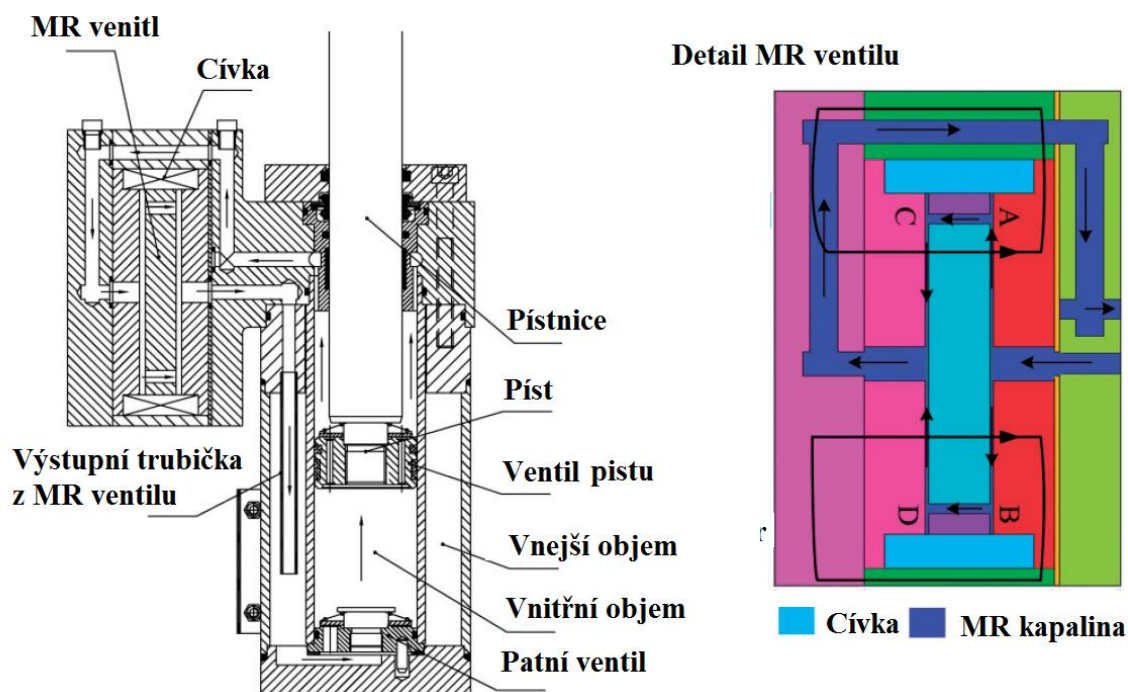
MR tlumič byl přímo namontován na vysokorychlostní vlak, testován na pevném testeru. Nahrazeny čtyři tlumiče vrtění u jednoho vozidla vysokorychlostního vlaku. Přesné parametry konstrukce MR tlumiče nejsou uvedeny [27]. Pouze rozsah vstupního proudu od 0 A po 1,5 A. Součástí experimentální sestavy je také proudové řízení, MRF kontrolér a snímač zrychlení. Rychlost vlaku při testování je uvedena dle rozdílných křivek obr.2-38. Je zde také zobrazena naměřená závislost zrychlení skříně při určitém vstupním proudu a dané rychlosti.



Obr. 2 - 38 Závislost vibračního zrychlení skříně na proudu cívky MR tlumiče, při rozdílné rychlosti [27]

Nad 13 g (obr. 2-38) vlak přesahuje kritickou rychlost [27]. Při postupném zvyšování rychlosti dochází k většímu zrychlení skříně (v laterálním směru vůči podvozku). Stejně tak je zřejmé, že při zvyšování proudu do MR tlumiče, což vede ke zvětšení tlumicí síly, dochází k snížení tohoto zrychlení. Překročení kritické rychlosti nastává pouze u 350 km/hod a od 0A-0,2A. Je ovšem třeba říct, že normální provozní rychlosti by se této kritické rychlosti neměli vůbec přiblížit. Autoři porovnávají výsledné jízdní vlastnosti při použití MR tlumiče v porovnání s dřívější pasivní koncepcí. Uvádí zlepšení jízdních vlastností o 39 % při použití on/off řízení.

Guo [46] navrhl dvouplášťový MR tlumič v konfiguraci bypass na obr. 2-40. Maximální tlumicí síla je 9 kN, minimální tlumicí síla 1 kN. Min. síla je navrhována tak aby splňovala kritéria fail-safe. Dle autorů článku má jednosměrný tok MR kapaliny pozitivní dopad na sedimentaci, také uvádí, že konstrukce MR ventilu mimo tlumič má výhody v teplotním vedení. Výstupní trubička slouží k zlepšení oběhu MR kapaliny.

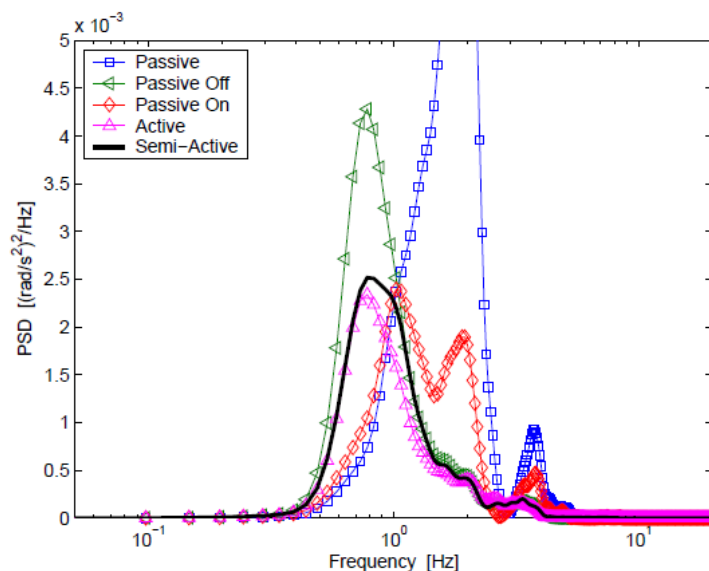


Obr. 2 - 40 Schéma řešení MR ventilu s detailem magnetického obvodu; upraveno [46]

Další parametry tlumiče: 450 závitů, odpor cívky 10 Ω ; Štěrbina má šířku 0,8 mm a je na poloměru 100 mm. Autoři článku udávají odezvu systému jako 0,342 s pro navýšení síly z 0 % na 90 %. Pro snížení síly je to 0,29 s. Vysokou odezvu připisují zejména stlačitelnosti MR kapaliny. Tyto hodnoty dostávají při proud 0 až 1 A kde se síly v tlumiči změní z 300 na 5440 N. Popřípadě při poklesu z 5790 na 1200 N. Síla se nemůže vrátit na původní hodnotu kvůli zbytkové magnetizaci[46]. Autoři článku vidí vylepšení ve oblasti řídicího systému. Dále se také zaměřovali na praktické testování sedimentace, zde vycházejí nedostatečné výsledky. Po čase MR kapalina značně sedimentuje, ovšem během několik cyklu tlumiče se jí podaří získat zpět svoje původní vlastnosti[46].

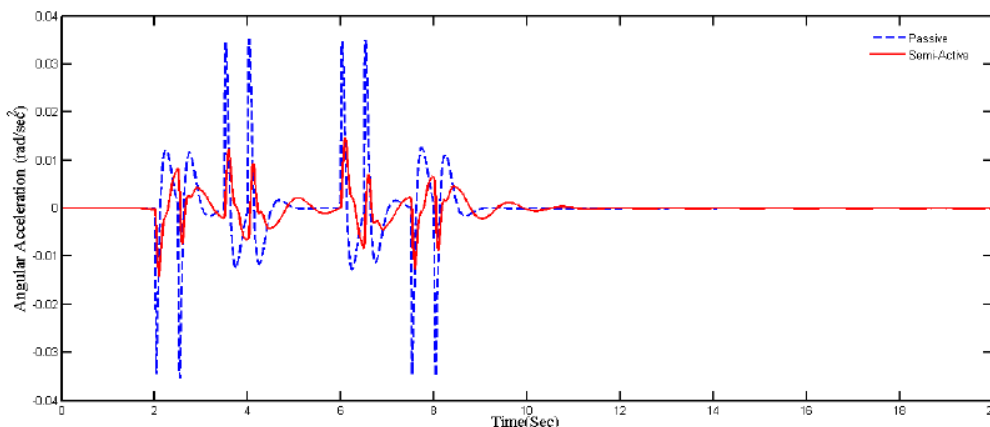
Výsledky Wanga [47] zkoumajícího MR tlumič jako součást laterárního vypružení v sekundární části. Využívá pouze matematické modely a jejich výsledky. Obr. 2-41 zobrazuje spektrální hustotu zrychlení skříně na frekvenci pohybu. Čím je tato hodnota nižší tím dochází k efektivnějšímu tlumení. Průběhy jsou uvedeny pro pasivní tlumič, on/off stav MR tlumič; S/A MR tlumiče a aktivní systém vypružení. Porovnání semi-aktivního systému vypružení v porovnání s pasivním dle simulace vychází o 50% lepší. MR tlumič v on/off stavu vychází hodnotami zhruba mezi pasivním a S/A MR systémem. Aktivní systém vypružení dosahují, různový průběh na obr. 2-41 dle těchto výsledku simulací ještě lepších (nižších hodnot) hodnot.

Pro pasivní, passive-on situaci lze vidět druhý vrchol na obr.2-41 také lze registrovat, že první pík je větší než u aktivního a semi-aktivního přístupu vypružení. Je zřejmé, že při vypnutí MR tlumiče passive-off dochází k největšímu prvnímu píku. Nejeftektivnější vypružení vychází dle článku jako aktivní, S/A se od tohoto přístupu velmi neliší [47].



Obr. 2 - 41 Zrychlení skříně dle frekvence vibrací [47]

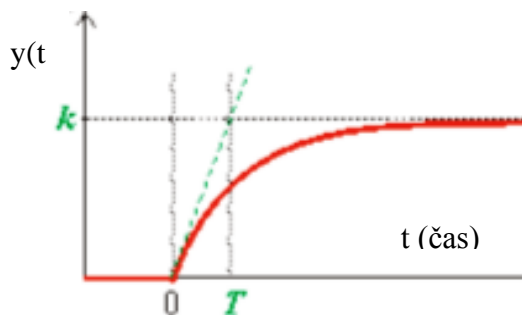
Jeden z mála článků [48], který udává i závislosti natočení skříně vůči podvozku. Na obr. 2-42 lze vidět výsledky simulací v *Matlabu simuling*. Autor neuvádí počet stupňů volnosti, které v modelu jsou. Ovšem model řeší jeden vagon, který obsahuje dva podvozky a čtyři dvojkolí. MR tlumič nahrazuje standartní tlumiče v příčném směru sekundárního vypružení. V publikaci není zmínka o tlumičích vrtění ani o konstrukci MR tlumiče jako takového. Na obr.2-47 jsou zobrazeny dva průběhy (modrý pasivní, červený S/A) poměrového zrychlení natočení v čase. Z grafu je patrné zlepšení, co se týče úhlového zrychlení (jeho snížení) skříně vozidla při vstupním proudu na cívku MR tlumiče 0,4 A. Autoři dále uvádí zlepšení 20% v oblasti zrychlení natočení v porovnání pasivní proti S/A systému vypružení. Co se týče maximálního natočení vlivem momentu je zde uváděno zlepšení 18,5% (dochází tedy ke snížení působících sil).



Obr. 2 - 42 Úhlové zrychlení skříně v čase pro pasivní a semi-aktivní přístup k vypružení, MR 0,4 (A) [48]

2.4.2 Časová odezva magnetoreologického tlumiče

Časová odezva pro magnetoreologický tlumič vychází z dynamického systému prvního řádu. Jedná se o využití skokové změny, která je popsána přechodovou rovnicí s exponenciálním průběhem (červený průběh na obr. 2-43) [49]. Časová odezva je daná průnikem v místě, kde se spolu potká tečna z počátečního bodu (zelená čárkovaná) sledovaného průběhu s tečnou v nekonečnu. Vzhledem k tomu, že se jedná o exponenciální funkci tak tečna v nekonečnu vlastně představuje téměř 100% hodnotu sledované veličiny. Bod T je označován jako primární časová odezva náběhu sledované veličiny na 63,2% maximální hodnoty [50].



Obr. 2 - 43 Časová odezva systému prvního řádu, upraveno [49]

Mimo primární odezvu MR tlumiče se také uvádí sekundární 90%. Tyto hodnoty platí pro náběh pro pokles je primární odezva na 36,8% a sekundární na 10% (odečtení od 100%).

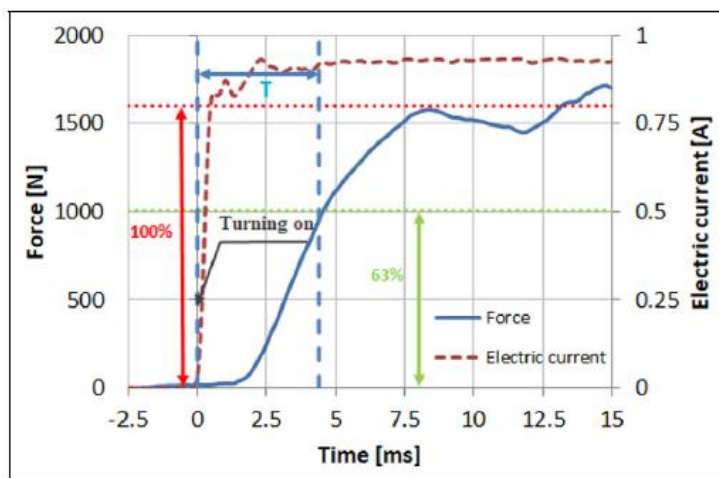
Jednotlivé složky celkové časové odezvy tlumicí síly MR tlumiče:

Lze říci, že odezva tlumiče je ovlivněna především: odezvou samotné MR kapaliny, indukčností cívky MR tlumiče a vířivými proudy především v jádru této cívky [51]. Doba odezvy MR kapaliny zkoumal Goncalves [52] a ten odhadl její hodnotu mezi 0,45-0,60 ms, je závislá na koncentraci částic v kapalině a jejich velikosti jak uvádí Sedlacik [53]. Ovšem v porovnání s celkovou odezvou je tento vliv samotné kapaliny malý. Dalšími faktory ovlivňující časovou odezvu jsou: setrvání částic v aktivní zóně (oblast kde působí magnetické pole) [52], značný vliv má velikost budícího proudu [51]. Časová odezva je samozřejmě závislá i na konstrukci tlumiče, například pro prstencovou geometrii proudění je odezva velká, a naopak pro radiální geometrii proudění je malá [54].

Jednotlivé složky časové odezvy tlumicí síly MR tlumiče (uvedené předpokládané hodnoty):

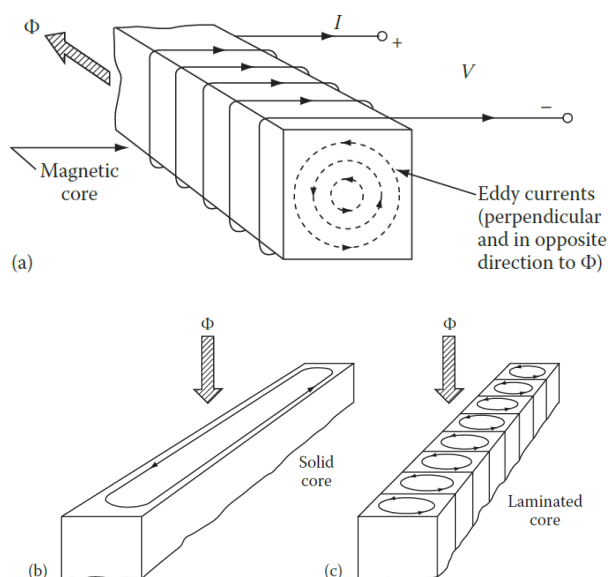
- Odezvou samotné magnetoreologické kapaliny. Součástí této odezvy je: řetězení částic vlivem MR efektu, velikost částic a jejich setrvání v aktivní zóně: **0,4-0,6 ms**
- Indukčností cívky MR tlumiče: - **ms**
- Vířivými proudy v mag. obvodu MR tlumiče: **největší složka časové odezvy**
- Řízení náběhu proudu, při použití proudového řízení [54]: **0,5-1 ms**
- Konstrukce MR tlumiče prstencová x radiální geometrie: - **ms**

Průběh tlumicí síly a elektrického proudu na cívce (0 až 1 A) pro MR tlumič v čase je zobrazen na obr. 2-44, zelenou kótou je označen stav 63 %, kterého bylo dosaženo zhruba v čase $T = 4$ ms. Čárkovaná čára znázorňuje náběh el. proudu, modrá průběh síly [55].



Obr. 2 - 44 Graf závislosti Síly-čase [55]

Dle výsledků rešerše a publikací je největší částí odezvy MR tlumičů zpoždění vzniklé vířivými proudy. Vířivé proudy vznikají při změně magnetického pole a mají takový směr, že se snaží této změně zabránit (tím snižují rychlost změny) [56]. Obecně existují dva způsoby, jak zle tyto vířivé proudy eliminovat. Jedním z nich je využití materiálu s vysokým elektrickým odporem a druhý způsob je rozdělení součásti a vložením magneticky neaktivní vrstvy mezi tyto dvě části, což je standardní způsob řešení v el. motorech a transformátorech. Vířivé proudy se vytváří v rovině kolmé na směr magnetického toku, tudíž nejefektivnější je rozdělení součásti ve směru magnetického toku, jak je znázorněno na obr.2-45[56].

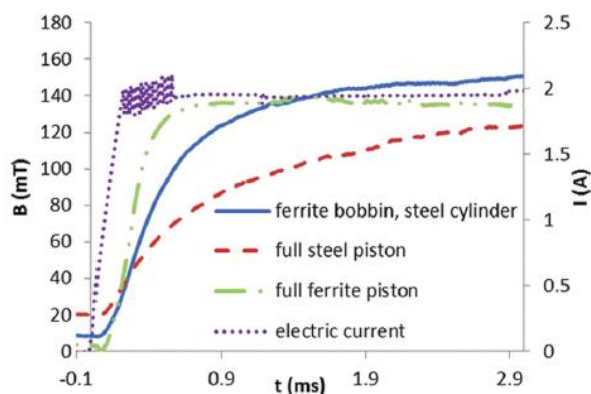


Obr. 2 - 45 Vznik vířivých proudů v magnetickém jádru; (a) jádro s cívkou označené směry proudu a mag. toku; (b) vířivé proudy pro plné jádro; (c) vířivé proudy pro dělené jádro [56]

Vířivé proudy – Materiálový přístup

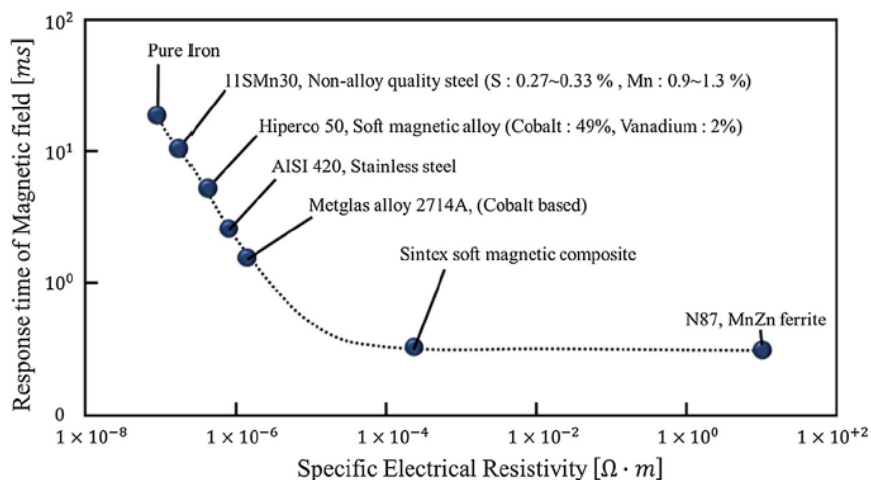
Pro potlačení vířivých proudů, které vznikají v magnetickém obvodu MR tlumiče, především v jádru cívky, je vhodné použít materiál s **nízkou elektrickou vodivostí**. Tím se výrazně sníží časová odezva způsobená vířivými proudy.

Časová odezva pro rozdílné materiály součástí mag. obvodu zobrazena na obr. 2-46 [51]. Z grafu jde vidět, že nejrychlejší je odezva s plně feritovou variantou (cívka i plášť), naproti tomu nejmenší odezva je s plně ocelovou variantou. Ovšem součásti vyráběné z ferritu jsou těžko obrobitelné, jsou křehké [51]. Tyto varianty byly vyráběny a reálně testovány.



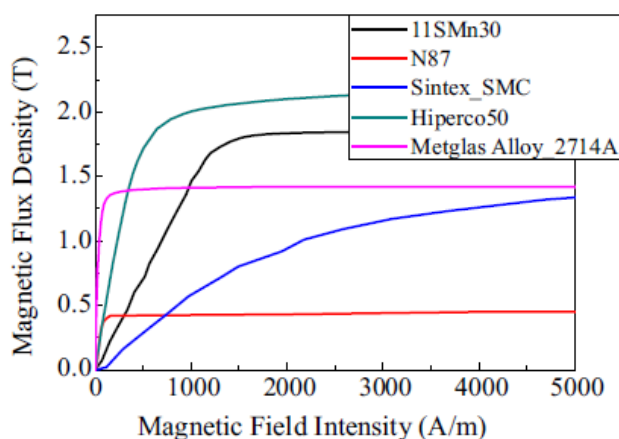
Obr. 2 - 46 Časová odezva magnetické indukce v mezeře [51]

Na obr. 2-47 jsou znázorněny možné materiály magnetického obvodu pro MR tlumiče dle článku z roku 2019 [57]. Na ose y je časová odezva magnetického pole (simulace) na ose x je elektrický odpor. **Materiál 11SMn30 je použit na pomalé verzi MR tlumiče**. Každý z těchto materiálů má svoje výhody/nevýhody. Čisté železo lze tisknout pomocí SLM má ovšem nízký elektrický odpor, to znamená, že u něj dochází k velké tvorbě vířivých proudů. Hiperco (slitina kobaltu) má poměrně dobré mag. i mech. vlastnosti. Vlastnosti ferritu už byly uvedeny dříve, jedná se o výborné mag. vlastnosti a špatnou obrobitelnost [57].



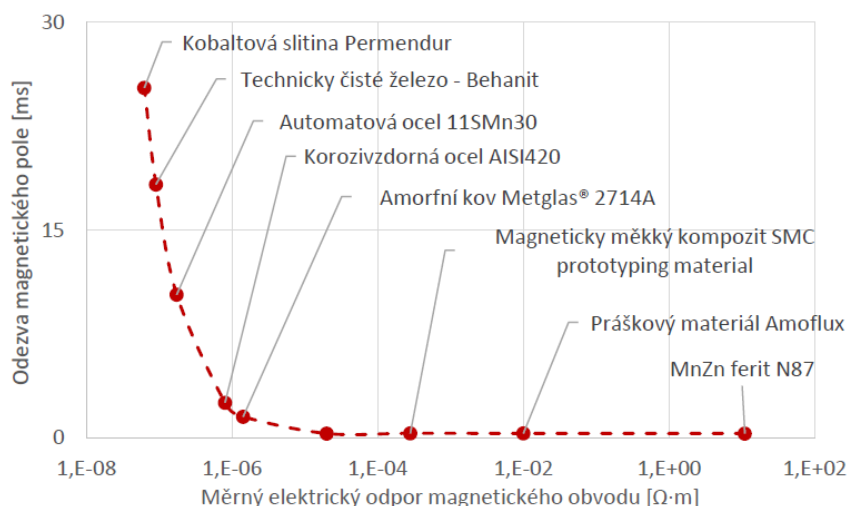
Obr. 2 - 47 Časová odezva v závislosti na elektrickém odporu [57]

Na obr. 2-48 [57] je zobrazena závislost magnetické indukce B (T) a magnetické intenzity H (A/m). Veličina, která tyto dvě hodnoty spojuje se nazývá magnetická permeabilita. Je to schopnost ovlivňovat magnetické pole (zesilovat/zeslabovat). Graf zobrazuje míru nasycení, ta je v oblasti kdy se jednotlivé průběhy začínají lámat tzv. za kolenem. Za touto oblastí už nedochází k navýšení tlumicí síly ani při navýšení vstupního proudu. Magnetický obvod je tzv. nasycený [56]. Tím, že velikost magnetické indukce přímo ovlivňuje schopnost řetězení částic a tím tlumicí sílu. Lze říct, že například magnetický obvod z materiálu 11SMn30 bude mít větší tlumicí sílu při stejné geometrii a vstupním proudu jako při využití materiálu N87 (Ferit). Ovšem zaleží, kde se na hodnotě H budeme pohybovat (na určitém intervalu má magnetickou indukci větší N87). Obecně platí, že čím pozvolnější průběh tím lépe.



Obr. 2 - 48 B-H křivka materiálů [57]

DP z roku 2017 [58] také řešila vhodné materiály pro magnetické obvody MR tlumičů obr. 2-49. Shodou okolností využívá naprosto stejný přístup k zobrazení a vybírá si stejné materiály, je zde zobrazeno několik materiálu navíc. Práce řeší materiál SMC a 11SMn30.

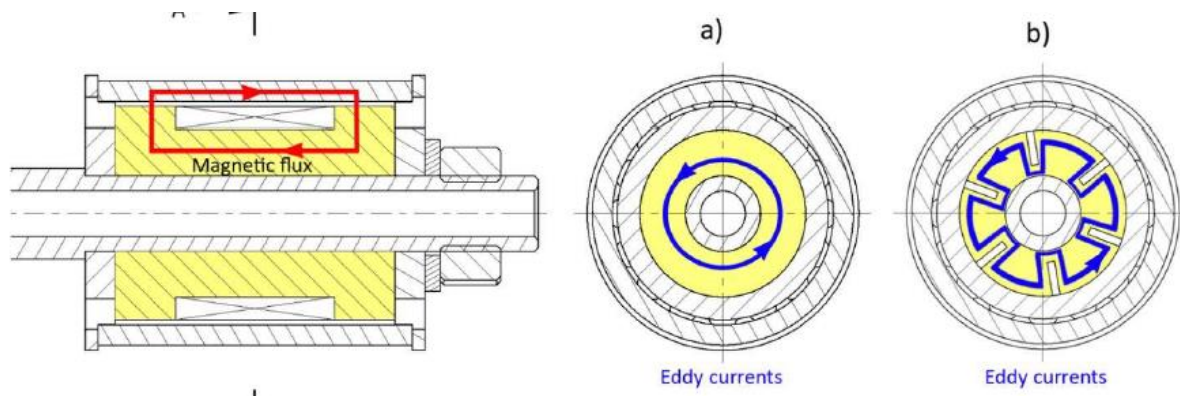


Obr. 2 - 49 Odezva magnetického pole na měrném elektrickém odporu mag. obvodu [58]

Vířivé proudy – Tvarový přístup

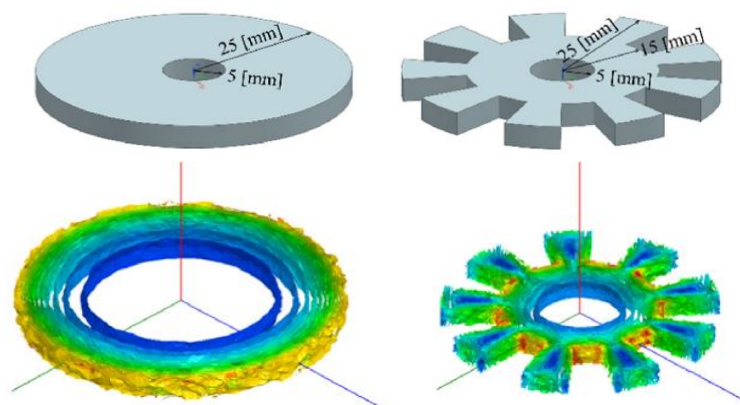
Pomocí tvarového přístupu například drážkováním cívky MR tlumiče dojde k vytvoření mezer. Tím se navýší trasa, kterou musí vířivé proudy urazit, což vede k důsledku jejich snížení a tím i zrychlení náběhu magnetické indukce jakožto největší součástí odezvy tlumící síly. Tímto přístupem se v poslední době zabíralo několik výzkumných skupin.

Tvarovým přístupem lze výrazně snížit časovou odezvu magnetické indukce, možný přístup lze vidět na obr. 2-50 [59]. Je zde zobrazen jednak boční řez a směr magnetického toku dále také výsledný směr vířivých proudů před (a) a po drážkování (b).



Obr. 2 - 50 Tvarový přístup ke konstrukci jádra cívky, z disertační práce [59]

Výsledky simulací vířivých proudů obr. 2-51 (a) společně se změnou geometrie (b) je prezentován také v článku [57]. Lze si všimnout rozdílného rozložení a velikosti proudů v magnetických simulacích pro jednotlivé varianty. Autor uvádí snížení o 80%.



Obr. 2 - 51 Simulace rozložení vířivých proudů a jejich geometrie [57]

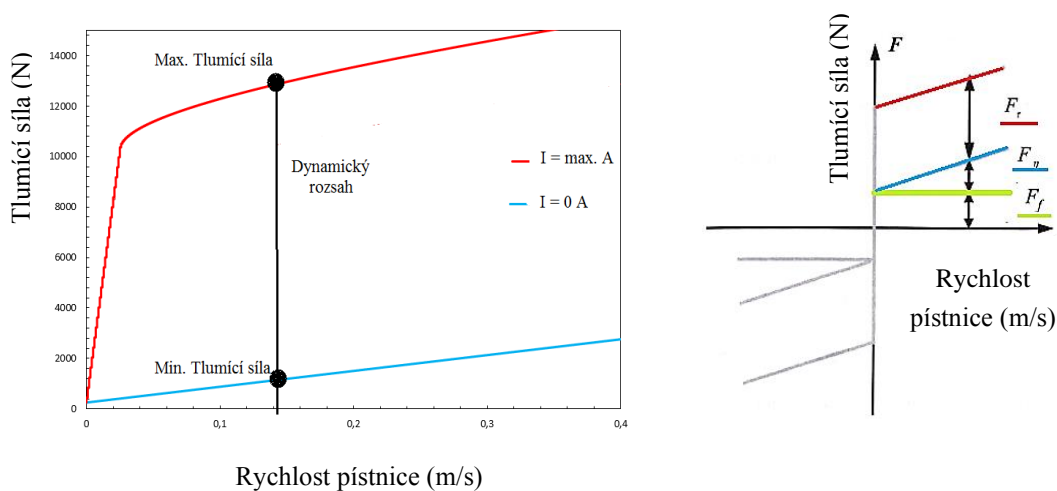
Tvarový přístup lze realizovat také využitím 3D tisku, tomu je vzhledem k dílčímu cíli a poměrně značné složitosti věnovaná kapitola 2.6 rešeršní analýzy. Samotný návrh je v kapitole 5.4.

Řídicí systém – budící proud

Pro efektivní odezvu je naprosto klíčový i řídicí systém a algoritmus. Diplomová práce se touto problematikou ovšem nezabývá, tudíž jsou zde pouze zmíněny nejdůležitější informace. Indukčnost cívky způsobuje nenulovou časovou odezvu budícího proudu. Tuto odezvu lze snížit použitím vyššího vstupního napětí (několikanásobně větší než to, které vychází z Ohmova zákona). Yang ve své práci uvádí použití proudového řízení, kdy se odezva z původních 300 ms sníží na 60 ms [60]. Tento postup je ve vylepšení formě použit i při návrhu MR tlumiče [55], kde značně zrychluje odezvu tlumiče až na hodnotu 4 ms.

2.4.3 Dynamický rozsah Magnetoreologického tlumiče

Obecně lze tlumící složky v MR tlumiči rozdělit na kontrolované a nekontrolované F - v charakteristika a rozdělení v detailu na obr. 2-52. Kontrolovaná složka tlumící síly (červeně) je dána velikostí magnetického pole a řetězením části (MR efektem), tu lze měnit vstupním proudem na cívku. Druhá část je nekontrolovatelná ta se skládá z třecích sil (zeleně), viskózního tření (modře) [46]. Této tlumící síly by se tedy mělo dosahovat při nulovém vstupním proudu. Je to tedy minimální tlumící síla. Dle konstrukce a požadavků na minimální tlumící sílu ji lze upravovat. Snižovat min. tlumící sílu lze zvětšením štěrbin, zlepšením třecích ploch, vytvořením nového otvoru. Zvětšovat min. sílu například přidáním permanentního magnetu do konstrukce MR tlumiče (fail-safe řešení).



Obr. 2- 52 F - v charakteristika; vpravo rozdělení tlumících sil v MR tlumiči [46]

Dynamický rozsah je tedy výsledek maximální tlumící síly děleno minimální tlumící síly při dané rychlosti pístnice. Jena z výhod je právě velký dynamický rozsah MR tlumičů.

2.5 Tvarový přístup k návrhu jádra pomocí technologie 3D tisku metodou SLM

Ačkoliv je metoda výroby drážek pomocí drátořezu jednoduchá je extrémně drahá a existuje pouze omezený počet efektivních návrhů drážek. Je také nutné po vytvoření drážek jejich zaplnění hmotnou (mag. neaktivní, otěru odolnou) tak aby se do těchto míst nedostala MR kapalina a tím efekt snižování vířivých proudů nepotlačila. Tento proces je časově poměrně náročný viz kap. 5.2 zalévání.

Jako **alternativa drážkování** se nabízí možnost využití výroby součástí pomocí **aditivních technologií**. Vzhledem k velkému počtu aditivních technologií výroby je zvolen (k přihlídnutí z dřívějším zkušenostem a množstvím publikací) 3D tisku pomocí **technologie SLM** (Selective Laser melting).

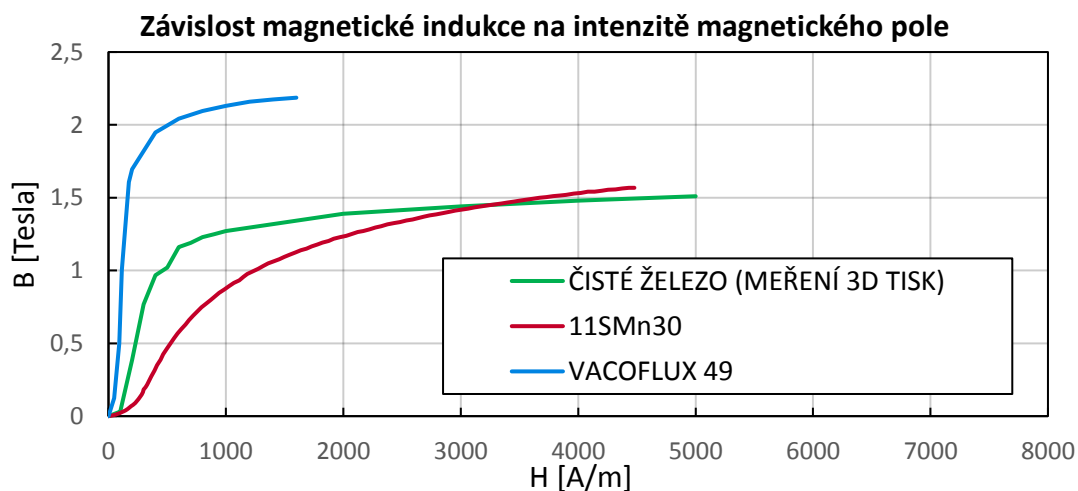
Technologie SLM využívá vstupního materiálu ve formě prášku, který je postupně nanášen ve vrstvách na pracovní platformu (v interní atmosféře). U každé vrstvy dochází jednotlivě k tavení pomocí laseru, ten postupně vrstvu po vrstvě vytváří 3D model součástí podle vstupní geometrie. Časová a ekonomická náročnost výroby je vyvážena složitými tvary, jež lze vyrábět. Dle komplexnosti vyráběného tvaru jsou použity podpory, které slouží také k lepšímu odvodu tepla ze součástí (viz obr. 2-55). U 3D tisku lze nastavovat celou řadu parametru, přes výkon laseru, skenovací rychlost, popřípadě směr tisku, tyto parametry mají vliv na vlastnosti výtisku. 3D tiskem lze vhodněji tvarovat součásti magnetického obvodu tak aby byly vířivé proudy co nejvíce potlačeny (výborná časová odezva), dochází také ke snížení hmotnosti. U velikosti indukce záleží na struktuře (objemu) součástí v oblasti měření. Je zřejmé, že 3D tisk je technologicky mnohem složitější a z podstaty věci má mnoho nevýhod: omezené množství použitelných materiálů, dlouhá výroba, mechanické a pevnostní vlastnosti. Jedná se o zajímavý alternativní přístup k řešení, který umožňuje poměrně složité tvarování součástí magnetického obvodu MR tlumiče.

Vzhledem k složitosti této problematiky se **dílčí cíl zaměřuje primárně na návrh geometrie strukturovaného magnetického obvodu** s využitím přístupu popsaného v patentu [61]. Návrh se tedy nezabývá řešením technologie výroby a při vytváření geometrie jsou brány v potaz pravidla pro 3D tisknuté součásti ale nejedná se o navrhování podpor, stavění na tisknuté platformě nebo hlubších úprav vzhledem k technologii výroby. Materiál je volen tak aby byl vhodný pro SLM technologii. Klíčové parametry materiálu do simulací ($B-H$, el. vodivost). V následující kapitole jsou představeny materiály vhodné pro magnetické obvody, které lze vyrábět 3D tiskem metodou SLM, dále jsou uvedeny magnetického obvodu, kde je využita technologie 3D tisku a strukturovaného návrhu.

2.5.1 Materiály vyráběné technologií SLM vhodné pro magnetické obvody

Jedním z omezení technologie 3D tisku pro magnetické obvody je poměrně nízký počet použitelných materiálů. Pro materiál platí požadavky popsány v kap. 2.5 (materiálový přístup) navíc musí být zpracovatelné pomocí technologie SLM. Ideální materiál by měl mít vysoké hodnoty: magnetické permeability, míry nasycení a elektrické rezistivity naproti tomu nízkou zbytkovou magnetizaci a vhodné mechanické vlastnosti. Je jasné, že při volbě materiálu je třeba zvolit určitý kompromis vzhledem k výše zmíněným požadavkům. Součásti vyrobené 3D tiskem mají často problém se zvýšenou pórovitostí, křehkostí a špatnou obrobitelností. Jako vhodné materiály se jeví magneticky měkké materiály. Mezi ně se řadí čisté železo, popřípadě jeho slitiny s niklem (Fe-Ni), křemíkem (Fe-Si) nebo s kobaltem (Fe-Co). Publikace sporadicky uvádí konkrétní hodnoty, které jsou potřebné pro výpočty ($B-H$, elektrickou vodivost). Navíc jsou tyto hodnoty závislé na parametrech, strategii výroby a samozřejmě přesné složení prášku. Často jsou uváděny i tepelné zpracování výtisku pro zlepšení magnetických vlastností.

$B-H$ křivky vybraných materiálu jsou na obr.5-53. Jedná se o čisté železo použité v DP 2018 [62], křivka je vytvořena z dat získaných z měření reálně vytištěného toroidu. Je to jediný materiál, který reálně jde tisknout na 3D tiskem (SLM) a má vhodné vlastnosti pro mag. obvody. Jak lze vidět velikost mag. nasycení je nižší než u 11SMn30 a také k němu dojde dříve tudíž při menší hodnotě intenzity magnetického pole (jiný průběh křivky). Elektrické vodivost je zhruba dvakrát větší než u mat. 11SMn30, lze tedy očekávat větší tvorbu vířivých proudů i časovou odezvu. Další materiál je Vacoflux [63] což je slitina Fe-Co použita v disertační práci jako možný budoucí materiál pro SLM tištěnou součást magnetického obvodu [64]. Má zhruba 4x nižší el. vodivost než čisté železo (2x nižší než 11SMn30) a dvakrát vyšší hladinu nasycení než 11SMn30. Lze tedy předpokládat že dojde k navýšení magnetické indukce, a přitom i snížení její časové odezvy (záleží na tvaru mag. obvodu).

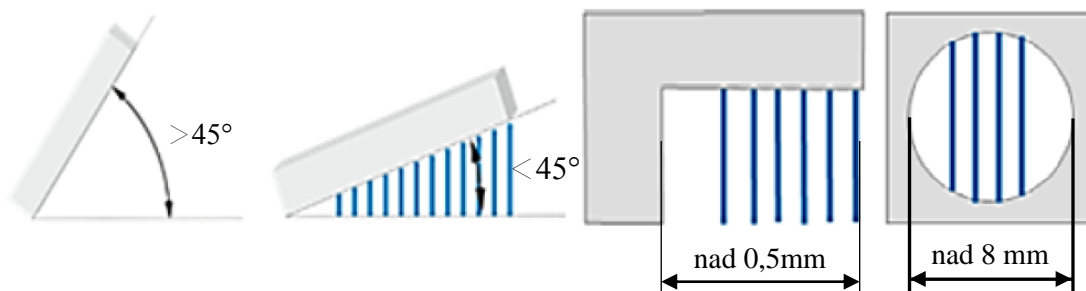


Obr. 2- 53 $B-H$ mat. použitých v kap. 2.6; tisknout lze pouze čisté železo; ostatní pro porovnání

2.5.2 Přístup k návrhu geometrie tisknutých součástí

Při zaměření se pouze na návrh geometrie součástí je třeba se řídit určitými pravidly a omezeními. Tento přístup má za cíl umožnit technologicky výrobu součástí a také snížit nežádoucí vlastnosti výtisku např: smršťení, pórovitosti, pnutí a kvalitu povrchu. 3D tisk je technologie, která umožňuje vytisknout téměř libovolný tvar, vzhledem k problematice řešení je ovšem vhodné, aby bylo použito co nejméně podpor. Tvarování součástí bude primárně souviset se snížením vířivých proudů v magnetickém obvodu. K tomu bude geometrie respektovat zásady výroby tak aby bylo minimalizováno použití podpor.

Oblasti, kde je potřeba podpory kvůli geometrii použít jsou zobrazeny na obr. 2-54 jedná se o plochy, které mají úhel vzhledem k platformě menší než 45° . Části výtisku, které jsou převísle nad vzdálenost 0,5 mm a díry s rovnoběžnou osou vůči stavební platformě s průměrem větším než 8 mm[65]. Je třeba také dbát na minimální tloušťku a poměr mezi rozměry konkrétní části součástí. Např. úzké a dlouhé součásti nejsou vhodné k tisku vzhledem ke stabilitě a odvodu tepla (nutnost použití podpor a výztuží).



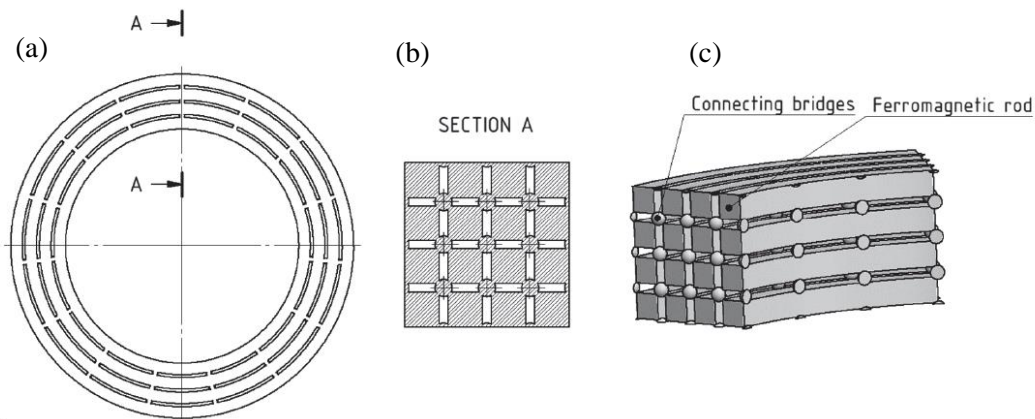
Obr. 2- 54 Obecná pravidla použití podpor u 3D tisku [65];upraveno

Podpory se používají také k zajištění výtisku proti oddělení od stavební platformy a k lepšímu odvodu tepla. Odvod tepla souvisí hlavně s objemem materiálu v dané oblasti a parametry tisku.

2.5.3 Využití 3D technologie u návrhu magnetického obvodu

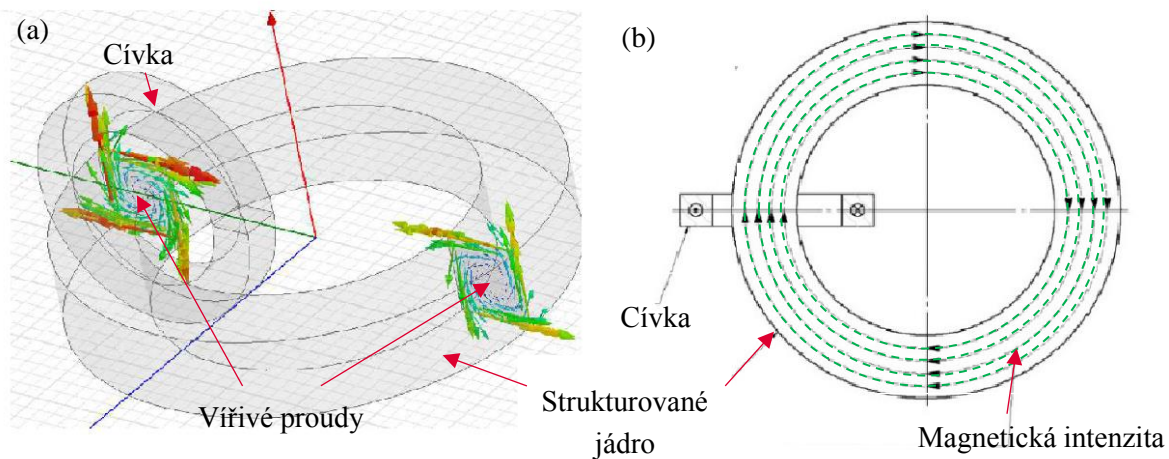
Vzhledem k tomu, že problematika 3D tisku je poměrně novým oborem, a navíc v kombinaci s použitím 3D pro magnetické obvody je počet použitelných publikací nízký. Nebyly nalezeny publikace nebo výzkumní činnosti zabývající se touto problematikou tak aby byla relevantní k potřebám řešení. Z toho důvodu je tato část rešerše omezena na výsledky z ÚK v posledních letech. Pozornost je soustředěna na výsledky diplomové práce z roku 2018 [62], která se zabývá návrhem písní skupiny MR tlumiče s využitím SLM technologie. V této práci bylo použito čisté železo jako materiál jádra MR tlumiče vyrobeného technologií SLM. Výsledky této diplomové práce jsou také popsány v článku [66] společně s patentem [61] pro strukturovaný návrh jádra magnetického obvodu.

Na obr. 2-55 je zobrazen patent strukturovaného toroidu [61]. Toroid se skládá z prutu, které mají stejný směr jako magnetická intenzita v ustáleném stavu. Průřez prutů je čtvercový a jednotlivé pruty jsou spojeny „můstky“. Snaha docílit co nejmenšího odporu proti toku mag. pole zatím co dochází k zvětšení odporu vůči toku vířivých proudů. Změny prostředí mezi pruty a navyšování dráhy, kterou musí vířivé proudy urazit (viz kap. 2.5.3).



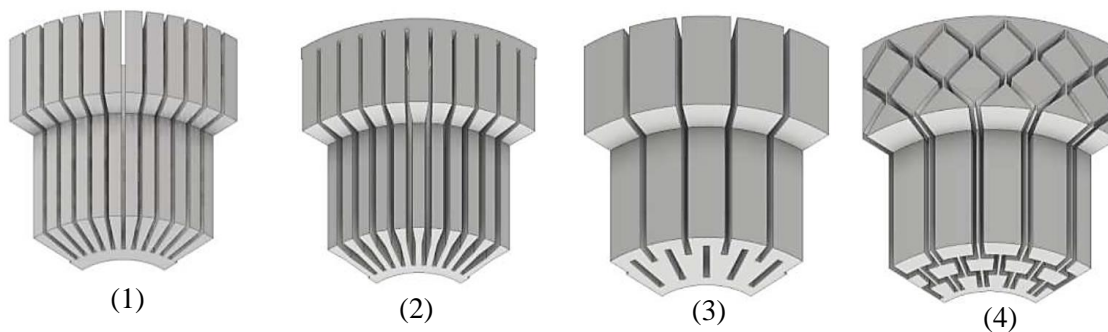
Obr. 2- 55 Strukturovaný toroid [61] snižující vliv vířivých proudů: (a) horní pohled; (b) řez; (c) 3D pohled

Na obrázku obr.2-56 (b) je zobrazen horní pohled na strukturovaný toroid (jádro magnetického obvodu) s cívkou, zelenou čárkovanou čarou jsou zobrazeny směry magnetické intenzity [66]. Na obr.2-56 (a) je zobrazena simulace tohoto uspořádání. Konkrétně se jedná o zobrazení indukovaných vířivých proudů v rovině kolmé na procházející magnetickou intenzitu (tam se tvoří viz o tvorbě vířivých proudů v kap. 2.5.3).



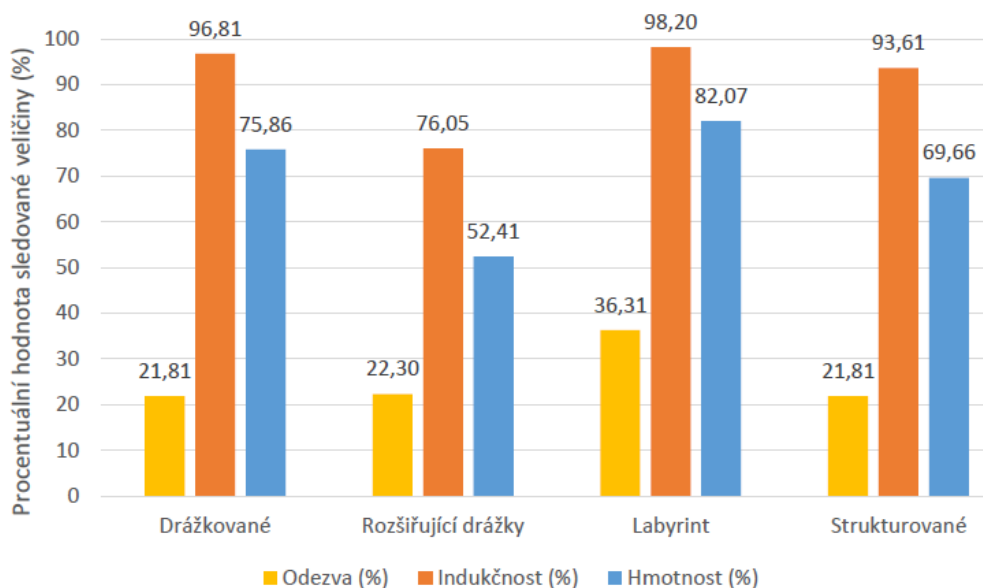
Obr. 2- 56 Vizualizace vířivých proudů v toroidním strukturovaném jádře [66]

Návrhem mag. obvodu MR tlumiče s využitím technologie SLM řešila diplomová práce z roku 2018 [62]. Obr. 2-57 popisuje čtyři varianty jádra MR tlumiče využívající symetrii vůči ose rotace a také poloviční symetrii (zobrazena 1/8 jádra). První 3D model popisuje návrh jádra z DP z roku 2017[58], použité podobné rozměry písní skupiny a tlumiče. Další koncepce jsou už z DP [62] a jedná se o variantu zužujících se drážek (2), následuje jádro typu labyrint (3), a nakonec nejpodstatnější varianta strukturovaného jádra (4).



Obr. 2- 57 3D modely jádra MR tlumiče využívající 1/8 symetrii; (1) jednoduché drážky [58]; (2) zužující se drážky [62]; (3) drážky typu labyrint [62]; (4) strukturované jádro [62] (obrázky upraveny)

Na obr. 5-58 jsou zobrazeny výsledky simulací těchto variant, jsou vyjádřeny procentuálně vůči původnímu plnému jádru (není zobrazeno). Graf porovnává hodnoty hmotnosti, odezvy a magnetické indukce. **Je zřejmé, že úpravy drážek nejsou efektivní v oblasti časové odezvy. Tam je nejlepší odezva při použití jednoduchých drážek nebo právě strukturované varianty.** V oblasti mag. indukce jsou hodnoty závislé na objemu magneticky aktivního materiálu v místě měření. Dle grafu lze pozorovat malé změny velikosti magnetické indukce [62].



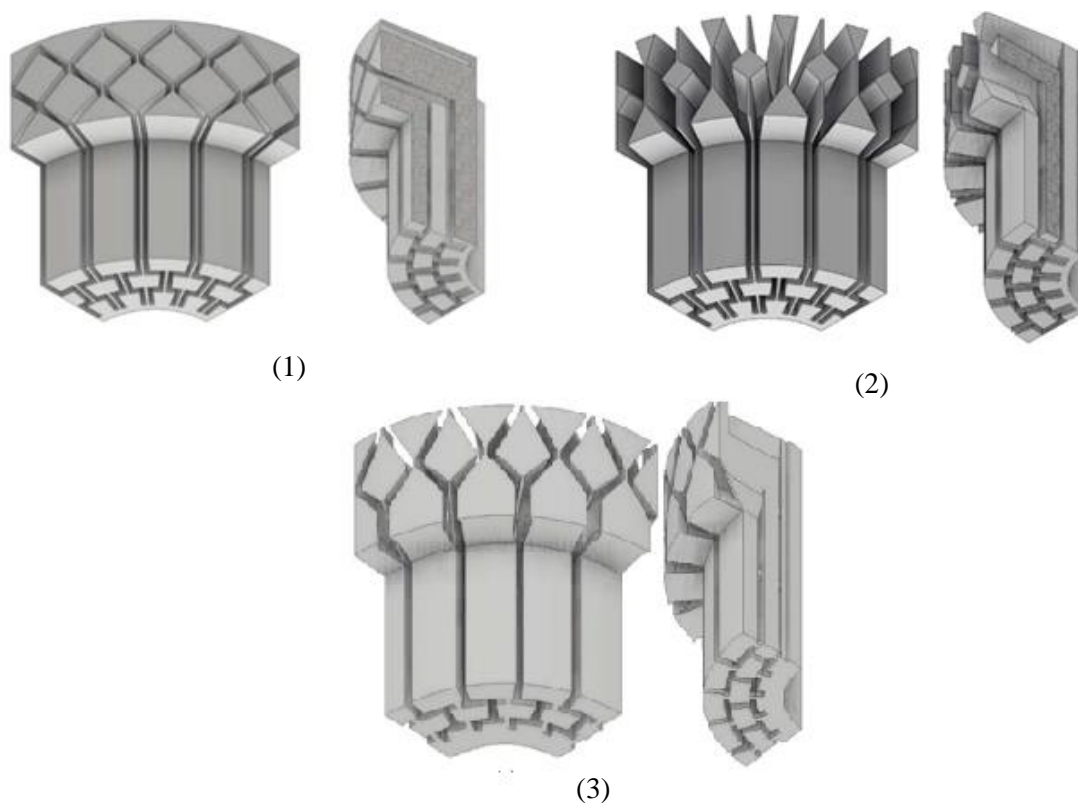
Obr. 2- 58 Srovnání různých variant jádra pístu MR tlumiče vůči plnému jádru [62]

Strukturovaná varianta z obr.2-57 (4) využívá pruty ve směru intenzity magnetického pole stejně jako patent[61]. Tyto pruty mají proměnlivé rozměry, tudíž rozdílný průřez. Mezera mezi pruty má konstantní tloušťkou 0,3 mm viz řez na obr.2-59 (1). Na obr. 2-58 lze vidět porovnání této varianty s ostatními, dosahuje velmi dobrých hodnot ve všech porovnávaných parametrech. Mírně nižší odezvu vůči drážkované variantě. Rozdílný průřez má jednu nevýhodu ve formě max. indukčního toku, ten je totiž v části s nejmenším průřezem. [62]

Na obr. 2-59 jsou zobrazeny další dvě strukturovaná jádra (2,3), vycházející z dříve zmíněné varianty ta je zde zobrazená také (1) [62].

Varianta (2) pracuje s úpravou rozměrů prutů, a to tak aby jejich průřez byl přibližně konstantní po celé délce. Dle autora by tento návrh měl dosahovat stejné indukce při snížení hmotnosti jádra. Jak lze vidět na povrchu jsou velké mezery mezi jednotlivými pruty jádra což vede k rozdílné magnetické indukci ve štěrbině (značně nežádoucí prvek).

Další varianta (3) spočívala ve vyrovnání indukce ve štěrbině, čehož se dosáhlo zvětšením průřezů prutů na povrchu. Geometrie byla navržena tak aby se průřez měnil rovnoměrně. Dle uvedených výsledků došlo k rovnoměrnějšímu rozložení magnetické indukce.

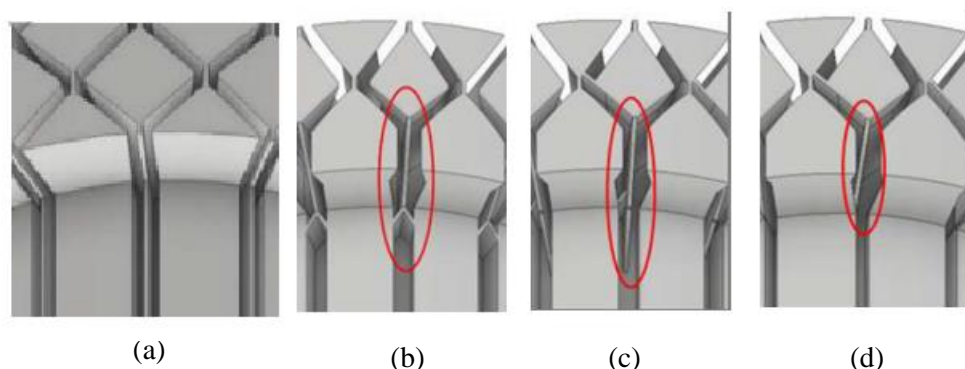


Obr. 2- 59 Jednotlivé varianty strukturovaného návrhu jádra MR tlumiče [66]

Poměrně problematická oblast při návrhu strukturovaného obvodu spočívá ve spojení jednotlivých prutů. Toto spojení je nutné z důvodu vyrobitelnosti, celistvosti a stability jádra. Tyto spoje ovšem zákonitě umožní pohyb vířivých proudů přes jednotlivé pruty, čímž zvýší časovou odezvu. Jde tedy o to, aby těchto můstků (přechodů, podpor, výztuh) mezi jednotlivými pruty byl minimální počet a jejich umístění a geometrie byla co nejefektivnější.

V práci [62] jsou tyto prvky nejdříve realizovány pomocí svislých tenkých stěn (umístěny mezi jednotlivými pruty). Tyto části strukturovaného jádra jsou technologicky problematické, pravděpodobně by docházelo ke špatnému odvodu tepla což by mohlo způsobit deformování. Postupné úpravy těchto prvků lze vidět na obr. 2-60. Ten zobrazuje detail strukturovaného jádra a v červeném kroužku je znázorněna problematická oblast mezi dvěma drážkami a její následné úpravy.

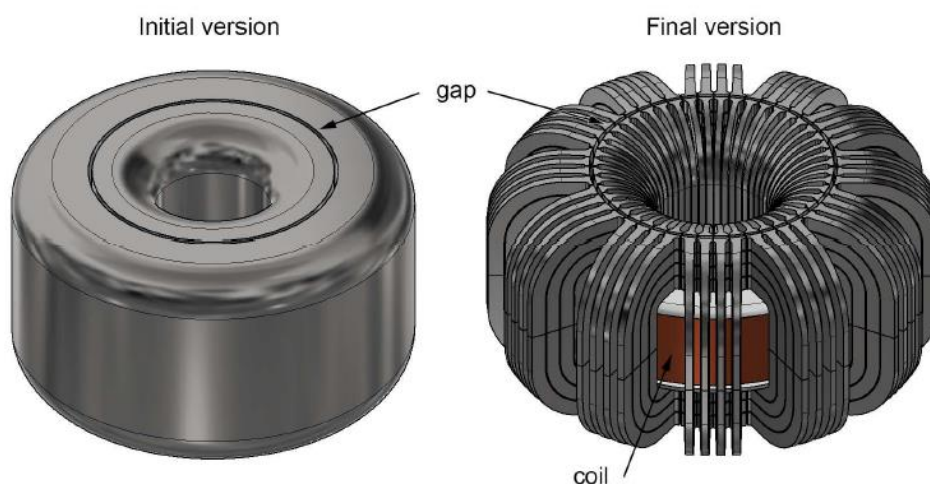
U prvního přístupu obr. 2-60 (b) dojde k zmenšení velikosti této stěny a spojení ke dvěma vedlejším prutům. To vede ovšem k navýšení časové odezvy (z 0,7 ms na 1 ms). Druhý přístup odděluje jedno připojení na prut (c) a poslední přístup (d) přímo napojuje stěnu pod úhlem na vedlejší prut. Varianty b-d postupně dosahují nižších časové odezvy [62].



Obr. 2- 60 Úprava tenké stěny mezi pruty: varianta tenké stěny 1 až 3 [62]

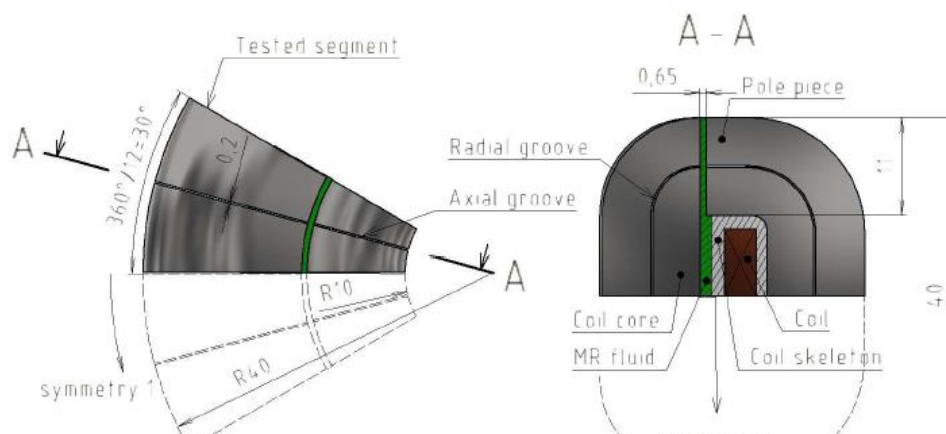
Změna geometrie vnitřní a vnějších tenkých stěn související s vyrobiteľností 3D tiskem, technologií SLM způsobuje nárůst v časové odezvě magnetického pole dle simulací zhruba o 25 %. Šířka mezi pruty je 0,3 ž 0,5 mm podle varianty [62].

Další práce, které se zabývá návrhem mag. obvodu je disertační práce [64]. Pro jádro používá mat. Vacoflux 50. Obrázek magnetického obvodu, kde je použit tvarový přístup je zobrazen na obr. 2-61, jedná se o původní verzi vlevo a upravenou vpravo.



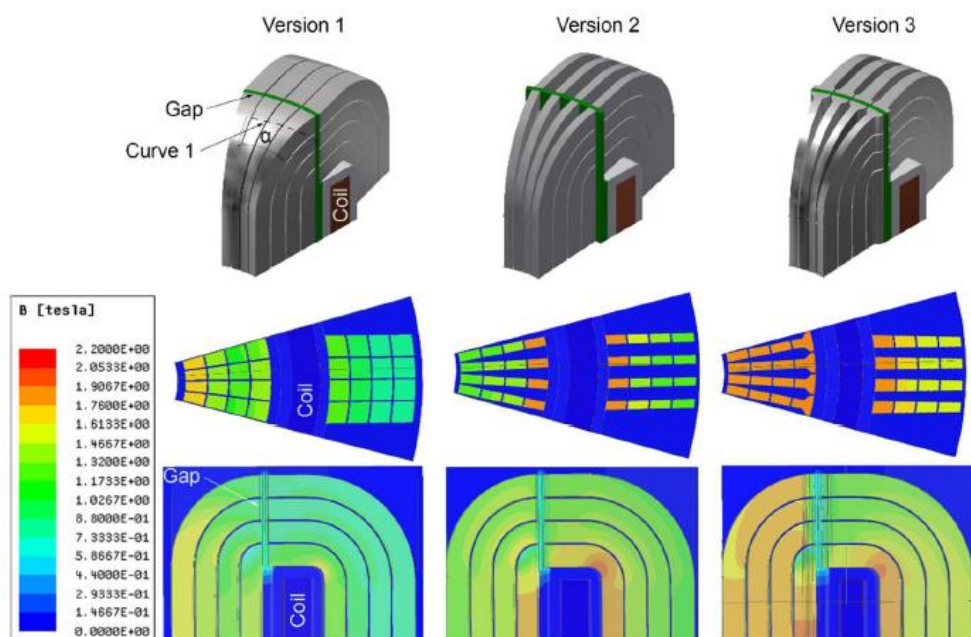
Obr. 2- 61 Původní a konečná verze magnetického obvodu [64]

Při navrhování obvodu je použita symetrie kolem osy a půlená symetrie. Využívá se dělení jádra v radiálním i axiálním směru geometrie. Výsek pro magnetické simulace na obr. 2-62. S narůstajícím počtem drážek dochází k snížení časové odezvy a snížení mag. indukce, to platí jak pro radiální, tak pro axiální drážky. Dle simulací lze říct, že při stejných parametrech jsou výsledky časové odezvy stejné pro varianty: 20x0 nebo 12x2 (axiální x radiální drážky). Nahrazení axiálních drážek radiálními pomáhá snížit riziko nasycení [64].



Obr. 2- 62 Drážkovaný magnetický obvod 24x2; geometrie využívající symetrii [64]

Drážky v magnetickém obvodu vytváří samostatné pruty, jejichž průřez není konstantní. Takže ani hustota magnetické indukce (nevýhodné vzhledem k hmotnosti obvodu). Proto jsou navrženy změny v drážkování, které ovlivňují tloušťku jednotlivých prutu (vrstev) viz obr. 2-63. Je zde zobrazena 3D geometrie a poté rozložení hustoty magnetické indukce z vrchního a spodního pohledu (jedná se o řezy v modelu) [64]. U varianty 1, kde jsou drážky rovnoběžné je největší B na nízkém průměru jádra, kvůli nízkému průřezu prutu. U drážek varianty 2 s konstantním průřezem je největší hustota magnetické indukce nejbližší k cívice, to ovlivňuje indukci ve štěrbině (je nehomogenní) a tím pádem i tlumící sílu. Kombinací varianty 1 a varianty 2 dojde ke snížení hmotnosti jádra ale také k podobné magnetické indukci ve štěrbině viz verze 3. V práci se zmiňuje část, kde je napsáno, že finální magnetická obvodu bude vyroben pomocí 3D tisku metodou SLM[64]. Ovšem v současné době materiál Vacoflux 50 tisknout nelze. Práce je ovšem velmi přínosná v oblasti tvarového návrh magnetického obvodu MR tlumiče.



Obr. 2- 63 Nasycení rozdílně tvarovaných magnetických obvodu; $I = 2 \text{ A}$, $t = 0,05 \text{ ms}$ [64]

3 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Analýza problému

Problematika řešená v diplomové práci vychází z požadavku navyšování rychlostních limitů kolejových vozidel a snahy zachovat nebo snížit opotřebení v dílčích částech konstrukce podvozků kolejových vozidel. Tyto požadavky mimo jiné vedou k potřebné rozdílné tlumicí síle při vysokých rychlostech v přímé trati a při průjezdu obloukem. Současné pasivní tlumiče totiž neumožňují změnu tlumicí síly v průběhu provozu a tím zmíněné požadavky nespĺňují. K řešení tohoto problému je zapotřebí použití tlumičů s proměnlivou tlumicí charakteristikou, které by umožňovali nastavení požadované tlumicí síly v dané oblasti, tak aby co nejlépe vyhovovala okolnostem provozu. Do této kategorie tlumičů se řadí magnetoreologické tlumiče. Klíčovým parametrem MR tlumičů s rychlým S/A řízením (snímač, řídicí jednotka) je časová odezva tlumicí síly, čím nižší je tato odezva, tím efektivněji dochází k potlačování nežádoucích vibrací.

3.2 Analýza a zhodnocení rešerše

Diplomová práce se zabývá návrhem rychlého MR tlumiče vrtivých kmitů pro podvozek kolejového vozidla. Tlumiče vrtivých kmitů jsou součástí sekundárního vypružení mezi podvozkem a skříní kolejového vozidla. V naprosté většině podvozků jsou tyto tlumiče pasivní, a tudíž mají jednu tlumicí charakteristiku. S ohledem na soudobé požadavky v oblasti navyšování rychlostí a snižování opotřebení, nejsou tyto řešení zcela dostačující. Lze říci, že u současných tlumičů je tlumicí charakteristika nastavena jako kompromis mezi dvěma odlišnými oblastmi použití, a to mezi průjezdem oblouku a rychlou jízdou v přímé trati.

Rozdílné nároky na tlumicí sílu souvisí s pohybem vozidla vysokou rychlostí v přímé trati (stabilita) a průjezdem oblouku (opotřebení). Z rešerše vyplývá, že nestabilní vrtění, které způsobuje nežádoucí natáčení skříně a může vést až k vykolejení, vzniká při překročení určité rychlosti. Tato kritická rychlost je ovlivněna parametry vozidla a liší se i pro totožné vozy v soupravě (závisí například na řazení v soupravě). Maximální zjištěná frekvence vrtění je 8 Hz. Při průjezdu obloukem je ideální jiné nastavení vypružení podvozku, a to s co nejnižší tlumicí silou, tak aby byl kladen minimální odpor natočení skříně vůči podvozku. Tudíž pro zlepšování jízdních vlastností a navyšování rychlostních limitů je vhodné využití tlumiče s proměnnou tlumicí charakteristikou, tlumicí síla není závislá pouze na rychlosti pístitnice, ale také například na vstupním proudu nebo poloze ventilu.

Existuje několik systémů vypružení, které tuto změnu umožňují: semi-aktivní, aktivní a adaptivní. Aktivní systémy obecně dosahují nejlepších výsledků v oblasti vypružení, ovšem jejich konstrukce je zpravidla složitější a dražší. Tyto systémy obsahují aktuátor, který vyžaduje značný zdroj elektrické energie. Složitost systému dále souvisí s jeho spolehlivostí a náročností údržby. Naproti tomu semi-aktivní systémy se jeví jako vhodnější způsob na dosažení požadavků pro soudobé tlumiče vrtění, mají dostatečné tlumicí parametry s vysokým dynamickým rozsahem, jsou zpravidla jednodušší a levnější. Mezi tyto systémy patří také tlumiče využívající magnetoreologickou kapalinu, tzv. MR tlumiče.

Značná výhoda MR tlumičů tkví v jednoduchosti konstrukce, rychle odezvě, nízkým energetickým požadavkům a širokému dynamickému rozsahu, což umožňuje, s využitím snímačů a systémů řízení, nastavení ideální tlumicí síly. Hlavní problémy, které při konstrukci MR tlumiče vznikají, souvisí s jeho časovou odezvou neboli rychlostí změny působící síly. Tato odezva podstatně ovlivňuje efektivnost vypružení. Zpoždění mezi vstupním proudem a změnou síly vzniká primárně vlivem odezvy magnetického pole, odezvou samotného řídicího systému a celkovou odezvou MR kapaliny (řetězení částic).

Odezva magnetického pole, jakožto největší složka, je ovlivněna tvorbou vířivých proudů. Ty působí proti počátečnímu magnetickému poli, a tím ho snižují. Pro snížení času náběhu magnetického pole, a tím pádem i snížení celkové časové odezvy, lze použít vhodné tvarování jádra a pláště – například drážkováním vybraných součástí, nebo jejich výrobou za pomoci technologie 3D tisku. Princip tvarového přístupu spočívá v navyšování vzdálenosti, kterou musí vířivé proudy urazit, čímž dochází k jejich snížení.

Další možností, jak snížit časovou odezvu MR tlumiče, je použití materiálu s vysokou magnetickou permeabilitou, ovšem s nízkou elektrickou vodivostí. Je potřeba vzít v úvahu nutné mechanické vlastnosti, které tento materiál – a z něho vytvořená konstrukce – musí mít: především dlouhou životnost a spolehlivost. Jako nejvhodnější se jeví kompozitní materiály.

MR tlumiče, jakožto poměrně nová technologie, ještě nemají široké uplatnění v oblasti vypružení kolejových vozidel. Lze shrnout, že se vědecké týmy téměř výhradně zabývají použitím MR tlumiče jako součástí sekundárního tlumiče v příčném směru. Tato oblast použití je dána největším vlivem na kritickou rychlost.

Jako alternativa pro MR tlumiče se nabízí semi-aktivní tlumič s elektromagnetickým řízeným ventilem (solenoidové tlumiče), ty už v dnešní době dosahují dostačující rychlosti odezvy i tlumicí síly, jsou ovšem konstrukčně složitější (elektromechanické ovládací prvky, pohyblivé díly). Dalším řešením je použití některého z aktivních systému, při jejich vhodném použití se vytrácí potřeba použití tlumiče vrtění, např. ASW, DSW (kap. 2.4.3). Tyto řešení mají ovšem význam především při navrhování nových konstrukcí kolejových vozidel.

3.3 Cíl práce

Použitím tlumiče vrtivých kmitů s proměnlivou tlumicí charakteristikou dojde k splnění novým požadavku na vypružení kolejových vozidel. Jako konstrukce, která tuto změnu umožňuje je zvolena technologie s magnetoreologickou kapalinou, tedy MR tlumič. Klíčový prvek MR tlumičů, který ovlivňuje jejich efektivnost vypružení je jejich časová odezva. Ta je především ovlivněna tvorbou vířivých proudů, které lze buď tvarovým nebo materiálovým přístupem značně snížit a tím dosáhnout požadované rychlé odezvy.

Hlavním cílem diplomové práce je tedy konstrukční řešení MR tlumiče vrtění s rychlou odezvou pro použití do podvozku kolejová vozidla.

Vzhledem k maximální frekvenci 8 Hz vrtivých kmitů (eliminovaný nežádoucí pohyb). Je maximální celková časová odezva MR tlumiče vrtění zvolena na 12,5 ms (desetkrát rychlejší než maximální frekvence). **Pro odezvu magnetického pole jakožto největší části celkové odezvy je zvolena hodnota 7,5 ms.** K dosažení rychlé odezvy je použita kombinace tvarového a materiálového přístupu k navrhnutí jádra a pláště MR tlumiče. K dosažení optimálního návrhu je použito prostředí ANSYS MAXWELL a jeho magnetostatické a magnetické transientní analýzy. V koncepčním řešení je použita 2D geometrie a v konstrukčním 3D geometrie.

Návrh MR tlumiče je ovlivněn jeho předchozí pomalou verzí, ze které konstrukce vychází. Tím pádem jsou omezeny zástavbové rozměry pístitní skupiny (obr. 4.1 a 4.2).

Dílčí cíle diplomové práce:

- vytvoření magnetostatických a transientních simulačních modelů v 2D i 3D geometrii,
- navrhnutí několika koncepčních variant uspořádání magnetoreologického ventilu s ohledem na krátkou časovou odezvu magnetického pole
- navrhnutí konstrukčního řešení a zjištění vlivu geometrie drážek na časovou odezvu magnetického pole
- výroba finální konstrukční varianty magnetoreologického ventilu (drážkování, zalití)
- návrh přípravků pro zalití drážek pláště a jádra MR tlumiče
- experimentální testování konstrukční varianty grafy: $B-I$, $F-v$ a časová odezva
- návrh strukturovaného magnetického obvodu magnetoreologického ventilu s krátkou časovou odezvou vyrobitelného za pomoci metody 3D kovového tisku,
- konstrukční úpravy tlumiče s ohledem na efektivní sériovou výrobu.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

V první části koncepčního řešení je uveden postup řešení vlastní realizace celé diplomové práce. Dále jsou zmíněny vstupní parametry pro návrh koncepčních variant magnetického obvodu, které vychází ze zadání diplomové práce a výsledků rešerše. Poté jsou uvedeny přístupy pro návrh magnetického obvodu a detailně popsány jednotlivé navržené koncepční varianty. Cílem této kapitoly je vybrat nejvhodnější geometrii magnetického obvodu, a to primárně v závislosti na časové odezvě náběhu magnetického pole. Svoji roli hraje samozřejmě také předpokládaná technologická náročnost výroby a cena řešení.

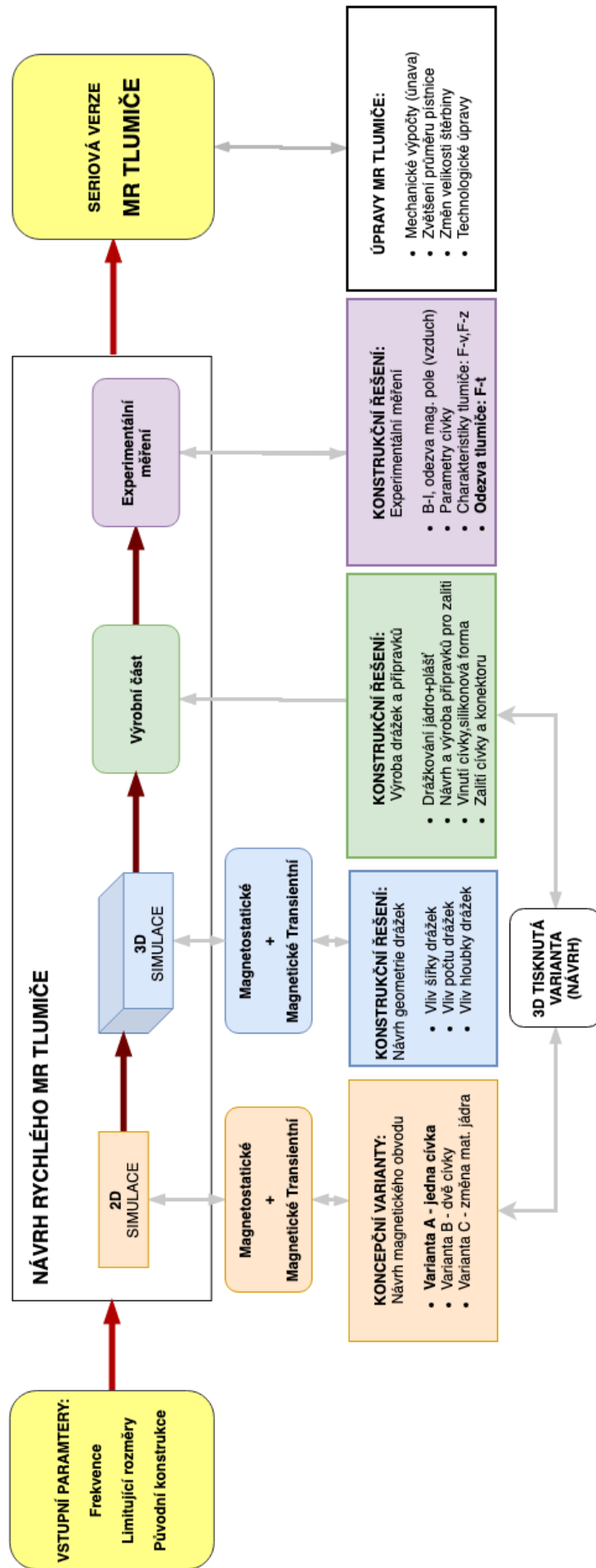
4.1 Postup řešení

V první fázi vlastní realizace jsou vytvořeny simulační analýzy a modely. Nejprve se jedná o magnetické simulace (statické, transientní) s 2D geometrií. Ty jednak slouží k vhodnému navrhnutí magnetického obvodu – tedy té části, která je v oblasti písní skupiny a určitým způsobem ovlivňuje (zesiluje, zeslabuje) výsledné mag. pole. V této části jsou zahrnuty 2D mag. simulace tří koncepčních řešení s rozdílným přístupem návrhu (tvarový, materiálový).

Pro vybrané nejvhodnější koncepční řešení jsou vytvořeny mag. simulace s 3D geometrií, což umožňuje zkoumání vlivu rozměru drážek (šířka, hloubka, počet) na časovou odezvu mag. pole. Nejvhodnější drážkování (počet, geometrie drážek) je vyrobeno pomocí elektroerozivního obrábění, neboli drátořezem. Drážkováno je jádro i plášť MR tlumiče. Drážky je nutné zalít dvojsložkovým plastem tak, aby se do nich nedostala MR kapalina, a také kvůli vytvoření izolační plochy mezi cívkou a jádrem. K tomuto účelu jsou vytvořeny zalévací přípravky pro zalití drážek. Následuje měření $B-I$ charakteristiky ve šterbině, a to na několika místech po obvodu. Dále následuje měření časové odezvy náběhu magnetického pole. Tyto měření jsou prováděné na vzduchu a slouží mimo jiné k ověření správnosti dříve provedených simulací. Nakonec je zalitá vrchní plocha navinuté cívky, k tomuto účelu je vytvořena silikonová forma. V další fázi řešení se rychlý MR tlumič testuje na pulsátoru. Jedná se o měření závislosti časové odezvy tlumící síly ($F-t$) při změně vstupního proudu cívky. Mimoto jsou vyhodnoceny rychlostní a zdvihové charakteristiky tlumiče a jeho dynamický rozsah. Tyto výsledky slouží k posuzování vhodného návrhu MR tlumiče. Celková časová odezva primárního náběhu tlumící síly by měla být nižší než 12,5 ms a odezva náběhu magnetického pole by měla být maximálně 7,5 ms (v rámci simulací).

Na základě všech dosažených výsledků dojde k návrhu strukturovaného jádra vyráběného pomocí technologie 3D tisku a k návrhu konstrukčních úprav MR tlumiče vhodnějšího pro sériovou výrobu. Blokové schéma řešení diplomové práce je zobrazeno v tab. 4-1.

Tab. 4- 1 Blokové schéma řešení diplomové práce



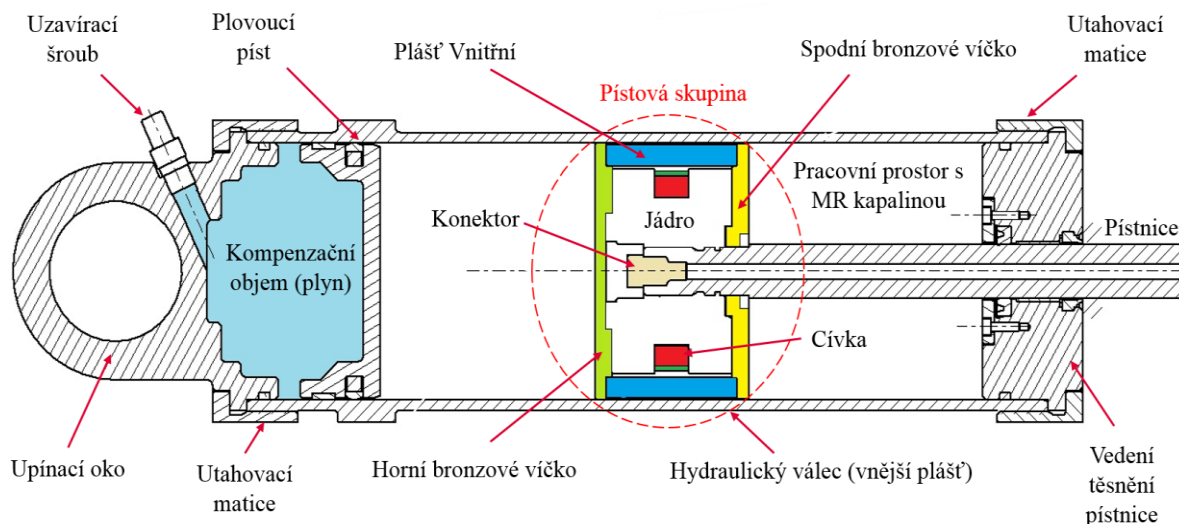
4.2 Vstupní parametry pro návrh koncepčních variant

Z rešerše vychází maximální frekvence vrtění **8 Hz**. Při ideálním řízení by měl tlumič dosahovat celkové odezvy tlumící síly maximálně **12,5 ms**, což odpovídá desetkrát rychlejší hodnotě, než je frekvence tlumeného pohybu. Celková odezva změny tlumící síly se skládá z několika částí, které ji ovlivňují. Jedná se o odezvu: řízení (náběh proudu), rychlostí řetězení částic, vzniklou zpožděním náběhu mag. pole vlivem vířivých proudů (největší část).

Z celkové odezvy MR tlumiče se při návrhu pracuje pouze s odezvou mag. pole, kterou lze jako jedinou odezvu efektivně ovlivňovat vhodným návrhem magnetického obvodu. K tomuto účelu je použito prostředí ANSYS Electronics Desktop 19.2, konkrétně program ANSYS MAXWELL a jeho magnetostatické a transientní magnetické analýzy.

Dle zkušeností z návrhu dřívějších konstrukcí MR tlumičů provedených na odboru diagnostiky ÚK a konzultací s vedoucím diplomové práce je **maximální časová odezva magnetického pole určena na: 7,5 ms** (snaha docílit nižší hodnoty). Tato hodnota byla zvolena s přihlédnutím k neznámým, jako je doba časové odezvy samotné MR kapaliny a problematika její stlačitelnosti, přesnost samotné magnetické analýzy a použitých materiálových vstupů ($B-H$, vodivost). Jedná se tedy o konzervativní hodnotu.

Tlumiče vrtění (tab. 2-1) pracují obecně v silovém rozsahu **10-20 kN**. Pracovní amplituda tlumičů vrtění je malá v oblasti vysokých tlumících sil (vysoká rychlost-přímá trať). Při průjezdu obloukem tlumič pracuje v celkovém rozsahu zdvihu vlivem natočení skříně vůči podvozku (nízké pístové rychlosti a tlumící síly). Obecně síla i amplituda závisí na typu a provedení podvozku (vzdálenost od středu otáčení atd.). U dané geometrie tlumiče zobrazené na obr.4.-1, z které návrh vychází, se předpokládá dostačující tlumící síla, a to na základě výsledků z měření F-v pomalého MR tlumiče. Zdvih je 140 mm.

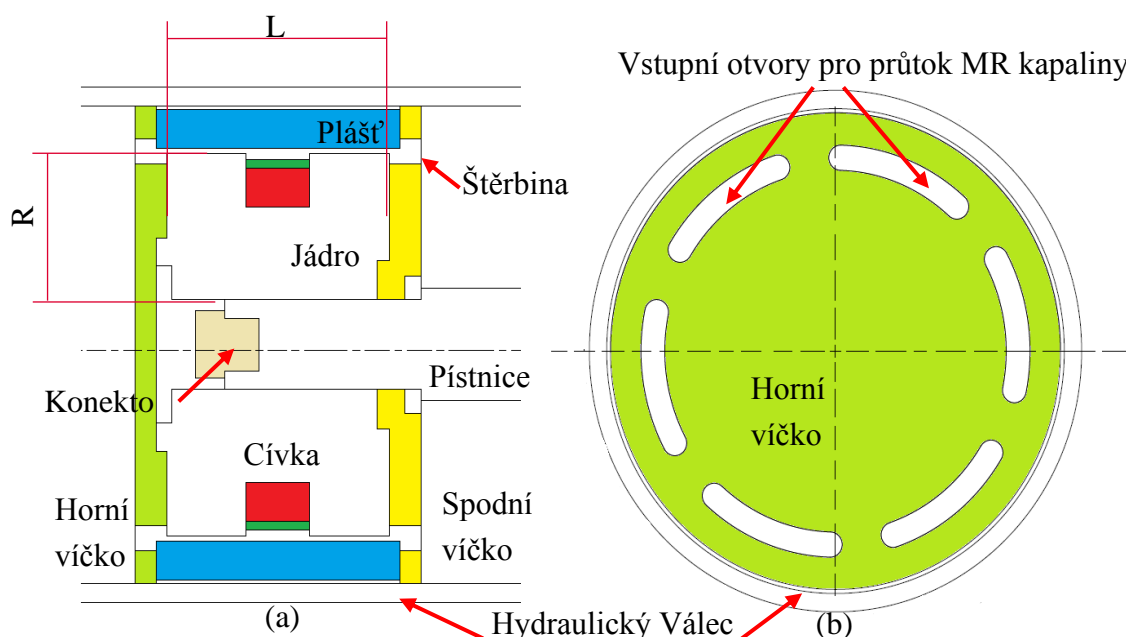


Obr. 4- 1 Řez MR tlumičem původní konstrukce s popisky jednotlivých částí; označena pístová skupina

Konstrukce MR tlumiče v diplomové práci vychází z dřívějšího návrhu tlumiče, jeho kompletní popis je schematicky zobrazen v řezu na obr. 4-1. Jedná se tedy o jednoplášťový tlumič s kompenzačním prostorem, který svým stlačením vyrovnává objem vstupující pístnice. Průměr hydraulického válce je 92 mm a délka tlumiče v horní úvrati je 500 mm.

Pístová skupina je poté zobrazena na obr. 4-2 a její detail s naznačeným směrem pohybu MR kapaliny na obr. 4-3. Jelikož se jedná o klasickou jednoplášťovou konstrukci s kompenzačním objemem, v této fázi odpadají konstrukční řešení, které byly zmíněny v rešerši. Jedná se například o tlumiče s průchozí pístnicí nebo popřípadě vytvoření externího MR ventilu (expanzní části). Řešení jsou to možná, ale značně komplikovaná. Vzhledem k náročnosti úprav a k řešené problematice s sebou nepřinášají dostatečné výhody (v oblasti zlepšení časové odezvy). Dalším omezením při novém návrhu je **rozměr pístové skupiny** z dřívější konstrukce. Tyto hlavní rozměry L (šířka jádra) a R (aktivní rozměr mezi poloměrem pístnice a začátkem drážky) červené kóty na obr. 4-2 (a) je třeba zachovat tak, aby se výsledné parametry tlumiče daly porovnávat mezi původní a novou verzí. Parametry, které se porovnávají, jsou časová odezva a $F-v$ charakteristika. Změna rozměrů pístové skupiny by byla možná, ale vzhledem k požadavkům na tvorbu rychlého tlumiče s využitím drážkování nebo rozdílného materiálu pro jádro-plášť MR tlumiče, není tato úprava potřebná. Pouze by zapříčinila nutnost úprav navazujících součástí a znemožnila by transparentní porovnání s předchozí variantou.

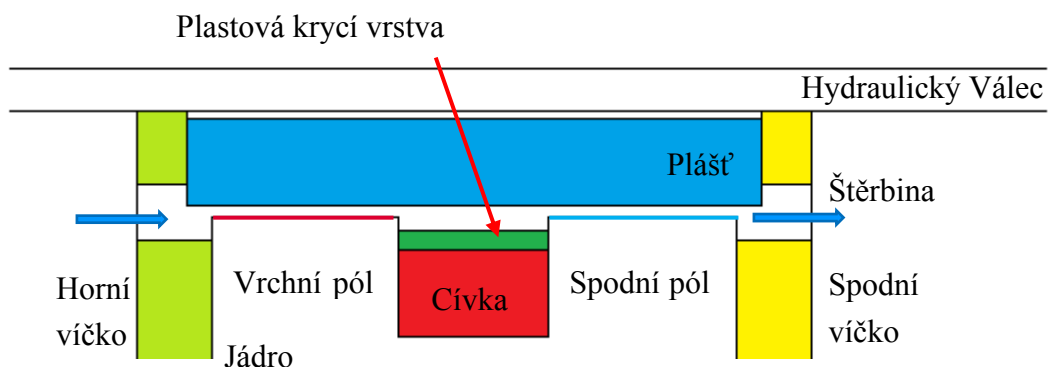
V poslední části konstrukčního řešení (kapitola 5) je navrhována verze pro sériovou výrobu rychlého MR tlumiče. Ta se především snaží o zjednodušení konstrukce pístové skupiny, tak aby byla vhodnější pro sériovou výrobu. Rozměry z původní koncepce zachovává. Součástí diplomové práce je také navrhnutí strukturovaného jádra MR tlumiče, i pro tento návrh platí výše zmíněné omezení.



Obr. 4-2 Řez pístovou skupinou (a); Přední pohled na pístovou skupinu (b)

Nejdůležitější částí MR tlumiče je pístová skupina, detail na obr. 4-2. Ta se skládá z pístnice, ke které je na konci zašroubováno jádro, jež je umístěno mezi dvěma bronzovými víčky. Tyto víčka stlačují vnitřní plášť a jsou k jádru z jedné strany přišroubována. Mezera vzniklá mezi vnitřním pláštěm a jádrem se nazývá štěrbina. V původní pomalé verzi má štěrbina šířku 0,95 mm. Touto cestou tedy prochází MR kapalina a zde dochází k řetězení částic (primárně v oblastech pólů, viz obr. 4-3). Řetězení částic se projevuje nárůstem relativní viskozity a zvětšením odporu proti pohybu vlivem tření. Tento proces u MR tlumiče tedy vytváří tlumící sílu. Z přední části jsou ve víčkách otvory, které umožňují vstup MR kapaliny, obr. 4-2 (b). Zhruba uprostřed šířky jádra je navinuta cívka, která je zalita krycí plastovou vrstvou, a to jak z důvodu ochrany před zkratem, tak také kvůli abrazivnímu chování kapaliny. Přes průchozí pístnici a konektor je cívka spojena se zdrojem elektrického proudu.

Na obrázku je znázorněn také vnější plášť (hydraulický válec), v kterém se píst pohybuje. Hydraulický válec je z obou stran ukončen pomocí matic (obr.4-1), jejichž součástí jsou těsnění. Na jedné straně tlumiče je oko sloužící k upnutí k podvozku a kompenzační plynový objem, ten je oddělen plovoucím pístem se stíracími O-kroužky. Na druhé straně je matice, která přitlačuje součást vedení pístnice. Na konci pístnice (na obr. není vidět) je umístěno další oko na upnutí, které obsahuje otvory pro vyvedení kabelů napájení cívky.



Obr. 4- 3 Detail pístní skupiny, modrou čarou znázorněn tok MR kapaliny ve štěrbině

V případě koncepčních variant se mění pouze materiál jádra a pláště. V průběhu práce byla původní verze několikrát upravena v oblasti zvětšení průměru pístnice (z důvodů pevnostní bezpečnosti) z průměru 18 na 25 mm. Také došlo k zvětšení štěrbiny MR tlumiče z 0,95 mm na 1,1 mm, a to z důvodu snahy snížit minimální tlumící sílu při nulovém vstupním proudu na cívku (viz kapitola 5.5).

Koncepční řešení diplomové práce se zaměřuje pouze na navrhnutí variant **pístové skupiny**, respektive **magnetického obvodu tlumiče**. **Primárním faktorem je časová odezva magnetické indukce.**

4.3 Přístupy při návrhu magnetického obvodu MR tlumiče

a) Materiál magnetického obvodu

Návrh materiálu magnetického obvodu (jádra, pláště) vychází primárně z materiálových magnetických vlastností zobrazených na obr. 2-39. Mezi tyto vlastnosti se řadí: vysoká relativní magnetická propustnost, nízká elektrická vodivost a magnetické nasycení. Při zvětšování vstupního proudu na cívku se zvětšuje mag. pole ve štěrbině a tím pádem i tlumicí síla. Tento jev je omezen magnetickým nasycením materiálu magnetického obvodu. Vhodná volba materiálu jádra cívky výrazně sníží tvorbu vířivých proudů, a tím pádem sníží i časovou odezvu, což je klíčový parametr MR tlumiče. Jako vhodné materiály splňující kritéria uvedená výše se jeví např.: SMC, slitiny Kobaltu – *Hiperco 50*, slitiny *Fe-Si*. Je třeba také brát v potaz potřebné mechanické a technologické vlastnosti.

b) Tvarový přístup

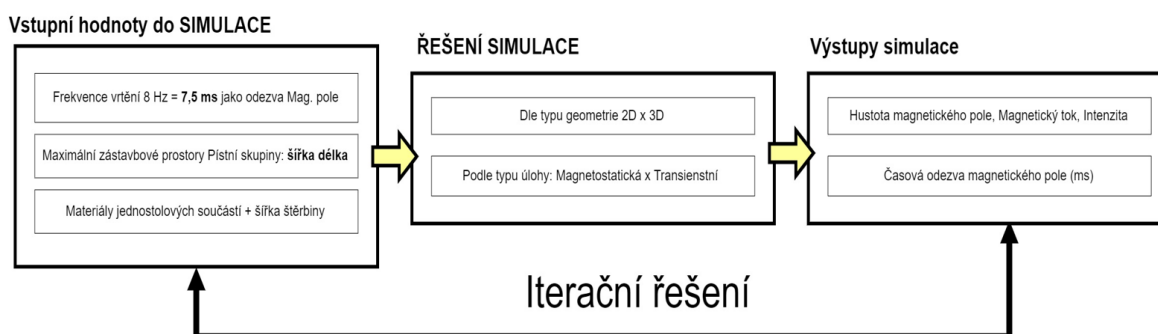
Tvarový přístup je zobrazen na obr. 2-40 a 2-41. Cílem je zvětšit dráhu, kterou musí vířivé proudy urazit a vytvořit přechodové oblasti „mezery“, kde se mění vlastnosti pro procházející vířivé proudy (např. větší odpor). Tento přístup, například ve formě laminovaného magnetického obvodu, je běžně používán v elektrotechnickém průmyslu (transformátory, el. motory). Laminování ovšem nelze efektivně použít u MR tlumičů, vzhledem k dynamickému zatěžování a navýšení komplikovanosti (ceny) konstrukce. Stejný princip navýšení vzdálenosti je možné dosáhnout zajímavým a inovativním přístupem při použití drážkování pomocí elektroerozivního obrábění (drátořez). Tento přístup nabízí pouze omezené možnosti tvarování magnetického obvodu. Tvarový přístup lze realizovat také pomocí 3D tisku. Zde lze velmi efektivně navrhnout geometrii součástí magnetického obvodu. Je jasné, že se jedná o technologicky nejsložitější cestu, která ovšem umožňuje tvoření vnitřních mezer, využití opakujících se struktur a téměř neomezené variace tvarových prvků. Tvarový přístup je možné efektivně uplatnit pouze u jádra a vnitřního pláště.

c) Geometrie magnetického obvodu

Při potřebě zachování rozměru L , R (obr. 4.2 a) nelze rozměrově písní skupinu, popřípadě jádro, příliš upravovat. Nabízí se cesta úpravy cívky. V případě změny počtu závitů nebo průřezů cívky (lichoběžníkový) dojde k ovlivnění magnetické indukce, ale ne přímo ke změně velikosti časové odezvy. Ovšem v případě použití dvou cívek dojde k změně magnetického pole, které má za následek rychlejší náběh magnetické indukce vlivem snížení vířivých proudů v prostřední části magnetického obvodu. Je potřeba obvod navrhnout správně tak, aby co nejefektivněji využíval objem magneticky aktivního jádra. Také je třeba cívky navrhnout tak, aby se výsledné hodnoty daly porovnávat mezi ostatními jedno-cívkovými variantami (stejně parametry proudové hustoty musí platit pro všechny varianty).

4.4 Nastavení magnetické simulace pro koncepční řešení

Dle výše uvedených vstupních parametrů a požadavků byly vytvořeny tři koncepční varianty magnetického obvodu. Kvůli výpočetní náročnosti simulací byly analýzy koncepčních variant prováděny s 2D geometrií, což sice znemožnilo použití drážkování, ovšem pro potřeby koncepčních řešení byly 2D simulace dostačující. 3D simulace a návrh drážkování je proveden pro vybrané konstrukční řešení v další části diplomové práce. Obr. 4-4 zobrazuje schéma řešení magnetických simulací. Toto schéma platí jak pro 3D-2D geometrii, tak i pro rozdílné typy analýz: Magnetostatická x Transientní (přechodová).



Obr. 4- 4 Schéma řešení magnetických simulací

Pro určení vhodnosti variant je klíčová hodnota **časové odezvy magnetického pole**. K tomu abychom tuto hodnotu mohli získat, je potřeba vypočítat velikost **maximálního magnetického pole** v dané měřící oblasti. Ta je reprezentovaná měřící přímkou ve vrchním pólu – obr. 4-5 (pro všechny koncepční varianty je měřící přímka stejná). Velikost magnetického pole je závislá na dané geometrii, materiálu, parametrech cívky a vstupním proudem. K jejímu zjištění jsou použity magnetostatické simulace, které nám zároveň mohou sloužit jako prostředek k vhodnějšímu návrhu magnetického obvodu v oblasti magnetického nasycení. Zjednodušeně se jedná o rozložení hmoty kolem cívky tak, aby se magnetické pole dostalo do největší vzdálenosti a tím se využil celý obsah (objem) magnetického obvodu. Primárním výsledkem z magnetostatické analýzy je graf závislosti proudu na magnetické indukci ($B-I$).

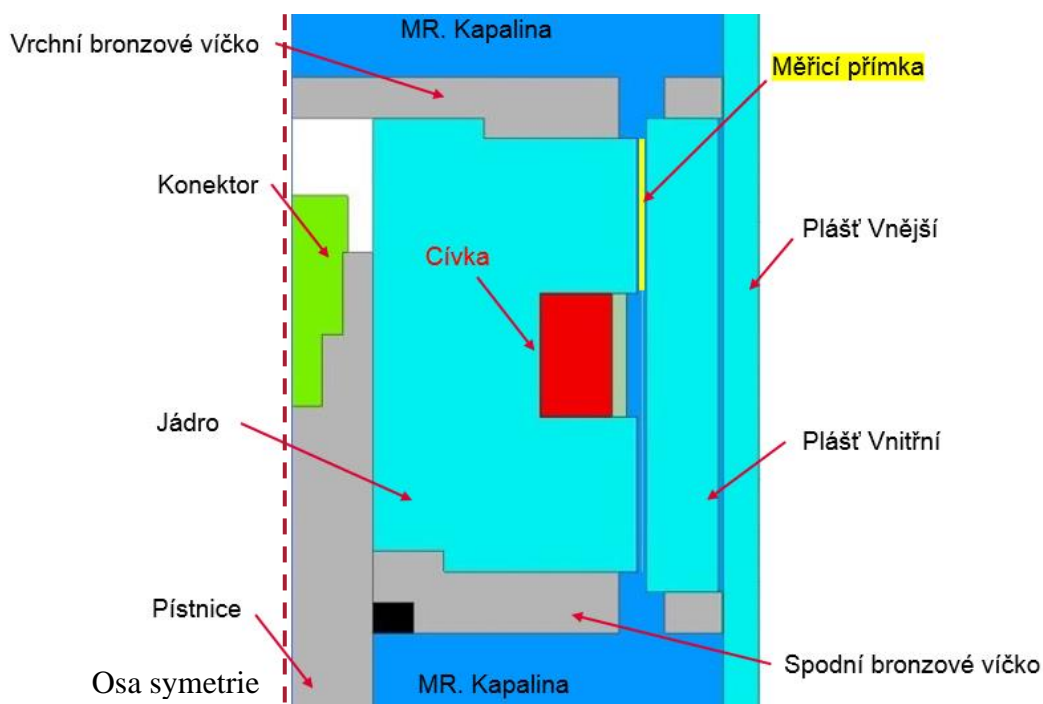
Pro konečné určení časové odezvy magnetické indukce je potřeba simulace transientního magnetického chování, ta stručně řečeno zobrazuje chování sledovaných veličin v čase, tudíž primárním výsledkem z transientní magnetické analýzy je graf hustoty magnetické indukce v závislosti na čase ($B-t$). Porovnáním výsledků vyjde doba, za kterou daný magnetický obvod dosáhne požadované velikosti magnetické indukce v oblasti měřící přímky (hodnoty se na přímce průměrují). Nejčastěji se jedná o náběh na primární časovou odezvu (63,2 %). Byla provedena celá řada výpočetních simulací, zde jsou uvedeny pouze výsledky nejdůležitějších z nich. Ostatní simulace jsou uvedeny v elektronických přílohách: Výsledky 2D simulací, Výsledky 3D simulací a Počet-seznam 3D simulací.

4.5 Koncepční řešení magnetického obvodu pístové skupiny

V případě všech variant je geometrie zjednodušená (zanedbané otvory pro šrouby, těsnění atd.) a využívá symetrii kolem osy pístnice. Mezi nejdůležitějšími vstupujícími parametry jsou B - H křivky pro MR kapalinu (MRF 132 DG _lord), materiál 11SMn30 a Steel 4130 (hodnoty převzaté z datasheetu).

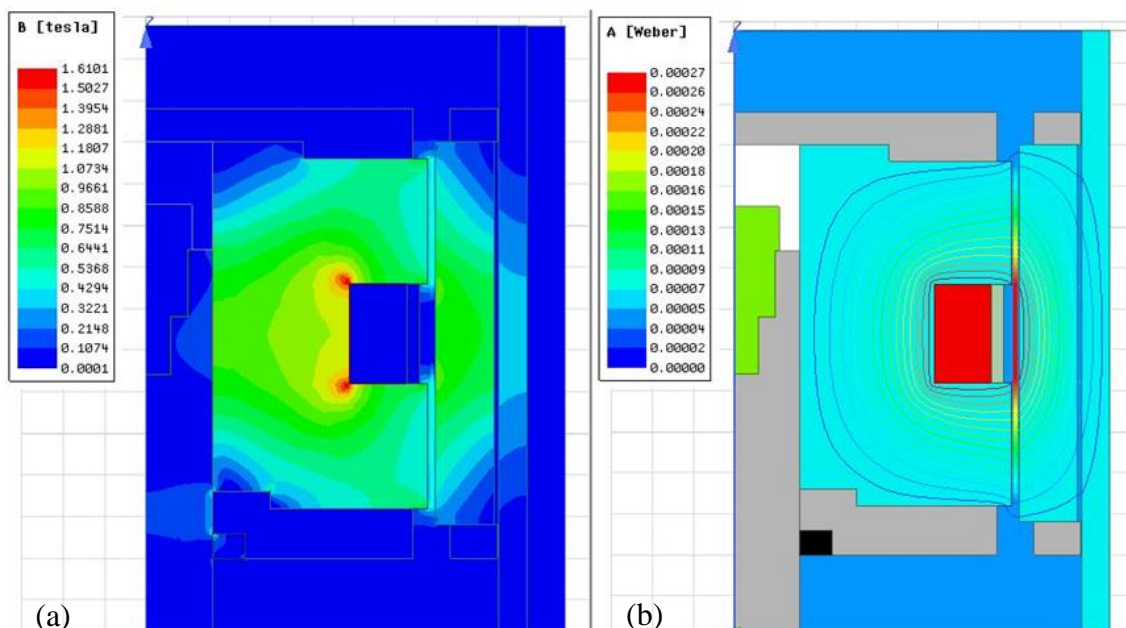
4.5.1 Varianta A – Jedna cívky

Jedná se o základní rozvržení mag. obvodu dle původní koncepce: obr. 4-5 (viz kap. 4.2) V této variantě se už předběžně počítá s potřebou drážkování (jádra, pláště, nebo obou součástí). Jakožto varianta bez využití tvarového a materiálového přístupu, nám dává nejhorší výsledky odezvy magnetické indukce. Materiál jádra i pláště je 11 SMn30. Na obr. 4-5 je zobrazena měřicí přímka, která je umístěna ve středu štěrbině přes celý průběh horního pólu jádra. Všechny simulace využívají tuto přímku pro vyhodnocení parametru magnetické indukce, ty jsou zobrazeny jako průměr hodnot získaných na této přímce.



Obr. 4- 5 Magnetický obvod: Varianta A

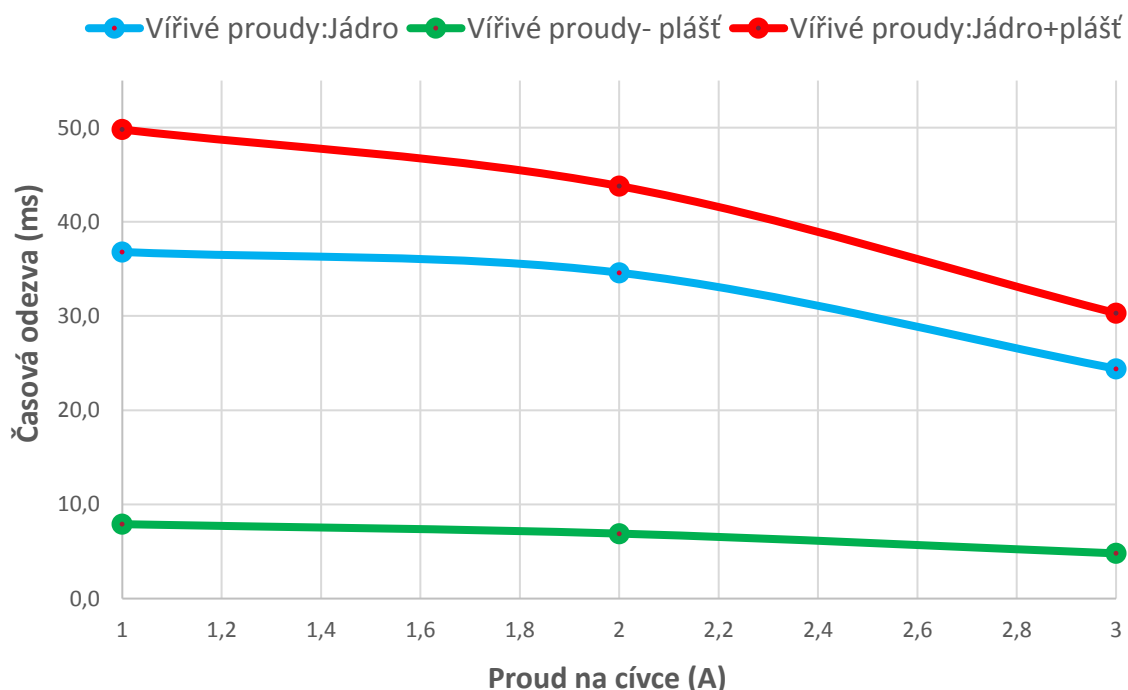
Na obr. 4-6 je zobrazeno rozložení hustoty mag. pole (a). Dle barevných pásem lze určit vhodnost návrhu mag. pole a jeho magnetického nasycení. Vpravo je poté zobrazen mag. indukční tok, který je kolmý na pohyb kapaliny ve štěrbině v oblastech pólu, proto dochází v těchto oblastech k největšímu řetězení. Je to také důvod umístění měřicí přímky. Každá simulace obsahuje tabulku s rozsahem výsledků, ke kterým je přiřazené barevné rozložení.



Obr. 4- 6 Rozložení hustoty magnetického vole, vpravo mag. indukční tok pro 1A; varianta A

Graf dole (obr. 4-7) zobrazuje výsledky simulací. Jedná se o závislosti časové odezvy na proudu cívky, a to pro zapnuté/vypnuté vířivé proudy jednotlivých částí (jádro, plášť).

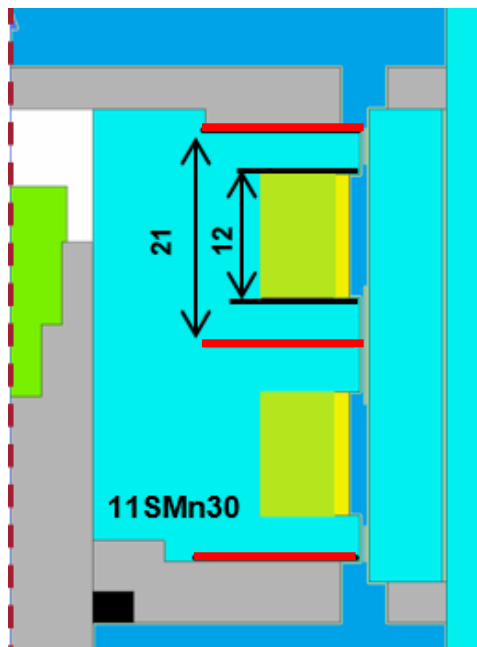
Dle výsledku je časová odezva rovna zhruba **50 ms** (1 A na cívce a vířivé proudy pro jádro i plášť) a maximální magnetická indukce je na měřené přímce **0,45 Tesla**. Časová odezva daleko přesahuje potřebnou hodnotu a je tedy nutné pro toto řešení použít tvarový přístup. Jak lze vidět z grafu, mnohem větší časovou odezvu má samotné jádro, než plášť. A při navyšujícím se proudu platí trend snižování se časové odezvy magnetického pole.



Obr. 4- 7 Časová odezva nárustu (63,2 %) magnetického pole v závislosti na proud cívky; VARIANTA A

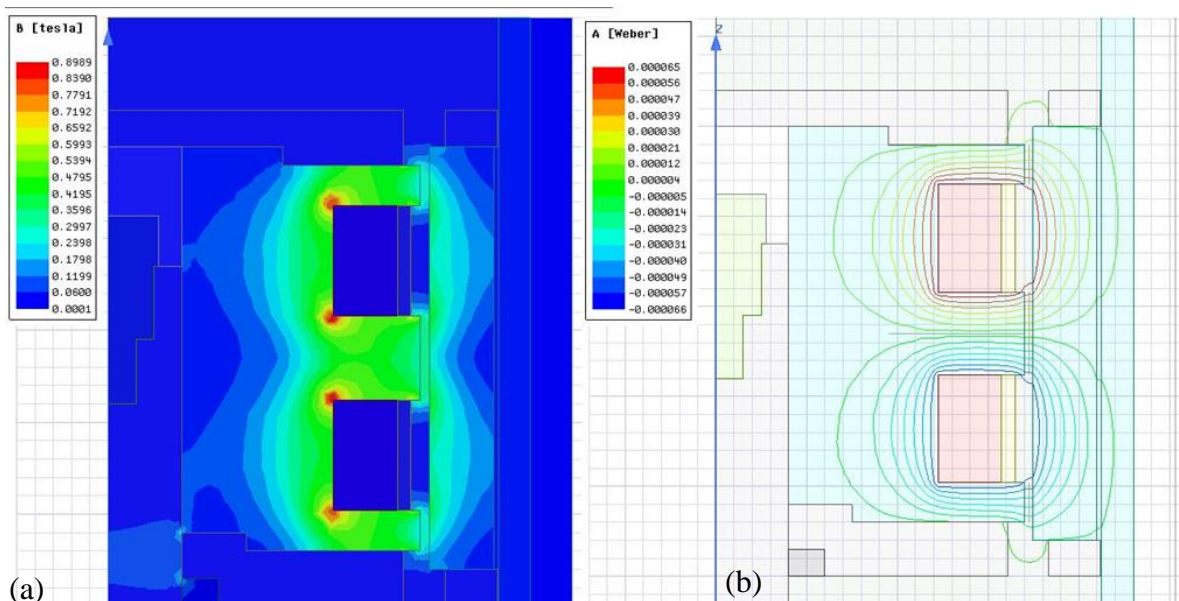
4.5.2 Varianta B – Dvě cívky

V případě varianty B jsou okolní rozměry totožné pouze dojde k mírným změnám v rozměrech jádra. To je dáno použitím dvou cívek a potřebou upravit rozměry, tak aby docházelo k výhodnějšímu mag. nasycení jádra. Obr. 4-8 ukazuje geometrii varianty B. Červené přímkové (vrchní, střední a spodní) slouží pro měření mag. indukce v jádře a tím určení mag. nasycení. Rozměry cívky: šířka 12, výška 7 mm. Počet závitů jedné cívky je 100.



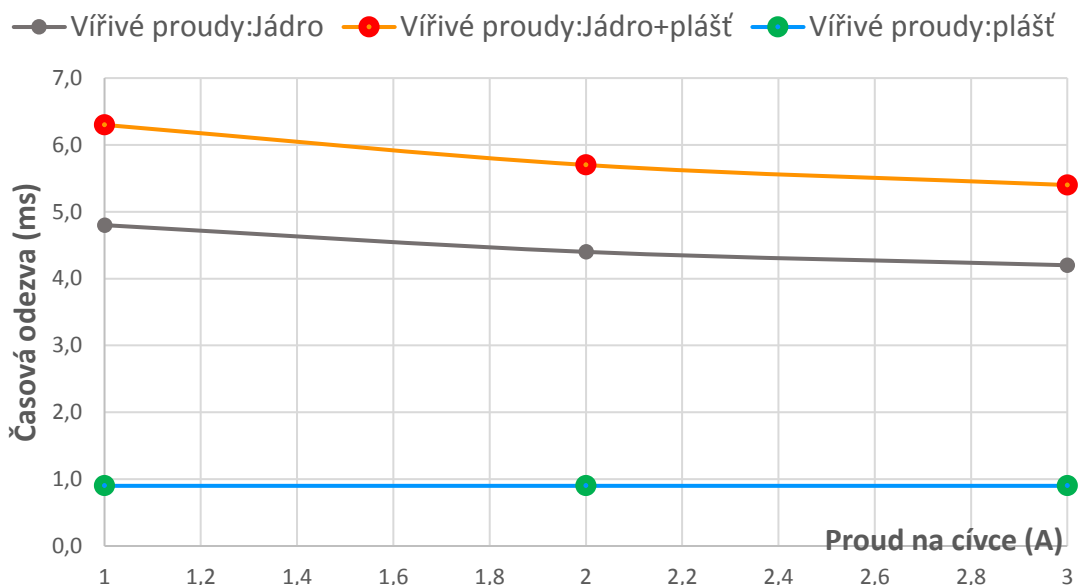
Obr. 4- 8 Geometrie varianty B s popisem měřicích úseků

Na obr.4-9 (a) je zobrazeno rozložení hustoty magnetického pole. Vpravo je poté zobrazen magnetický indukční tok, který je kolmý na pohyb kapaliny ve štěrbině v místě pólů.



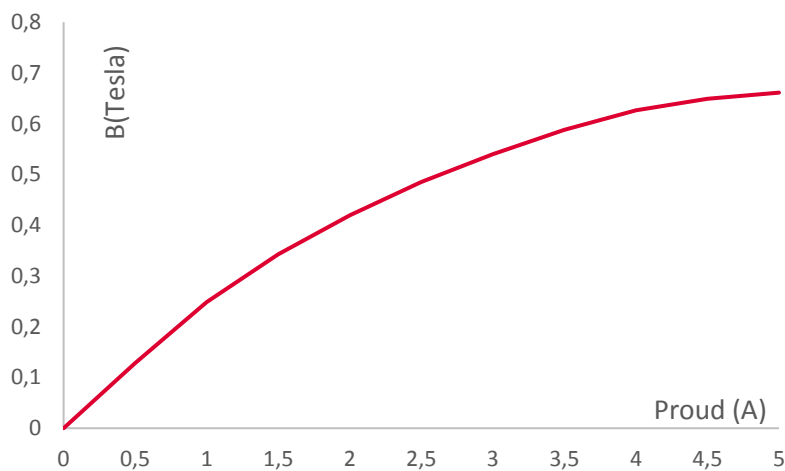
Obr.4- 9 Rozložení hustoty magnetického pole, vpravo magnetický indukční tok pro 1 A; VARIANTA B

Graf dole (obr. 4-10) zobrazuje výsledky simulací. Jedná se o závislosti časové odezvy na proudu cívky, a to pro zapnuté/vypnuté vířivé proudy jednotlivých částí (jádro, plášť). Dle výsledku je časová odezva rovna zhruba **6 ms** (1 A) a maximální magnetické pole je na měřené přímce **0,35 Tesla**. Časová odezva je tedy pro tuto variantu dostačující. Pokles magnetického pole je dán rozdílným směrem generovaného magnetického pole (jedna cívka je pozitivní druhá negativní), což má za následek sčítání mag. pole na prostředním pólu a na krajních pólech je hustota mag. pole zhruba poloviční (v oblasti měřící přímky).



Obr. 4- 10 Časová odezva nárustu (63,2 %) magnetického pole v závislosti na proud cívky; VARIANTA B

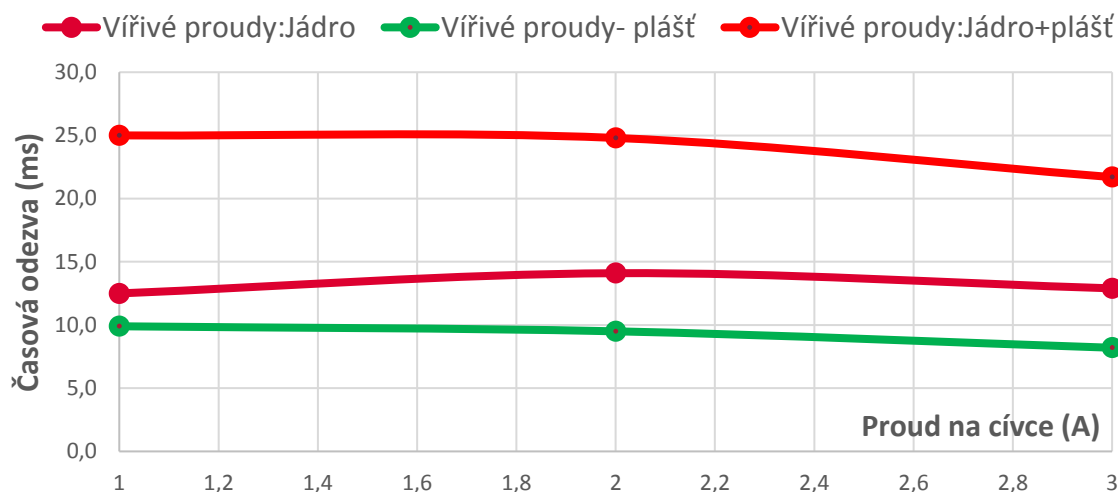
Na grafu 4-11 je zobrazena $B-I$ závislost varianty B. Měřící přímka je stejná jako u zjištění časové odezvy. Lze vidět snižující se tendenci nárustu magnetického pole se zvyšujícím se proudem na cívce, to je spojené s dříve zmíněným jevem magnetického nasycení materiálů. Tento typ grafu byl vytvořen pro všechny varianty a vychází z něho hodnota mag. pole při daném proudu, která je poté porovnávána s výsledky transientních úloh, viz obr. 4-13.



Obr. 4- 11 Graf závislosti magnetického pole na proudu ($B-I$), VARIANTA B

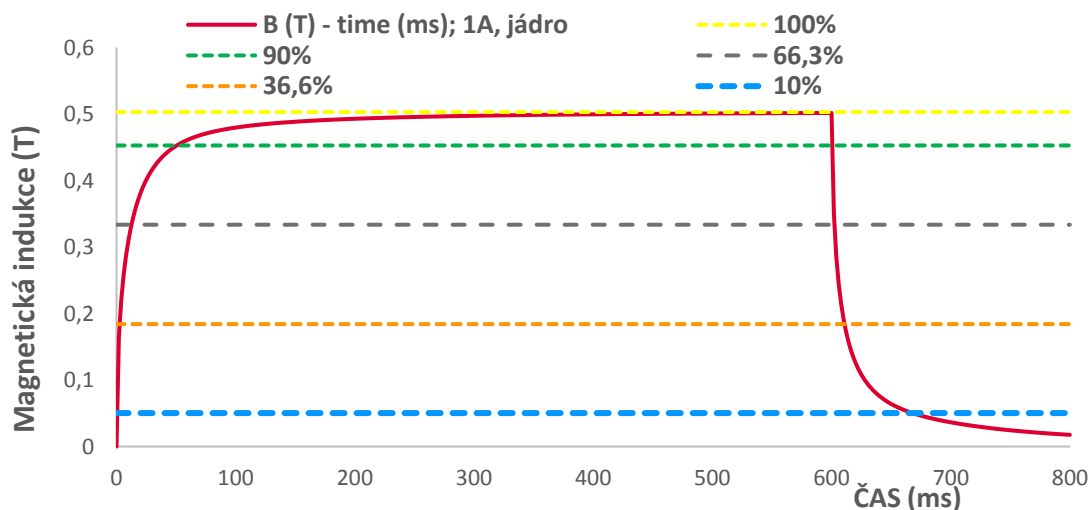
4.5.3 Varianta C – Změna materiálu jádra cívky

V případě Varianty C byla snaha využít jiný materiál pro jádro (popřípadě plášť) dle grafu 2-47. Ostatní rozměry jsou neměnné vůči variante A tudíž pro schéma varianty platí obr.4-5. Jako materiál jádra byla volena slitina kobaltu *Hiperco 50* a to kvůli svým výborným mechanickým a mag. vlastnostem. Výsledky **25 ms** (obr. 4-12) ukazují oproti variantě A zhruba 50% zlepšení ovšem odezva magnetického pole je pořád vzhledem k požadavkům nedostačující. Vzhledem k značnému cenovému navýšení je zlepšení poměrně nevýhodné.



Obr. 4- 12 Časová odezva nárustu (63,2 %) magnetického pole v závislosti na proud cívky; VARIANTA C

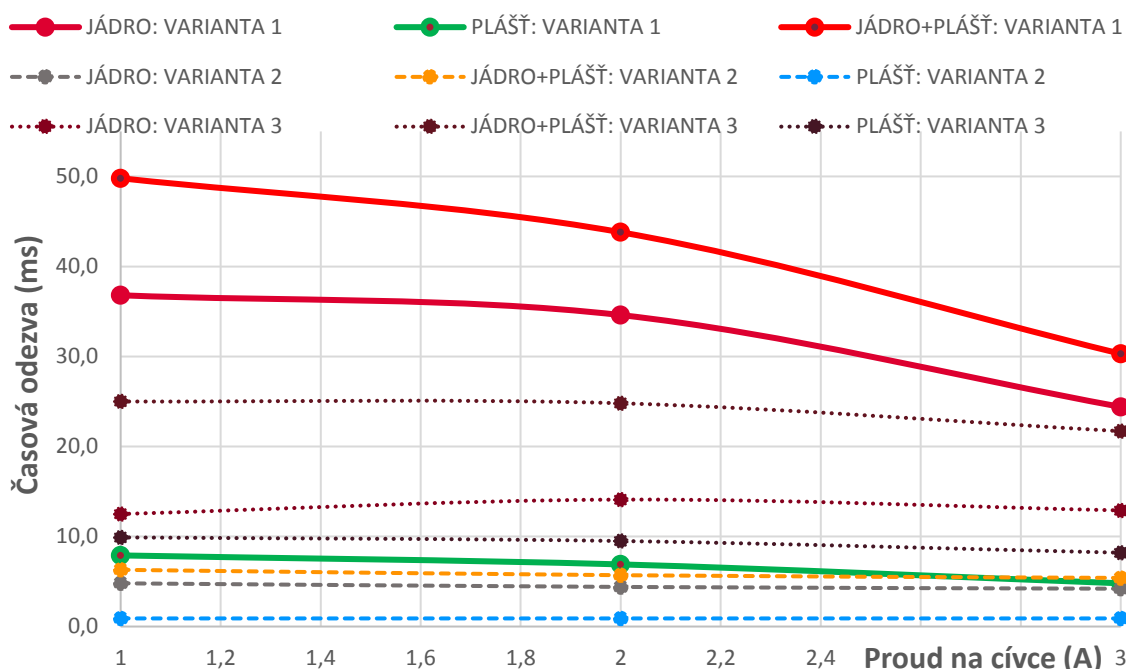
Na obr. 4-13 je zobrazen typ transienčních analýz, lze vidět procentuální hodnoty maximálního magnetického pole (vychází z magnetostatické analýzy). Hodnota se asymptoticky blíží k 100 %. Pro nárůst i pokles jsou vždy měřeny rozdílné časové hodnoty.



Obr. 4- 13 Graf: B(T) - t(ms) pro (1A), vířivé proudy pouze v jádře; VARIANTA C

4.5.4 Výběr nejvhodnější koncepční varianty

Obr. 4-14 porovnávající výsledky časové odezvy pro nárůst na 63,2 % u všech koncepčních variant je zobrazen níže. Nejhorše dopadla varianta A, naproti tomu nejlépe varianta B (dvě cívky). Odezva mag. indukce v případě varianty C je zhruba mezi, ovšem její zlepšení je nedostačující vzhledem k cenovému zvýšení při použití materiálu *Hiperco* (150 \$/kg).



Obr. 4- 14 Graf: čas (ms) - Proud (A); 0 % na 63,2% nárůst; POROVNÁNÍ VARIANT

Při použití dvou cívek (varianta B) vzniká problém při vinutí a možnost zkratu vlivem dotyku drátu živé části nebo při křížení, vzhledem k této velmi problematické oblasti je tato varianta také nevhodná. **Na základě konzultací a výsledků simulací je volena varianta A.** Její časová odezva je sice nedostačující 50 ms pro 1 A (vířivé proudy jádro + plášť) ovšem při použití tvarového přístupu lze dosáhnout požadované časové odezvy (max. 7,5 ms). Navíc je varianta jednoduchá a nedojde k velkému množství změn na stávající konstrukci. Této problematice návrhu drážkování jádra (pláště) je vyhrazena první část konstrukčního řešení.

Další zjištění vycházející z 2D simulací: Bylo zjištěno, že tvorba vířivých proudů je mnohem značnější v jádře než v plášti (doporučení pro drážkování spíše jádra). Zároveň lze říci, že s narůstajícím proudem dochází k snížení časové odezvy, a to ve všech stavech (volba 1A pro další simulace). Stavem je míněn přechod například z 0 % na 63,2 %. V různých přechodech z jednoho stavu do druhého lze říci, že při nárůstu je odezva pomalejší než při poklesu (viz příloha výsledky simulací). Tyto vlastnosti lze vyvodit ze všech grafů transienčních úloh. Pro určení časové odezvy jsou v další fázi simulací (3D simulace v kapitole konstrukční řešení) použity primárně tyto nastavení: vstupní proud na cívku 1 A; vířivé proudy v jádře i plášti a primární časová odezva se zjišťuje pro nárůst, pokud je použito jiné nastavení, je popsáno.

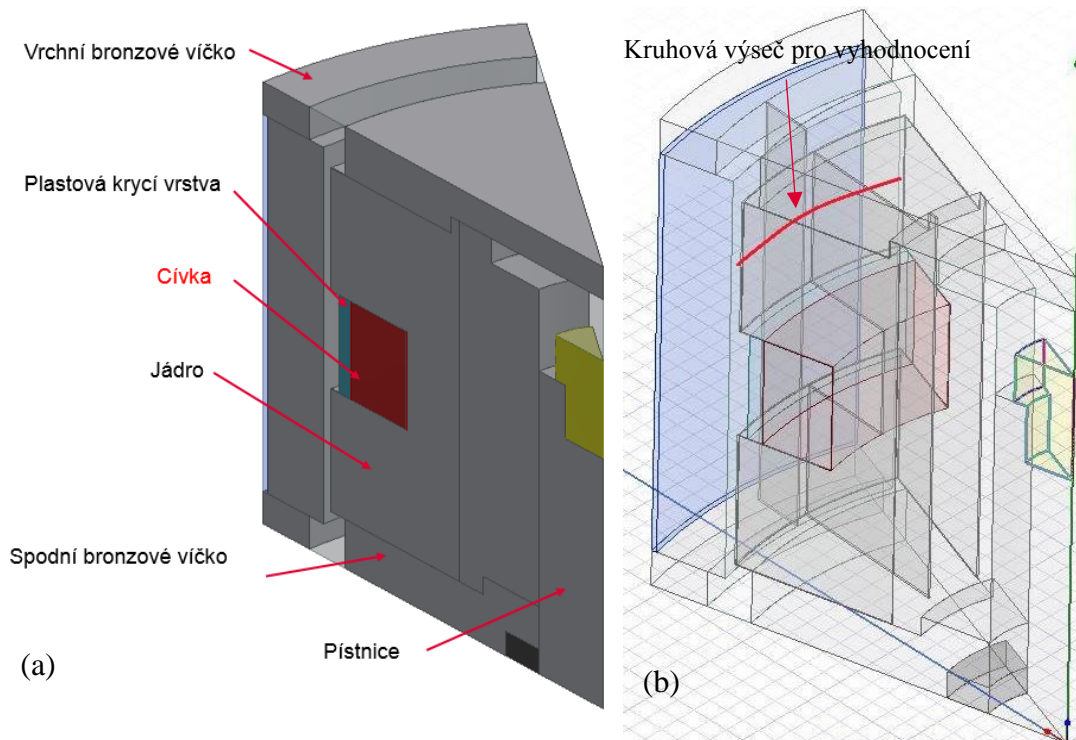
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V první části se konstrukční řešení zabývá tvarovým přístupem pro magnetický obvod. Jde především o zjištění vlivu geometrie drážek, k tomu jsou určeny 3D mag. simulace. Z této analýzy je poté možné navrhnout nejvhodnější geometrii a počet drážek. Další část kapitoly představuje zalévání drážek a ochranné vrstvy cívky. Následuje experimentální část: měření magnetické indukce ($B-I$, $B-t$) se vzduchem v aktivní zóně a testování MR tlumiče na pulsátoru ($F-v$, $F-z$, $F-t$). Poté je představen návrh jádra vyráběného 3D tiskem a v poslední části je navrženo konstrukční zjednodušení pro sériovou výrobu MR tlumiče.

5.1 3D magnetické přechodové simulace

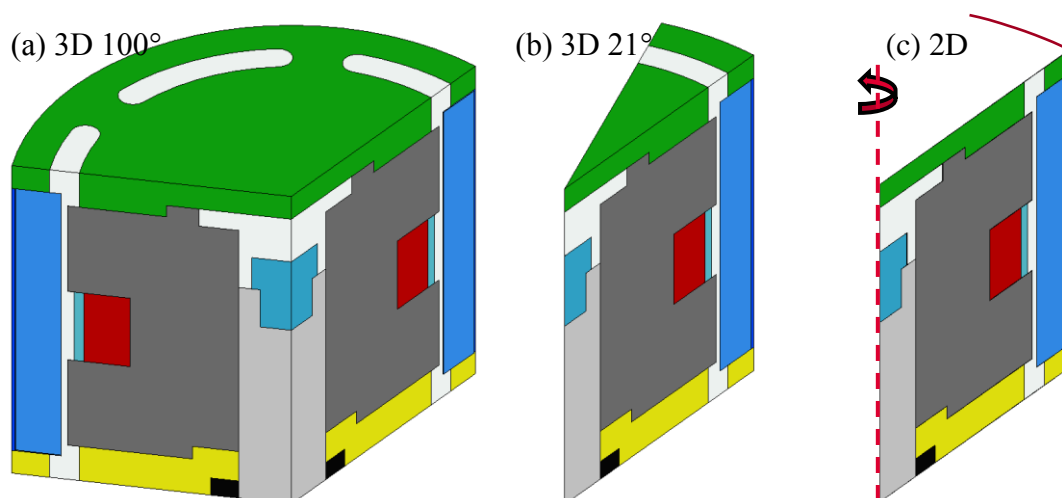
5.1.1 Geometrie pro 3D simulace

Na obr. 5-1 (a) lze vidět zjednodušenou geometrii pro 3D simulace, ta je ve formě výseče z pístové skupiny, rozměrově je identická s 2D variantou A. V případě, že jádro (plášť) obsahuje drážky, je výseč zvolena tak, aby jedna drážka byla symetricky uprostřed výseče a dvě na krajích výseče, viz obr. 5-4. Na obr. 5-1 (b) je zobrazen model v prostředí Ansys Maxwell. Na modelu jsou vidět hranice jednotlivých součástí pístové skupiny, včetně drážek a měřicí kruhové výseče, která je označena červenou barvou.



Obr. 5- 1 Popis výseče pístové skupiny pro 3D geometrii (a); Model v Maxwelu ze zobrazenou měřicí červenou výsečí ve vrchním pólu MR tlumiče (b)

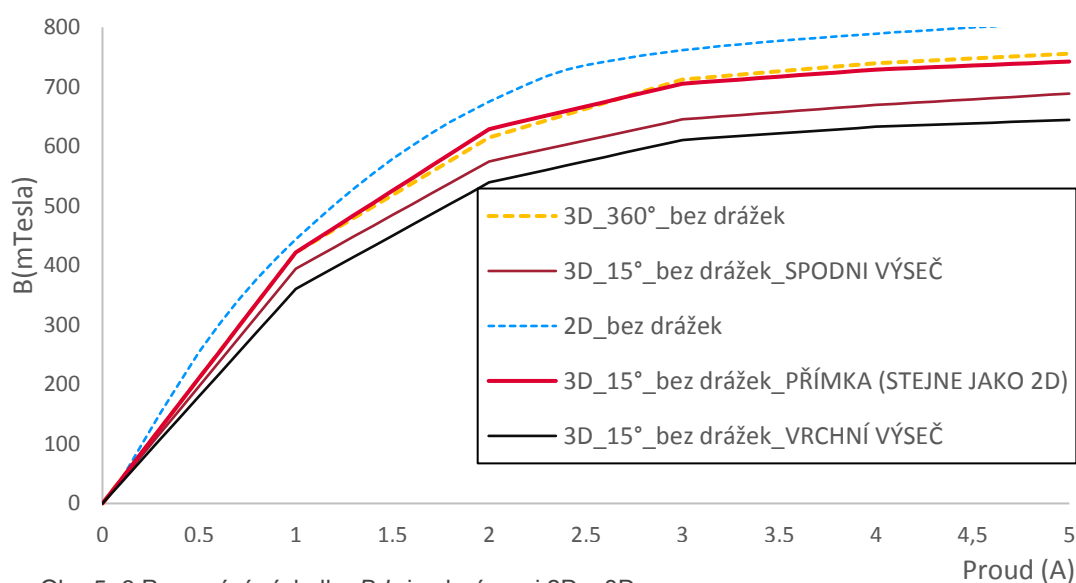
Na obr. 5-2 jsou zobrazeny pístní skupiny a přechod z 2D na 3D geometrii s rozdílnou výsečí (uvažuje se rotační symetrie). Vzhledem k mírně rozdílné geometrii spodního a vrchního víčka jsou volbou úhlu výseče ovlivněny výsledky simulací (do jaké míry ukazuje obr. 5-3).



Obr. 5- 2 Znárodnění rozdílu mezi 2D a 3D geometrii s rozdílným úhlem výseče; (a) 100°; (b) 21°; (c) 2D 0°

5.1.2 Nastavení sítě a ověření výsledků vzhledem k 2D simulacím

Magnetické 3D simulace mají zpravidla značnou časovou výpočetní náročnost (5 až 35 hodin), která je závislá na konečno prvkové síti a počtu elementů. Optimalizace počtu prvků je tedy **velice zásadní**. Porovnání výsledků B-I grafů z 2D a 3D simulace pro různá nastavení jsou zobrazeny na grafu 5-1. 2D simulace reprezentuje modrý čárkovaný průběh a ze všech simulací dosahuje největších hodnot mag. indukce. Pro 3D simulace je zde několik nastavení dle stupňů výseče 3D geometrie (podobně jako na obr.5-2). Rozdíl mezi 2D a 3D se zvětšuje při narůstajícím proudu na cívce. Pro 3 A, což odpovídá zhruba hodnotě nasycení, je max. rozdíl mezi 2D a 3D simulací 18 %. Tento rozdíl lze považovat za vyhovující.



Obr. 5- 3 Porovnání výsledku B-I simulací mezi 2D a 3D

Na obr. 5-3 je také znázorněn rozdíl v umístění měřicí přímky a její vliv na dosažené výsledky. Byly testovány tři pozice měřicí přímky:

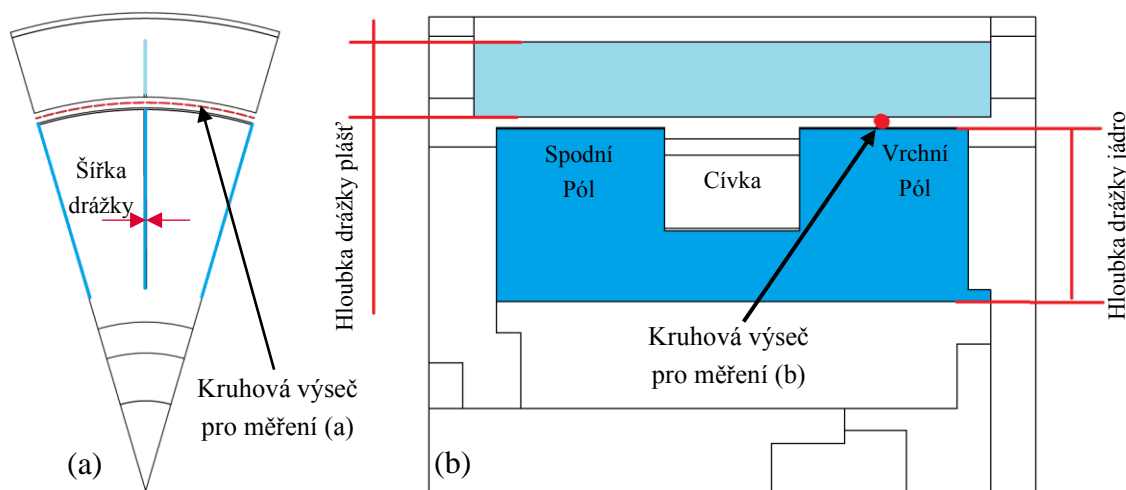
- **Přímka** uprostřed drážky přes celou délku štěrbinu, stejně jako u 2D (obr. 4-5). Umístěna vždy uprostřed vybrané 3D geometrie (symetricky ji rozděluje napůl).
- **Kruhová výseč**, která je uprostřed drážky a v polovině pólu (obr. 5-4). Byly použity dvě umístění ve vrchním a spodním pólu MR tlumiče.

Výsledky jsou mírně rozdílné, což je způsobeno odlišnou vzdáleností od cívky a nesymetrií pístové skupiny. Při hodnotě 3 A je rozdíl mezi vrchní a spodní výsečí 5 % a mezi průměrem výsečí a měřicí přímkou rozdíl 15 % magnetické indukce. Pro další simulace je použita kruhová výseč na vrchním pólu jádra MR tlumiče (obr. 5-4).

Zjednodušení geometrie je tedy možné a ovlivnění výsledku je přijatelné.

5.1.3 Drážky jádra a pláště MR tlumiče

Pro každou simulaci s rozdílným počtem drážek nebo rozdílnou geometrií drážek je vytvořen originální model. Každý model s drážkami obsahuje jednu drážku ve středu symetrie a polovinu drážky na každém kraji výseče, viz obr. 5-4 (a) – modré přímky reprezentují drážky. Na obr. 5-4 (b) modré oblasti představují hloubku těchto drážek. Při tvorbě výpočetních modelů se jedná o minimalizování velikosti (objemu) modelu a tím co nejvíce snížení výpočetního času pro simulace (typický čas transienční simulace 10-24 h).



Obr. 5- 4 Náčrt výseče pístové skupiny 42°; (a) horní pohled a čárkovaně zobrazená měřicí kruhová výseč ve štěrbině; (b) boční pohled a výškové umístění kruhové výseče v polovině vrchního pólu

Pro každou hodnotu v grafu (platí i u 2D) byla nejdříve vytvořena magnetostatická simulace ($B-I$). Ta určuje maximální 100% hodnotu mag. indukce. Transienční magnetická simulace určuje průběh této indukce v čase ($B-t$). Společně lze z výsledků těchto simulací určit časovou odezvu mag. pole. Jedná se o primární a sekundární časovou odezvu pro náběh/pokles magnetického pole. Často je časová odezva vykreslená v závislosti na jiném parametru, například u 2D grafu je to proud, u 3D je to geometrie drážek.

5.1.4 Závislost geometrie drážek na časové odezvě

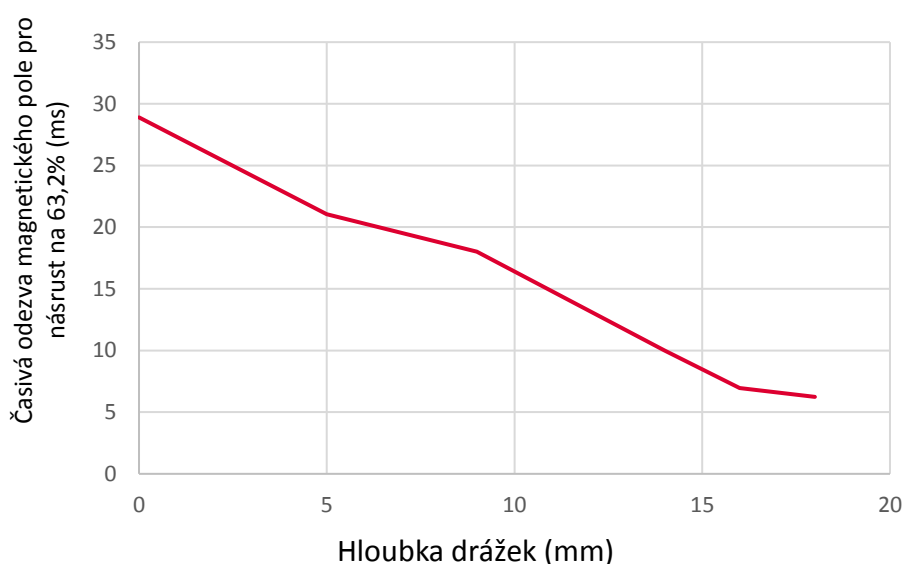
V další fázi, po ověření stejných výsledku 2D a 3D simulací, se výpočet zaměřil na pochopení vlivu drážky na časovou odezvu. Byly tedy vytvořeny následující analýzy, které ukazují závislost **hloubky, šířky a počtu drážek** (jádro, plášť, jádro + plášť). Rozměry drážek jsou zobrazeny na obr. 5-4.

V této části je třeba zmínit, že kvůli velké časové náročnosti, byly všechny 3D transientní simulace řešeny pouze se vstupním proudem 1 A. Tento proud byl volen jako optimální pro reálné použití MR tlumiče. Platí také, že při nižším proudu je i nižší odezva. Drážky byly aplikovány **pouze v jádře** (což je pro zjištění závislostí dostačující) a vířivé proudy byly vždy nastaveny jak pro jádro, tak i pro plášť (jako je tomu ve skutečnosti). Jedná se tedy o graf: 5-5 a 5-6 a 5-7. Data a tabulky k simulacím v elektronické příloze (3D simulace).

Hloubka drážky v závislosti na časové odezvě magnetického pole

Pro všechny magnetostatické i transientní simulace platí rovnocenné materiálové vlastnosti a totožné geometrické parametry vyjma **hloubky drážek**, nastavení simulace je vždy totožné (platí především pro čas, krok u transientní simulace). Počet drážek u **simulací závislosti hloubky** byl 42 a jejich **šířka** byla 0,3 mm (drážkováno pouze jádro).

Hloubka drážky výrazně neovlivňuje velikost magnetického pole ve štěrbině (obr. 5-5). Časovou odezvu ale mění značně, především pokud se drážky dostanou i pod vinutí cívky. Při návrhu hloubky drážek je třeba brát v úvahu značné zeslabení, a tedy oslabení mechanické a únavové pevnosti dílu. Jako **ideální hloubka drážky** se jeví hodnota kolem **13-16 mm**, a to vzhledem k výsledkům simulací i strukturální pevnosti dílu.

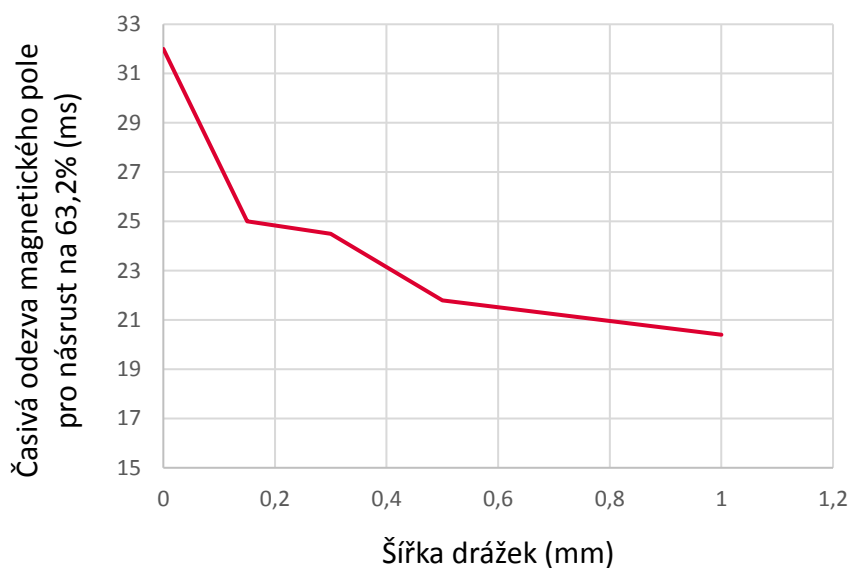


Obr. 5- 5 Závislost časové odezvy nárůstu magnetického pole na hloubce drážek

Šířka drážky v závislosti na časové odezvě magnetického pole

Pro všechny magnetostatické i transientní simulace platí rovnocenné materiálové vlastnosti a totožné geometrické parametry vyjma **šířky drážek**, nastavení simulace je vždy totožné (platí především pro čas a krok u transientní simulace). Počet drážek u **simulací závislosti šířky** byl 42 a jejich **hloubka** byla 9 mm (drážkováno pouze jádro).

Šířka drážky minimálně ovlivňuje velikost magnetické pole ve štěrbině. V oblasti časové odezvy se dá pozorovat dle grafu 5-6 pouze malé zlepšení. V případě malé šířky drážek pod 0,1 mm dochází k problémové vyrobitelnosti drážek. Navyšování šířky drážek nemá efekt na časovou odezvu, ale dochází k většímu snižování magnetického pole. Dle výsledků simulací lze doporučit jako **ideálnější šířku drážky** v rozmezí **0,2-0,35 mm**. Je potřeba brát v úvahu výrobu drážek elektroerozivním obráběním, a to konkrétně průměr drátu.

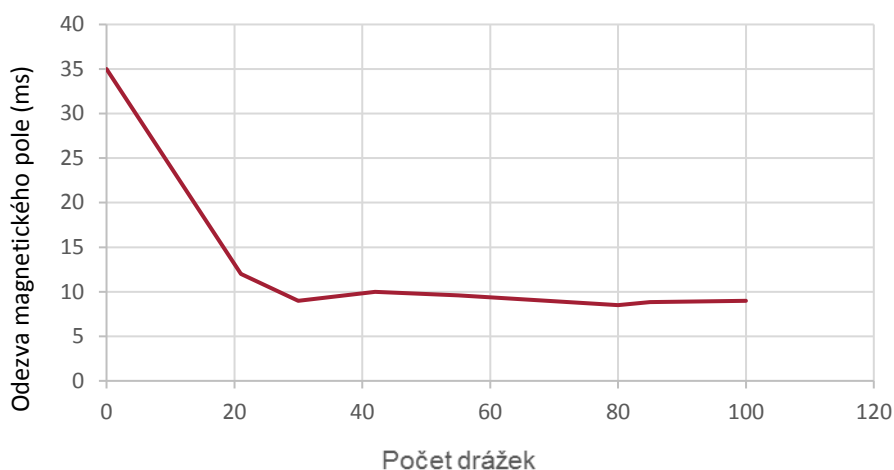


Obr. 5- 6 Závislost časové odezvy nárustu magnetického pole na šířce drážek

Počet drážek v závislosti na časové odezvě magnetického pole

Pro všechny magnetostatické i transientní simulace platí rovnocenné materiálové vlastnosti a totožné geometrické parametry vyjma **počtu drážek**, nastavení simulace je vždy totožné (platí především pro čas, krok u transientní simulace). **Šířka drážek** je 0,2 mm jejich **hloubka** je 14 mm.

Z obr. 5-7 je vidět značná závislost časové odezvy na počtu drážek. Drážkováno pouze jádro a vířivé proudy jsou zapnuty pro jádro i plášť. Hodnota se pro jakýkoliv počet drážek nedostane pod 7,5 ms. Tudíž z grafu vyplývá strmé snížení odezvy zhruba do počtu 30 drážek pak už je odezva systému téměř stejná. To je dáno vlivem vířivých proudů v plášti neboli **pro dosažení požadované odezvy je třeba drážkovat nejenom jádro ale i plášť**.



Obr. 5- 7 Závislost časové odezvy mag. pole na počtu drážek (drážky pouze jádro); vířivé proudy jádro + plášť

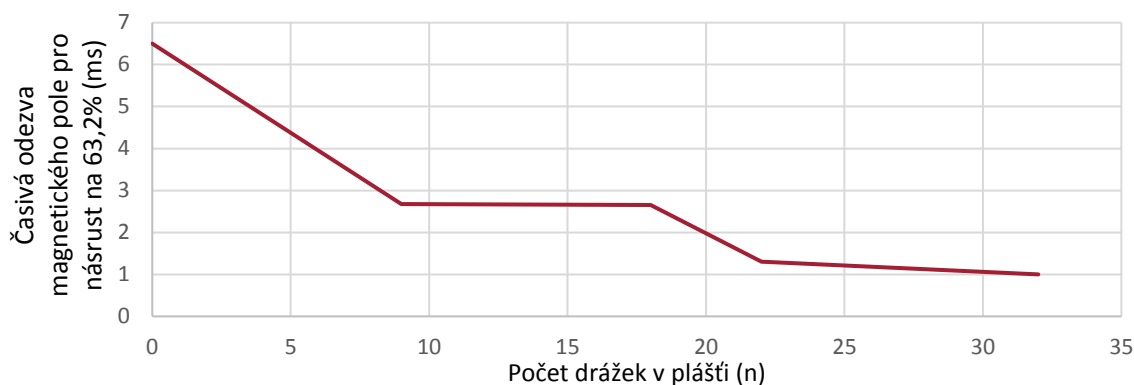
Oproti simulacím na (obr. 5-7) jsou u obr. 5-8 a 5-9 **vypnuty vířivé proudy v části**, ve kterých nejsou drážky. Tím se dosáhne ideálního zobrazení vztahu drážkování dané součásti na časové odezvě mag. pole. Pro všechny simulace mají drážky stejnou šířku a to 0,35mm a hloubku 16 mm.



Obr. 5- 8 Závislost časové odezvy mag. pole na počtu drážek (drážky pouze jádro); vířivé proudy jádro

Z grafu 5-8 je jasné, že pro jádro nemá smysl pokračovat v drážkování při překročení hranice **30 drážek**. Tento výsledek koresponduje s výsledky na obr. 5-7. Poté už téměř nedochází k snížení časové odezvy. Časová odezva se pohybuje kolem 2 ms, toto je nejnižší dosažitelná časová odezva, která je způsobena vířivými proudy jádra.

Simulace ukazují, že při vysokém počtu drážek dochází naopak k navyšování časové odezvy. To je způsobeno zřejmě tím, že jádro má v těchto konfiguracích nyní více objemu drážek (reprezentuje objem vzduchu) než samotného magneticky aktivního materiálu jádra.



Obr. 5- 9 Závislost časové odezvy mag. pole na počtu drážek (drážky pouze plášť); vířivé proudy plášť

V případě pláště obr. 5-9 se jeví jako ideální drážkování hodnoty někde mezi 10-20 drážkami. Časová odezva pouze pro plášť se pohybuje v rozsahu 2,5 až 1 ms toto je nejnižší dosažitelná časová odezva, která je způsobena vířivými proudy pláště.

5.1.5 Volba optimální geometrie drážek

Byly provedeny desítky simulací pro jednotlivé kombinace počtu drážek v jádře a plášti tak aby se dosáhlo ideální časové odezvy magnetické indukce. Všechny výsledky jsou uvedeny v příloze 3D SIMULACE (formát excel). V tab. 5-1 jsou vybrány 4 varianty z poslední fáze simulačních 3D výpočtů.

Varianty	Počet drážek jádro	Počet drážek plášť	Šířka drážky (mm)	Hloubka drážky (mm)	Náběh na 63,2% (ms)
1	0	0	0	0	35
2	30	18	0,3	16 a 5	5
3	42	9	0,3	14 a 5	6
4	21	18	0,2	16 a 5	10

Tab. 5- 1 Výsledky možných kombinací návrhu drážkování

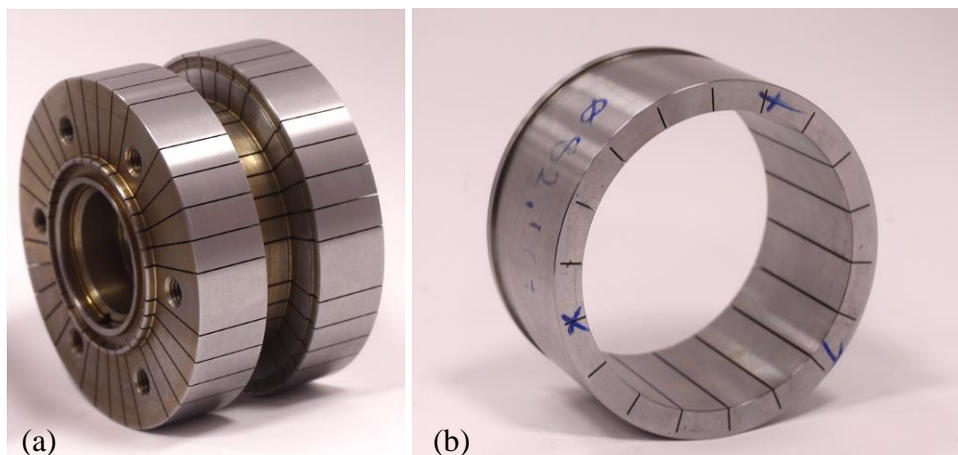
Pro varianty, které splňují časovou odezvu nižší než 7,5, je celá řada (viz příloha). Musí se ovšem vždy jednat o kombinaci drážek v jádře i plášti, a to s maximální možnou hloubkou.

Jako ideální počet drážek se jeví varianta 2, a to s 30 drážkami v jádře a 18 v plášti. Šířka pro drážky je v obou případech stejná, a to 0,3 mm, hloubka je pro jádro 16 mm a pro plášť 5 mm.

Výsledkem této konstrukční varianty je tedy časová odezva náběhu magnetického pole na 63,3 % za dobu 5 ms.

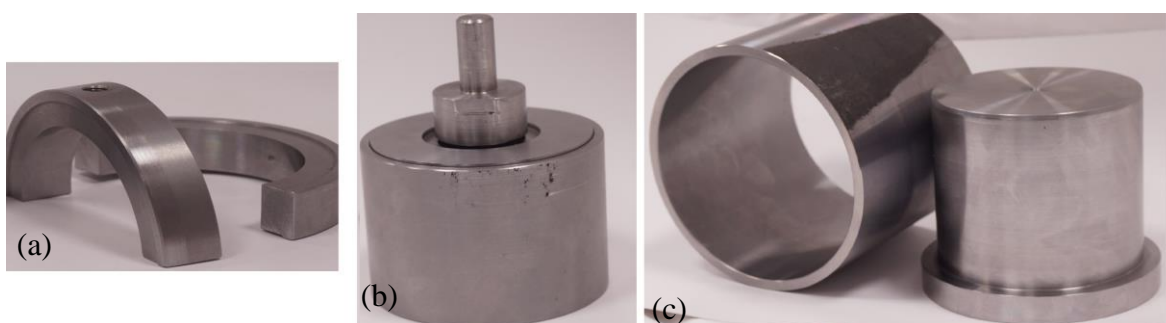
5.2 Ochrana drážek a pláště MR tlumiče

Geometrie drážek pro jádro i pláště je určena a jejich výroba byla zadána externí firmě. Po výrobě elektroerozivním obráběním na obr. 5-10 je třeba tyto drážky zalít speciálním dvousložkovým plastem, jednak kvůli abrazivnímu chování MR kapaliny a také kvůli vytvoření izolace pro cívku. Celkový průběh zalití drážek je v příloze E-ZALITÍ DRÁŽEK.



Obr. 5- 10 Drážkované jádro (a) a drážkovaný plášť MR tlumiče (b)

Pro efektivní zalití pláště bylo nejdříve potřeba vytvořit přípravy k zalití. Ty slouží k tomu, aby se zalévací hmota dostala jen tam kam má a např. nezatekla do závitu jádra obr. 5-11.

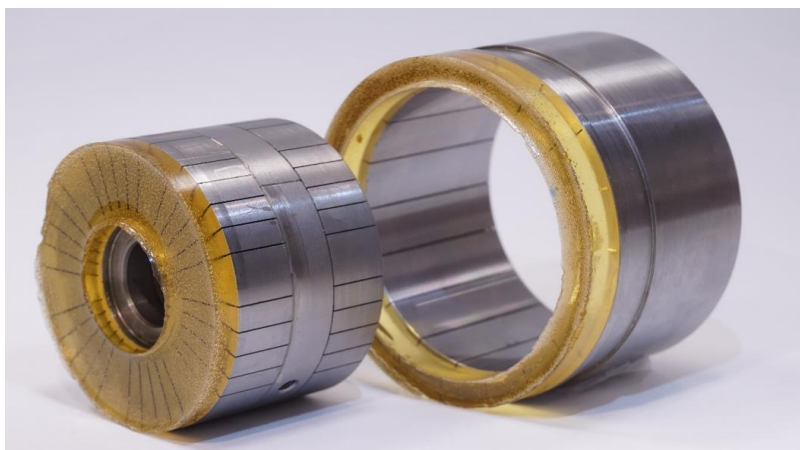


Obr. 5- 11 Přípravky pro zalití pláště společně s pláštěm

V případě jádra se jedná o vnější trubku s minimální vůlí a spodním víčkem pro znemožnění protečení zalévací hmoty (5-11 b). Dále jsou speciálně pro jádro navrhnutы tzv. půlměsíčky, které znemožní zalití do prostoru cívky a zároveň umožní vytvoření slabé vrstvy mezi jádrem a cívkou (izolace), zobrazeny na obr. 5-11 (a).

Přípravky pro zalití pláště jsou jednodušší, obr. 5-11 (c). Jedná se o čep, který velmi přesně sedí k vnitřnímu rozměru pláště, znovu dochází k zalití pouze drážek. Na čepu je spodní odsazení tak, aby nedocházelo k protečení zalévací hmoty na druhou stranu.

Výsledek zalévání drážek u jádra i pláště lze vidět na obr. 5-12. Následuje obrobení a broušení zalévací hmoty mimo drážky.



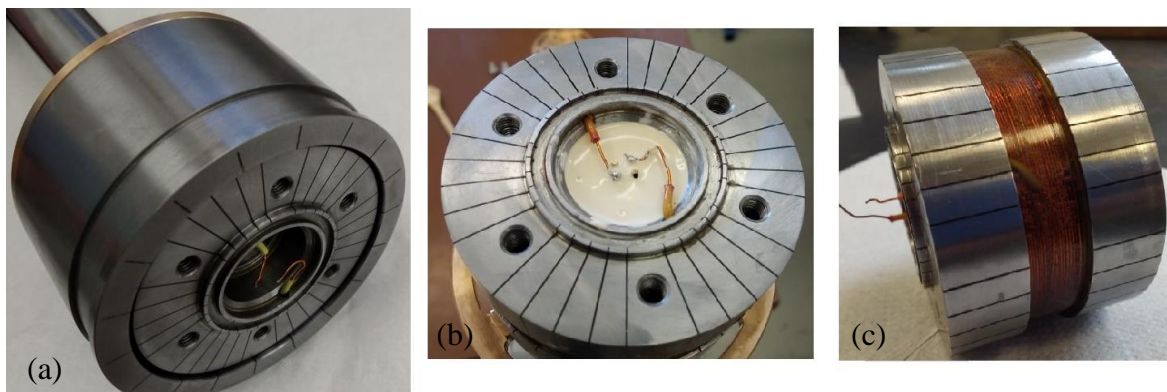
Obr. 5- 12 Výsledek zalévání drážek jádra a pláště dvojsložkovou plastovou zalévací hmotou

Pro zalití byla použita temperovací pec společně s vakuovou komorou. V další fázi zalití bylo potřeba vytvořit ochrannou vrstvu na vinuté cívce. K tomu účelu byla vytvořeno jádro z hliníku vpravo na obr. 5-13, které slouží následně pro vytvoření silikonové formy.



Obr. 5- 12 Drážkované jádro s vinutou cívkou a hliníkovým jádrem pro silikonovou formu

Na obr. 5-14 (a) je zobrazena kompletní pístitní skupina (bez horního víčka). Detail konektoru při zalévání ochrannou vrstvou, proti zatečení MR kapaliny (b). Na obrázku 5-14 (c) lze vidět výsledek vytvoření ochranných vrtů na cívce (nedokonalosti zalití, bublinky).



Obr. 5- 13 Pístitní skupina (a); zalití konektoru (b); ochranná vrstva cívky (c)

5.3 Experimentální část

Experimentální část se zabývá testováním magnetoreologického tlumiče v těchto oblastech:

- Elektrické vlastnosti cívky,
- magnetické statické vlastnosti,
- časová odezva magnetického pole,
- rychlostní charakteristika tlumiče,
- časová odezva síly.

Některé experimentální části byly měřeny ještě před zalitím MR tlumiče. Jedná se o všechny měření, které proběhly se vzduchem v aktivní zóně MR tlumiče a určení el. vlastností.

Hlavní část experimentu měření $F-t$, $F-v$ a $F-z$ proběhla až po zalití drážek a vytvoření ochranné vrstvy na cívce jádra MR tlumiče. Při montáži byl tlumič natlakován na 30 bar a testovala se jeho těsnost.

Elektrické vlastnosti cívky

Tabulka 5-2 zobrazuje měřené hodnoty cívky, které byly využity jako vstupní parametry při magnetických simulacích MR tlumiče. Do simulačních modelů je třeba znát přesně odpor cívky a její indukčnost. V původní fázi výpočtů byly tyto hodnoty odhadnuté na základě zkušeností a předešlých měřeních. Po výrobě drážek a jejich zalití následovalo reálné měření a následné úpravy v důležitých simulačních analýzách.

Tab. 5- 2 Tabulka fyzikálních parametrů měřených a použitých v simulaci

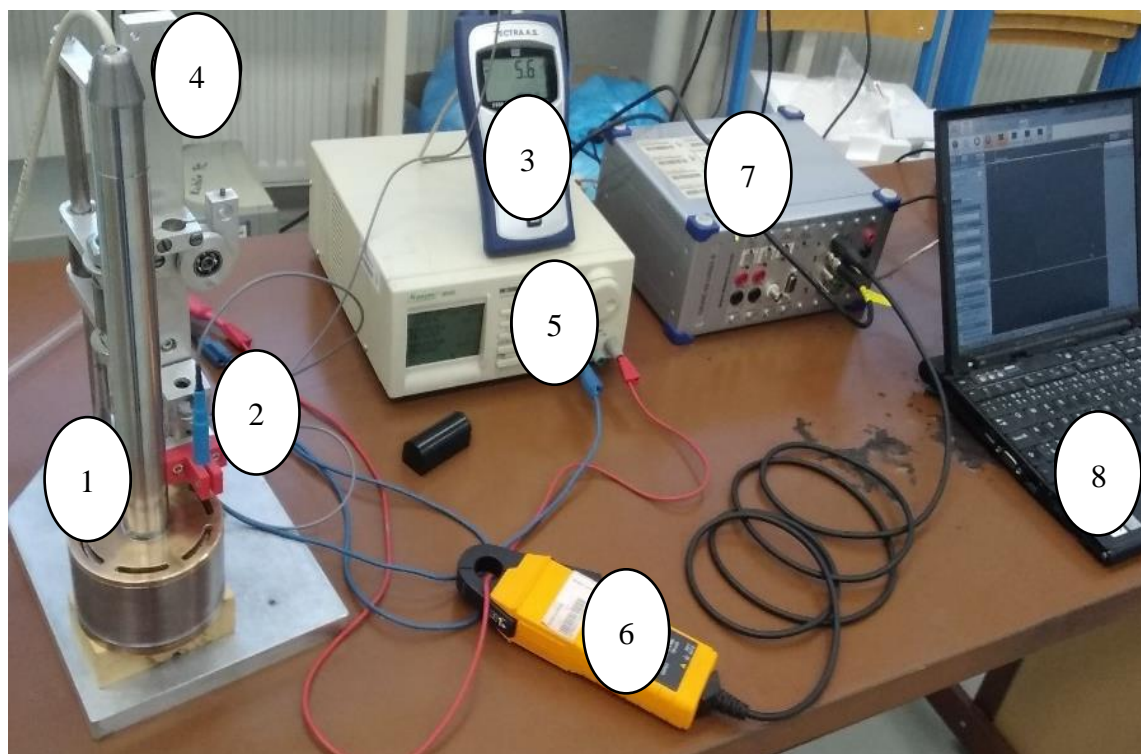
Vlastnost	Hodnoty získané z měření
Odpor cívky (Ω)	2,5
Indukčnost cívky (mH); vzduch v aktivní zóně	54

5.3.1 Quasi statické magnetické vlastnosti

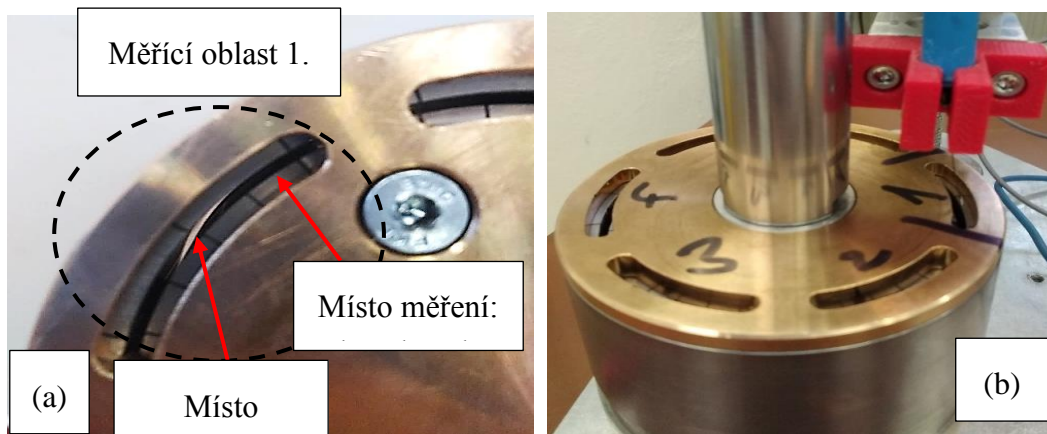
Kapitola popisuje měření závislosti **magnetické indukce**, ve štěrbině MR tlumiče, **na vstupním proudu cívky** neboli určuje $B-I$ charakteristiku. Měření je provedeno pro rychlou verzi MR tlumiče se vzduchem v aktivní zóně. $B-I$ závislost byla měřena na několik místech, pro určení rozdílné magnetické indukce v oblastech s drážkami nebo bez. Kompletní popis měřicího řetěze, přístupu k měření a všech výsledků v příloze měření A.

Měřící řetězec

Na obrázku 5-14 lze vidět měřící řetězec. Pro měření byla použita pouze část MR tlumiče, a to jeho píst a pístní skupina (pozice 1). Součástí pístní skupiny je jádro a plášť. Tyto dvě součásti mezi sebou mají mezeru tzv. štěrbinu, v její oblasti byla měřena mag. indukce. A to za pomoci Hallovy sondy STB1X-0201 (2), která byla připojena do Magnetometru F.W. Bell 5180 (3). Jádro MR tlumiče má dvě oblasti pólů (vrchní a spodní), mezi nimiž je prostor s vinutou cívkou. Sonda je umístěna ve štěrbině MR tlumiče ve výšce poloviny jeho vrchního pólu (5-15) a je upevněna pomocí červeného přípravku, který je součástí stojanu (4). Jako zdroj el. proudu byl použit Manson SGP2693 na pozici (5). Přesnou velikost vstupní proudu na cívku měří proudové kleště Fluke i30 (6). Měřené signály proudu a magnetická indukce vstupují do měřicí ústředny Dewetron USB-50 (7). Údaje jsou dále zpracovány v PC (8) pomocí softwaru DEWESOFT. Následně jsou tyto data vyhodnocovány pomocí Excelu.

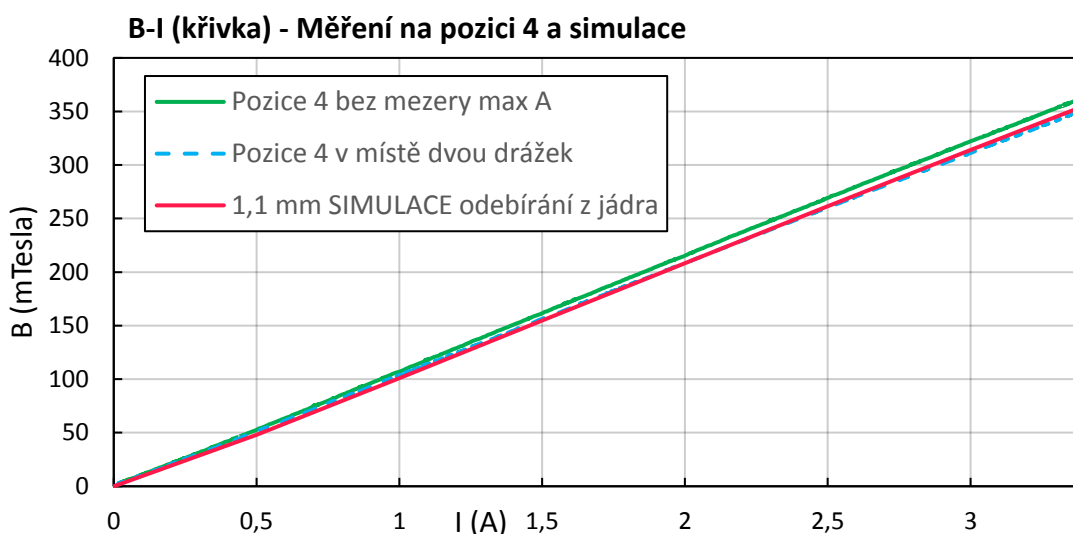


Obr. 5- 14 Měřící řetězec pro určení B-I závislosti drážkovaného MR tlumiče se vzduchem v aktivní zóně



Obr. 5- 15 Vlevo detail drážkovaného tlumiče se štěrbinou, vpravo oblasti měření B-I charakteristiky

První část měření porovnává magnetickou indukci v šesti pozicích (bez drážek) ve štěrbině MR tlumiče, a to v polovině jeho horního pólu. Výsledky ukazují velmi podobné hodnoty. Další měření určuje mag. indukci v místě s drážkami, poloha sondy je totožná s měřením č.1. Mag. indukce je v místě drážek nižší, což vychází z menšího magneticky aktivního materiálu v okolí drážky. Ovšem znovu v rámci stejného měření (v místě s drážkami) jsou naměřeny téměř totožná data. Dle výsledků měření lze říct, že magnetická indukce bude v celém obvodu štěrbině ve středu vrchního pólu homogenní obr. 5-16. Rozdíly mezi mag. indukci jsou maximálně do 3 %. Magnetická hystereze systému je nízká (5 mT).



Obr. 5- 16 Rozdílné hodnoty B-I v místě: bez drážek, dvou drážek a simulace

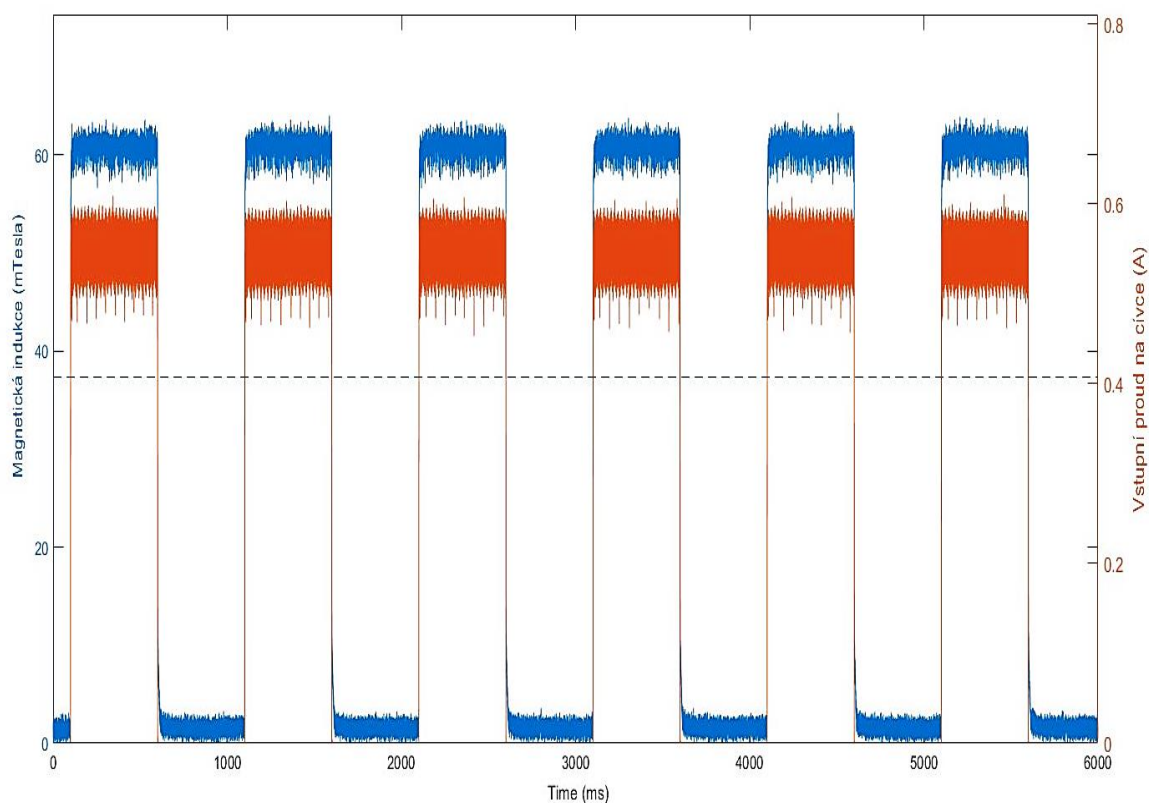
Porovnání měření se simulací prokazuje značnou podobnost. Výsledky simulací jsou více podobné výsledkům měření v místě s drážkami. K většímu rozdílu dochází při vyšších proudech. Rozdílné hodnoty jsou malé, a tudíž se jedná o poměrně dobrou shodu měření a simulace. Odlišnosti mezi simulací a měřením jsou způsobeny: zjednodušením geometrie simulace (zaoblení, složité tvary atd.), rozdíly mezi vstupními materiálovými parametry. Lze říct, že simulace jsou nastaveny vhodně a hodnoty které ukazují výsledky jsou důvěryhodné a mají dostatečnou přesnost.

5.3.2 Měření časové odezvy magnetického pole

Měření **odezvy magnetické indukce** bylo realizováno, ve štěrbině MR tlumiče, v závislosti na vstupním proudu cívky. Měření je provedeno pro pomalou i rychlou verzi MR tlumiče se vzduchem v aktivní zóně. Měřicí řetězec je podobný tomu z obr. 5-14 pouze je přidáno proudové řízení pro rychlejší náběh na požadovanou hodnotu. Výsledkem měření jsou průběhy magnetické indukce v čase ($B-t$). Ty jsou poté porovnávány s výsledky 3D mag. simulací viz příloha B. Pro vyhodnocení tohoto měření byl vytvořen Matlab skript.

Měření odezvy magnetického pole na vzduchu:

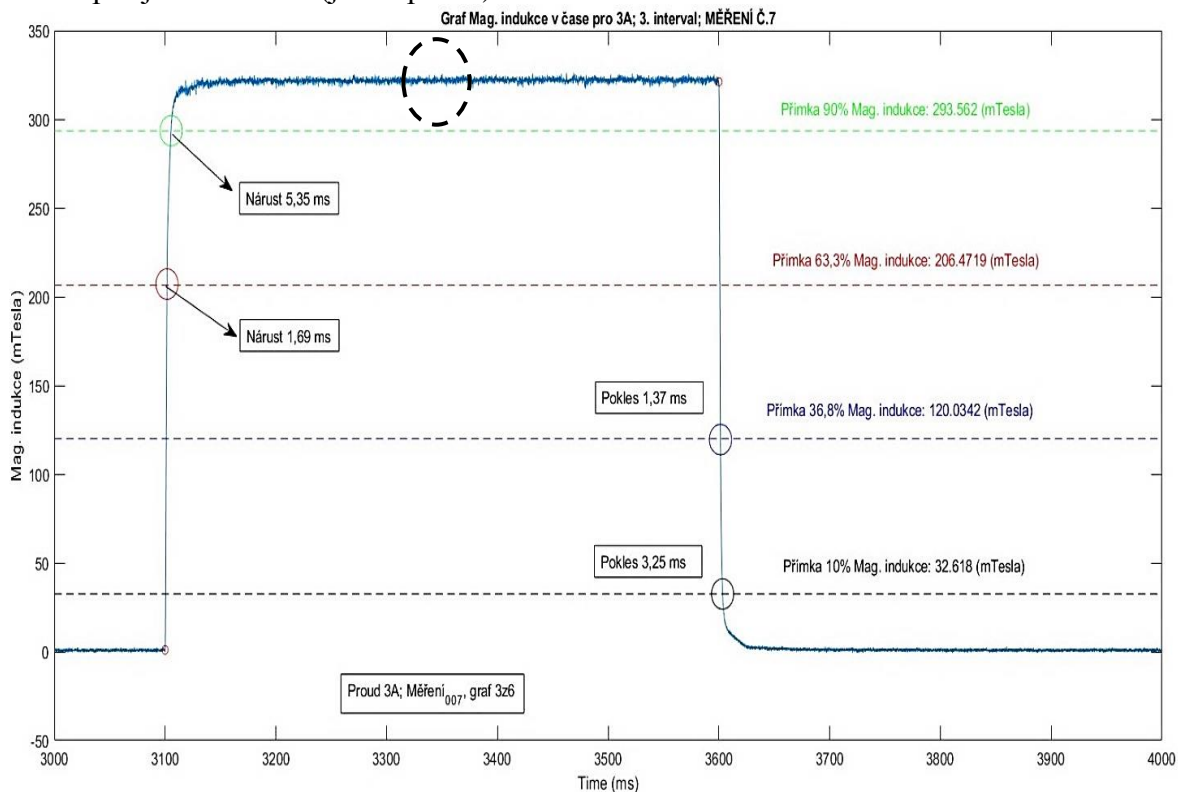
Vyhodnocení dat z měření probíhalo v prostředí *Matlab*. Na obr. 5-17 je zobrazeno typické jedno měření skládající se z 6 jednotlivých vrcholů. Graf zobrazuje vývoj magnetické indukce (modrá barva) a proudu (oranžová) v čase. Každý tento vrchol se vyhodnocoval zvlášť. Rychlý nárůst a pokles znázorňuje zapnutí/vypnutí zdroje. Čárkovaná čára značí osu času (ms).



Obr. 5- 15 Průběhy proudu a magnetické indukce v čase v prostředí Matlab (jedno celé měření)

Na obrázku 5-18 lze vidět detail jedné části měření (třetí vrchol). Maximum mag. indukce vychází z průměrné hodnoty v prostřední části označena čárkovaným kroužkem, od které je odečtena hodnota zbytkové indukce (5-10 *mTesla*). Jednotlivými čárkovanými přímkami jsou označeny časové odezvy pro nárůst a pokles indukce. Tyto hodnoty jsou dány procentuálním vyjádřením z vypočtené maximální indukce. V místech, kde jednotlivé přímkové grafy protínají (zobrazeno kroužky) jsou následně zaznamenávány hodnoty.

Tento postup se opakuje pro jednotlivé vrcholy. Výsledek časové odezvy pro jedno měření (jeden proud) a procentuální hodnotu magnetické indukce (např. nárůst 90 %) je dán průměrem z výsledků všech vrcholů v měření. Z těchto dat je následně sestavná chybová úsečka pro jedno měření (jeden proud).



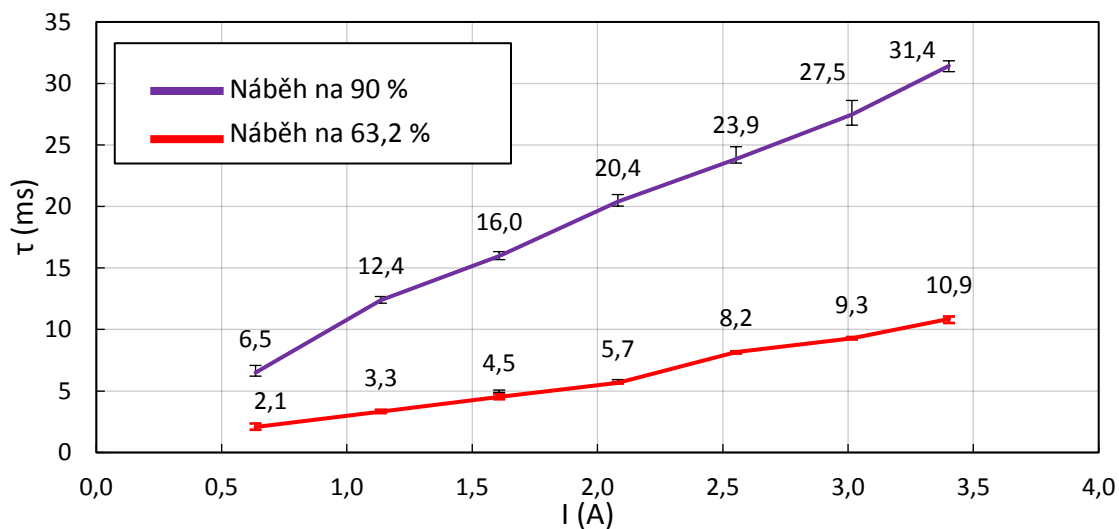
Obr. 5- 16 Graf měření 007: změna mag. indukce v čase; pomalá varianta; třetí vrchol měření (Matlab)

Průběhy na obr. 5-17 a 5-18 jsou výsledkem vyhodnocovacího skriptu vytvořeného v prostředí Matlab. Ten funguje automaticky po načtení vhodného souboru dat (formát .mat). Data i skript jsou součástí el. přílohy CASOVA_ODEZVA_MAG_POLE_VZDUCH.m.

V následující části zprávy jsou uvedeny výsledky měření časových odezvy pro plnou a drážkovanou variantu se vzduchem v aktivní zóně. Jedná se o **odezvy náběhu (poklesu)** na primární 63,2 % (36,8 %) a sekundární 90 % (10 %) hodnotu maximální mag. indukce. V poslední části zprávy jsou výsledky náběhu porovnány s adekvátními magnetickými simulacemi.

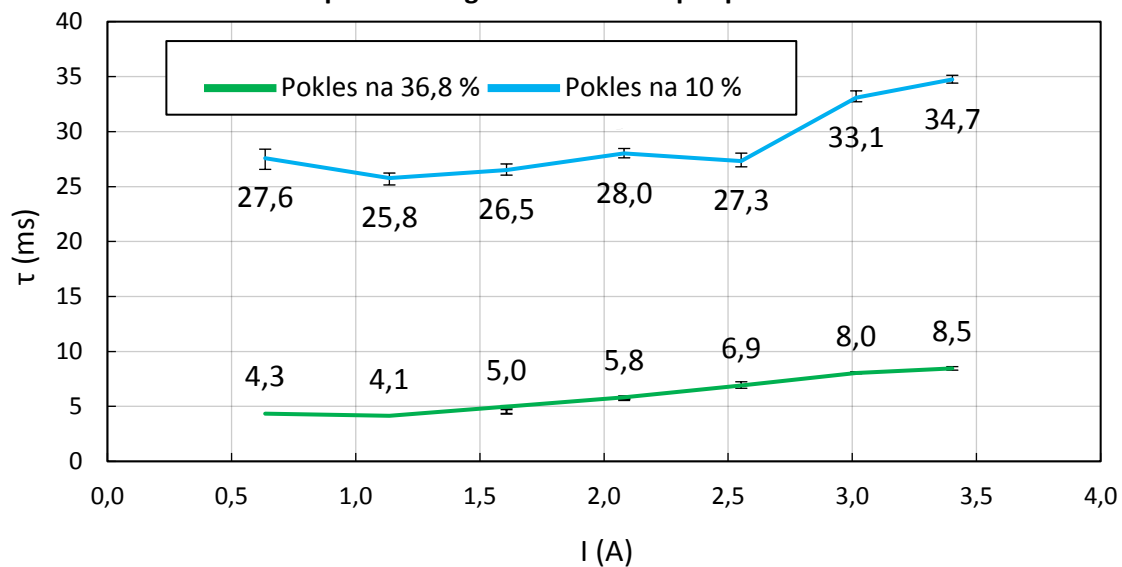
Výsledky měření **PLNÁ VARIANTA MR TLUMIČE:**

Časová odezva náběhu magnetické indukce pro plnou variantu



Obr. 5- 18 Graf časové odezvy náběhu magnetické indukce v závislosti proudu pro plnou variantu

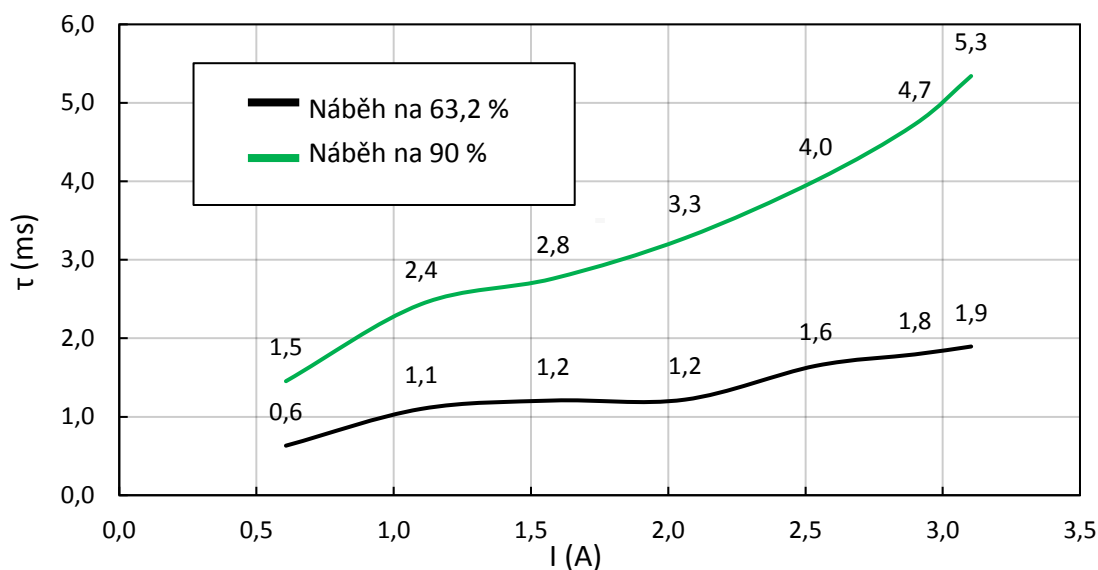
Časová odezva poklesu magnetické indukce pro plnou variantu



Obr. 5- 17 Graf časové odezvy poklesu magnetické indukce v závislosti proudu pro plnou variantu

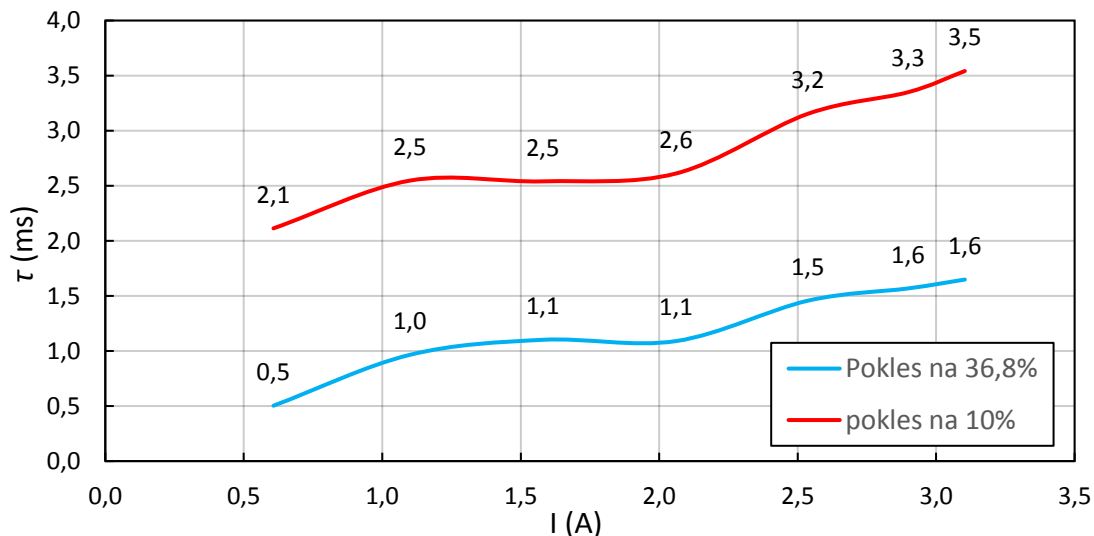
Výsledky měření DRÁŽKOVANÁ VARIANTA MR TLUMIČE:

Časová odezva náběhu magnetické indukce pro drážkovanou variantu



Obr. 5- 20 Graf časové odezvy náběhu magnetické indukce v závislosti proudu pro drážkovanou variantu

Časová odezva poklesu magnetické indukce pro drážkovanou variantu



Obr. 5- 19 Graf časové odezvy poklesu magnetické indukce v závislosti proudu pro drážkovanou variantu

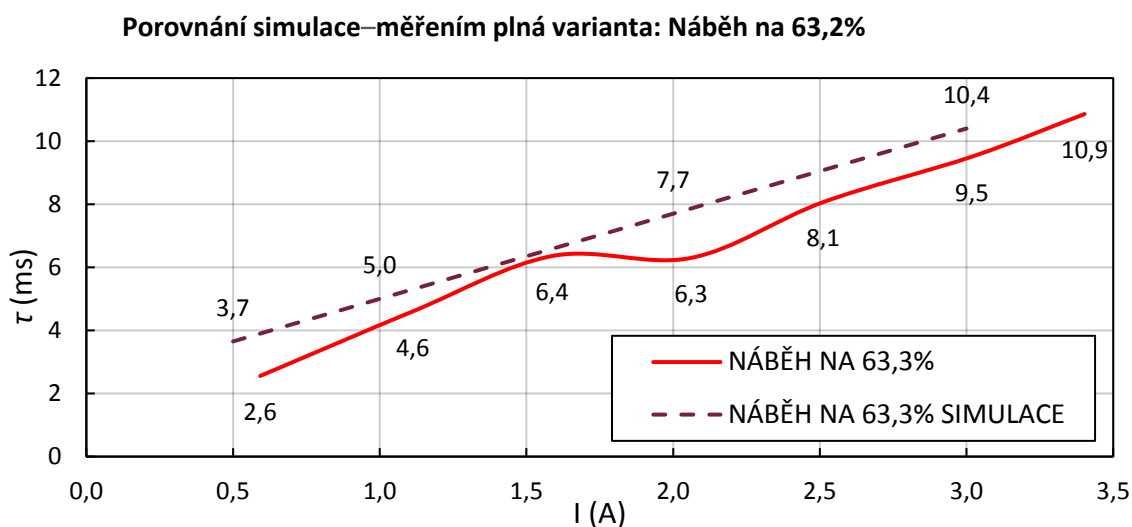
Výsledné grafy obr. 5-19 až 5.22 jasně ukazují stoupající trend nárůstu časové odezvy magnetické indukce při nárůstu vstupního proudu na cívku. Pokles magnetické indukce je ve většině případů rychlejší než nárůst. Nejblíže jsou si tyto hodnoty v případě nízkých proudů. Výsledky také jasně ukazují zrychlení drážkované verze oproti plné verzi MR tlumiče.

Průměrná hodnota zrychlení časové odezvy magnetické indukce v drážce MR tlumiče z plné varianty na drážkovanou je 92,5 %.

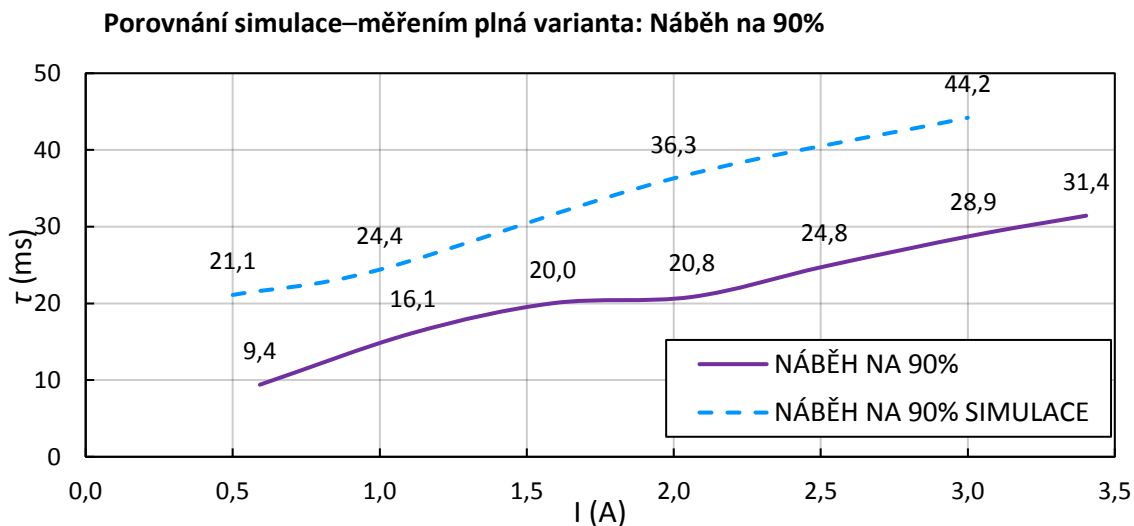
Porovnání měření a simulace odezvy magnetického pole s MR kapalinou:

V následujících grafech jsou uvedeny výsledky simulací a měření pro **náběhy** na 63,2 % a 90 % maxima magnetické indukce, pro **plnou** a **drážkovanou variantu** se **vzduchem v aktivní zóně**.

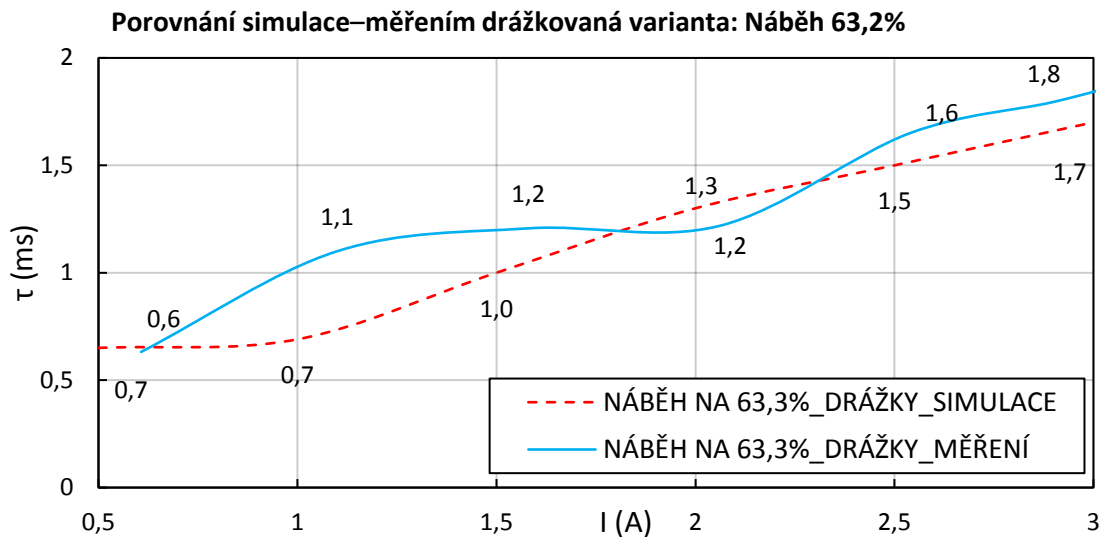
Ve všech grafech 5-23 až 5-26 jsou simulace znázorněny přerušovanou křivkou a měření křivkou plnou. Nejsou zde zobrazeny grafy porovnání pro pokles magnetické indukce, protože pro verifikaci a představu o přesnosti simulací vzhledem ke skutečnosti stačí porovnání náběhu magnetické indukce.



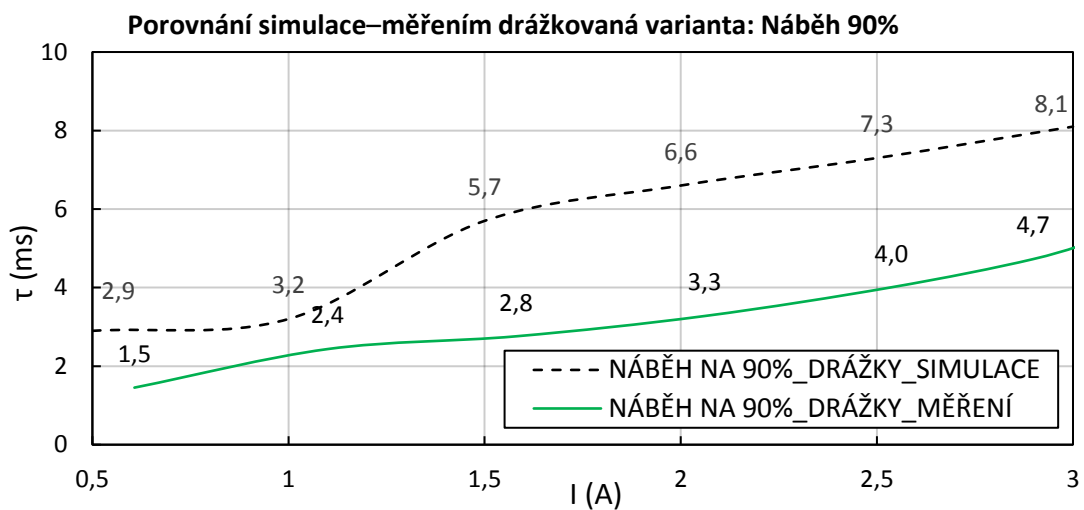
Obr. 5- 22 Graf časové odezvy náběhu na 63,2% magnetické indukce pro plnou variantu; porovnání



Obr. 5- 21 Graf časové odezvy náběhu na 90% magnetické indukce pro plnou variantu; porovnání



Obr. 5- 24 Graf časové odezvy náběhu na 90% magnetické indukce pro drážkovanou variantu; porovnání



Obr. 5- 23 Graf časové odezvy náběhu na 90% magnetické indukce pro drážkovanou variantu; porovnání

Porovnání výsledků měření a simulací jsou zobrazeny na obr. 5-23 až 5-26. Grafy porovnávají nárůst na 63,2 a 90% maximální magnetické indukce pro drážkovanou a plnou variantu MR tlumiče. Je zřejmé, že i pro grafy simulací platí podobné směrnice růstu. Také tady pro ně platí narůstající časová odezva s rostoucím vstupním proudem na cívku. Simulace je více podobná měření u drážkované varianty. Obecně jsou hodnoty podobnější v oblasti primární časové odezvy mag. indukce.

V případě porovnání časové odezvy pro nárůst na 63,2 % se rozdíl mezi simulací a měřením pohybuje pro plnou variantu maximálně do 1,4 ms a pro drážkovanou variantu max. do 0,4 ms. V případě porovnání časové odezvy pro nárůst na 90 % se rozdíl mezi simulací a měřením pohybuje pro plnou variantu maximálně do 15,5 ms a pro drážkovanou max. do 3,4 ms.

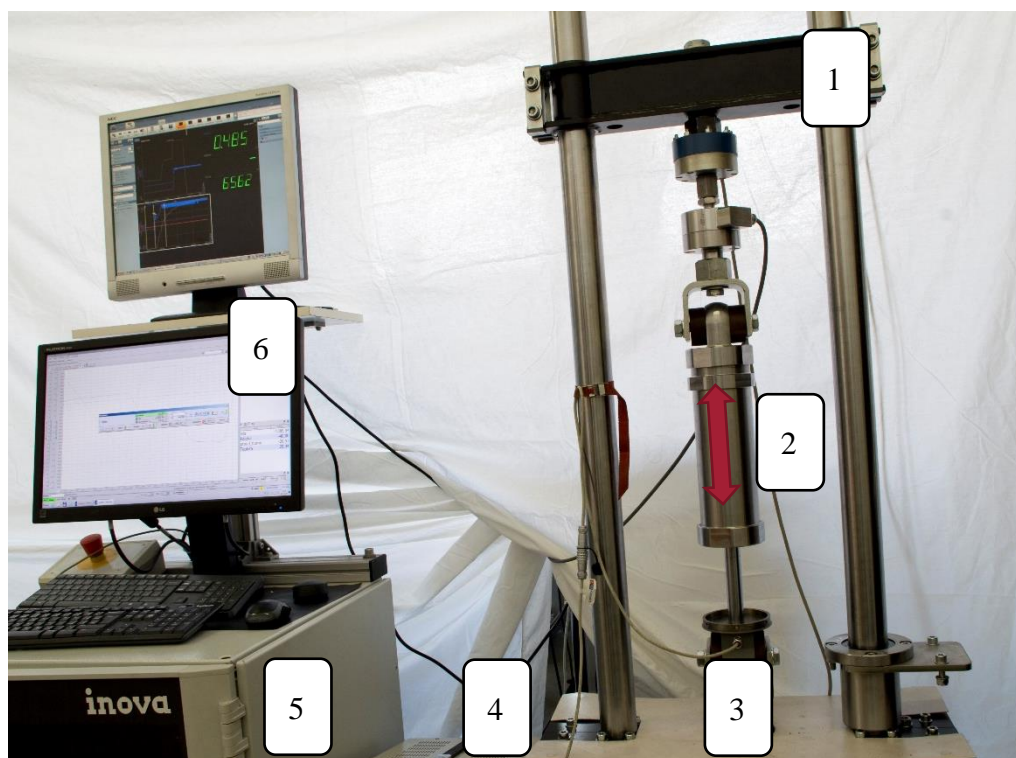
Při porovnání hodnot vychází simulace téměř vždy pomalejší, než měření.

5.3.3 Měření F - v charakteristik

Výstupy měření jsou pro určení časové odezvy průběhy síly a proudu v čase (F - t , I - t) a pro určení rychlostní a zdvihové charakteristiky MR tlumiče závislosti F - z a F - v . Oboje tyto měření probíhaly na pulsátoru Innova.

Měřicí řetězec

Obr. 5-27 zobrazuje měřicí řetězec. Pro určení odezvy tlumící síly byl využit hydraulický pulsátor Innova (1), který pomocí hydraulického válce pohybuje s MR tlumičem (2) ve směru nahoru a dolů. MR tlumič je připevněn pomocí šroubu a velmi tuhých vložek (3). Zdroj (4) spíná proud do cívky MR tlumiče a společně s proudovým řízením zaručuje rychlý náběh proudu na požadovanou hodnotu (vlivem značně zvýšeného napětí). Pro určení polohy slouží snímač umístěný v těle hydraulického válce. Z polohy proměnné v čase lze poté derivací zjistit rychlost, popřípadě zrychlení MR tlumiče. Měřicí soustava obsahuje dva siloměry jeden pro záznam síly a druhý pro silovou ochranu tlumiče (bezpečnostní pojistka). Ve spodní části lze vidět kabel pro napájení tlumiče proudem.



Obr. 5- 25 Měřicí sestava pro určení časové odezvy tlumící síly rychlého MR tlumiče

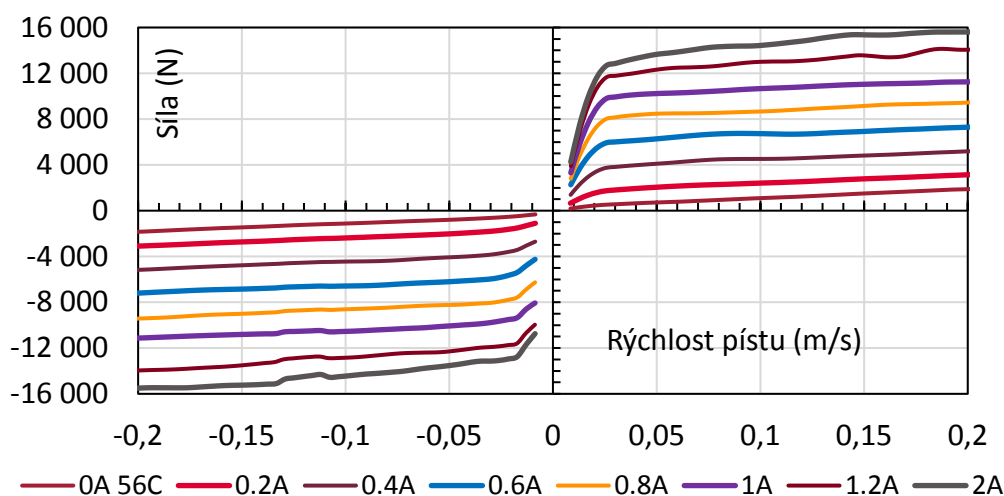
Všechny naměřené hodnoty jsou poté přivedeny do měřicí ústředny (5) a počítače (6) s vyhodnocovacím softwarem. Data z tohoto systému poté slouží k dalšímu vyhodnocování pomocí skriptu vytvořeného v prostředí Matlab.

Metodiku měření

Rychlostní charakteristika tlumiče ($F-v$) je závislosti působící síly a rychlosti pístnice MR tlumiče ve středu zdvihu tlumiče obr.2-28. Jedná se tedy o oblast, kde má tlumič nulové zrychlení, místo měření je takto zvoleno kvůli eliminaci působení setrvačných sil. Při zachování zdvihu a frekvence pohybu dojde k navyšování rychlosti a tím také k navyšování tlumicí síly, tento postup je tzv. sweep metoda měření.

$F-v$ charakteristika zobrazuje závislost tlumicí síly na rychlosti pístnice

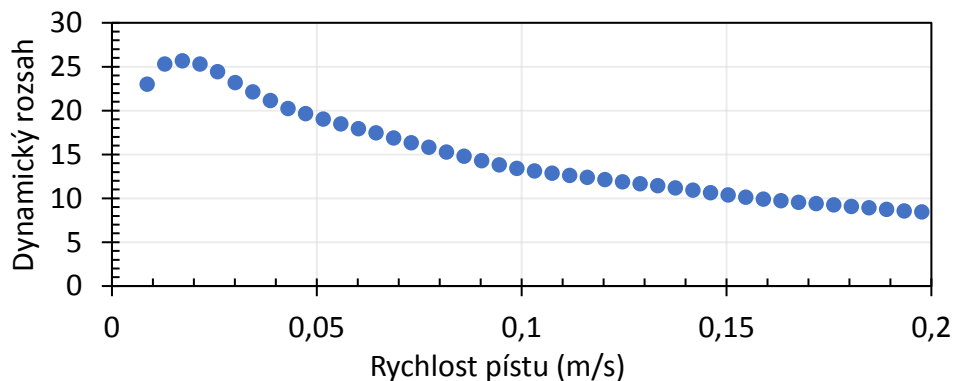
Například pro rychlost 0,05 m/s je maximální tlumicí síla zhruba 13,5 kN (2 A) a minimální tlumicí síla zhruba 0,71 kN (0 A). Při měření tlumicí síla nepřesáhne 16 kN, rozsah (0-2 A).



Obr. 5- 26 Závislost síly na rychlosti pístu při změně proudu na cívce: $F-v$ charakteristika

Určení dynamického rozsahu MR tlumiče

Dynamický rozsah obr.5-29 vychází z maximální tlumicí síly děleno minimální tlumicí silou (při stejné rychlosti pístnice), která je daná bez napájení tlumiče, tudíž se jedná pouze o tlumicí sílu danou třením. Například pro 0,05 m/s je dynamický rozsah 19. Maximální dynamický rozsah těsně přesáhne hodnotu 25 při rychlosti pístu 0,02 m/s.



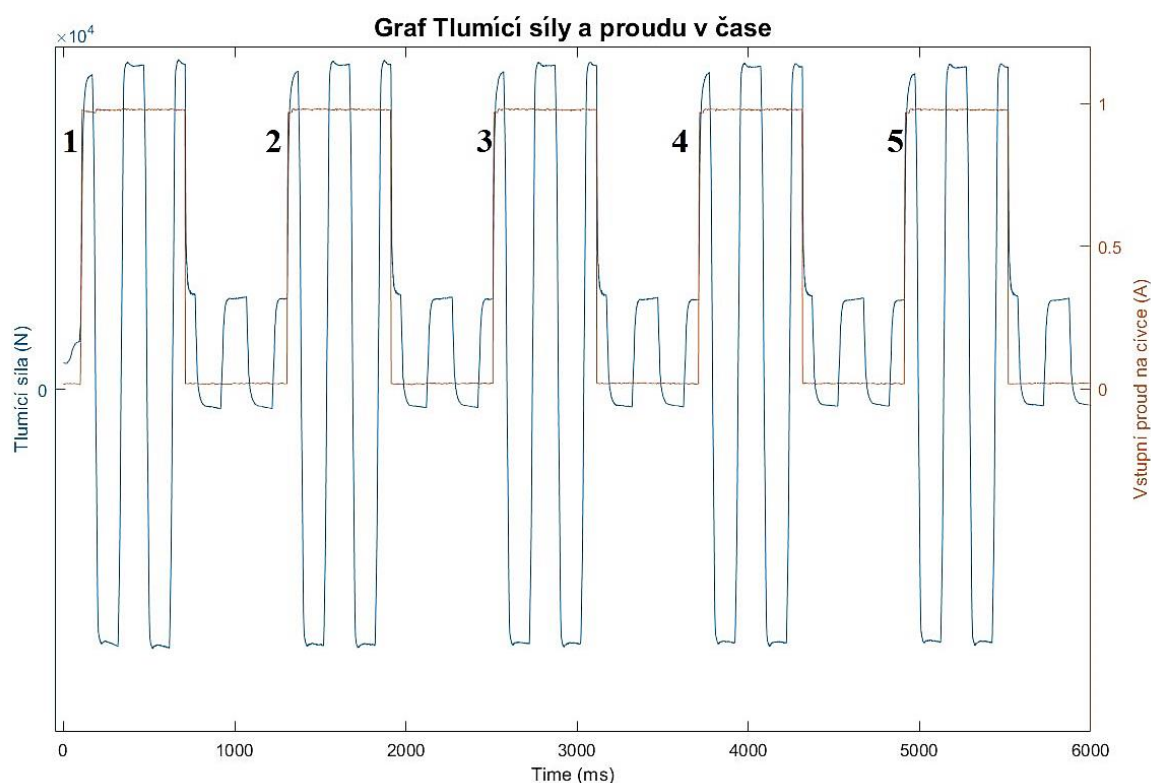
Obr. 5- 27 Graf dynamického rozsahu rychlého MR tlumiče

5.3.4 Měření odezvy síly MR tlumiče

Měření probíhalo na pulsátoru a měřící řetězec je stejný jako v předchozí kapitole měření F - v charakteristiky MR tlumiče. Rozdílné je vyhodnocení, pro které bylo potřeba vytvořit další vyhodnocovací skript v prostředí Matlab viz. elektronická příloha.

Metodika vyhodnocení

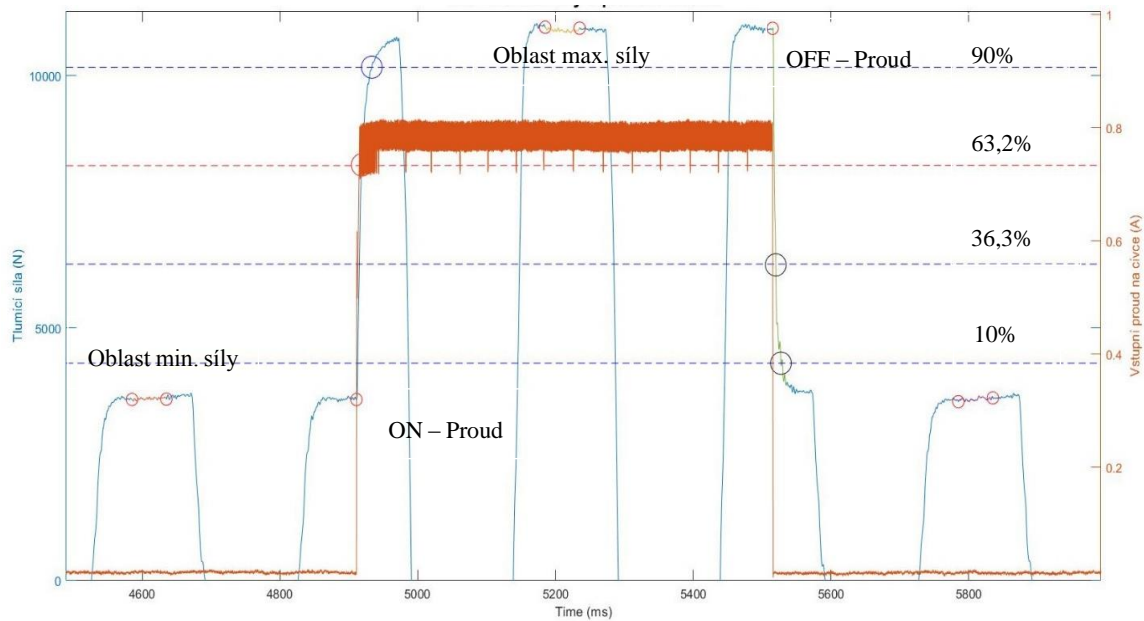
Vyhodnocení dat z měření probíhalo v prostředí Matlab. Na obr. 5-30 je zobrazeno jedno měření skládající se z 5 jednotlivých cyklů. Graf zobrazuje vývoj tlumící síly (modrá barva) a proudu (oranžová) v čase. Každý tento cyklus se vyhodnocoval zvlášť a celkové hodnoty představují průměr z těchto měření. První cyklus se do celkového výsledku nezapočítává. Rychlý nárůst a pokles oranžové křivky znázorňuje zapnutí/vypnutí zdroje.



Obr. 5- 28 Graf tlumící síly a proudu na cívce v čase, celý průběh měření

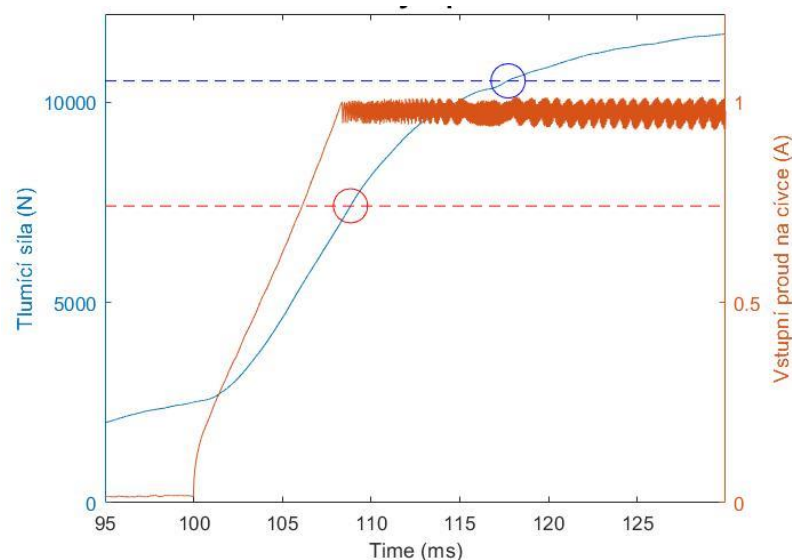
Na obrázku 2-31 lze vidět jednu část měření (čtvrtý vrchol) a konkrétně její závislost tlumící síly a proudu v čase. Maximální tlumící síla je brána jako průměr z oblasti max. síly mínus původní tlumící síla před zapnutím proudu v oblasti min. síly. Začátky a konce intervalů jsou na průbězích označeny kroužky. Jednotlivými čárkovanými přímkami jsou označeny časové odezvy pro nárůst a pokles tlumící síly, ty jsou dány procentuálním vyjádřením maximální síly (10 až 90 %). Přímkami poté jednotlivě průběh tlumící síly protínají a v těchto bodech jsou následně vypisovány hodnoty.

Tento postup je proveden vždy pro jeden cyklus. Pro celé měření jsou výsledky jednotlivých průniků průměrovány, dále je u nich určena plusová i minusová chybová úsečka.



Obr. 5- 30 Graf tlumící síly a proudu v čase, jeden cyklus

Na obr. 5-32 lze vidět zvilost síly a proudu na čase pro nárůst jednoho cyklu. *Proud on* je v čase 100 ms, náběh na 63,2 % maximální tlumící síly je zhruba v čase 8 ms a náběh na 90 % je v čase 17 ms. Dle popsané metodiky na obr.5-31 až 5-33 jsou vyhodnoceny všechny měření časové závislosti tlumící síly MR tlumiče. Jedná se o osm měření, všechny data, grafy lze vyhledat v el. příloze VYHODNOCNÍ ČASOVÉ ODEZVY TLUMICI SILY. Vyhodnocovací program v rozhraní Matlab, je také součástí el. přílohy CASOVA_ODEZVA_SILY.m.

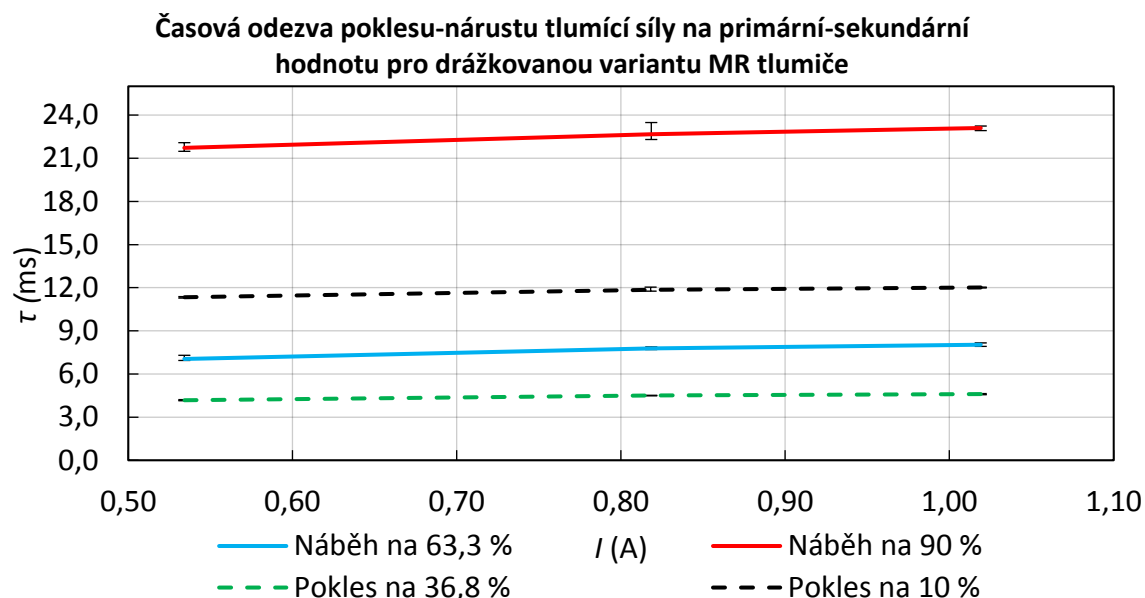


Obr. 5- 29 Graf tlumící síly a proudu v čase, jeden cyklus, NÁBĚH

Vzhledem k velkému počtu grafů je uveden pouze graf shrnující všechny časové odezvy obr.5-34. Výsledky jsou uvedeny pro drážkovanou variantu. Grafy jsou rozděleny na náběh a pokles. Na konci kapitoly jsou uvedeny tabulky s výsledky měření

Výsledky měření

Měření ukazuje jasný trend (obr.5-33), který je zobrazen ve všech grafech měření (viz příloha) a to mírný nárůst časové odezvy tlumicí síly při zvýšený vstupního proudu na cívku. Pokles je ve všech případech rychlejší než nárůst. Výsledky také jasně ukazují zrychlení drážkované verze oproti plné verzi MR tlumiče.



Obr. 5- 31 Graf časové odezvy tlumicí síly pro drážkovanou variantu MR tlumiče, souhrnný graf

MR tlumič v oblasti časové odezvy dosahuje požadovaných hodnot, pro obr. 5-33. zobrazeny v tab. 5-3. Minimální odezvu na primární nárůst tlumicí síly splňuje u všech testovaných proudů, hodnoty jsou výrazně nižší.

Tab. 5- 3 Tabulka hodnot časové odezvy pro drážkovanou variantu MR tlumiče

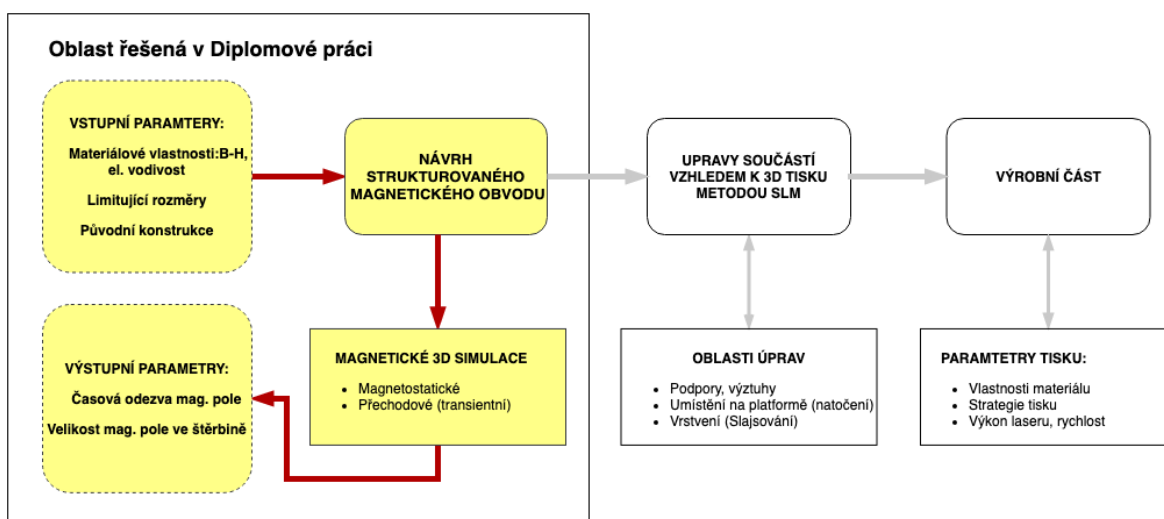
Proud na cívce (A)	Náběh na 63,2 % (ms)	Náběh na 90 % (ms)	Pokles na 36,8 % (ms)	Pokles na 10 % (ms)
0,53	7,04	21,72	4,18	11,34
0,82	7,78	22,66	4,50	11,85
1,02	8,03	23,10	4,61	12,02

Pro proud na cívce 1 A vycházející z magnetických simulací hodnota pro náběh magnetické indukce 5 ms. Podle měření je hodnota 8 ms, a to pro celkovou odezvu MR tlumiče. V rozdílu těchto hodnot (3 ms) jsou obsaženy časové odezvy: řetězení částic, odezva proudového řízení (0,5 ms). Je pravděpodobné, že určité časové zpoždění způsobuje i tuhost uložení.

Všechny hodnoty časové odezvy tlumicí síly dle měření splňují náběh na primární odezvu pod 12,5 ms. MR tlumič tedy bude efektivně tlumit vrtění i při nejvyšší možné frekvenci 8 Hz.

5.4 Návrh 3D tisknutého strukturovaného jádra

Další možností, jak navrhnout součásti magnetického obvodu je využití **3D tisku**, konkrétně **technologie SLM** (Selective Laser melting). Tento přístup umožňuje návrh strukturovaných tvarů (opakující se geometrie) pro snížení časové odezvy. Kapitola se **zaměřuje primárně na návrh geometrie strukturovaného magnetického obvodu** s využitím přístupu popsaného v patentu [61] Nezabývá se řešením technologie výroby (parametry tisku) ani hlubšími úpravami vzhledem k technologii výroby (podpory, vrstvení modelu). Na obr. 5-34 je zobrazeno schéma návrhu/výroby 3D tisknutého jádra MR tlumiče. Práce se tedy zabývá pouze první částí (žluté vyznačené obdélníky). Cílem je představit vhodný návrh v oblasti magnetické indukce a její odezvy ve štěrbině MR tlumiče s využitím 3D tisku.



Obr. 5- 32 Schéma řešení návrhu magnetického strukturovaného obvodu s vyznačenou oblastí řešenou v DP

Vzhledem k omezenému množství vhodných materiálů (použitelné pro metodu SLM, dobré magnetické vlastnosti) i na základě dřívějších pozitivních zkušeností je volen **materiál čistého železa**. Materiálové data, jsou převzaty z výsledků měření 3D tisknutého toroidu [62], který byl tepelně zpracován pro zlepšení mag. vlastností. Průběh $B-H$ křivky na obr.2-55, velikost nasycení je podobná jako u 11SMn30 ovšem nasytí se mnohem dříve, při nižší hodnotě H . Intenzita mag. pole (H) závisí na počtu vinutí a vstupním proudem na cívice. Vzhledem k mag. obvodu by bylo výhodné tyto parametry změnit ovšem pro lepší porovnání budou zachovány. Elektrická vodivost je zhruba dvojnásobná, lze tedy předpokládat podobnou magnetickou indukci ale mnohem vyšší časovou odezvu pro plnou variantu.

Z rešerše vyplývá několik pravidel, doporučení pro návrh strukturovaného magnetického obvodu vyráběného 3D tiskem:

- Jednotlivé pruty jsou ve směru magnetické intenzity a jsou minimálně spojovány,
- v oblasti povrchu jádra (v pólech) štěrbin jsou malé mezery mezi pruty, lze tím dosáhnout homogennější magnetické indukce ve štěrbině,

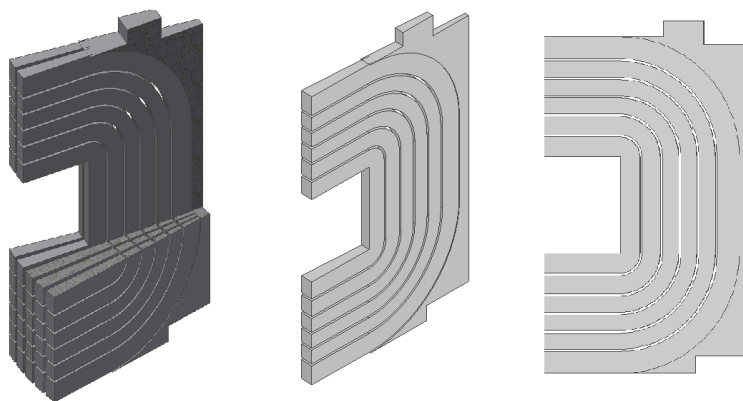
- je vhodné, aby byl větší průřez prutů blíže u cívky kvůli magnetickému nasycení,
- je nutné se co nejvíce vyhýbat úzkým stěnám, popřípadě jakýmkoliv prvkům s velkým rozdílem mezi jednotlivými rozměry (šířka, tloušťka),
- omezením pro šikmé stěny úhel min 45° a převislé části do 0,5 mm
- je třeba brát v potaz možnosti výpočetního programu, především jde o schopnost vytvořit výpočetní síť a celkový výpočetní čas.

Pokud se návrh bude těmito pravidly řídit, dá se předpokládat značné snížení časové odezvy při minimálním snížení magnetické indukce ve štěrbině MR tlumiče. V této části jede především o to, aby bylo možné geometrii vyrobit pomocí 3D tisku a zároveň šlo efektivně vytvořit výpočetní simulaci. Příliš komplikované tvary a malé rozměry vedou buď k neschopnosti vytvořit výpočetní síť anebo k vysokým výpočetním časům (30 h).

5.4.1 Strukturované jádro magnetického obvodu

Pro obě varianty platí, že struktury byly využity pouze pro jádro, u kterého byl použit mat. čistého železa pro SLM tisk. Hlavním prvkem obou návrhů jsou pruty, které směřují stejně jako magnetický indukční tok. Geometrie je výsledkem několika iteračních postupů, především u varianty 2.

Varianta 1: Průřez prutů ve formě obdélníků

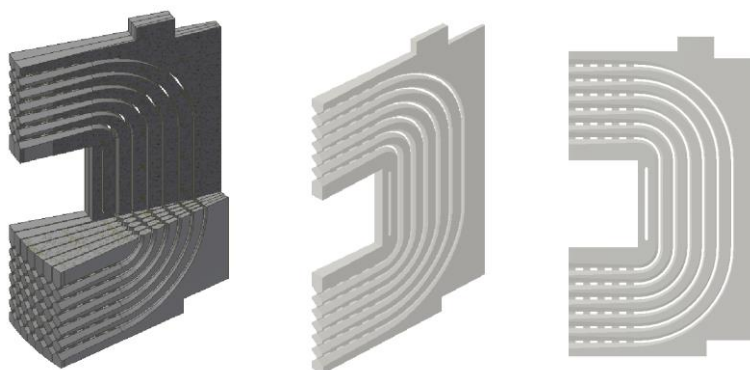


Obr. 5- 33 Varianta 1 strukturovaného jádra magnetického obvodu MR tlumiče: průřez obdélník

Varianta 1 obr. 5-35 se skládá z 6 prutů v jedné vrstvě. Těchto vrstev je 60, tzv. jádro obsahuje 360 prutů. Tyto pruty mají v bočním pohledu tvar C a obdélníkový průřez, směřují ve směru magnetické indukce. Prut pod cívkou je mírně širší než ostatní, které mají stejnou šířku i výšku. Pro tuto variantu nejsou použity spojovací prvky mezi pruty a tím, že mají obdélníkový průřez by jejich 3D výroba byla bez podpor neproveditelná. Varianta slouží k ideálnímu nastavení simulace, ověření všech přístupů, a navrhnutí velikosti a počtu prutů (celkové geometrie). Lze předpokládat, že výsledky dosažené touto variantou budou nejlepší vzhledem k požadovaným parametrům.

Varianta 2: Průřez prutů ve formě kosočtverců

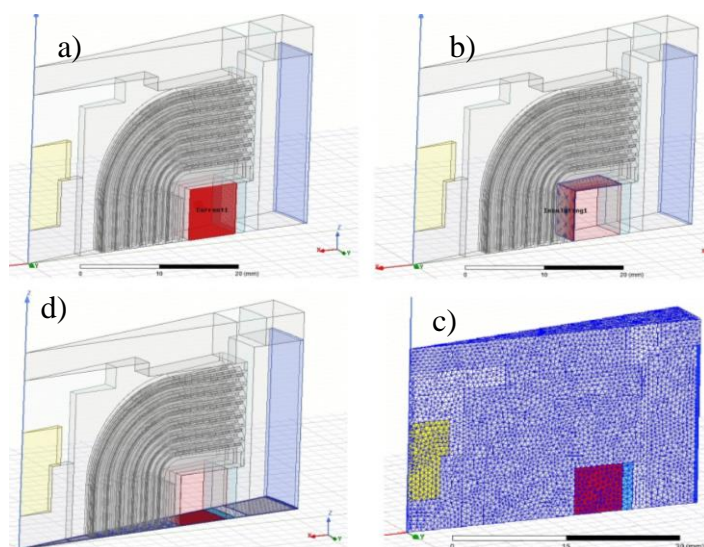
V další fázi se vycházelo z rozměrů prutu z varianty jedna, ovšem jejich průřez byl změněn na kosočtverec obr.5-36. Jednak tím došlo k lepší návaznosti jednotlivých prutu a tato změna umožnila lepší vyrobiteľnosť samotné součásti. Spojovací prvky pro pruty jsou v oblasti kolmé na osu jádra (nad o pod cívkou). Podpory mají vzhledem k rozměru prutu nezanedbatelnou velikost, a tak také složí k zvýšení objemu materiálu směrem k povrchu jádra a tím k homogennější magnetické indukci ve štěrbině. V oblasti rovnoběžné s osou jádra nejsou použity podpory, jsou zde zachovány mezery o konstantní velikosti.



Obr. 5- 34 Varianta 2 strukturovaného jádra magnetického obvodu MR tlumiče: průřez kosočtverec

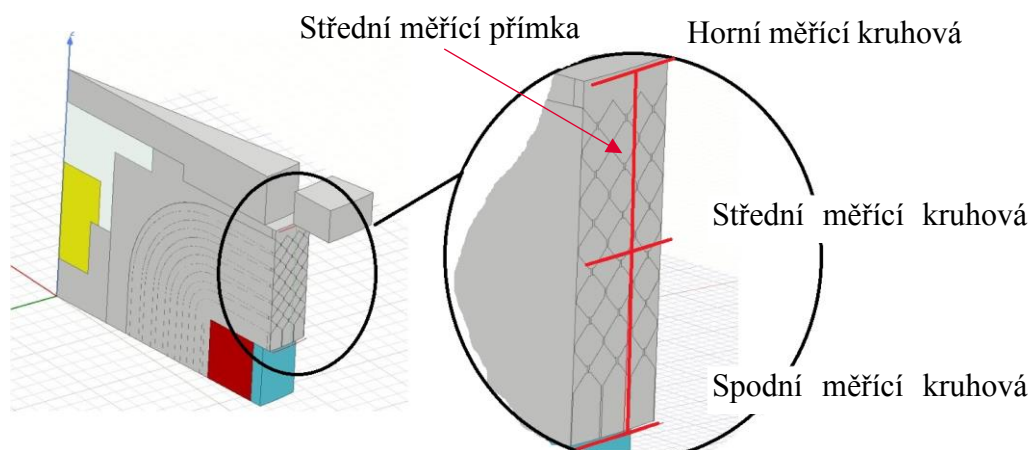
Popis magnetické simulace pro strukturované řešení

Na obr. 5-37 je geometrie varianty 2 a nastavení klíčových částí simulace. Jedná se o nastavení proudu (a) a izolaci (b) cívky. Ač není jádro ideálně symetrické vzhledem k výpočetní náročnosti byla nutnost symetrii použít 5-37 (d). Jedná se o použití sudé symetrie neboli magnetická indukce proudí kolmo na plochu symetrie. Výpočetní náročnost souvisí ze složitostí geometrie, kvalitou sítě (5-37 c) a s min. rozměry, proto bylo při návrhu nutné využívat určitý kompromis vzhledem k dostupnému výpočetnímu výkonu.



Obr. 5- 35 Klíčové prvky při nastavení Magnetických simulací strukturovaných obvodů

Velikost magnetické indukce je reprezentovaná jednou hodnotou. Ta se získá zprůměrováním hodnot z měřicí přímky uprostřed štěrbiny (2D) nebo z měřicí kruhové výseče uprostřed štěrbiny vrchního pólu jádra (3D). Takto získaná hodnota nejlépe reprezentuje magnetickou indukci ve štěrbině MR tlumiče. Pro případ strukturovaných obvodu je zřejmé, že v oblasti povrchu MR tlumiče se střídají mezery a vystupující pruty jádra, to má vliv na změnu magnetické indukce ve štěrbině. Na obr. 5-38 je znázorněna strukturovaný obvod varianty 2 a detail povrchu jádra. V detailu jsou zobrazeny tři měřicí kruhové výseče a měřicí přímka. Každá měřicí křivka je uprostřed drážky.



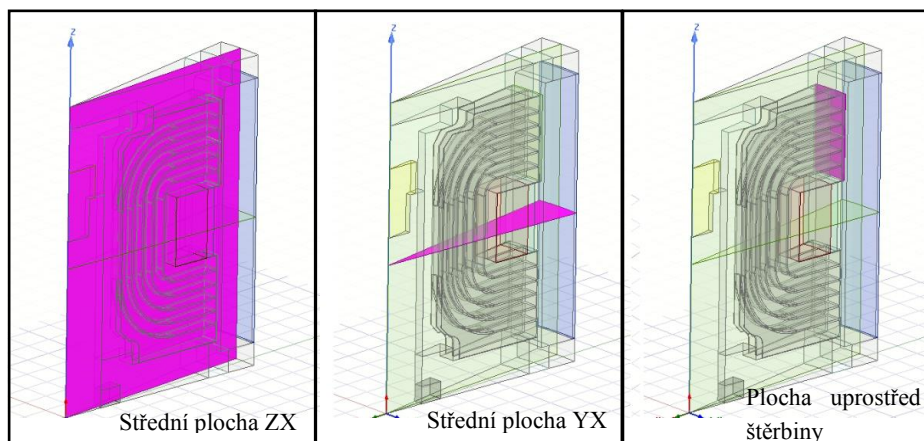
Obr. 5- 36 Strukturované jádro Varianta 2; detail povrchu jádra a jednotlivé měřicí přímky-výseče

Výsledky mag. indukce a primární časové odezvy jejího náběhu při využití jednotlivých měřících křivek lze vidět v tabulce tab.5-4. Podle předpokladů čím blíže je měřicí přímka cívice jádra tím rychleji dosáhne odezvy. Hodnota získaná z měřicí přímky je nejbližší výsledkům ze střední výseče, popřípadě průměru ze všech výsečí. Dle těchto výsledků lze konstatovat, že hodnota, která nejhodněji popisuje mag. indukci ve štěrbině je průměr ze získaných hodnot na střední měřicí kruhové výseči nebo přímce. Parametry simulace pro výsledky v tabulce: 1 A; mat. jádra čisté železo, mat. pláště 11SMn30. Jedna varianta plná (nehomogenita způsobena pouze vzdáleností od cívky) druhá strukturovaná.

Tab. 5- 4 Tabulka výsledku podle měřicí přímky

Použitá měřicí křivka	Strukturované jádro varianta 2		Plné jádro	
	Mag. Indukce (mT)	Časová odezva (ms)	Mag. Indukce (mT)	Časová odezva (ms)
Vrchní výseč	372,4	11,6	397	81
Střední výseč	397	7,2	465	75,54
Spodní výseč	425,4	1,5	463	45,7
Přímka	424	6,7	467,5	74,65

Na obr. 5-40 jsou zobrazeny měřicí plochy pro zhodnocení mag. obvodu MR tlumiče. Jedná se o střední plochu ZX, symetricky umístěna uprostřed využití geometrie. Dále o střední plochu YX ta je uprostřed cívky a plochu uprostřed štěrbiny ve vrchní části jádra.



Obr. 5- 38 Měřicí- vyhodnocovací plochy strukturovaných obvodů

VARIANTA:	Střední plocha ZX	Střední plocha YX	Plocha štěrbiny
Drážkované jádro + plášť Materiál: 11SMn30			
Plné Jádro Variant 0 Materiál: Čisté železo			
Strukturované Jádro Variant 1 Materiál: Čisté železo			
Strukturované Jádro Variant 2 Materiál: Čisté železo			

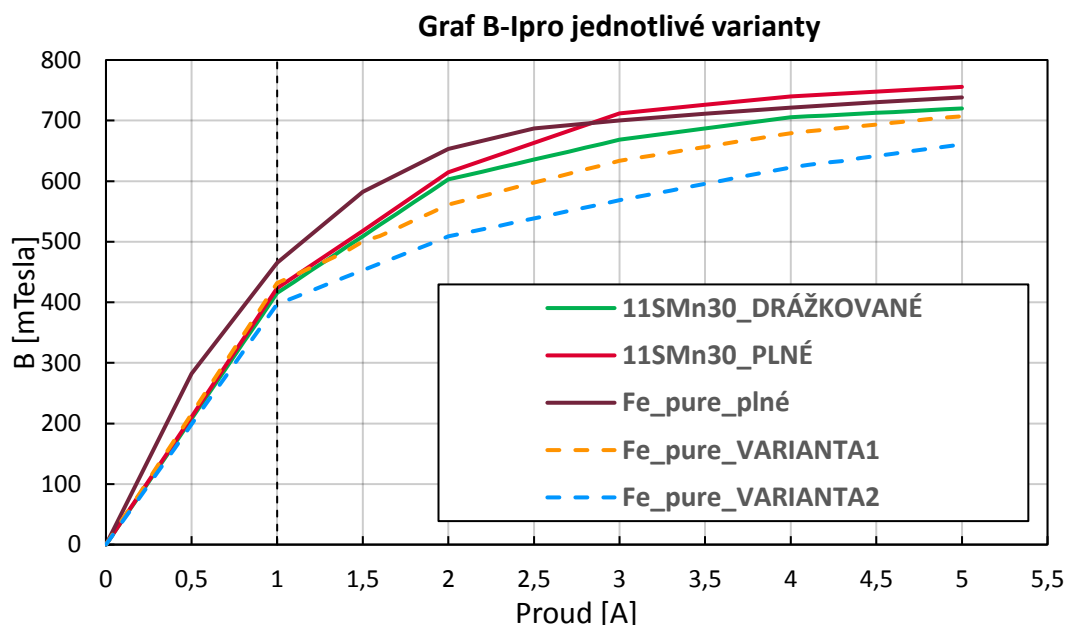
Obr. 5- 37 Plochy jednotlivých variant a rozložení hustoty magnetické indukce

Na obr. 5-39 lze vidět výsledky hustoty magnetické indukce pro jednotlivé varianty na vykreslených plochách tak jak jsou zobrazeny na obr. 5-40. Všechny zobrazené přechodové magnetická simulace mají stejné parametry: $I = 1 \text{ A}$ (cívka); vířivé proudy ON; $t = 5 \text{ ms}$; měřítko a velikost jednotlivých obrázku je individuální.

První varianta ukazuje výsledky pro vyráběný magnetický obvod MR tlumiče. Je zřejmé, že se jedná o nejlépe navržený magnetický obvod dochází zde k efektivnímu využití materiálu jádra a pláště pro maximální zvětšení mag. indukce ve štěrbině. Výsledek u štěrbině ukazuje rozdílnou hodnotu to je způsobeno drážkou (pro ni je zvolen mag. neaktivní materiál – plast).

Další je zobrazena varianta plného jádra z mat. čistého železo pro 3D tisk. Výsledky ukazují dříve zmíněný fakt, že sice má stejnou hodnotu nasycení ovšem dochází k němu rychleji a tím pádem nevyužívá celkového objemu mag. obvodu. Zlepšení je možné ve změně rozměrů cívky (počtu vinutí, proudu), štěrbině nebo snížení průměrů jádra a tím se dostat na nižší hodnotu magnetické intenzity. Ovšem pak by tato varianta byla zcela neporovnatelná (změna rozměru není možná). Zde je třeba říct, že se jedná pouze o variantu, která slouží k porovnání se strukturovanou variantou, kde je rozložení magnetického pole lepší.

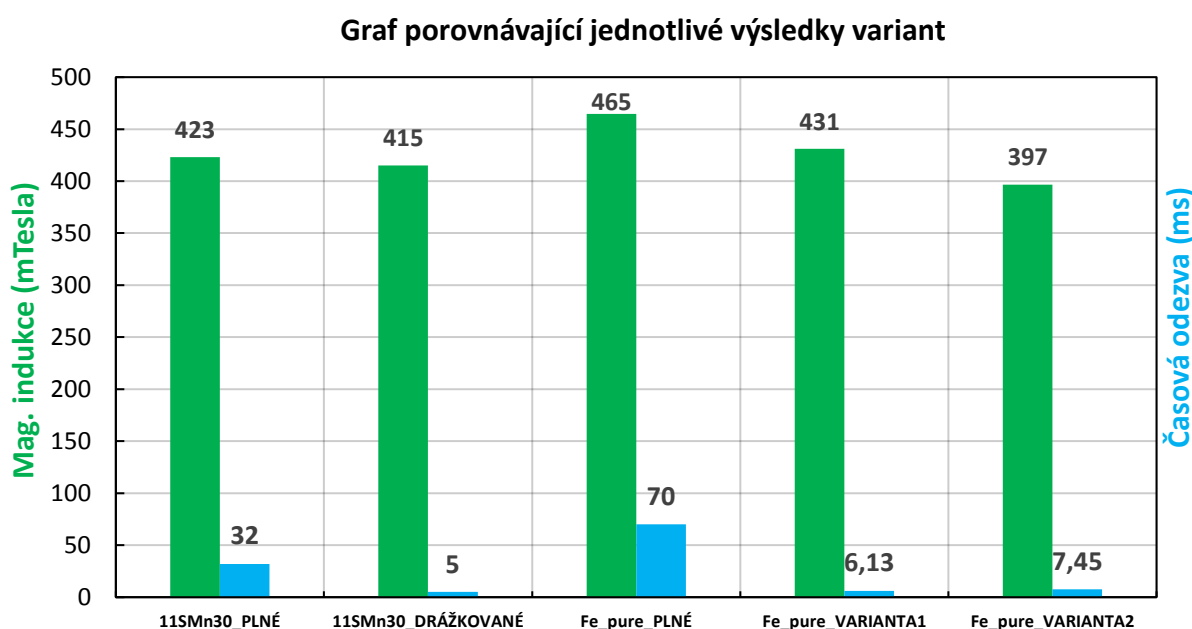
Varianta 1 a 2 strukturovaného jádra magnetického obvodu má problematické rozložení hustoty magnetického pole na ploše štěrbině. Varianta 1 je v tomto ohledu lepší ovšem z technologického hlediska ji lze komplikovaně vyrobit. Pruty by se tiskly do prostoru, bylo by potřeba vytvořit podpory, ke kterým by se v určitých částech dalo velmi těžko dostat. Pro variantu 2 je rozložení v ploše ZX obdobné a na povrchu jádra rozdílně, ovšem v polovině drážky se tyto rozdíly srovnávají. Tento problém lze vyřešit zvětšováním prutu směrem k povrchu jádra a tím zmenšováním mezery mezi pruty, to je ovšem problematické vzhledem k modelování a následně k vytváření sítě. Navíc výsledky jsou v rámci požadavků a rozsahu návrhu dostačující, tyto výsledky lze vidět na obr. 5-41 a 5-42.



Obr. 5- 39 B-I závislost v drážce jádra MR tlumiče; rozdílný mat.

Na obr. 5-42 jsou zobrazeny výsledky magnetostatických simulací pro varianty použité v kapitole návrhu strukturovaného obvodu. Je zřejmé, že u varianty využívající materiál 11SMn30 dochází k mírnějšímu snížení. Drážky neodebírají tolik aktivního mat. z magnetického obvodu. Plná varianta z čistého železa dosahuje největší mag. indukce, vzhledem k její vysoké el. vodivosti a rychlému nasycení není tento materiál nejvhodnější a bylo by vhodné najít náhradní řešení, což je ovšem velmi problematické vezmeme v potaz kombinaci potřebných vlastností, a navíc možnost využít materiálu při výrobě součástí 3D tiskem. Je jasně vidět, že strukturované obvody dosahují nejnižší magnetické indukce to je spojeno s ubytkem aktivního materiálu magnetického obvodu.

Hodnoty výsledku magnetické indukce a její časové odezvy jsou vidět na obr. 5.43. Jak pro variantu 1 tak i pro variantu 2 je splněn limit maximální primární časové odezvy pro náběh magnetické indukce v štěrbině MR tlumiče (do 7,5 ms). Podle dříve dosažených výsledků se časová odezva snižuje se zvyšováním proudu na cívce.



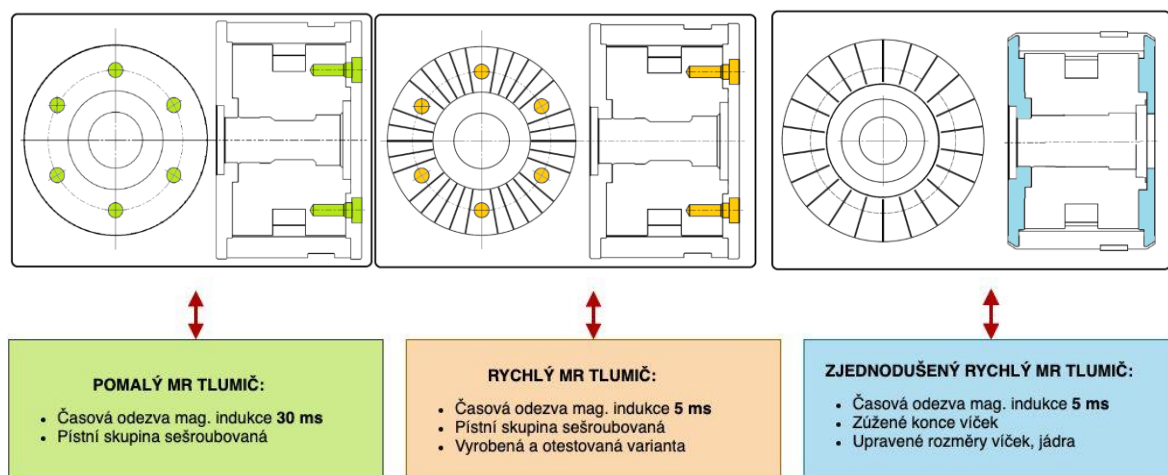
Obr. 5- 40 Tabulka porovnání výsledků simulací odezvy magnetické indukce a její velikosti.

Využitím strukturovaných součástí v magnetickém obvodu lze velmi výrazně potlačit vznik vířivých proudů a tím pádem snížit časovou odezvu magnetické indukce. Tento návrh má ovšem několik omezení v oblasti složitosti geometrie ať už kvůli tvorbě sítě nebo výpočetním nárokům. Navíc se musí řídit určitými zásadami a pravidly technologii 3D tisku, ta je také omezena použitelnými materiály s dobrými magnetickými vlastnostmi. Materiály, které mají prokazatelně dobré mag. vlastnosti a lze je tisknout technologií 3D tisku jsou slitiny Fe-Ni a Fe-Si ale v nalezených publikacích se neuvádí potřebné materiálové parametry pro magnetické simulace. Materiálové vlastnosti tištěných součástí jsou silně závislé na procesních parametrech výkonu laseru, skenovací rychlosti a strategii, popřípadě tepelným úpravám.

5.5 Konstrukční úpravy magnetoreologického tlumiče

Na tlumiče podvozků kolejových vozidel jsou kladeny vysoké nároky na životnost a spolehlivost, spojené s minimální údržbou. Tlumič je zatěžován proměnlivým zatížením s max. silou 15kN, maximální frekvence tohoto zatěžování je 8 Hz. Lze ovšem předpokládat, že nejčastější zatěžující síla a frekvence bude nižší, a to v závislosti na umístění tlumiče v podvozku kolejového vozidla, na projížděné trati, a především provozní rychlosti.

Kapitola se nejdříve zabývá konstrukčními úpravami vycházejícími z poznatků získaných při úpravách konstrukce MR tlumiče z pomalé na rychlou verzi. Následně jsou představeny výsledky z výpočetních analýz pístnice. Poslední část se zabývá zjednodušeními MR tlumiče tak aby byla konstrukce vhodnější k sériové výrobě. Vzhledem k tématu DP a rozsahu práce se nejedná se o celkový výrobní a technologický návrh pro sériovou výrobu. Na obr. 5-43 lze vidět postup řešení MR tlumičů v diplomové práci.



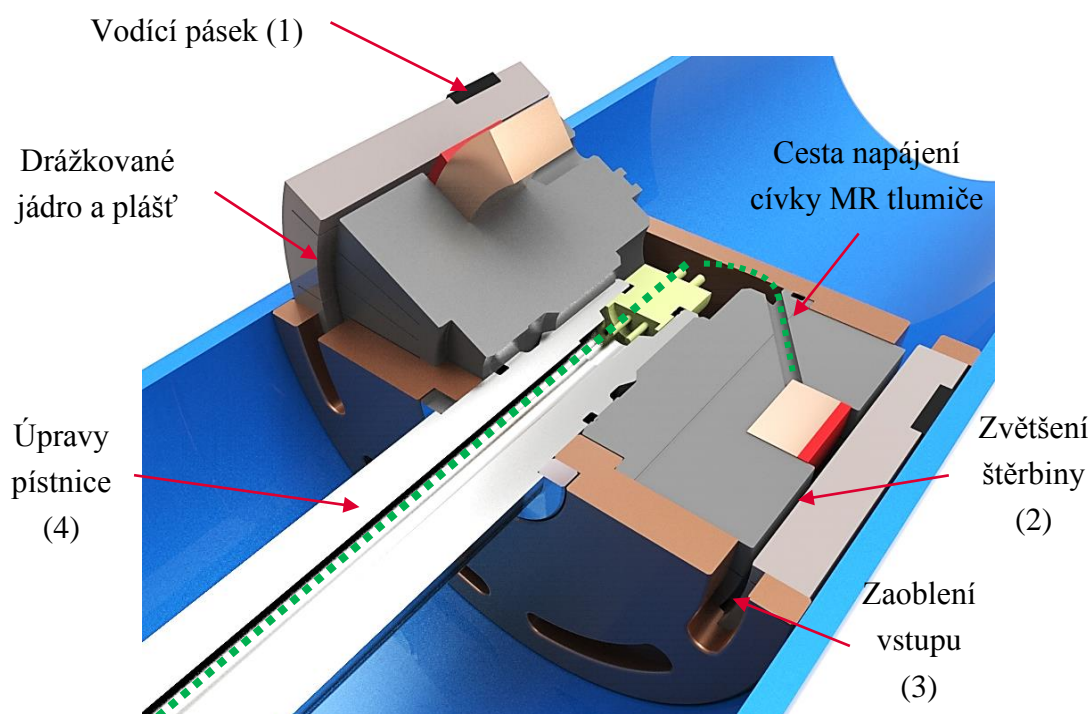
Obr. 5- 41 Schéma tlumičů DP s uvedenými základními informacemi a vyznačenými oblastmi změny

5.5.1 Úpravy vycházející ze změny na rychlou verzi MR tlumiče

V průběhu návrhu rychlého MR tlumiče docházelo na základě zkušeností ke změnám v konstrukci. Pro lepší vedení pístu v hydraulickém válci je využít vodící pásek. Kvůli výsledkům minimální tlumicí síly ($I = 0$ A) z podobné konstrukce MR tlumiče došlo k zvětšení drážky. Pro součásti nacházející se v oblasti, kde kapalina vstupuje do štěrbin je využito zaoblení kvůli předpokládanému snížení vtokových ztrát. Dochází také k navýšení průměru pístnice viz další kapitola. Uvedené změny jsou zobrazeny na obr. 5-2.

1. Změna vedení pístové skupiny – využití vodícího pásku,
2. zvětšení velikosti štěrbin y z 0,95 na 1,15 mm, kvůli snížení min. tlumicí síly
3. zaoblení vstupu do štěrbin y – předpokládané snížení vtokových ztrát,
4. výpočetní analýza pístnice, zvětšení průměru pístnice z 18 na 25 mm.

Model na obr. 5-44 je částečný a odstupňovaný řez pístoni skupiny v hydraulickém válci. Jednak jsou zde uvedeny odkazy na provedené změny a také lze vidět průchozí pístonici na jejímž konci je konektor. Tento konektor je z jedné strany spojený s napájením a z druhé s navinutou cívkou, jejíž drát prochází natočenou dírou v řezu, cesta je vyznačena čárkovanou zelenou čarou. Cívka je zobrazena jako plný materiál, ve skutečnosti se jedná o navrstvený drát (200 závitů) s průměrem 0,15 mm. Na obrázku lze také vidět drážkování jádra a pláště MR tlumiče.



Obr. 5- 42 3D model drážkovaného MR tlumiče; pohled v upraveném řezu

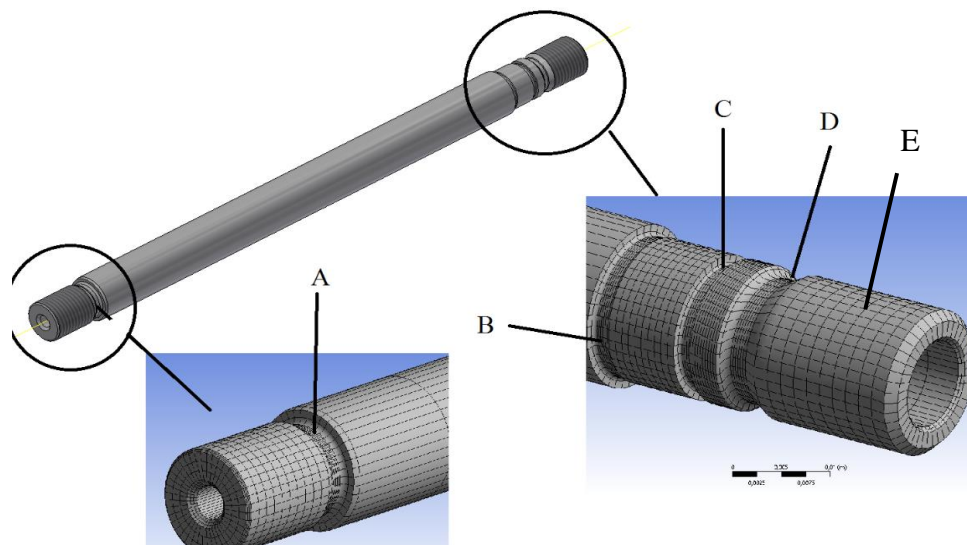
Pevnostní analýza pístonice

Pevnostní analýza je zaměřena na pístonici MR tlumiče, kvůli nárokům zmíněným výše byl kladen požadavek na kompletní kontrolu vůči mezním stavům, které mohou při provozu nastat. Kompletní výpočet pístonice je uveden v příloze D ta je vytvořena v programu PTC Mathcad Prime 4.0 a popisuje analytický přístup a také uvádí výsledky MKP simulací v prostředí ANSYSYS. Analytický přístup vychází z Konstruování Strojních součástí [67] nebo Strojnických tabulek [68]. Výpočty u pístonice jsou zaměřeny na několik mezních stavů:

- Mezní stav vzpěrné stability (MSVS),
- mezní stav pružnosti (MSP),
- kontrola závitů,
- mezní stav únavy (MSU),
- metoda konečných prvků (MKP).

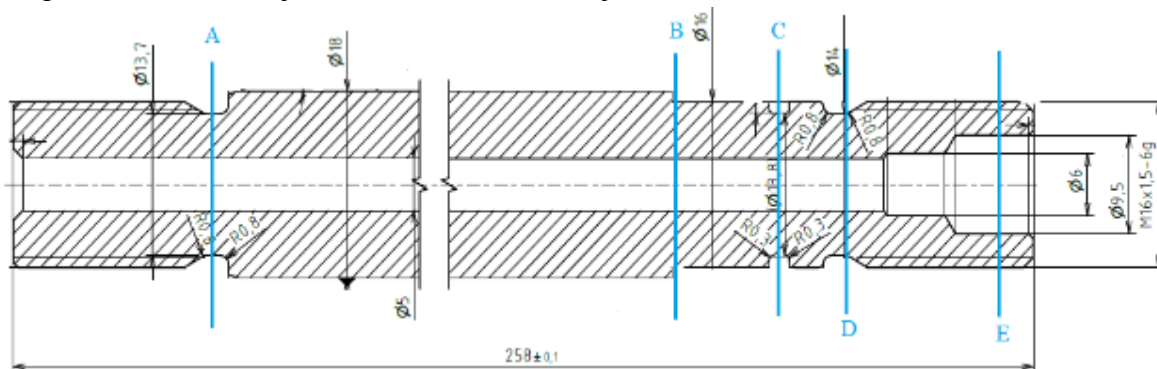
Analytický přístup k výpočtu pístnice

Pístnice je vzhledem k pevnostním výpočtům nejkritičtější část tlumiče. Především se jedná o únavovou životnost a požadovaný počet cyklů. Na obr.5-45 je zobrazen 3D model pístnice a v detailu jsou zobrazeny prověřované oblasti. Jsou použity výstřižky z programu ANSYS, které ukazují síť pro MKP výpočty. Prověřované oblasti jsou označovány jako A až E. Každá tato oblast je svým způsobem problematická ať už se jedná o obsah průřezu nebo koncentrátoři napětí. Pístnice je po celé délce dutá. Oblasti A, D jsou zahlubení za závitem, oblast B je v místě zápichu, C je místem pro drážku těsnícího kroužku a oblast E je v prostřední části závitu, tato oblast má nejmenší průřez.



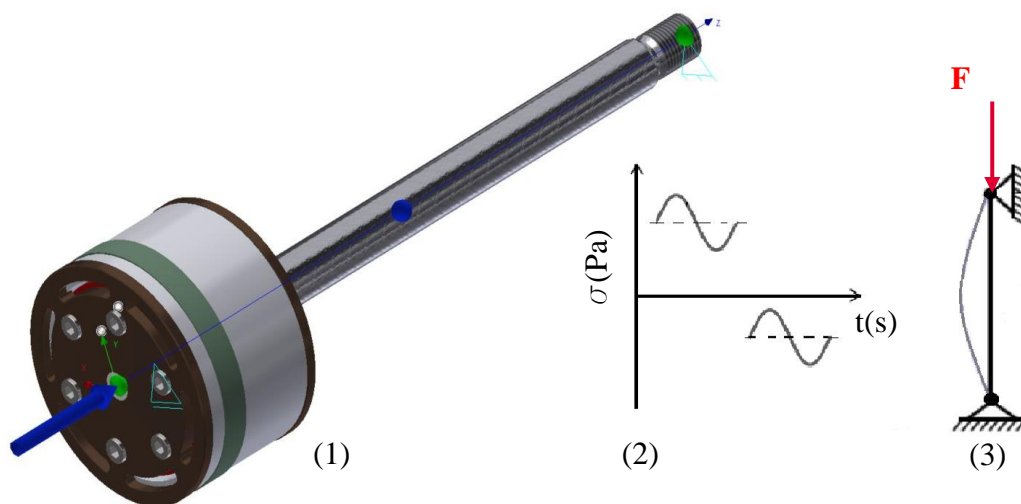
Obr. 5- 43 Model pístnice MR tlumiče v prostředí ANSYS, detailně označené problematické oblasti pro výpočet

Na obr 5-46 je zobrazen řez pístnicí společně se základními rozměry původního návrhu pístnice. V průběhu výpočtu se mění maximální průměr a nato navazující rozměry (závitu, zahlubení atd.). Původní max. průměr je 18 mm a pístnice končí na každé straně závitem M16. Pístnice má přes celou délku (258 mm) vnitřní průměr 5 mm, tento průměr je v oblasti E zvětšen na 9,5 mm, kvůli konektoru. Modře jsou označeny kritické oblasti ukázány už na obr. 5-46. K těmto oblastem jsou vypočteny průřezy, koncentrátoři napětí a výsledné meze bezpečnosti. Pístnice je z materiálu 42CrMo a jádro z 11SMn30.



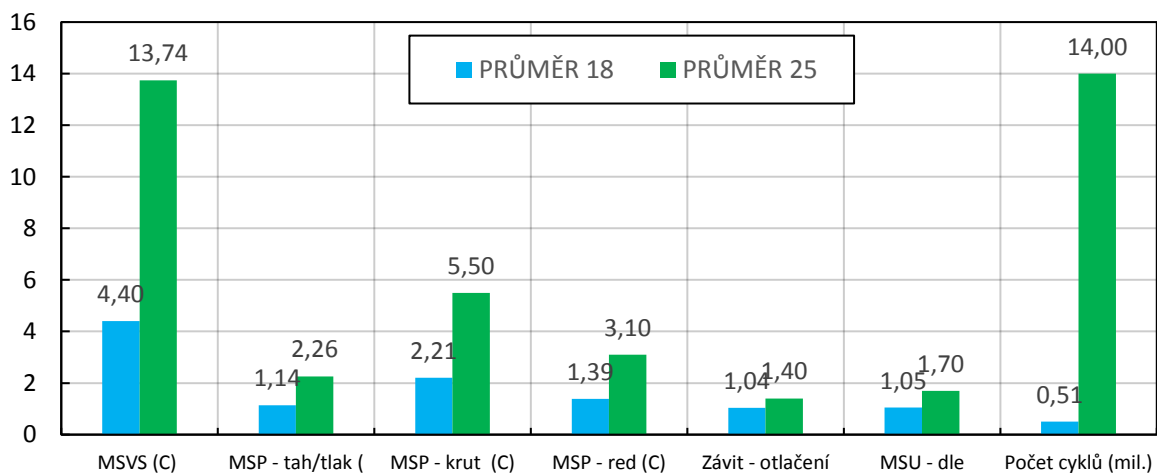
Obr. 5- 44 Řez pístnicí s označenými oblastmi kontroly (modré čáry) a původními rozměry

Na obr. 5-47 (1) je zobrazena pístnice a pístová skupina se zatěžující silou a umístěním podpor pro MZP. Při výpočtu pístnice v případě mezního stavu únavy se vychází z proměnlivého namáhání. Realitě nejvíce odpovídá cyklus pulsující obr. 5-48 (2). Vzhledem k utažení pístnice k jádru je použito předpětí šroubu 19,3 kN. V provozu vzniká konstantní zatížení od natlakované části tlumiče 30bar a síla od tlumení pohybu podvozku kolejového vozidla vůči skříni. Ta je volena na 15kN, s frekvencí 3 Hz. Pro mezní stav vzpěrné stability se předpokládá konfigurace na obr. 5-48 (3) jedná se o využití kloubových podpor na koncích pístnice.



Obr. 5- 45 Zobrazení pístnice (1); zatěžující pulsující cyklus (2); uložení MSVS (3)

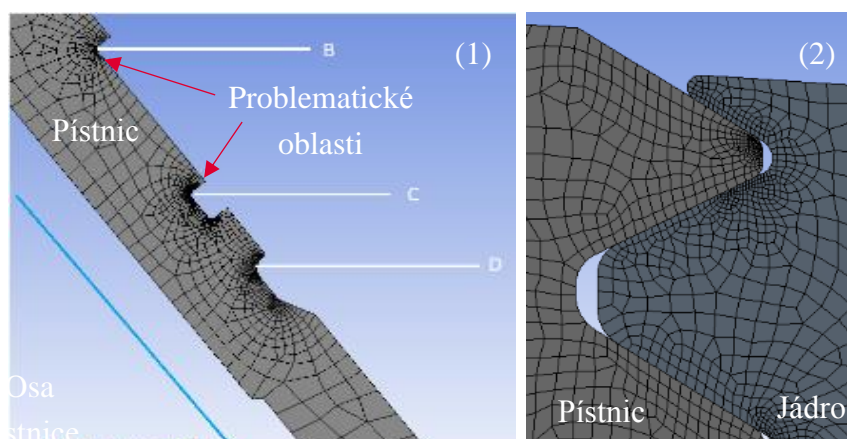
Kompletní výsledky pro nejnižší bezpečnost k jednotlivým mezním stavům, v závorce uvedeny průřezy, kterých se nejnižší bezpečnost týká na obr. 5-48. Zobrazena první iterace 18 mm a poslední iterace 25 mm. Zkratky uvedené v legendě obr. 5-48: Mezní stav vzpěrné stability = MSVS; Mezní stav pružnosti pístnice= MSP; Mezní stav únavy pístnice = MSÚ. Kompletní výpočty pro jednotlivé iterace jsou uvedeny v příloze D: Pevnostní analýza pístnice MR tlumiče, popřípadě v el. příloze souboru excel Výsledky pevnostních výpočtů.



Obr. 5- 46 Tabulka výsledků pevnostní analýzy pro průměr pístnice 18 a 25; analytický přístup

Přístup k pevnostnímu výpočtu pístnice pomocí MKP

V první části se k problematice přistupovalo pomocí analytického výpočtu. V další části se využili metody konečných prvků a programu ANSYS. To z důvodu kontroly a ověření správnosti výpočtu. Nejdříve došlo k výpočtům s 3D geometrií, tyto výpočty mají určité omezení vzhledem k kvalitě sítě a výpočetní náročnosti. Nepodařilo se získat hodnoty pro únavovou životnost a pro napětí v závitě. Z tohoto důvodu byla tedy vytvořena geometrie 2D. Nejdříve pístnice obr. 5-49 (1), využívající symetrii kolem osy rotace a poté kontaktní oblast pístnice se závitěm a maticí (jádro) obr. 5-49 (2).



Obr. 5- 47 2D geometrie pro MKP výpočty; (1) pístnice; (2) kontakt v závitě jádro/pístnice

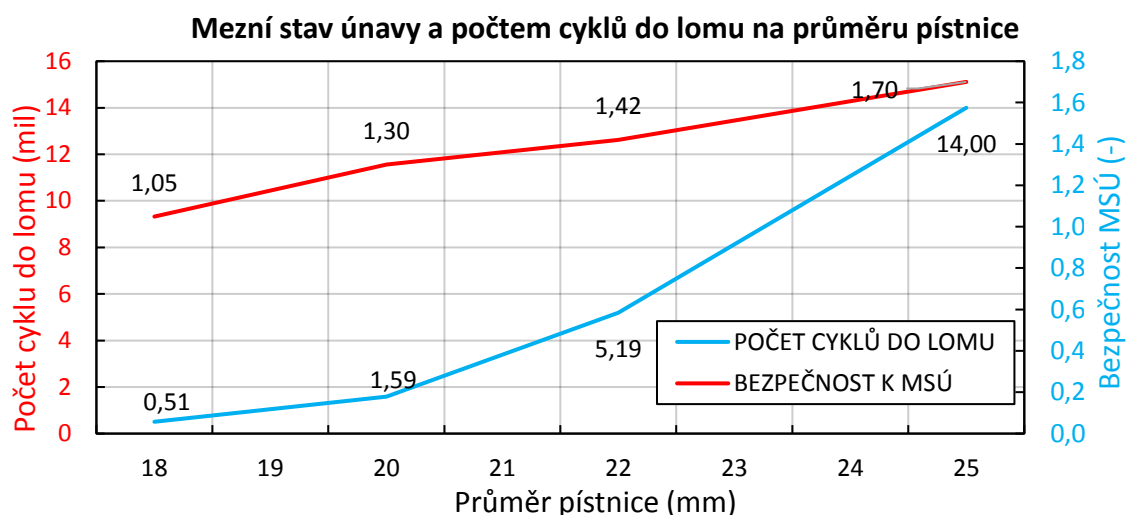
Výsledky z výpočtu MKP pro 2D i 3D geometrii a analytického přístupu pro průměr pístnice 18 mm jsou uvedeny na obr.5-51. Lze si všimnout zvýšení napětí při změně geometrie z 3D na 2D. Přesto pro všechny mezní stavy platí podobné výsledky i stejné nejkritičtější oblasti. Vzhledem k poměrně dobré možnosti optimalizace výpočetního přístupu v příloze D (Mathcad software). Byl pro další výpočty z rozdílnými rozměry volen analytický přístup.

Průřezy na pístnici	MKP - ANSYS		Analytický
	2D	3D	
PRŮŘEZ A (MPa)	510	380	442
PRŮŘEZ B (MPa)	450	300	380
PRŮŘEZ C (MPa)	690	420	530
PRŮŘEZ D (MPa)	450	340	472
PRŮŘEZ E (MPa)	-	400	420
Závit - otlačení (MPa)	100	-	80
MSÚ - počet cyklů (mil)	0,7	-	0,5
Vzpěr síla (kN)	-	247,5	234,5

Obr. 5- 48 Výsledky: MKP 2D/3D geometrie, analytického přístupu k výpočtu pístnice s průměrem 18 mm

V první části bylo několik výpočtu na hranici bezpečnosti, jak lze vidět v obr.5-50 pro průměr pístnice 18 mm. Při dalším navyšování rozměru pístnice přetrvával pouze problém v počtu cyklů, které tlumič vykoná před dosažením meze únavy dle Gerberova kritéria.

Hodnota, která byla nastavena jako dostačující vychází z určení průměrné frekvence vrtění na 3 Hz, průměrné rychlosti na 160 km/hod a vzdálenosti kterou musí tlumič jakožto součásti vlaku urazit na dvě stě tisíc kilometrů. Dle těchto hodnot musí tlumič být schopen zvládnout minimálně 13,5 milionů cyklů. Vzhledem k hlavní problematice řešené v DP byla tato část značně zjednodušena. Tuto stanovenou hodnotu překračuje, jak lze vidět na obr. 5-51 při průměru pístnice 24 mm. Tento obrázek jednak ukazuje téměř lineární nárůst bezpečnosti vůči meznímu stavu únavy a zároveň exponenciální nárůst počtu cyklů do lomu při zvětšujícím se průměru pístnice. Výsledky analytického přístupu podle Gerberová kritéria.



Obr. 5- 49 Závislost nárůstu počtu cyklu do lomu a bezpečnosti k MSÚ vzhledem k průměru pístnice

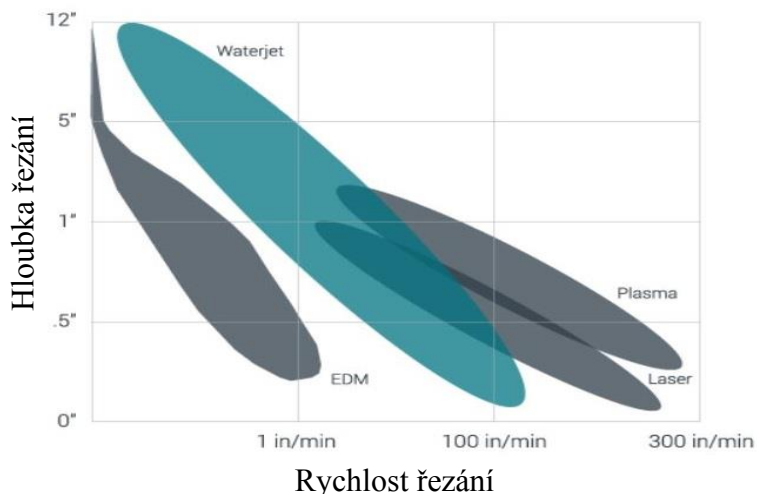
5.5.2 Úpravy k zjednodušení konstrukce pro sériovou výrobu

Všechny dříve zmíněné úpravy jsou použity v této fázi návrhu. Ať už se jedná o drážkování pro rychlou variantu nebo změny v konstrukci vycházejí z předešlé kapitoly. Vzhledem k tématu DP a rozsahu práce se nejedná se o celkový výrobní a technologický návrh pro sériovou výrobu. Je třeba zmínit, že v oblasti výroby tlumičů vrtění se nikdy nejedná o sériovou výrobu v pravém slova smyslu. Lze předpokládat výrobu v rozsahu desítek, nebo nižších stovek kusů. Tato kapitola tedy navrhuje přístupy k zjednodušení MR tlumiče tak aby byla konstrukce vhodnější k sériové výrobě.

Výroba drážek

První zjednodušení se nabízí v oblasti výroby drážek. Pro jádro je daná hloubka drážek 15 mm. Pro plášť se jedná o hloubku 5 mm, ovšem jde o drážky z vnitřní strany což značí problematický přístup. Na obr. 5-52 lze vidět několik technologických přístupů k výrobě drážek. Vyznačená oblast odpovídá použitelné technologii, závisí to na možné hloubce (osa y) a rychlosti řezání (osa x). Elektroerozivním obráběním (EDM) lze dosáhnout velmi dobré přesnosti i hloubky drážek (není omezení) jak lze vidět z grafu jedná se o nejpomalejší řešení. Dle získaných zkušeností je to i velmi drážka technologie (relativní porovnání).

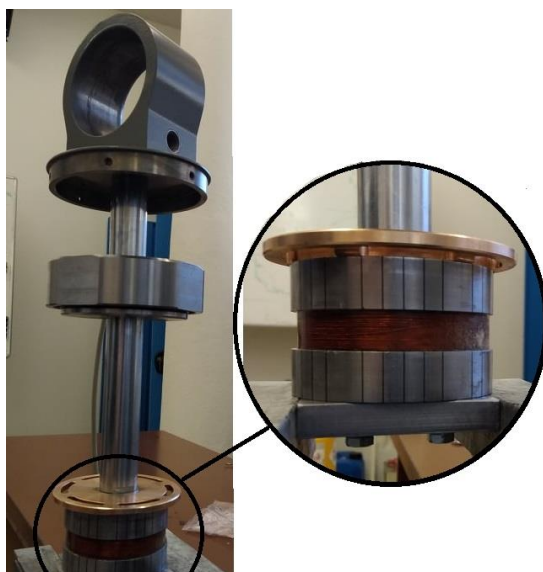
Jako alternativu použití lze drážky vyrobit pomocí řezání plazmou nebo laserem zde je problém v hloubce drážek a v ovlivnění tepelnou vrstvou. Snížení hloubky drážek pomocí dělení jádra není vhodným řešením. Jako poslední alternativa se nabízí použití vodního paprsku, jedná se o abrazivní substanci pod vysokým tlakem. Tato technologie ovšem vyžaduje navyšování šířky s hloubkou (nutný minimální poměr)[69]. Vzhledem k použitelnosti metod se pořád jedná o neefektivní zrychlení výroby, pokud vezmeme do úvah také časovou náročnost samotného zalévání drážek.



Obr. 5- 50 Jednotlivé metody použitelné pro výrobu drážek [70], upraveno

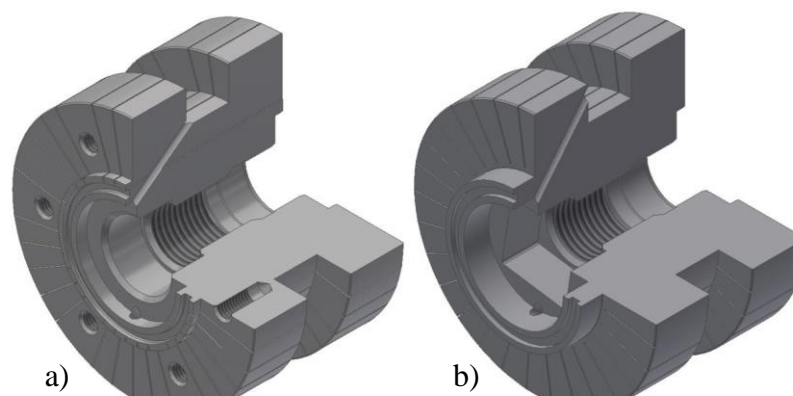
Změna spojení částí pístové skupiny

Nejefektivnější zjednodušení se nabízí ve změně konstrukce ze šroubového spoje na spoj nerozebíratelný. Problematická oblast, která vzniká vyřazením šroubového spoje je utáhnutí jádra k pístnici. Toho bylo v šroubované verzi dosaženo pomocí utahovacího přípravku, který se právě za použití šroubu připevnil k spodní části jádra a upevnil k svěráku obr. 5-53.



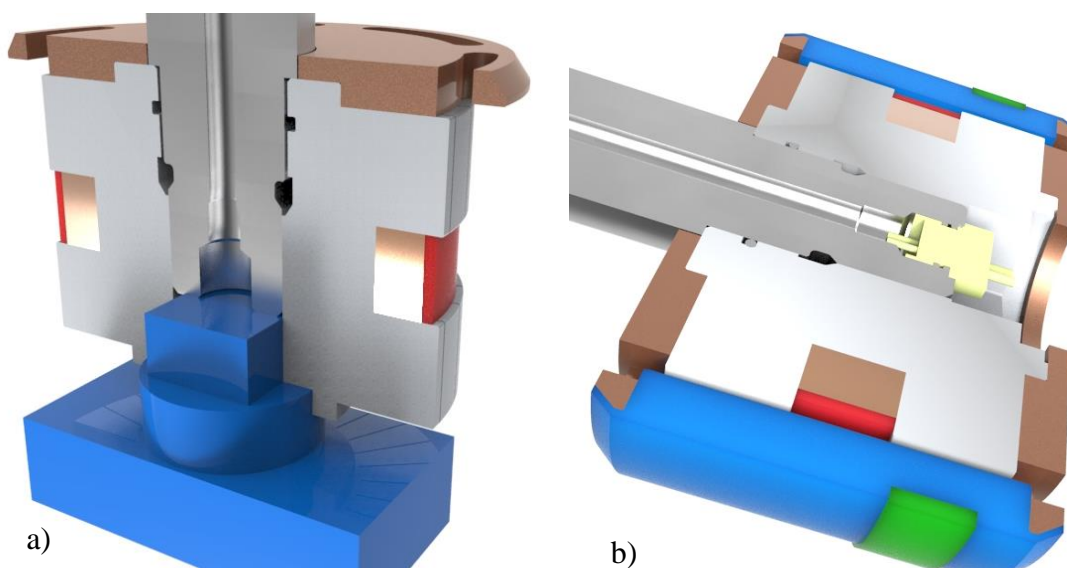
Obr. 5- 51 Utahování pístnice a jádra MR tlumiče; detail přípravku pro utáhnutí

Řešení se nabízí buď v utahování přímo za jádro (za vnější průměr) zde ovšem hrozí poškození jádra. Další možností je vytvoření odsazení, tvarového prvku nebo upravení současných rozměrů jádra. Výsledná změna tvaru jádra lze vidět na obr.5-54. Jádro bez otvorů pro šrouby je zobrazeno na obr. 5-54(b) pro utáhnutí slouží změna vnitřního rozměru. Do původního kruhového tvaru je vepsán čtverec s rozměry 20x20x10. U nového jádra také dochází k změně rozměrů. Jádro je symetrické a je vněm vytvořena drážka pro těsnění.



Obr. 5- 52 3D modely jádra MR tlumiče; (a) drážkované jádro s otvory pro šrouby; (b) upravená varianta pro utáhnutí s vnitřním čtyřhranem

Na obr. 5-55 (a) je zobrazena sestava pístové skupiny při utahování. Jako opěrný prvek do svěráku je využit modrý přípravek pro utáhnutí a jeho největší spodní kvádr. Vrchní nejmenší kvádr a válec zrcadlově kopíruje vnitřní rozměry jádra. Výška válce je zvolena tak aby se jádro při utahování mohlo maximálně opřít a nedošlo tak k vyvrácení pístnice. Z druhé strany je jádro přímo opřeno o pístnici (vynechává se ocelový kroužek). Po utáhnutí následuje spojení cívky s konektorem a zalití plastem. Nakonec dojde k nasazení pláště a nalisování spodního víčka, dále jsou úpravné konce pláště přitlačeny na víčka. Následuje poslední zalití prostoru za horním víčkem, kompletní sestava na obr. 5-55 (b).

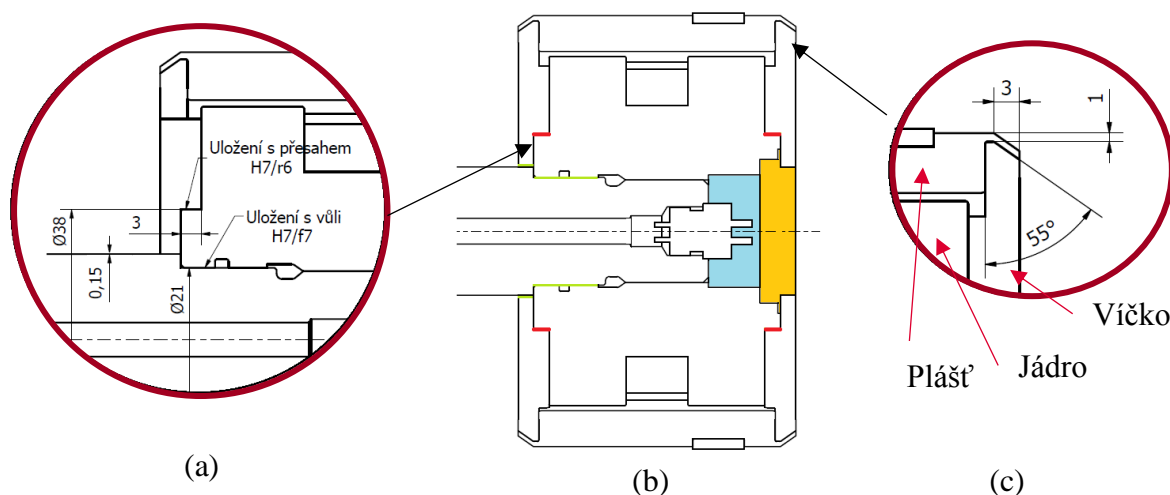


Obr. 5- 53 3D modely v řezu zjednodušené konstrukce MR tlumiče pro sériovou výrobu: a) Sestava pro utáhnutí jádra k pístnici; b) Řez kompletní sestavou

Na obr. 5-56 (b) je zobrazena pístní skupina zjednodušeného MR tlumiče pro sériovou výrobu. Červenou čarou jsou označena místa uložena s přesahem a zelenou uložení s vůlí. Vyplněné oblasti vedle konektoru znázorňují etapy zalití, nejdříve dojde k zalití pomocí Lukoprenu (modrá oblast) a následně po umístění a zaválcování víčka dojde k zalití pomocí dvojsložkového plastu (žlutá oblast), lze využít stejný typ jako pro zalití drážek.

Na detailu obr. 5-56 (a) je uložení víček s přesahem a také řešení vůle mezi víčkem a pístnicí. K vystředění rozměru tedy dochází mezi jádrem a víčkem, montáž víček lze provádět nalisováním za studena. Mimo změněné rozměry jádra dochází také k změně u víček, ty jsou nyní identické a vyrobené z duralu. Jejich horní plocha je tedy zkosená tak aby na ni mohlo být nalisováno osazení pláště MR tlumiče viz obr. 5-56 (c).

U většiny pevnostních analýz se ukazuje drážka pro těsnící kroužek na pístnici jako oblast s největším napětím. Tento koncentrátor napětí lze zrušit, tím že se přesune drážka pro těsnící kroužek do jádra, které nepřenáší takové síly. Tuto poslední změnu lze vidět na obr. 5-56 (c) a 5-55.



Obr. 5- 54 Zobrazeno zjednodušené řešení MR tlumiče; (a) přední pohled na jádro; (b) schématický řez pístní skupinou; (c) detail uložení víček

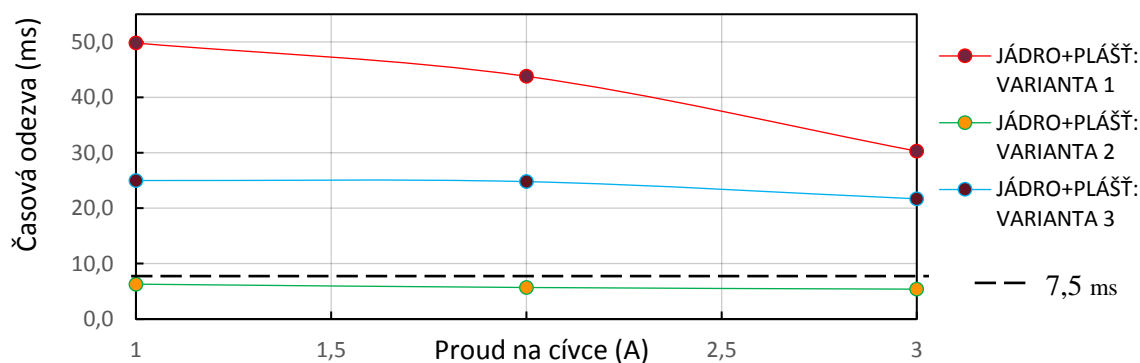
Mohlo by se zdát, že je nevhodné vytvořit z pístní skupiny nerozebíratelnou součást. Ovšem po zalití drážek, cívky a konektoru se v případě jakéhokoliv poškození nelze MR tlumič jednoduše opravit. Například při zalomení konektoru je nemožné znovu drát z cívky připojit na konektor. Uvedené změny v kapitole 5.5 by měli sloužit k zjednodušení výroby MR tlumiče a také k navýšení jeho provozním parametrům.

6 DISKUZE

Tlumiče vrtění se nepoužívají u všech podvozků kolejových vozidel, jde především o osobní a vysokorychlostní vlaky. Naprostá většina těchto tlumičů je pasivních. Použití magnetoreologických tlumičů je zatím pouze ve vědecké oblasti. Publikace, které se zabývají využitím MR tlumičů v podvozcích kolejových vozidel, se omezují na oblast sekundárního vypružení v příčném směru, to souvisí s neefektivnějším ovlivněním dynamiky kolejového vozidla – především kritické rychlosti.

Při konstrukci MR tlumiče se vycházelo z dříve navrhnuté pomalé verze. Pro porovnání bylo nutné dodržet stanovené rozměry magnetického obvodu L a R , obr.4-2 (a). Nejdůležitějším faktorem MR tlumiče je jeho odezva tlumící síly, hlavní cíl práce spočíval v jejím snížení tak, aby bylo možné efektivně tlumit vibrace s frekvencí do 8 Hz. Limit pro celkovou primární časovou **odezvu náběhu tlumící síly** byl stanoven na **12,5 ms** (desetkrát rychlejší než tlumený pohyb). Vzhledem k ostatním složkám a konzervativnímu přístupu byla určena maximální možná odezva **primárního náběhu magnetické indukce** na **7,5 ms**.

Hlavní oblast, které je řešena v diplomové práci, je magnetická simulace. Jedná se o simulace statické i transientní (přechodové). Jsou navrhnuty tři varianty magnetického odvodu rychlého MR tlumiče. Varianta 1 je s původními rozměry i materiály. Varianta 2 obsahuje dvě cívky a u varianty 3 je využita slitina kobaltu pro součást jádra. Výsledky časové odezvy mag. indukce jsou na obr. 6-1. Jedná se o výsledky 2D simulací pro 1 A.



Obr. 6- 1 Výsledky primární časové odezvy pro náběh magnetické indukce pro konceptní řešení

Čárkovanou přímkou je zobrazen limit, který musí splnit konstrukce mag. obvodu (7,5 ms). Lze vidět, že s rostoucím proudem dochází ke snížení časové odezvy. Vliv vířivých proudů je největší v jádře magnetického obvodu. U nejrychlejší varianty 2 (jediné, která splňuje limit) vzniká potenciační problém při vinutí a možnost zkratu vlivem dotyku drátu živé části nebo při křížení. U varianty 3 není dostačující zlepšení vzhledem k změně materiálu. Na základě výsledků a zkušeností je volena nejpřímější cesta – a to zachování rozměrů i materiálů magnetického obvodu a využití tvarového přístupu. Výhodou je i minimální množství změn v konstrukci MR tlumiče (kap. 5.5). Pro určení závislosti geometrie a počtu drážek na velikosti a odezvě mag. indukce byly využity magnetické simulace s 3D geometrií.

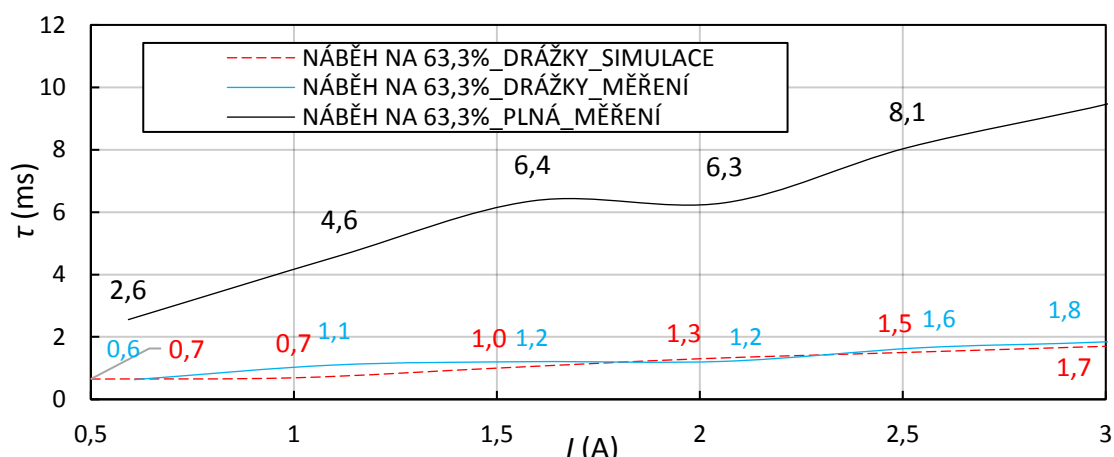
Zobrazení závislosti geometrie drážek na výsledcích magnetické indukce lze vidět na obr. 5-5 a 5-9. Obecně platí, že šířka příliš neovlivňuje odezvu magnetické indukce, ale při větších velikostech snižuje velikost mag. indukce ve štěrbině (menší objem magneticky aktivního materiálu v oblasti určení). Naproti tomu hloubka drážek a jejich počet ovlivňuje zásadně časovou odezvu. Vhodné je, aby hloubka drážek byla pod vnitřním průměrem vinuté cívky (dochází k neefektivnějšímu zamezení tvorby vířivých proudů). Pro obě tyto závislosti ovšem platí, že při překročení určitého počtu drážek (velikosti hloubky) dochází k navýšení časové odezvy a velkému snížení mag. indukce. Jedná se o to, že v jádře už je větší poměr mezer (magneticky neaktivního materiálu), což má negativní vliv na výsledky.

Výsledkem konstrukčního řešení je MR tlumič s třiceti drážkami v jádře s hloubkou 16 mm a 18 drážkami v plášti s hloubkou 5 mm. Pro obě součásti mají drážky šířku 0,3 mm.

Predikovaná primární časová odezva náběhu magnetického indukce za 5 ms.

Drážky je nutné zalít plastovou hmotou. Pro efektivnější zalití jsou navrženy jednoduché zalévací přípravky jak pro plášť, tak i pro jádro MR tlumiče, obr. 5-10 až 5-14. Tyto přípravky jsou určené k tomu, aby se zalévací hmotná nedostala do nežádoucích míst (závitů, konektoru, místa pro navinutí cívky). Dalším krokem bylo vytvoření izolační vrstvy mezi cívkou a vinutím a ochranné vrstvy cívky. Pro tento účel bylo vytvořeno hliníkové jádro, které slouží k vytvoření silikonové formy. Proces zalévání je značně zdoluhavý (jedno zalití 5 hodin), a při řešení DP ho bylo třeba několikrát opakovat (viz příloha E). V této oblasti lze vidět největší možnost zrychlení výroby MR tlumiče pro sériovou výrobu, vzhledem k rozsahu práce tato problematika nebyla řešena.

Při testování MR tlumiče se nejdříve zjišťovali jeho závislosti magnetické indukce na proudu ($B-I$) a na čase ($B-t$) – a to se vzduchem v aktivní zóně. K tomuto měření byla použita Hallova sonda, která se z magnetického pohledu chová stejně jako vzduch (stejná relativní permeabilita). Měření magnetické indukce s jiným materiálem (ve štěrbině MR tlumiče) než se vzduchem je značně limitováno. Například v případě měření s MR kapalinou v aktivní zóně by magnetické pole teklo kolem sondy a ta by zobrazovala nesprávné hodnoty.



Obr. 6- 2 Graf primární časové odezvy náběhu magnetické indukce na proudu ($B-t$)

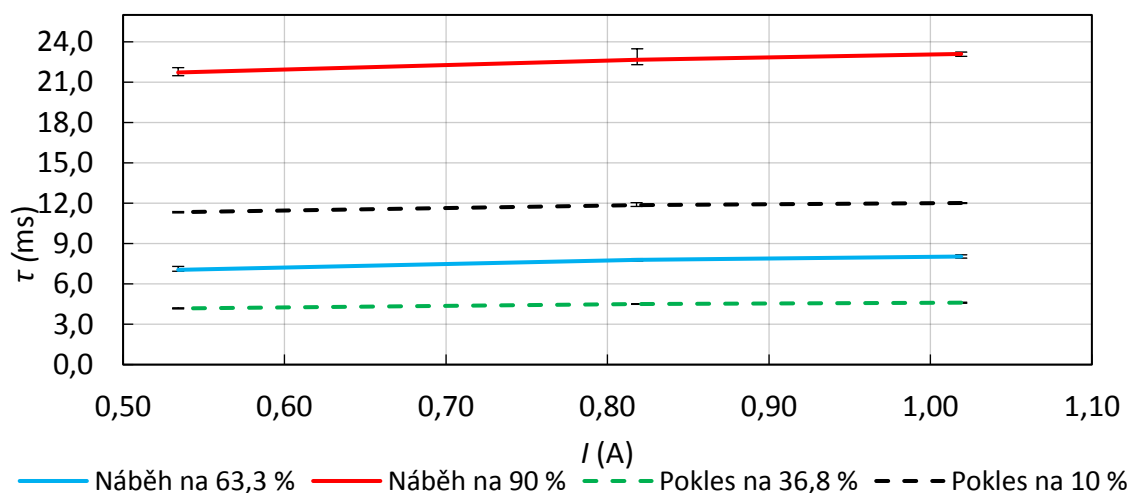
Vzhledem k této skutečnosti jsou výsledky měření porovnávány se simulacemi, které mají také vzduch v aktivní zóně, což lze vidět na jejich nízké časové odezvě (nižší než MR kap.).

Výsledky pro drážkovanou variantu (měření/simulace) a plnou variantu (pouze měření) MR tlumiče lze vidět na obr. 6-2. Při přechodu z pomalé varianty MR tlumiče na rychlou dochází v průměru k **92,5% zrychlení**. S narůstajícím proudem dochází k navýšení časové odezvy, to je způsobeno snižováním efektivity proudového řízení. Simulace obecně ukazují opačný průběh (především s MR kapalinou), a to z důvodu, že simulace nezahrnují všechny vlivy proudového řízení (do simulace se vkládá konstantní čas náběhu proudu). Lze říci, že pokles mag. indukce je ve většině případů rychlejší než nárůst. Simulace je více podobná měření u drážkované varianty. Hodnoty jsou podobnější v oblasti primární časové odezvy. Při porovnání hodnot vychází simulace téměř vždy pomalejší, než měření.

Co se týče měření magnetické indukce v závislosti na proudu cívky ($B-I$), výsledky jasně ukazují homogenní rozložení po obvodu štěrbiny MR tlumiče, viz obr. 5-17 a příloha E. V celém obvodu štěrbiny ve středu vrchního pólu jsou rozdíly mezi mag. indukci do 3 %. I pro toto měření platí, že větší podobnost výsledků simulací je s drážkovanou variantou.

Odlišnosti mezi simulací a měřením jsou způsobeny: zjednodušením geometrie simulace (zaoblení, složité tvary atd.), rozdíly mezi materiálovými parametry simulace/reality ($B-H$ křivka, el. odpor) a odlišným řízením náběhu proudu na cívku, platí především pro $B-t$.

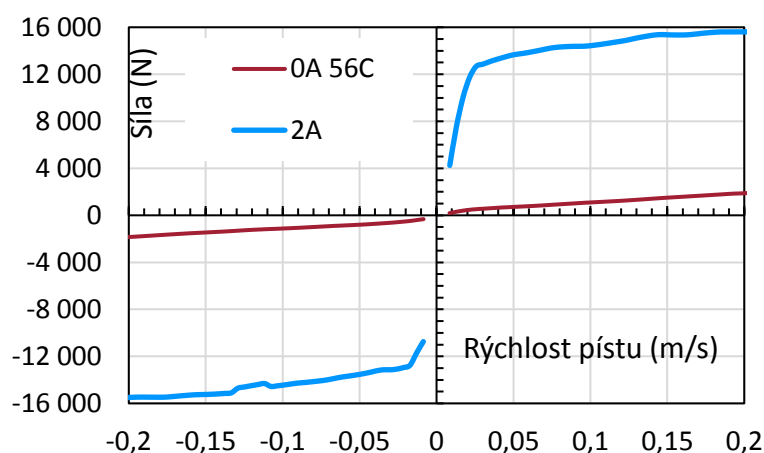
Rychlý MR tlumič byl testován na hydraulickém pulsátoru, kde byly měřeny jeho $F-v$ charakteristiky a časová odezva tlumící síly ($F-t$). Měření probíhalo s rozdílným proudem na cívce (0 až 2 A). Z výsledků měření vychází naprosto dostačující primární odezva náběhu tlumící síly do **8 ms** (limit 12,5 ms) pro všechny testované proudy na obr. 5-3 se jedná o modrou křivku. MR tlumič má dostatečně rychlou odezvu pro eliminaci kmitů vzniklých vrtivým pohybem podvozku kolejového vozidla. Pokles tlumící síly je rychlejší než nárůst a při zvětšujícím se proudu dochází k mírnému nárůstu časové odezvy (kopíruje výsledky měření magnetické indukce v čase).



Obr. 6- 3 Měření časové odezvy tlumící síly rychlé MR tlumiče

Pokud předpokládáme, že magnetická indukce má reálnou odezvu 5 ms (podle simulací zahrnuje i náběh proudu), poté lze zařadit ostatní složky časové odezvy (kap. 2.5.3) do zbývajících 3 ms. To platí pro primární časovou odezvu náběhu tlumicí síly pro 0,5 až 1 A.

Na obr. 6-4 lze vidět výsledky F-v charakteristiky pro rychlý MR tlumič. Je zobrazena pouze maximální tlumicí hladina (2 A) a minimální (0 A). Pro rychlost pístnice 0,05 m/s je maximální tlumicí síla 13,5 kN (2 A) a minimální tlumicí síla 0,72 kN (0 A), dynamický rozsah je v tomto případě 19. Tyto hodnoty jsou naprosto dostačující vzhledem k potřebám tlumičů vrtění. Viskozita MR kapaliny je značně závislá na teplotě, což ovlivňuje především minimální tlumicí hladinu a tím pádem dynamický rozsah. Řešení, které tento problém mohou částečně vyřešit, jsou uvedeny na konci závěru jako další možnosti pokračování práce a budoucího výzkumu v oblasti MR tlumičů.



Obr. 6- 4 Tlumicí síla v závislosti na rychlosti pístnice; maximální a minimální tlumicí hladina

Jedním z dílčích cílů DP bylo navržení jádra pomocí strukturovaného magnetického obvodu, který by bylo možné tisknout 3D tiskem technologií SLM. Jedná se o alternativní přístup k tvarovému návrhu, ovšem lze u něj mnohem efektivněji vytvářet danou geometrii. Tvarově bylo upravováno pouze jádro a zvoleno čisté železo jakožto materiál, jež lze tisknout metodou SLM. Čisté železo má nižší el. odpor než 11SMn30 a tím tvoří více vířivých proudů. Přesto jsou výsledky odezvy velmi dobré pro variantu A **6,1 ms** a pro variantu B **7,5 ms**. Jde tedy vidět, že vhodnější návrh může vyrovnat horší mag. vlastnosti použitého materiálu. Omezení jsou v množství použitelných materiálů a v oblasti náročnosti výpočtu magnetických simulací, to limituje možnosti tvarování geometrie (minimální rozměry, zjednodušení). V této oblasti návrhu je ještě mnoho prostoru pro zlepšení.

Poslední část diplomové práce řešila konstrukční úpravy a zjednodušení tak, aby bylo možné MR tlumiče snáze sériově vyrábět. Dle provedených změn lze říci, že návrh je pouze v rámci dílčího cíle a nejde o celkové řešení technologie sériové výroby. Přes řadu zjednodušení (symetrie jádra a víček, lisování, odstranění koncentrátorů napětí a změny materiálů) je největší časová neefektivnost ve výrobě a zalití drážek. Nepodařilo se najít vhodnější řešení. Laser, plazma a vodní parsek nejsou vhodné (obr. 5-52), a proto je v této oblasti také prostor pro návrh lepšího postupu při zalévání (rychlejšího, sériového).

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem magnetoreologického tlumiče s krátkou časovou odezvou pro povozek kolejného vozidla. Na Ústavu konstruování byl navrhnut pomalý MR tlumič s materiálem jádra i pláště 11SMn30. Vzhledem k současným požadavkům pro nové přístupy k návrhu tlumičů do podvozků kolejových vozidel bylo potřeba tuto konstrukci vylepšit, a to v oblasti časové odezvy a konstrukčních úprav.

Jsou navrženy tři varianty magnetického odvodu rychlého MR tlumiče. K návrhu je využito velké množství 2D magnetických simulací. Obvody mají stejné rozměry, rozdíl spočívá v materiálu součástí, popřípadě ve využití dvou cívek. Hlavním parametrem pro porovnání je odezva magnetické indukce ve štěrbině MR tlumiče. Jako konstrukční řešení je vybrána varianta s původní geometrií a neměnnými materiály, u které je využit tvarový přístup. Ten spočívá ve vytvoření drážkování pomocí elektroerozivního obrábění. Pro vhodné navržení geometrie a počtu drážek byla vytvořena celá řada 3D magnetických simulací, ty zkoumaly vliv drážek na časovou odezvu a velikost magnetické indukce ve štěrbině.

Jako finální konstrukční konfigurace je zvolen počet 30 drážek s hloubkou 16 mm v jádře a 18 drážek s hloubkou 5 mm v plášti. Pro všechny drážky platí stejná šířka 0,3 mm. Predikována primární **odezva náběhu mag. indukce je 5 ms** (limit 7,5 ms). Drážky bylo poté nutné zalít plastovou hmotou za využití zalévacích přípravků. Další částí tohoto procesu bylo zalití ochranné vrstvy cívky, pro kterou bylo potřeba vytvořit silikonovou formu.

Následovalo testování MR tlumiče, nejdříve byly měřeny závislosti magnetické indukce na proudu ($B-I$) a na čase ($B-t$) se vzduchem v aktivní zóně. Měřila se rychlá i pomalá varianta, v průměru dochází k **zrychlení o 92,5 %**. Toto měření ukázalo také dobrou schodu s výsledky simulací. Dle výsledku lze také říct, že magnetická indukce je v drážce homogenní. Zkompletovaný rychlý MR tlumič byl dále testován na hydraulickém pulsátoru, kde byly měřeny jeho $F-v$ charakteristiky a jeho časová odezva tlumící síly ($F-t$) s proměnlivým proudem na cívce. Z výsledků měření vychází naprosto dostačující primární odezva náběhu tlumící síly do **8 ms** (limit 12,5 ms) pro všechny testované proudy. Tedy MR tlumič má dostatečně rychlou odezvu pro eliminaci kmitů vzniklých vrtivým pohybem podvozku kolejového vozidla. Pro rychlost pístitnice 0,05 m/s je maximální tlumící síla 13,5 kN (2 A) a minimální tlumící síla 0,72 kN (0 A), dynamický rozsah je v tomto případě 19.

Další část se zabírala alternativním přístupem k návrhu jádra pomocí strukturovaného magnetického obvodu, který by bylo možné tisknout 3D tiskem technologií SLM. Tento přístup k návrhu umožňuje ideální tvarování tak, aby se dosáhlo minimální časové odezvy. Jednotlivé pruty jsou navrženy tak, aby byly ve směru magnetické indukce. Výsledná primární časová odezva náběhu magnetické indukce dle magnetických simulací pro variantu B je **7,5 ms**, dochází k mírnému poklesu magnetické indukce ve štěrbině.

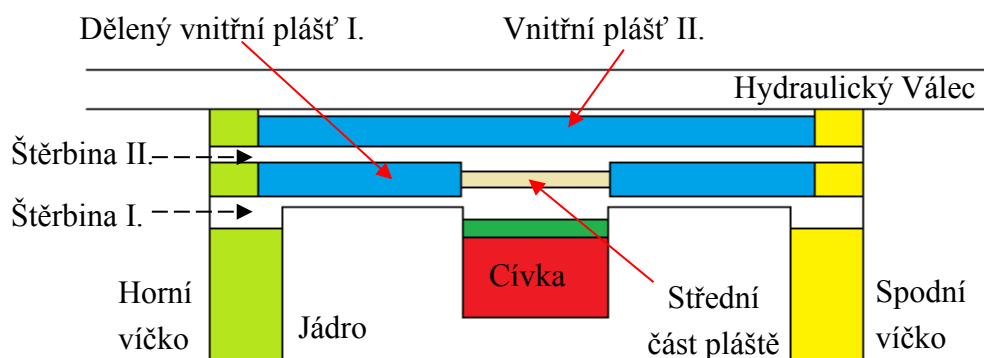
Poslední část diplomové práce řešila konstrukční úpravy a zjednodušení tak, aby bylo možné MR tlumiče snáze sériově vyrábět. Jedná se o symetrickou úpravu jádra a pláště, změnu materiálu pláště, úpravy pístnice a nahrazení šroubového spoje v pístové skupině. Nahrazeno nalisováním víček na jádro a zakružováním odsazení pláště na víčko.

Všech cílů, které byly stanoveny v kapitole 3.3 diplomové práce bylo dosaženo.

V současné době se pracuje na ÚK v oblasti zlepšení sedimentace MR kapaliny. Jednak aby samotná kapalina neztrácela při provozu svoje vlastnosti, a aby její sedimentace probíhala co nejpomaleji. Těchto vlastností lze dosáhnout pomocí přidání aditiv do kapaliny. Také se začíná věnovat větší pozornost abrazivnímu chování MR kapaliny. Jde především o její negativní vliv na těsnění v oblasti plovoucího pístu a těsnění pístnice s hydraulickým válcem. V těchto oblastech bude třeba ještě značného množství testů a výzkumů, aby MR tlumič splnil požadované provozní parametry životnosti a bezúdržbového provozu.

Při testování MR tlumiče lze pozorovat závislost součinitele tření MR kapaliny na teplotě. Tato závislost se negativně projevuje především u nižších teplot a má za následek zvyšování tlumící síly v neaktivovaném stavu, čímž snižuje dynamický rozsah MR tlumiče. Řešení se nabízí buď ve změně MR kapaliny, nebo v použití konstantního proudu na cívce, ten by sloužil k udržení/prohřátí kapaliny na provozní teplotu. To lze docílit například vhodným naprogramováním řízení MR tlumiče, které bude brát v potaz provozní stav, okolní teplotu i teplotu samotné MR kapaliny. Nevýhodou tohoto přístupu je pouze lokální ohřev MR kap.

Další možnou úpravou, která také souvisí se snížením tlumící síly v neaktivovaném stavu, je využití dvojitě štěrbinou tzv. double gap, obr. 7-1. Jedná se o to, že při konstantní rychlosti dojde k rozdělení průtoku do dvou částí (Štěrbina I. a II.), což by mělo mít za následek úměrné snížení tlumící síly při neaktivovaném stavu. Na grafu $F-v$ charakteristiky se to projeví zploštěním křivky za kolénem. Druhou štěrbinu lze konstrukčně vytvořit vložením vnitřního děleného pláště. Při této konfiguraci je třeba zamezit magnetickému toku, aby **neprocházel** přímo vnitřním pláštěm (tím by došlo k magnetickému vyřazení horní štěrbinu při aktivovaném stavu), ale aby byl nucen projít i přes vnitřní plášť II. Toho lze docílit buď nasycením střední části vnitřního pláště, nebo nemagnetického materiálu v této části. Střední část vnitřního děleného pláště je zúžená a zobrazena hnědou barvou.



Obr. 7 - 1 Náčrt MR tlumiče s dvojitou štěrbinou

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LING, Liang, Xin-biao XIAO, Jia-yang XIONG, Li ZHOU, Ze-feng WEN a Xue-song JIN. Erratum to: A 3D model for coupling dynamics analysis of high-speed train/track system. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2015, roč. 16, č. 2, s. 170–170. ISSN 1673-565X.
- [2] STRIBERSKY, Anton, Andreas KIENBERGER, Günther WAGNER a Herbert MÜLLER. Design and Evaluation of a Semi-Active Damping System for Rail Vehicles. *Vehicle System Dynamics*. 1997, roč. 29, č. 1, s. 669–681. ISSN 0042-3114.
- [3] MACHACEK, Ondrej, Michal KUBIK a Petr NOVÁK. A new method of magnetorheological damper quality evaluation. *Engineering Mechanics 2017*. 2017, č. May, s. 594–597.
- [4] ZENG, Jing a Pingbo WU. Stability Analysis of High Speed Railway Vehicles *. *JSME International Journal*. 2004, roč. 47, č. 04, s. 464–470.
- [5] MRKVIČKA, Jan a Josef BASLAR. *Kolejová vozidla*. 1. vyd. Bratislava: Nakladatelství dopravy a spojů, 1986.
- [6] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. *Kolejová vozidla II*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-641-7.
- [7] ŠÍBA, Jaroslav. *Kolejová vozidla II - pojezd*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00615-8.
- [8] DOSTÁL, Josef a Petr HELLER. *Kolejová vozidla I*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-960-9.
- [9] *STROJÍRNA OSLAVANY*. [vid. 15. prosinec 2019]. Dostupné z: <http://www.st-os.cz/>
- [10] *Vagony*. [vid. 11. listopad 2019]. Dostupné z: <https://vagony.cz>
- [11] *ŽelPage - elektronický magazín o drahách*. [vid. 25. listopad 2019]. Dostupné z: zelpage.cz
- [12] ORVNÄS, Anneli. *Active Secondary Suspension in Trains A Literature Survey of Concepts and Previous Work by*. nedatováno. ISBN 9789174151442.
- [13] GOODALL, R. M., S. BRUNI a T. X. MEI. Concepts and prospects for actively controlled railway running gear. *Vehicle System Dynamics*. 2006, roč. 44, č. sup1, s. 60–70. ISSN 0042-3114.
- [14] BRUNI, Stefano, Roger GOODALL, T. X. MEI a Hitoshi TSUNASHIMA. Control and monitoring for railway vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*. 2007, roč. 45, č. 7–8, s. 743–779. ISSN 0042-3114.
- [15] BRAGHIN, Francesco, Stefano BRUNI a Ferruccio RESTA. Active yaw damper for the improvement of railway vehicle stability and curving performances: simulations and experimental results. *Vehicle System Dynamics*. 2006, roč. 44, č. 11, s. 857–869. ISSN 0042-3114.
- [16] HUGHES, Murray. Chuo Shinkansen will be 'a national project. 1997, roč. 2pp, s. 153.

- [17] BALLO, I. Comparison of the properties of active and semiactive suspension. *Vehicle System Dynamics*. 2007, roč. 45, č. 11, s. 1065–1073. ISSN 0042-3114.
- [18] YOSHIE, N, H YANO a H. NORINAO. 500-Series Shinkansen for commercial operation at 300 km/h of JR West. 1999, roč. 97, s. 421–427.
- [19] GOODALL, R M a T X MEI. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. 2010, s. 327–357.
- [20] KONDO, Osamu. Simulation Technology for Railway Vehicle Dynamics. *Nippon Steel & Sumitomo Metal*. 2013, č. 105, s. 77–83.
- [21] COOPERRIDER, N. K. The Hunting Behavior of Conventional Railway Trucks. *Journal of Engineering for Industry*. 1972, roč. 94, č. 2, s. 752. ISSN 00220817.
- [22] MATSUDAIRA, T. Paper 7: Hunting Problem of High-Speed Railway Vehicles with Special Reference to Bogie Design for the New Tokaido Line. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*. 1965, roč. 180, č. 6, s. 58–66. ISSN 0367-8849.
- [23] DAVIES, R D. SOME EXPERIMENTS ON THE LATERAL OSCILLATION OF RAILWAY VEHICLES. *Journal of the Institution of Civil Engineers*. 1939, roč. 11, č. 5, s. 224–261. ISSN 0368-2455.
- [24] AHMADIAN, Mehdi a Shaopu YANG. Hopf Bifurcation and Hunting Behavior in a Rail Wheelset with Flange Contact. *Nonlinear Dynamics*. 1998, roč. 15, č. 1, s. 15–30. ISSN 0924090X.
- [25] SEDIGHI, Hamid M. a Kouros H. SHIRAZI. Bifurcation analysis in hunting dynamical behavior in a railway bogie: Using novel exact equivalent functions for discontinuous nonlinearities. *Scientia Iranica*. 2012, roč. 19, č. 6, s. 1493–1501. ISSN 10263098.
- [26] KOIZUMI, Satoshi, Osamu GOTO, Masaharu UEDA, Y SHIMOKAWA, M MIZUNO, Taizo MAKINO, Hiroki SAKAI, Makoto KIMURA, Yoshinori OKAGATA, Kazuhiko SAEKI, General MANAGER, Miyuki YAMAMOTO, Osamu KONDO, Tsutomu SUGIURA, Hiroshi TOMONO a Kenji SAITA. Advance in Railway Vehicle Technology and Future Prospects Mainly in Relation to Bogie. *NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT No. 105*. 2013, č. 105, s. 1–2.
- [27] SUN, Shuaishuai. Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetorheological technology. 2013, roč. 22, s. 1–14.
- [28] TANIFUJI, Katsuya, Satoshi KOIZUMI a Ryo-hei SHIMAMUNE. Mechatronics in Japanese rail vehicles: active and semi-active suspensions. *Control Engineering Practice*. 2002, roč. 10, č. 9, s. 999–1004. ISSN 09670661.
- [29] BRUNI, S. a F. RESTA. Active control of railway vehicles to avoid hunting instability. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*. 2001, roč. 1, č. July, s. 231–236.
- [30] MELLADO, Alberto Conde, Eduardo GOMEZ a Jordi VINOLAS. Advances on railway yaw damper characterisation exposed to small displacements. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2006, roč. 13, č. 4, s. 263. ISSN 1744-232X.
- [31] FRANTIŠEK, Vlk 2003. *Dynamika motorových vozidel*. nedatováno. ISBN 80-239-0024-2.

- [32] WANG, W. L., Z. R. ZHOU, D. S. YU, Q. H. QIN a S. IWNICKI. Rail vehicle dynamic response to a nonlinear physical ‘in-service’ model of its secondary suspension hydraulic dampers. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017, roč. 95, s. 138–157. ISSN 10961216.
- [33] AG, ZF Friedrichshafen. *Suspension Technology*. [vid. 10. listopad 2019]. Dostupné z:
https://www.zf.com/products/media/en/product_media/cars_5/pkw_daempfungsmodule.pdf.
- [34] <http://www.koni-enidine-rail.com/Specialty-Dampers/>. nedatováno.
- [35] IN, Applications a Vehicle SYSTEMS. *Fluid technology*. nedatováno. ISBN 9781439856741.
- [36] QIN, Yechen, Feng ZHAO, Zhenfeng WANG, Liang GU a Mingming DONG. Comprehensive analysis for influence of controllable damper time delay on semi-active suspension control strategies. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*. 2017, roč. 139, č. 3. ISSN 15288927.
- [37] GAILE, Anton a Yuan LUE. Electro Hydraulic Actuation (EHA) systems for primary flight control, landing gear and other type of actuation. *AUS 2016 - 2016 IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems*. 2016, s. 723–728.
- [38] HAJALILOU, Abdollah, Saiful AMRI MAZLAN, Hossein LAVVAFI a Kamyar SHAMELI. Insight into the Field Responsive Fluids. In: . 2016, s. 127–134. ISBN 978-981-10-2494-8. Dostupné z: doi:
- [39] BALBAS, L. C., G. BORSTEL a J. A. ALONSO. Nonlocal density functional calculation of the electron affinity of atoms. *Physics Letters A*. 1986, roč. 114, č. 5, s. 236–240. ISSN 03759601.
- [40] CARLSON, J.D. *Magnetorheological fluids, in Smart Materials*. B.m.: CRC Press Taylor & Francis Group, LLC. eBook, 2009. ISBN 978-1-4200-4373-0.
- [41] EBRAHIMI, Babak. *Development of Hybrid Electromagnetic Dampers for Vehicle Suspension Systems*. 2009.
- [42] SEMI-ACTIVE VIBRATION CONTROL OF A PARALLEL PLATFORM. 2006.
- [43] ZHU, Xiaocong, Xingjian JING a Li CHENG. Magnetorheological fluid dampers: A review on structure design and analysis. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2012, roč. 23, č. 8, s. 839–873. ISSN 1045-389X.
- [44] GOLDASZ, J. *Configurations of MR Dampers*. 2015.
- [45] SHIN, Yu-Jeong, Won-Hee YOU, Hyun-Moo HUR, Joon-Hyuk PARK a Gyu-Seop LEE. Improvement of Ride Quality of Railway Vehicle by Semiactive Secondary Suspension System on Roller Rig Using Magnetorheological Damper. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014, roč. 6, č. November, s. 298382. ISSN 1687-8140.
- [46] GUO, Chaoyang, Xinglong GONG, Luhang ZONG a Chao PENG. Twin-tube- and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicles. 2015, roč. 229, č. 1, s. 48–57.
- [47] WANG, Dai-hua a Wei-hsin LIAO. Ride quality improvement ability of semi-active, active and passive suspension systems for railway vehicles. 2003, roč. 5056, s. 201–212.

- [48] SEARCH, Home, Collections JOURNALS, About CONTACT a My IOPSCIENCE. Analysis of Train Suspension System Using MR dampers. nedatováno, roč. 012137.
- [49] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE FAKULTA CHEMICKO-INŽENÝRSKA; MĚŘÍCÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA. 2005 [vid. 20. květen 2020]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k32-sous.htm>
- [50] GONCALVES, Fernando D., Jeong-Hoi KOO a Mehdi AHMADIAN. Experimental Approach for Finding the Response Time of MR Dampers for Vehicle Applications. In: *Volume 5: 19th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, Parts A, B, and C*. B.m.: ASME, 2003, s. 425–430. ISBN 0-7918-3703-3.
- [51] STRECKER, Zbynek, Jakub ROUPEC, Ivan MAZUREK, Ondrej MACHACEK, Michal KUBIK a Milan KLAPKA. Design of magnetorheological damper with short time response. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2015, roč. 26, č. 14, s. 1951–1958. ISSN 1045-389X.
- [52] GONCALVES, Fernando D., Mehdi AHMADIAN a J. D. CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*. 2006, roč. 15, č. 1, s. 75–85. ISSN 0964-1726.
- [53] SEDLACIK, M., V. PAVLINEK, P. SAHA, P. SVRCINOVA a P. FILIP. THE ROLE OF PARTICLES ANNEALING TEMPERATURE ON MAGNETORHEOLOGICAL EFFECT. *Modern Physics Letters B*. 2012, roč. 26, č. 03, s. 1150013. ISSN 0217-9849.
- [54] KOO, Jeong-Hoi, Fernando D. GONCALVES a Mehdi AHMADIAN. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. *Smart Materials and Structures*. 2006, roč. 15, č. 2, s. 351–358. ISSN 0964-1726.
- [55] STRECKER, Zbyněk, Jakub ROUPEC, Ivan MAZŮREK, Ondřej MACHÁČEK a Michal KUBÍK. Influence of response time of magnetorheological valve in Skyhook controlled three-parameter damping system. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, roč. 10, č. 11, s. 168781401881119. ISSN 1687-8140.
- [56] TURAN, GONEN. *ELECTRICAL MACHINES MACHINE MATLAB*. Second. 2005. ISBN 9781439878002.
- [57] YOON, Dal Seong, Yu Jin PARK a Seung Bok CHOI. An eddy current effect on the response time of a magnetorheological damper: Analysis and experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, roč. 127, s. 136–158. ISSN 10961216.
- [58] STRMISKA T. *Návrh magnetického obvodu rychlého magnetoreologického tlumiče bez použití feritu*. B.m., nedatováno. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D..
- [59] KUB, Michal. Magnetorheological suspension damper for space application. 2017, s. 83.
- [60] YANG, Guangqiang, Billie F. SPENCER, Hyung-Jo JUNG a J. David CARLSON. Dynamic Modeling of Large-Scale Magnetorheological Damper Systems for Civil Engineering Applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2004, roč. 130, č. 9, s. 1107–1114. ISSN 0733-9399.

- [61] KUBÍK M, KOUTNÝ D, PALOUŠEK D, MACHÁČEK O, STRECKER Z, Mazůrek I and Roupec J. A Core Skeleton Made of Rods of a Ferromagnetic Material 1–6. 2018.
- [62] VÍTEK, P. *Návrh pístní skupiny rychlého magnetoreologického tlumiče s využitím technologie selective laser melting*. B.m., nedatováno. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 104 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D..
- [63] VACCUMSCHMELZE GMBH & CO. Soft magnetic cobalt-iron alloys Vacoflux and Vacodur. *Advanced Materials and Processes*. 2016.
- [64] MACHÁČEK, O. *Magnetorheological strut for vibration isolation system of space launcher PhD thesis*. B.m., 2018. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design. Supervisor: Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [65] IVANA ZETKOVÁ. *Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem*. B.m., nedatováno. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Strojní, 2017. 131 s, Školitel: Doc. Ing. Jiří Česánek, Phd..
- [66] STRECKER, Zbyněk, Michal KUBIK, Petr VITEK, Jakub ROUPEC, David PALOUŠEK a Vit ŠREIBR. *Structured magnetic circuit for magnetorheological damper made by selective laser melting technology*. B.m., 2019. b.n. Dostupné z: doi:
- [67] SHIGLEY, JOSEPH, Chrales MISCHKE a Richard BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí. Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V. 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [68] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., . nedatováno. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [69] *Flow SHAPE TECHNOLOGIES GROUP*. [vid. 23. květen 2020]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Srovnnavaci-Rezani.aspx#range>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam použitých symbolů a veličin

Symbol	Jednotka	Veličina
B	T	Magnetická indukce
H	A/m	Intenzita magnetického pole
F	N	Síla
t	sek	Čas
I	A	Elektrický proud
C_{sy}	Ns/m	Sekundární příčné tlumení
K_{px}	N/m	Primární podélná tuhost
v	m/s	Rychlost
b	Ns/m	Útlum
c	N/m	Tuhost
m	Kg	hmotnost
δ	m	Volný kanál

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
2D	Dvojměrný
3D	Trojměrný
MR	Magnetoreologický
SLM	Selective laser melting
S/A	Semiaktivní
ÚK	Ústav Konstruování
Co	Kobalt
Si	Křemík
Fe	Železo
CDC	Continuous Damping Control
CVD	Continuously Variable Damping
PDC	Pneumatic Damping Control
ST-OS	Strojárna Oslavany
SYC	Secondary Yaw Control
ASW	Actuated Solid Wheelset
AIRW	Actuated Independently Rotating Wheels
DIRW	Driven Independently Rotating Wheels
DSW	Directly Steered Wheels

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 - 1 Schéma bezkolébkového podvozku vysokorychlostního kolejového vozidla, upraveno. [1]	9
Obr. 2 - 1 Konfigurace kolejového vozidla a směry tlumení, upraveno [4].....	11
Obr. 2 - 2 Členění kolejových vozidel [5]	11
Obr. 2 - 3 Podvozek kolejového vozidla, upraveno [9]	13
Obr. 2 - 4 Podvozek SGP 300 pro vysokorychlostní železniční vozidla [6].....	13
Obr. 2 - 5 Podvozek SGP 300; upraveno [10].....	14
Obr. 2 - 6 Podvozek Lokomotivy 109 E s označeným vypružením podvozku [11]	14
Obr. 2 - 7 Rozdělení tlumících systému a) pasivní b) aktivní c) semi-aktivní [12]	15
Obr. 2 - 8 Koncept aktivního systému vypružení [12].....	16
Obr. 2 - 9 Chování podvozku při průjezdu obloukem – detail kontaktu kola/kolejnice [20]	17
Obr. 2 - 10 a) Pohyb podvozku v přímé koleji, upraveno [8]; b) Detail kontaktu kola-kolejnice [23]	18
Obr. 2 - 11 a) Maximální pohyb v příčném směru v závislosti na rychlosti vlaku, b) Příční posuv v čase při přechodu přes kritickou rychlost [25]	18
Obr. 2 - 12 Závislost kritické rychlosti na řazení vozu pro tažná, tlačena vozidla; I. přímá trať; II. oblouk [4]	19
Obr. 2 - 13 Historické zobrazení maximální rychlosti kolejových vozidel (osobní, vysokorychlostní) [26].....	19
Obr. 2 - 14 Závislost kritické rychlosti na tlumícím poměru pro jednotlivé součásti podvozku vlaku [27].....	20
Obr. 2 - 15 Ovlivnění kritické rychlosti při navýšení tlumení v dané části [27].....	20
Obr. 2 - 16 Citlivostní analýza tuhosti pružin a tlumení tlumičů [27]	21
Obr. 2 - 17 Porovnání systému odpružení; zobrazení kvadrantů působení sil; frekvenční oblasti, potřebné energie a modelu [31]	22
Obr. 2 - 18 Dvouplášťový tlumič [32]	23
Obr. 2 - 19 Dvouplášťový tlumič CDC; pohyb oleje označen červeně, modře; pohyb pístnice oranžově [33].....	24
Obr. 2 - 20 a) Dvouplášťový tlumič CVD s kontrolním panelem; b) jeho dvoustavová F - v charakteristika [34].....	25

Obr. 2 - 21 PDC tlumič; vlevo ovládací mechanismus; uprostřed rozvod stlačeného vzduchu, vpravo tlumič[35]	25
Obr. 2 - 22 Časová odezva tlumicí síly tlumiče CDC; pro roztahování/stlačování [35]...	26
Obr. 2 - 23 Časová odezva tlumiče dle rozdílných přechodů (a), sestava tlumiče (b); testovací pulsátor (c)[35].....	26
Obr. 2 - 24 Možnosti aktivního řízení dvojkolí [18]	28
Obr. 2 - 25 Aktivní systém natáčení; reálné zobrazení na podvozku SIEMENS VECTRON [37]	28
Obr. 2 - 26 Schéma řízení aktivního systému natáčení skříně (a), uložení u testovacího vozu (b).....	29
Obr. 2 - 27 Aktivní řízení v podvozku E2-1000 Shinkansen; vpravo obecné schéma řízení [17]	29
Obr. 2 - 28 Efekt magnetického pole na částice, upraveno [38]	30
Obr. 2 - 29 Základní operační módy MR kapaliny; a) ventilový; b) smykový; c) tlakový [39]	30
Obr. 2 - 30 MR tlumič jednoplášťový typu; popsány jednotlivé části a znázorněn magnetický tok [40].....	31
Obr. 2 - 31 Základní rozdíl mezi jednoplášťovým a dvouplášťovým tlumičem [41].....	31
Obr. 2 - 32 MR tlumič základní konstrukce, vlevo bypass double tube, vpravo mono-tube [42]	32
Obr. 2 - 33 a) cívka mimo pracovní válec, b) nepohyblivá cívka v plášti [43]	32
Obr. 2 - 34 Rozdílné konfigurace pístové skupiny MR tlumiče [44]	33
Obr. 2 - 35 Vlevo schéma pro dynamické simulace, vpravo 1/5 testovací zařízení [45]...	33
Obr. 2 - 36 Vibračního zrychlení skříně při použití skyhook řízení, vlevo posun skříně on/off kontroly [45]	34
Obr. 2 - 37 Celková sestava s jednotlivými díly, vlevo testovací stanice s vozidlem [45]	34
Obr. 2 - 38 Závislost vibračního zrychlení skříně na proudu cívky MR tlumiče, při rozdílné rychlosti [27].....	35
Obr. 2 - 39 Testovací vozidlo, napravo detail umístění MR tlumiče [27].....	35
Obr. 2 - 40 Schéma řešení MR ventilu s detailem magnetického obvodu; upraveno [46].	36
Obr. 2 - 41 Zrychlení skříně dle frekvence vibrací [47]	37
Obr. 2 - 42 Úhlové zrychlení skříně v čase pro pasivní a semi-aktivní přístup k vypružení, MR 0,4 (A) [48].....	37

Obr. 2 - 43 Časová odezva systému prvního řádu, upraveno [49].....	38
Obr. 2 - 44 Graf závislosti Síly-čase [55]	39
Obr. 2 - 45 Vznik vířivých proudů v magnetickém jádru; (a) jádro s cívkou označené směry proudu a mag. toku; (b) vířivé proudy pro plné jádro; (c) vířivé proudy pro dělené jádro [56]	39
Obr. 2 - 46 Časová odezva magnetické indukce v mezeře [51]	40
Obr. 2 - 47 Časová odezva v závislosti na elektrickém odporu [57]	40
Obr. 2 - 48 B-H křivka materiálů [57]	41
Obr. 2 - 49 Odezva magnetického pole na měrném elektrickém odporu mag. obvodu [58]	41
Obr. 2 - 50 Tvarový přístup ke konstrukci jádra cívky, z disertační práce [59]	42
Obr. 2 - 51 Simulace rozložení vířivých proudů a jejich geometrie [57]	42
Obr. 4- 1 Řez MR tlumičem původní konstrukce s popisky jednotlivých částí; označena pístová skupina	57
Obr. 4- 2 Řez pístovou skupinou (a); Přední pohled na pístovou skupinu (b)	58
Obr. 4- 3 Detail pístní skupiny, modrou čarou znázorněn tok MR kapaliny ve štěrbině ...	59
Obr. 4- 4 Schéma řešení magnetických simulací	61
Obr. 4- 5 Magnetický obvod: Varianta A	62
Obr. 4- 6 Rozložení hustoty magnetického pole, vpravo mag. indukční tok pro 1 A; varianta A	63
Obr. 4- 7 Časová odezva nárustu (63,3 %) magnetického pole v závislosti na proud cívky; VARIANTA A	63
Obr. 4- 8 Geometrie varianty B s popisem měřicích úseků.....	64
Obr. 4- 9 Rozložení hustoty magnetického pole, vpravo magnetický indukční tok pro 1 A; VARIANTA B	64
Obr. 4- 10 Časová odezva nárustu (63,3 %) magnetického pole v závislosti na proud cívky; VARIANTA B	65
Obr. 4- 11 Graf závislosti magnetického pole na proudu (B-I), VARIANTA B.....	65
Obr. 4- 12 Časová odezva nárustu (63,3 %) magnetického pole v závislosti na proud cívky; VARIANTA C	66
Obr. 4- 13 Graf: B(T) - t(ms) pro (1A), vířivé proudy pouze v jádře; VARIANTA C	66
Obr. 4- 14 Graf: čas (ms) - Proud (A); 0 % na 63,6% nárust; POROVNÁNÍ VARIANT. 67	

Obr. 5- 1 Popis výseče pístové skupiny pro 3D geometrii (a); Model v Maxwelu z zobrazenou měřící červenou výsečí ve vrchním pólu MR tlumiče (b).....	68
Obr. 5- 2 Znárodnění rozdílů mezi 2D a 3D geometrii s rozdílným úhlem výseče; (a) 100°; (b) 21°; (c) 2D 0°	69
Obr. 5- 3 Porovnání výsledku <i>B-I</i> simulací mezi 2D a 3D.....	69
Obr. 5- 4 Náčrt výseče pístové skupiny 42°; (a) horní pohled a čárkovaně zobrazená měřící kruhová výseč ve štěrbině; (b) boční pohled a výškové umístění kruhové výseče v polovině vrchního pólu	70
Obr. 5- 5 Závislost časové odezvy nárůstu magnetického pole na hloubce drážek	71
Obr. 5- 6 Závislost časové odezvy nárůstu magnetického pole na šířce drážek.....	72
Obr. 5- 7 Závislost časové odezvy mag. pole na počtu drážek (drážky pouze jádro); vířivé proudy jádro + plášť.....	73
Obr. 5- 8 Závislost časové odezvy mag. pole na počtu drážek (drážky pouze jádro); vířivé proudy jádro	73
Obr. 5- 9 Závislost časové odezvy mag. pole na počtu drážek (drážky pouze plášť); vířivé proudy plášť	74
Obr. 5- 10 Drážkované jádro (a) a drážkovaný plášť MR tlumiče (b).....	75
Obr. 5- 11 Přípravky pro zalití pláště společně s pláštěm.....	75
Obr. 5- 12 Drážkované jádro s vinutou cívkou a hliníkovým jádrem pro silikonovou formu	76
Obr. 5- 13 Pístní skupina (a); zalití konektoru (b); ochranná vrstva cívky (c).....	76
Obr. 5- 14 Měřící řetězec pro určení <i>B-I</i> závislosti drážkovaného MR tlumiče se vzduchem v aktivní zóně	78
Obr. 5- 15 Rozdílné hodnoty <i>B-I</i> v místě: bez drážek, dvou drážek a simulace	79
Obr. 5- 16 Vlevo detail drážkovaného tlumiče se štěrbinou, vpravo oblasti měření <i>B-I</i> charakteristiky	79
Obr. 5- 17 Průběhy proudu a magnetické indukce v čase v prostředí Matlab (jedno celé měření)	80
Obr. 5- 18 Graf měření 007: změna mag. indukce v čase; pomalá varianta; třetí vrchol měření (Matlab).....	81
Obr. 5- 19 Graf časové odezvy poklesu magnetické indukce v závislosti proudu pro plnou variantu	82

Obr. 5- 20 Graf časové odezvy náběhu magnetické indukce v závislosti proudu pro plnou variantu.....	82
Obr. 5- 21 Graf časové odezvy poklesu magnetické indukce v závislosti proudu pro drážkovanou variantu	83
Obr. 5- 22 Graf časové odezvy náběhu magnetické indukce v závislosti proudu pro drážkovanou variantu	83
Obr. 5- 23 Graf časové odezvy náběhu na 90% magnetické indukce pro plnou variantu; porovnání.....	84
Obr. 5- 24 Graf časové odezvy náběhu na 63,3% magnetické indukce pro plnou variantu; porovnání.....	84
Obr. 5- 25 Graf časové odezvy náběhu na 90% magnetické indukce pro drážkovanou variantu; porovnání	85
Obr. 5- 26 Graf časové odezvy náběhu na 90% magnetické indukce pro drážkovanou variantu; porovnání	85
Obr. 5- 27 Měřicí sestava pro určení časové odezvy tlumicí síly rychlého MR tlumiče ...	86
Obr. 5- 28 Závislost síly na rychlosti pístu při změně proudu na cívce: F-v charakteristika	87
Obr. 5- 29 Graf dynamického rozsahu rychlého MR tlumiče.....	87
Obr. 5- 30 Graf tlumicí síly a proudu na cívce v čase, celý průběh měření.....	88
Obr. 5- 31 Graf tlumicí síly a proudu v čase, jeden cyklus, NÁBĚH	89
Obr. 5- 32 Graf tlumicí síly a proudu v čase, jeden cyklus	89
Obr. 5- 33 Graf časové odezvy tlumicí síly pro drážkovanou variantu MR tlumiče, souhrnný graf.....	90
Obr. 5- 34 Schéma řešení návrhu magnetického strukturovaného obvodu s vyznačenou oblastí řešenou v DP.....	91
Obr. 5- 35 Varianta 1 strukturovaného jádra magnetického obvodu MR tlumiče: průřez obdélník.....	92
Obr. 5- 36 Varianta 2 strukturovaného jádra magnetického obvodu MR tlumiče: průřez kosočtverec	93
Obr. 5- 37 Klíčové prvky při nastavení Magnetických simulací strukturovaných obvodů	93
Obr. 5- 38 Strukturované jádro Varianta 2; detail povrchu jádra a jednotlivé měřicí přímky-výseče.....	94
Obr. 5- 39 Plochy jednotlivých variant a rozložení hustoty magnetické indukce.....	95

Obr. 5- 40 Měřicí- vyhodnocovací plochy strukturovaných obvodů.....	95
Obr. 5- 41 B-I závislost v drážce jádra MR tlumiče; rozdílný mat.	96
Obr. 5- 42 Tabulka porovnání výsledků simulací odezve magnetické indukce a její velikosti.	97
Obr. 5- 43 Schéma tlumičů DP s uvedenými základními informacemi a vyznačenými oblastmi změny	98
Obr. 5- 44 3D model drážkovaného MR tlumiče; pohled v upraveném řezu	99
Obr. 5- 45 Model pístitnice MR tlumiče v prostředí ANSYS, detailně označené problematické oblasti pro výpočet.....	100
Obr. 5- 46 Řez pístitnicí s označenými oblastmi kontroly (modré čáry) a původními rozměry	100
Obr. 5- 47 Zobrazení pístitnice (1); zatěžující pulsující cyklus (2); uložení MSVS (3)....	101
Obr. 5- 48 Tabulka výsledků pevnostní analýzy pro průměr pístitnice 18 a 25; analytický přístup	101
Obr. 5- 49 2D geometrie pro MKP výpočty; (1) pístitnice; (2) kontakt v závitě jádro/pístitnice	102
Obr. 5- 50 Výsledky: MKP 2D/3D geometrie, analytického přístupu k výpočtu pístitnice s průměrem 18 mm.....	102
Obr. 5- 51 Závislost nárůstu počtu cyklu do lomu a bezpečnosti k MSÚ vzhledem k průměru pístitnice	103
Obr. 5- 52 Jednotlivé metody použitelné pro výrobu drážek [70], upraveno	104
Obr. 5- 53 Utahování pístitnice a jádra MR tlumiče; detail přípravku pro utáhnutí	104
Obr. 5- 54 3D modely jádra MR tlumiče; (a) drážkované jádro s otvory pro šrouby; (b) upravená varianta pro utáhnutí s vnitřním čtyřhranem.....	105
Obr. 5- 55 3D modely v řezu zjednodušené konstrukce MR tlumiče pro sériovou výrobu: a) Sestava pro utažení jádra k pístitnici; b) Řez kompletní sestavou.....	105
Obr. 5- 56 Zobrazeno zjednodušené řešení MR tlumiče; (a) přední pohled na jádro; (b) schématický řez pístitní skupinou; (b) detail uložení víček	106
Obr. 6- 1 Výsledky primární časové odezvy pro náběh magnetické indukce pro konceptní řešení.....	107
Obr. 6- 2 Graf primární časové odezvy náběhu magnetické indukce na proudu ($B-t$)	108
Obr. 6- 3 Měření časové odezvy tlumící síly rychlé MR tlumiče	109

Obr. 6- 4 Tlumící síla v závislosti na rychlosti pístnice; maximální a minimální tlumící hladina.....	110
Obr. 7 - 1 Náčrt MR tlumiče s dvojitou šěrbinou	112

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2- 1 Pasivní tlumiče vrtění a některé základní parametry	23
Tab. 4- 1 Blokové schéma řešení diplomové práce	56
Tab. 5- 1 Výsledky možných kombinací návrhu drážkování	74
Tab. 5- 2 Tabulka fyzikálních parametrů měřených a použitých v simulaci	77
Tab. 5- 3 Tabulka hodnot časové odezvy pro drážkovanou variantu MR tlumiče	90
Tab. 5- 4 Tabulka výsledku podle měřící přímky	94

12 SEZNAM PŘÍLOH

Papírové přílohy k diplomové práci:

- **Příloha A:** Měření magnetické indukce MR tlumiče v závislosti na proudu cívky se vzduchem v aktivní zóně. (11 stran)
- **Příloha B:** Měření časové odezvy magnetické indukce v závislosti na proudu cívky se vzduchem v aktivní zóně. (12 stran)
- **Příloha C:** Měření časové odezvy tlumicí síly MR tlumiče (12 stran)
- **Příloha D:** Pevnostní analýza pístitnice MR tlumiče (25 stran)
- **Příloha E:** Zalévání drážek jádra, pláště a ochranné vrstvy cívky MR tlumiče (13 stran)
- **Magnetoreologický tlumic s krátkou časovou odezvou _ Funkční vzor**

Elektronické přílohy k diplomové práci:

- **Excel grafy:** Vstupní parametry do magnetických simulací $B-H$ křivky
- **Excel výsledky:** Magnetických 2D simulací (Magnetostatické, Transientní)
- **Excel výsledky:** Magnetických 3D simulací (Magnetostatické, Transientní)
- **Excel výsledky:** Magnetických simulací pro strukturované jádro
- **Excel seznam:** Magnetických 3D simulací (zjednodušené výsledky, nastavení)

- **Excel výsledky:** Pevnostní výpočtů pístitnice (Analytické, MKP)

- **Excel vyhodnocení:** Měření magnetická indukce na proudu ($B-I$)
- **Excel vyhodnocení:** Měření magnetická indukce v čase ($B-t$)
- **Excel vyhodnocení:** Měření tlumicí síly v čase ($F-t$)

- **Matlab:** Skripty pro vyhodnocení $F-t$, $B-I$ (testovací soubor dat)
- **Stl. modely :** Rychlého MR tlumiče, strukturovaného jádra, zjednodušené verze MR tlumiče, sestavy pro utáhnutý zjednodušené MR verze.