

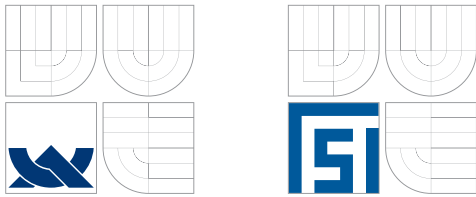
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče

[Disertační práce]
[Dissertation thesis]

Autor práce: **Ing. Zbyněk Strecker**
Author



Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče

[Disertační práce]
[Dissertation thesis]

Autor práce: **Ing. Zbyněk Strecker**
Author

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**
Supervisor

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá využitím magnetoreologického tlumiče v semiaktivním závěsu kola automobilu. Semiaktivní řízení závěsu může vylepšit jízdní komfort resp. bezpečnost jízdy na úroveň, která je s běžným pasivním nastavením nedosažitelná. Magnetoreologický tlumič má ale vlastnosti, které limitují oblast využití MR tlumiče. Mezi tyto parametry patří zejména časová odezva regulátoru s tlumičem a omezený regulační rozsah MR tlumiče. Bylo zjištěno, že zejména délka časové odezvy MR tlumiče má zásadní vliv na efektivitu semiaktivních algoritmů. Současné MR tlumiče s regulátory nejsou schopny efektivně pracovat v závěsech se semiaktivními algoritmy zvyšujícími bezpečnost jízdy. Pro využití MR tlumičů v semiaktivních závěsech tohoto typu je třeba snížit časovou odezvu. Pro snížení časové odezvy MR tlumiče byl navržen a ověřen princip proudového regulátoru a byly navrženy konstrukční změny potlačující vznik vířivých proudů v magnetickém obvodu MR tlumiče. Výsledky této práce by měly přispět ke kvalitnějšímu návrhu semiaktivních systémů odpružení s MR tlumiči.

KLÍČOVÁ SLOVA

MR tlumič, semiaktivní algoritmy, časová odezva, vířivé proudy, PWM regulátor

ABSTRACT

This work deals with the usage of magneto-rheological (MR) damper in the semi-active car suspension. Semi-active suspension can improve ride comfort or tyre grip to the level, which cannot be achieved with the common passive setting of the damper. MR damper has however features, like time response of the controller with MR damper and the control range of the MR damper, which limit area of application. It was found out that especially the time response of the damper significantly influences the efficiency of semi-active algorithms. Current MR dampers with controllers are not capable of efficient control of the semi-active suspension. For proper design of semi-active suspension with MR dampers, the time response must be decreased. Therefore, a new PWM current controller was designed and verified. Also changes in MR damper design which eliminate eddy-currents in the magnetic circuit were proposed. The results of this work should contribute to the better design of semi-active suspension systems with MR damper.

KEYWORDS

MR damper, semiactive algorithms, time response, eddy-currents, PWM controller

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRECKER, Z. *Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 114 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele Doc. Ing. Ivana Mazúrka, CSc.

V Brně dne 26. 8. 2013

.....
Zbyněk Strecker

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ivanu Mazůrkovi za mnoho cenných rad a připomínek v průběhu řešení této disertační práce a po celou dobu doktorského studia. Také bych rád poděkoval svým rodičům za podporu při studiu.

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	18
2.1	Omezující parametry MR tlumiče	18
2.1.1	Celková doba odezvy MR tlumiče	18
2.1.2	Časová odezva MR kapaliny	22
2.1.3	Indukčnost cívky MR tlumiče	23
2.1.4	Vířivé proudy v jádře.....	25
2.1.5	Regulační rozsah MR tlumiče	26
2.2	Princip regulátoru proudu používaného v řídicích jednotkách	27
2.3	Modely MR tlumiče	29
2.3.1	Binghamský model	29
2.3.2	Gamota and Filisko model.....	30
2.3.3	Nový Bouc-Wen model	30
2.3.4	Bi-viscous model	32
2.4	Semiaktivní algoritmy řízení tlumiče.....	33
2.4.1	Princip Algoritmu Skyhook.....	33
2.4.2	Princip algoritmu Balance control (Relative displacement control)	34
2.4.3	Princip algoritmu Acceleration-driven-damping control	35
2.4.4	Princip algoritmu Groundhook.....	35
2.4.5	Princip algoritmu Hybrid control	36
2.4.6	Porovnání kvality odpružení jednotlivých algoritmů:	36
3	FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU	39
4	VYMEZENÍ CÍLŮ	40
5	METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ	41
5.1	Postup určení limitujících parametrů MR tlumiče.....	41
5.1.1	Zjištění elektrických parametrů MR tlumiče.....	41
5.1.2	Měření dynamických charakteristik MR tlumiče	41
5.1.3	Zjištění vlivu vířivých proudů v jádře MR tlumiče na časovou odezvu magnetické indukce ve šterbině.....	45
5.2	Návrh optimálního regulátoru proudu pro MR tlumič.....	49
5.2.1	Volba principu regulace.....	50
5.2.2	Obvodové řešení optimálního regulátoru proudu MR tlumiče.....	56
5.3	Realizace fyzikálního modelu závěsu kola	59
5.3.1	Identifikace parametrů závěsu automobilu.....	59
5.3.2	Volba parametrů fyzikálního modelu	60
5.3.3	Volba vhodného rozsahu MR tlumiče	63
5.4	Sestavení virtuálního modelu odpružení automobilu	66
5.4.1	Metodika pro posuzování kvality odpružení	67
5.4.2	Sestavení virtuálního modelu MR tlumiče	68
5.5	Princip semiaktivních algoritmů řízení MR tlumiče.....	69
5.5.1	Groundhook	70
5.5.2	Modifikovaný groundhook	71
5.5.3	Skyhook	73
6	ANALÝZA A INTERPRETACE	74
6.1	Limitující prvky MR tlumiče	74
6.1.1	Elektrické parametry MR tlumiče	74

6.1.2	Časová odezva MR tlumiče	75
6.1.3	Experiment na zjištění vlivu materiálu na dobu odezvy magnetické indukce ve štěrbině v závislosti na elektrickém proudu	78
6.2	Ověření Fyzikálního závěsu kola s virtuálním modelem pomocí přejezdové zkoušky	87
6.3	Porovnání efektivity algoritmů řízení tlumiče	89
6.3.1	Efektivita pasivního způsobu řízení tlumiče.....	89
6.3.2	Efektivita semiaktivního algoritmu Groundhook	91
6.3.3	Efektivita semiaktivního algoritmu Modifikovaný groundhook	93
6.3.4	Efektivita semiaktivního algoritmu Skyhook	98
7	ZÁVĚR	101
7.1	Splnění cílů práce	101
7.2	Praktický význam dosažených výsledků.....	102
7.3	Doporučení pro rozšíření výzkumu.....	102
	LITERATURA.....	103
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A ZNAČEK.....	107
	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	108
	SEZNAM TABULEK.....	111
	PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE	112
	PŘÍLOHY	113
	Příloha 1: Schéma regulátoru.....	113
	Příloha 2: Rozmístění součástí	114

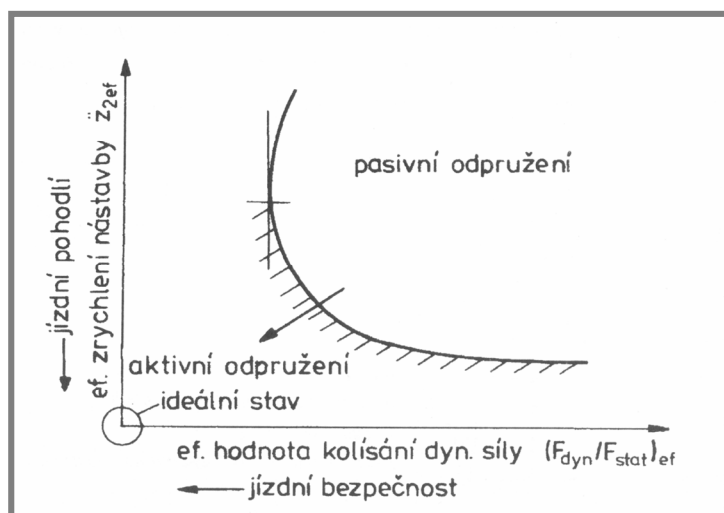
1 ÚVOD

Cílem odpružení automobilu je zajistit pohodlí cestujících (minimalizace svislého zrychlení působícího na posádku) a zajistit jízdní bezpečnost (zajištění konstantního přítlaku kola na vozovku).

Odpružení automobilu využívá dvou základních prvků – pružiny a tlumiče. Účinky rázů zmírňují pružiny tím, že přeměňují pohybovou energii narážejícího tělesa na potenciální energii (napjatost) pružiny.

Z fyzikálního hlediska je pružina akumulátor energie a pokud dojde ke stlačení pružiny, hmotnost připevněná na pružině se netlumeně rozkmitá. Aby se kmitání zabránilo, musí se použít prvek, který pohybovou energii přemění na jinou formu (teplo). Tímto prvkem je tlumič.

U dnešních automobilů jsou nejrozšířenější závěsy s kapalinovým tlumičem paralelně připojeným k pružině. Tento typ závěsu se nazývá pasivní. Pasivní závěs lze ale vždy nastavit jen jako kompromis mezi jízdním pohodlím a bezpečností jízdy (obr. 1.1). Pro zlepšení jak jízdních vlastností tak komfortu vozidla je možné využít adaptivních systémů odpružení. U adaptivních systémů je vždy možné měnit některý z prvků závěsu kola.



Obr. 1.1: Závislost jízdního pohodlí na jízdní bezpečnosti [1]

Adaptivní systémy se dle rychlosti a dodávané energie dělí na:

- Adaptivní pasivní
- Semiaktivní
- Aktivní

Ideálního odpružení automobilu je možno dosáhnout pomocí aktivního závěsu. Aktivní závěs se vyznačuje aktuátorem, který je schopen do závěsu dodávat energii. Příkladem takového systému je například odpružení od firmy BOSE (obr.1.2). V tomto závěsu je místo pružiny a tlumiče použit lineární elektromotor, který se snaží pohybovat kolem tak, aby kolo co nejpřesněji kopírovalo terén. Pak by na vozovku měla být vyvozována stálá síla při minimálních hodnotách zrychlení odpružené hmoty. Nevýhodou těchto systémů je ale i přes rekuperaci energie

poměrně vysoký stálý příkon, zrychlená složitost a tím i vysoká cena. Při poruše systému se navíc prudce zhorší jízdní vlastnosti odpružení vozidla.



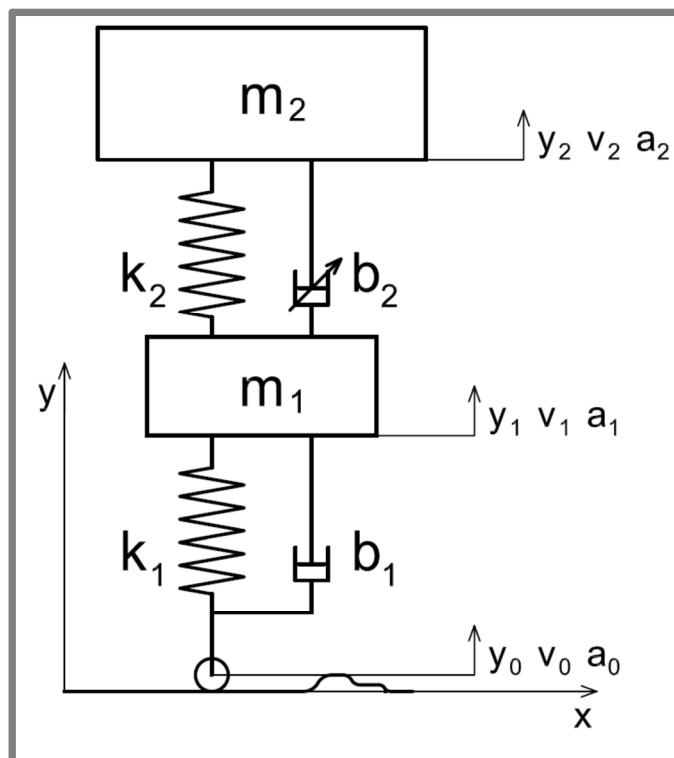
Obr. 1.2: Závěs BOSE s lineárními elektromotory

Jako levnější a jednodušší varianta odpružení automobilu, která dokáže zlešit jízdní vlastnosti automobilu, se jeví adaptivní pasivní resp. semiaktivní odpružení. Adaptivní pasivní systémy mohou měnit svou charakteristiku z dlouhodobého hlediska (zatížení vozidla apod.), ale nejsou schopny reagovat na okamžitou situaci při přejezdu nerovnosti.

Semiaktivní způsob řízení znamená, že do systému není možné (na rozdíl od aktivního řízení) dodávat energii, ale je možné měnit velikost disipované energie (změna charakteristiky systému). Hlavní rozdíl oproti adaptivním pasivním systémům je, že charakteristiku semiaktivních systémů lze měnit řádově minimálně s frekvencí rezonančních frekvencí závěsu. Výhodou oproti aktivním systémům je malá energetická náročnost, a že i při poruše řídicí jednotky tlumič stále funguje jako klasický tlumič, jedná se tedy o fail-safe systémy [2].

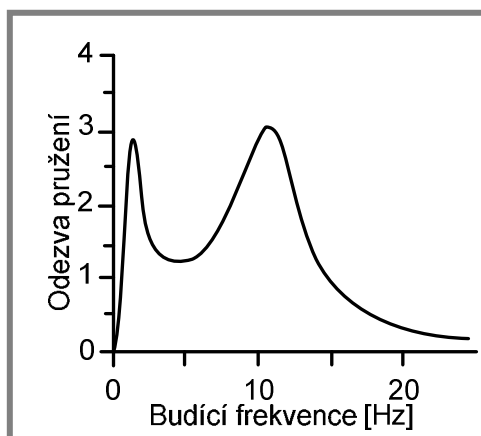
Pro účely modelování závěsu kola automobilu se obvykle používá čtvrtinový model vozidla (obr.1.3), což je model se dvěma stupni volnosti skládající se z odpružené hmoty m_2 , neodpružené hmoty m_1 , tlumiče s tlumením b_2 pružinou o tuhosti k_2 , tuhosti pneumatiky k_1 a tlumením b_1 . Frekvenční charakteristika závěsu kola (obr.1.4) má dva výrazné vrcholy - rezonanční frekvence odpružené hmoty (nižší frekvence) a rezonanční frekvenci neodpružené hmoty (vyšší frekvence).

Cílem závěsu kola je, aby přenos výchylky z kola do odpružené hmoty byl co nejmenší (malé tlumení, měkká pružina) a naopak aby přenos výchylky z kola do neodpružené hmoty byl roven jedné do co nejvyšších frekvencí (tvrdá pružina, velké tlumení).



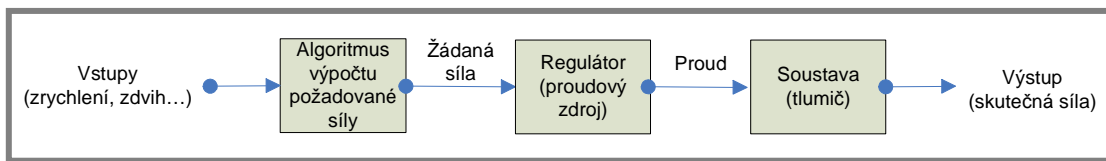
Obr. 1.3: Čtvrtinový model odpružení automobilu

Při použití semiaktivního pružení je tlumič použit jako generátor síly. Pro semiaktivní utlumení odpružené hmoty je třeba generovat sílu nejméně o frekvencích odpružené hmoty, pro semiaktivní utlumení neodpružené hmoty nejméně o frekvencích neodpružené hmoty.



Obr. 1.4: Frekvenční charakteristika závěsu kola

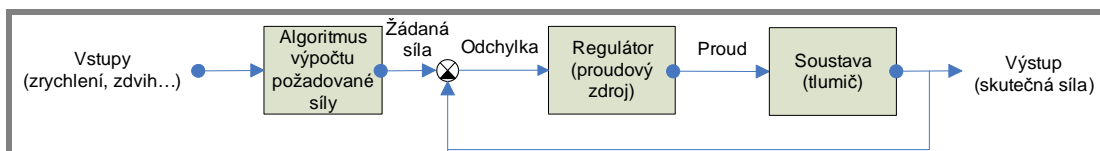
Adaptivní systémy s sebou přinášejí nutnost systém regulovat, to znamená na základě vstupních veličin generovat řídicí signál pro aktuátor. Nejjednodušším způsobem řízení je, že na základě vstupních parametrů (zrychlení odpružené hmoty, zdvih tlumiče) dostaneme podle určitého algoritmu požadovaný signál (velikost tlumící síly). Na základě modelu se do aktuátoru (tlumiče) vygeneruje odpovídající akční zásah (proud do cívky) a předpokládá se, že na výstupu aktuátoru je požadovaná síla. Takový způsob řízení se nazývá řízení v otevřené smyčce (obr.1.5).



Obr. 1.5: Řízení s otevřenou smyčkou

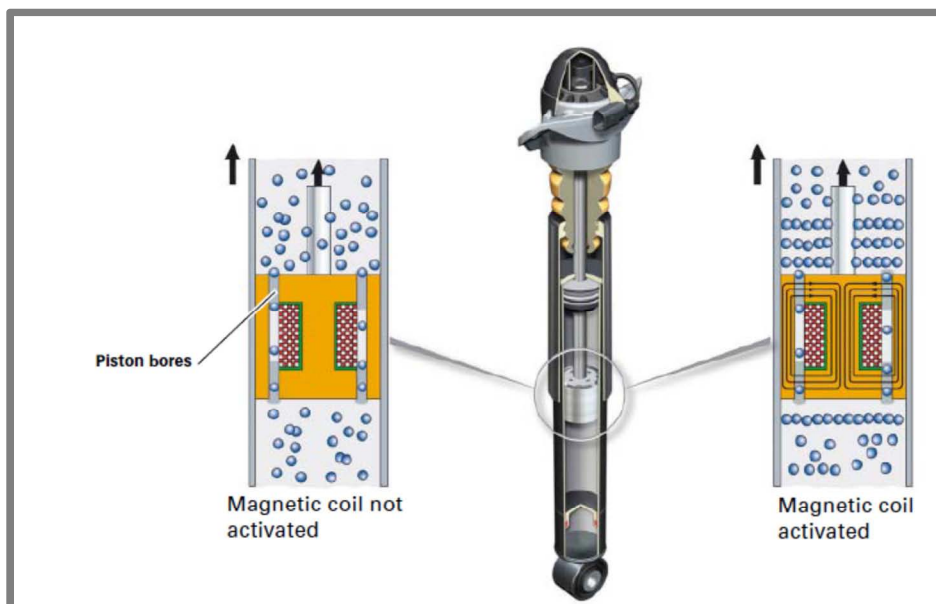
Výhodou je jednoduchost řešení (není třeba měřit tolik veličin jako u zpětnovazebné regulace). Nevýhodou je zejména značná citlivost na přesnost modelu soustavy a nemožnost kompenzace chyb.

U zpětnovazebné regulace (obr.1.6) je třeba měřit výstup ze soustavy (síla). Akční zásah je pak závislý na rozdílu mezi požadovanou a skutečnou hodnotou výstupu ze soustavy. Výhodou tohoto způsobu řízení je, že pokud se použije vhodný regulátor, je možné na výstupu ze soustavy dosáhnout přesné síly i bez přesného modelu soustavy. Nevýhodou je složitější řešení.



Obr. 1.6: Řízení MR tlumiče se zpětnou vazbou

V adaptivních závěsech je možné použít jako zdroj proměnné síly MR tlumič. Objev a rozvoj aplikací využívajících MR efekt se datuje od konce 50-tých let [3,4]. Koncem 90-tých let se hlavní firmou vyvíjející MR systémy stala firma Delphi (dnes BWI Group). Semiaktivní odpružení pomocí MR tlumičů se v sériově vyráběných automobilech začalo objevovat od roku 2002 (Ferrari 599GTB, Audi TT, Chevrolet Corvette atd...).



Obr. 1.7: Princip MR tlumiče [5]

Princip MR tlumiče je na obr. 1.7. Hlavním rozdílem oproti běžným tlumičům je elektická cívka umístěná obvykle přímo v pístu a náplň tlumiče – MR kapalina. MR kapalina je koloidní suspenze tvořená nosnou kapalinou a feromagnetickými mikročásticemi (2-5 μm). Pokud se do cívky pustí elektrický proud, magnetické pole ve štěrbině, kterou protéká MR kapalina, způsobí zřetězení části, čímž se ztíží průtok nosné kapaliny štěrbinou.

MR tlumiče se využívají nejen na tlumení podvozků a sedadel v automobilovém průmyslu [6-9], ale i na tlumení seismických vibrací budov [10, 11], tlumení mostových konstrukcí [12, 13] a tlumení rázů střelných zbraní [14].

Využití MR tlumičů je limitováno jejich vlastnostmi, které jsou dány konstrukcí. Jedná se zejména o omezený regulační rozsah, jistou dobu nutnou na změnu charakteristiky, degradaci MR kapaliny. Některé omezující parametry MR tlumiče je možné vhodnou konstrukcí či regulací eliminovat, s ostatními omezujícími parametry je při návrhu systémů s MR tlumiči nutné počítat. Následující práce popisuje limitující parametry MR tlumiče, možnosti jejich eliminace či redukce a vliv těchto limitujících parametrů na efektivitu semiaktivních algoritmů řízení MR tlumiče.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

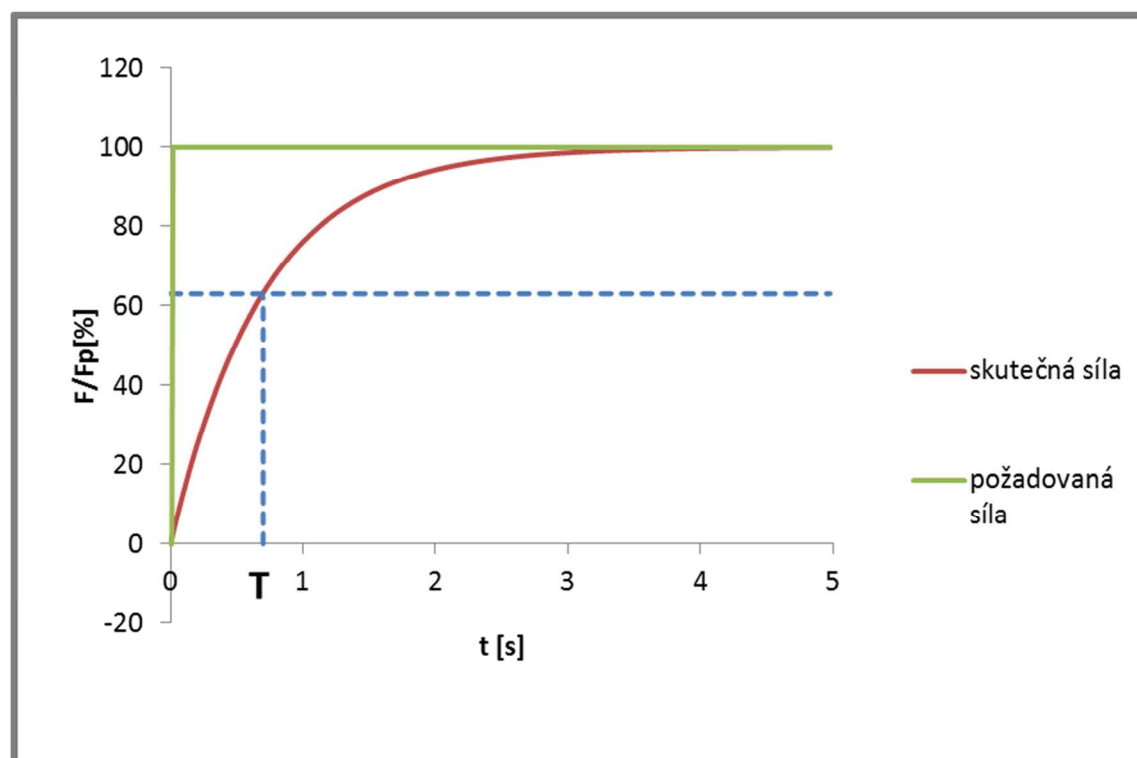
2.1 Omezující parametry MR tlumiče

2.1.1 Celková doba odezvy MR tlumiče

Pokud se systém navrhuje jako semiaktivní, je důležité znát dynamické chování (resp. časové konstanty) všech částí systému. Předpokládá se, že charakteristika MR tlumiče bude měněna několikrát v rámci jednoho zdvihu tlumiče. Amplitudově-frekvenční charakteristika závěsu automobilu má vrcholy na dvou rezonančních frekvencích (obr.1.4). Pro efektivní regulaci závěsu by časová konstanta aktuátoru (MR tlumiče) neměla být větší než je 1/10 převrácené hodnoty vlastní frekvence závěsu. Pokud je časová konstanta tlumiče delší, regulace se stává neúčinnou [15].

Doba odezvy resp. časová konstanta je pro dynamické systémy prvního řádu definována jako čas T nutný k dosažení 63,2 % konečné hodnoty výstupní veličiny v ustáleném stavu v odezvě na jednotkový skok vstupní veličiny (obr. 2.1).

Ve frekvenčním spektru je na frekvenci odpovídající převrácené hodnotě časové konstanty T pokles amplitudy o -3 dB. V některých zdrojích bývá jako časová konstanta považován čas nutný k dosažení 95 % konečné hodnoty, tento čas je pak zhruba trojnásobný oproti časové konstantě T .



Obr. 2.1: Definice časové konstanty T MR tlumiče

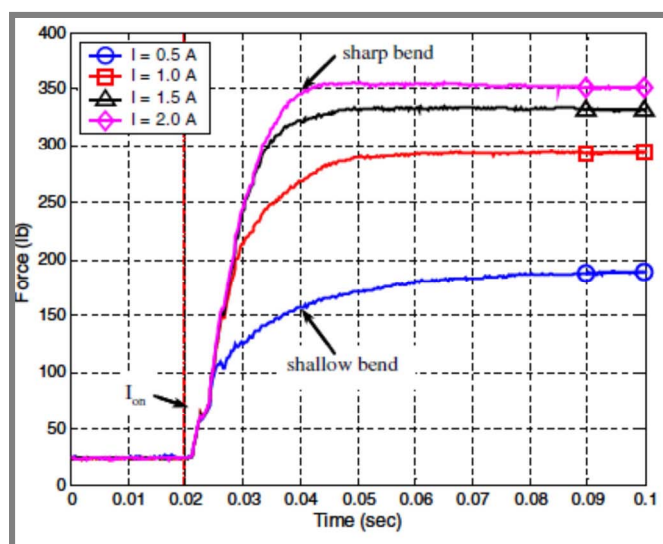
Měřením doby odezvy MR tlumičů se zabývalo mnoho výzkumných týmů. V článku vědeckého týmu Xinchunga [16] byla změřena časová odezva MR tlumiče s maximální tlumící silou 270 kN (MR tlumič určený k tlumení seismických vibrací budov). Změřená časová odezva tlumiče byla určena v rozmezí 160 – 240 ms

v závislosti na počátečním a konečném proudu a pístové rychlosti. Bylo zjištěno, že pokud je konečný proud vyšší, je celková doba odezvy MR tlumiče kratší. Rozdíl v odezvě mezi proudy 0-0.8A a 0.4-1.2 A může být až dvojnásobný. Doba odezvy MR tlumiče se také lišila v případech, kdy docházelo k přepínání z nižšího proudu na vyšší (kratší časová odezva) a z vyššího proudu na nižší. (delší časová odezva).

V rozsáhlém a často citovaném experimentu provedeném týmem Koo [17] byla změřena celková doba odezvy komerčně běžně dostupného tlumiče Lord Motion Master® určeného do automobilů.

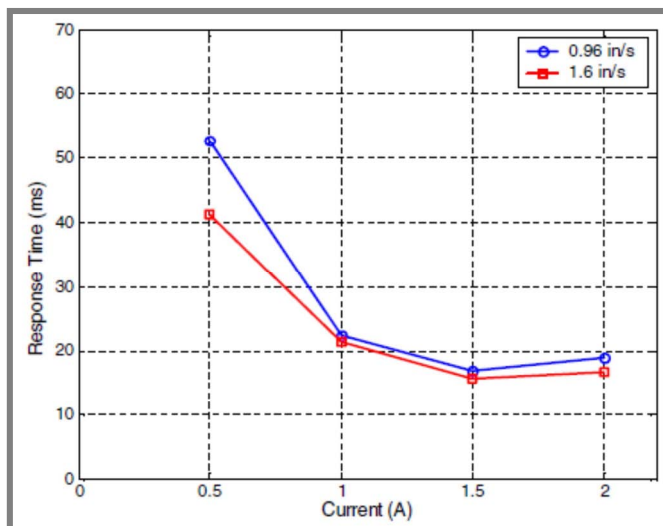
Autoři považují za časovou odezvu MR tlumiče čas nutný k dosažení 95% finální hodnoty požadované výstupní veličiny (síly). Byl testován vliv velikosti proudu a pístové rychlosti na celkovou dobu odezvy MR tlumiče.

Časová odezva síly v závislosti na proudu cívky je na obr. 2.2. Z grafu je patrné, že se vzrůstajícím proudem doba odezvy do proudu 1.5 A klesá. V závislosti na proudu se zásadně mění tvar křivky. Zatímco pro malé proudy je ohyb křivky pozvolný, pro větší proudy se ohyb křivky stává ostřejším.



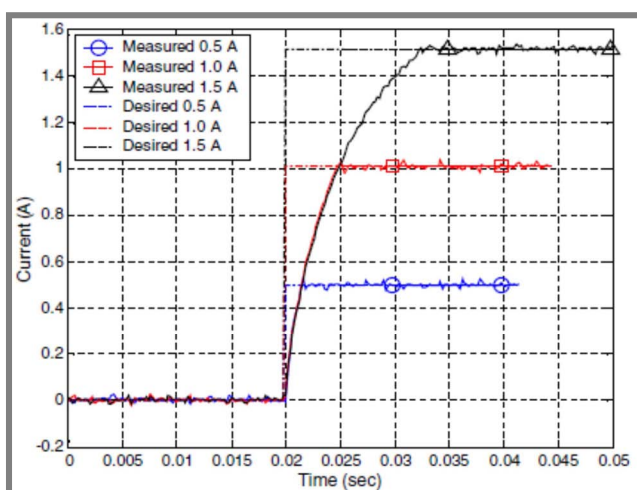
Obr. 2.2: Časová závislost síly pro různé proudy [17]

Na obr. 2.3 je vynesena změřená závislost doby odezvy v závislosti na proudu cívky. Graf ukazuje, že pokud je proud vyšší, je i doba odezvy tlumiče nižší.



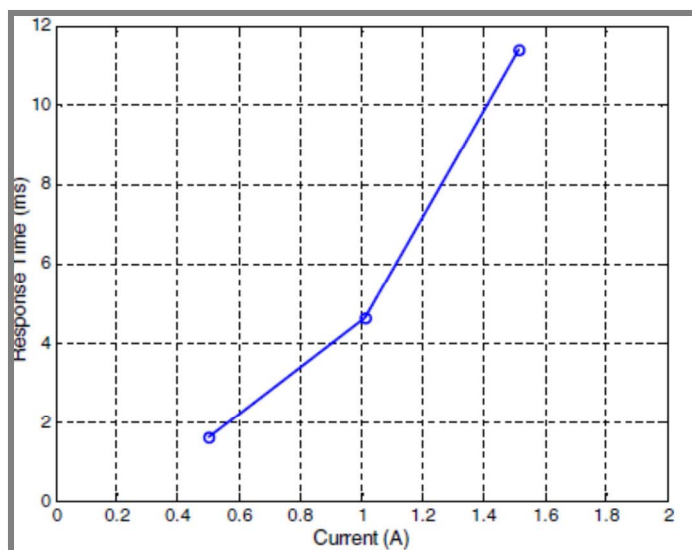
Obr. 2.3: Časová odezva tlumiče v závislosti na pístové rychlosti

V rámci experimentu byla změřena doba odezvy proudu na ovládací signál. Autoři používali proudový zdroj vlastní konstrukce.



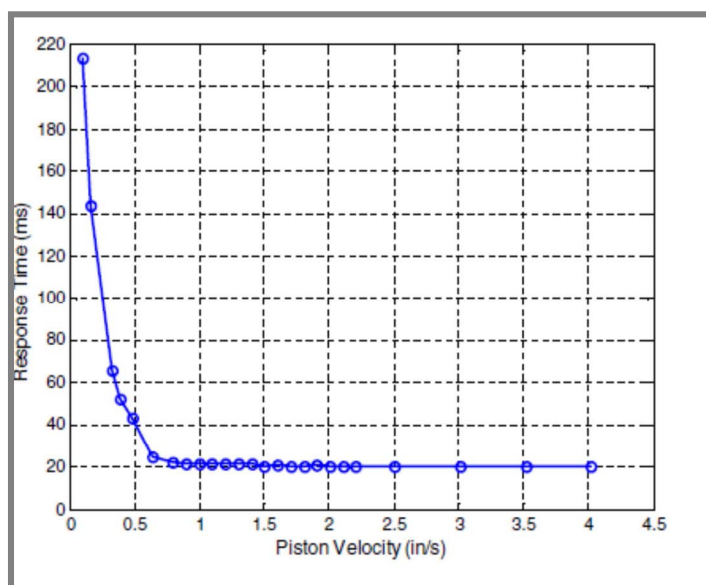
Obr. 2.4: Časová odezva proudu na jednotkový skok

Odezva řídicí elektroniky se vzrůstajícím požadovaným proudem narůstá podle obr. 2.4, 2.5. Zdá se, že řídicí elektronika v tomto zapojení může dělat více než polovinu času celkové odezvy tlumiče (pro proud 1,5 A je odezva řídicí elektroniky 11 ms, celková doba odezvy tlumiče je 18 ms).



Obr. 2.5: Závislost doby odezvy řídicího obvodu na proudu

Experiment na zjištění vlivu pístové rychlosti (obr. 2.6) na celkovou dobu odezvy tlumiče ukázal, že pro velmi nízké rychlosti se doba odezvy MR tlumiče prodlužuje. Po překročení rychlosti přibližně 0.2 m/s už nemá pístová rychlost tlumiče vliv na celkovou dobu tlumiče. Autoři tento jev připisují pružnému uchycení tlumiče přes gumové podložky. Při nízké rychlosti je totiž čas nutný na stisknutí pružiny (gumové podložky) delší než pro vysoké pístové rychlosti.



Obr. 2.6: Vliv pístové rychlosti MR tlumiče na délku časové odezvy

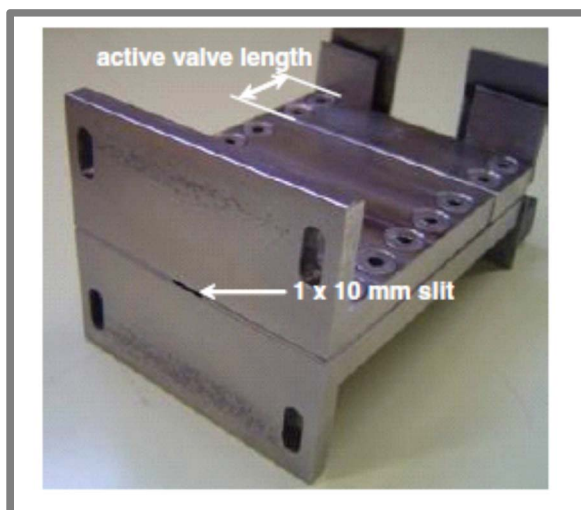
Časová odezva MR tlumičů se v závislosti na konstrukci MR tlumiče samotného a způsobu řízení značně liší. Příčiny časové konstanty MR zařízení jsou popsány týmem Maase [18]. Mezi hlavní identifikované příčiny lze zařadit:

- Odezva MR kapaliny
- Indukčnost cívky MR tlumiče

- Vířivé proudy v jádře

2.1.2 Časová odezva MR kapaliny

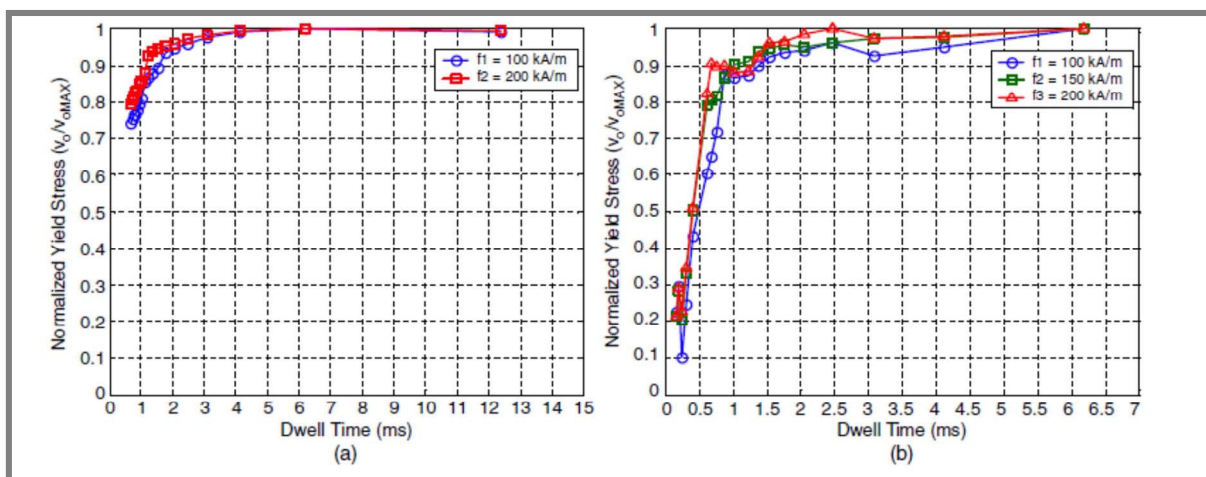
Odezva MR kapaliny je způsobena polarizací železných částic v MR kapalině a následným formováním těchto částic do řetězců, pokud se MR kapalina ocitne v magnetickém poli. Tým Gonkalvese [19] přesně změřil časovou odezvu MR kapaliny pomocí slit-flow reometru (obr. 2.7).



Obr. 2.7: Slit-flow reometr [19]

Tento reometr umožňuje měnit délku aktivní zóny. Dále je možné měnit průtok aktivní zónou. Z těchto parametrů je možné určit „dwell time“, což je čas, po který se letící částice nacházejí v aktivní zóně. Dále se snímá tlak MR kapaliny, který je nutný k vyvolání toku štěrbinou o požadované rychlosti. Následně je vyhodnocena normalizovaná mez toku (podíl okamžité meze toku a maximální dosažitelné meze toku při daném proudu). Výhodou této konstrukce reometru je, že v průběhu experimentu není měněna intenzita magnetického pole a měření není ovlivněno přechodovými ději v magnetickém obvodu.

Z průběhů na obrázku 2.8 je patrné, že při dobách průletu částice aktivní zónou kratších než 1 ms prudce klesá mez kluzu. Normalizovaná mez kluzu při prodlužující se délce průletu částice štěrbinou narůstá rychleji při větších intenzitách magnetického pole.



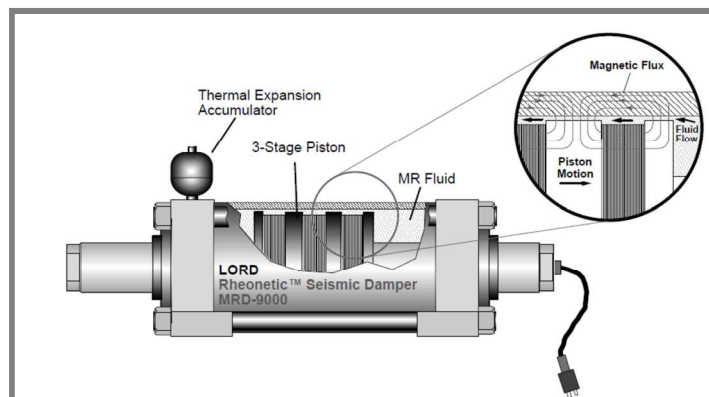
Obr. 2.8: Normalizovaná mez kluzu v závislosti na době průletu MR částice aktivní zónou

Z naměřených závislostí autoři určili jako dobu odezvy MR kapaliny (dwell time nutný k dosažení 62,3% maximální dosažitelné meze toku) v rozmezí od 0.45 ms pro vyšší intenzity magnetického pole, do 0.6 ms pro nižší intenzity magnetického pole. Časová odezva MR kapaliny byla změřena také ve stříhovém módu na experimentální MR spojce [18]. Časová odezva MR kapaliny se měřila z odezvy krouticího momentu na intenzitu magnetického pole ve štěrbině. Měření byly odezvy pro dvě kapaliny s různým obsahem železných částic (Fe částice tvořily 48 % a 27 % objemu) a pro různé vstupní signály (chirp, PRBS, skok). Bylo zjištěno, že pro kapalinu se 27 % Fe částic se časová odezva pohybovala v rozmezí 0.76 ms do 1.14 ms, pro kapalinu se 48 % Fe částic byla časová odezva v rozmezí 0.88 ms do 1.26 ms.

2.1.3 Indukčnost cívky MR tlumiče

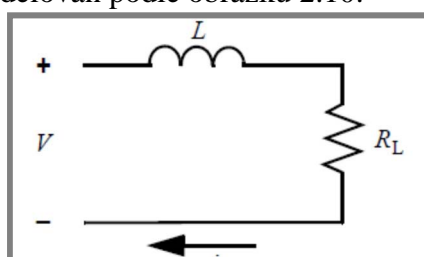
Z elektrického pohledu je možné brát MR tlumič jako systém typu setrvačný článek prvního řádu, kde vstupem je napětí a výstupem je proud. Jako akumulátor energie je zde cívka (nejčastěji v pístu tlumiče). Pokud je na vstup takového systému připojen zdroj konstantního napětí, bude proud narůstat po exponenciále. Mez toku MR kapaliny je přímo závislá na magnetické indukci ve štěrbině. Magnetická indukce je závislá na elektrickém proudu cívkou. Pokud cívkou neprotéká požadovaný proud, ani magnetická indukce ve štěrbině - a tím i mez toku MR kapaliny - nemůže dosahovat požadované hodnoty. Proto je nutné, aby byl požadovaný proud dosažen co nejrychleji. Toho je možné dosáhnout vhodným řízením tlumiče. Problematikou návrhu optimálního řízení tlumiče se zabývají články týmu vedeného Yangem [10, 20]

Pro ověření vlivu řízení na odezvu proudu tlumičem byl proveden experiment na MR tlumiči MRD-9000 (obr. 2.9), který se používá k utlumení kmitů budov (20 t, zdvih ± 8 cm). V tlumiči jsou 3 cívky, které jsou zapojeny do série. Celková indukčnost cívek je 6,6 H a odpor $R_0 = 21,9 \Omega$. Tlumič obsahuje 5 l MR kapaliny.



Obr. 2.9: Tlumič Lord MRD-9000

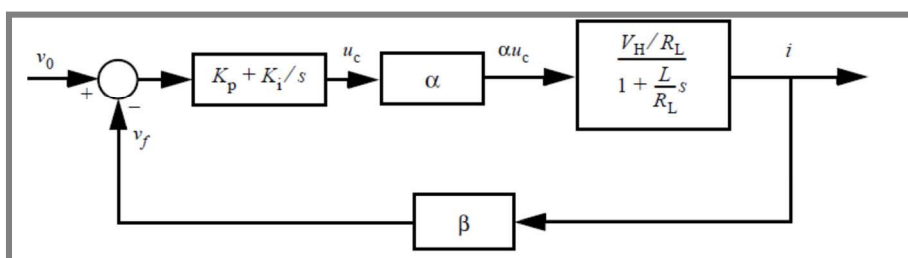
Obvod MR tlumiče je modelován podle obrázku 2.10:



Obr. 2.10: Elektrický model MR tlumiče

Pokud je jako řídicí veličina použito napětí – tzn. ze známého odporu a požadovaného proudu se vypočítá nutné napětí, které se musí připojit na tlumič - čas k dosažení 95 % požadovaného proudu je přibližně roven hodnotě $3L/R_L$.

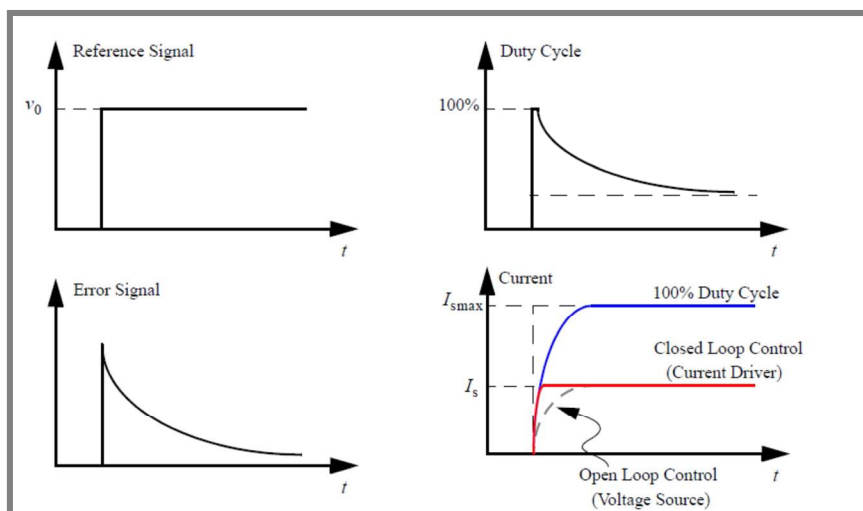
Pro zrychlení doby odezvy tlumiče je výhodnější použít proudového zdroje. Regulace proudového zdroje je realizována jako PI regulátor. Blokové schéma obvodu regulátoru proudu s připojeným tlumičem je na obrázku 2.11:



Obr. 2.11: Blokové schéma regulátoru proudu

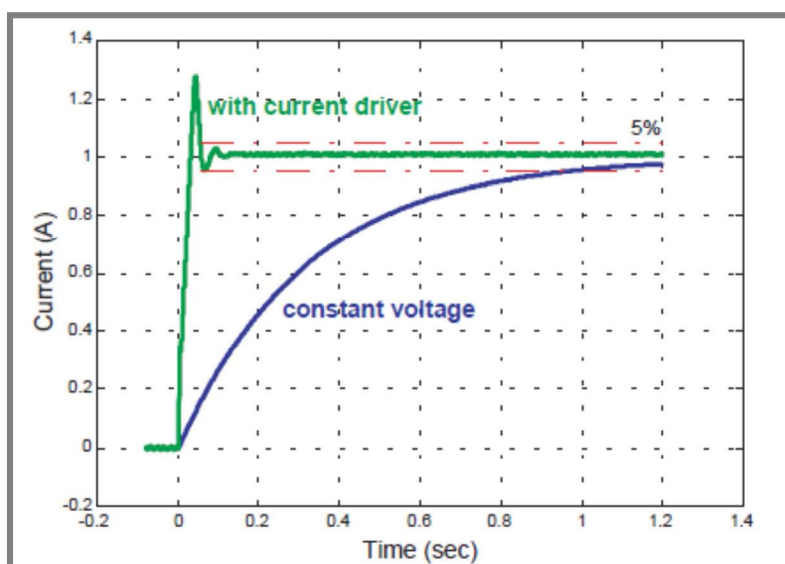
v_0 je požadovaný proud, v_f je skutečný proud. Blok $K_p + K_i/s$ symbolizuje PI regulátor, Blok $(V_H/R_L)/(1+L.s/R_L)$ symbolizuje tlumič. Součin αu_c je poměr délky doby vysoké úrovně signálu ku době jedné periody PWM modulace. Po vynásobení $\alpha u_c s V_H$ tedy získáme ekvivalent stejnosměrného napětí $(V(t))$ připojeného na cívku MR tlumiče.

Průběhy požadovaného proudu, vypočítaného napětí na tlumiči, odchylky požadovaného od skutečného proudu a skutečného proudu v závislosti na čase jsou na obrázku níže.



Obr. 2.12: Odezvy signálů na skok požadovaného proudu

Na obr. 2.12 je porovnání náběhu proudu, pokud se použije regulátor proudu (červený průběh) a pokud je použit napěťový regulátor (čárkovaná čára).



Obr. 2.13: Porovnání doby náběhu proudu za použití napěťového a proudového regulátoru

Pokud byl tlumič řízen napěťovým regulátorem, doba potřebná k dosažení 95% požadovaného proudu byla 0,3 s. Při použití proudového PWM regulátoru (s napětím $V_H = \pm 120V$) činil čas k dosažení požadovaného proudu s odchylkou 5% 0,06 s, viz obr. 2.13.

2.1.4 Vířivé proudy v jádře

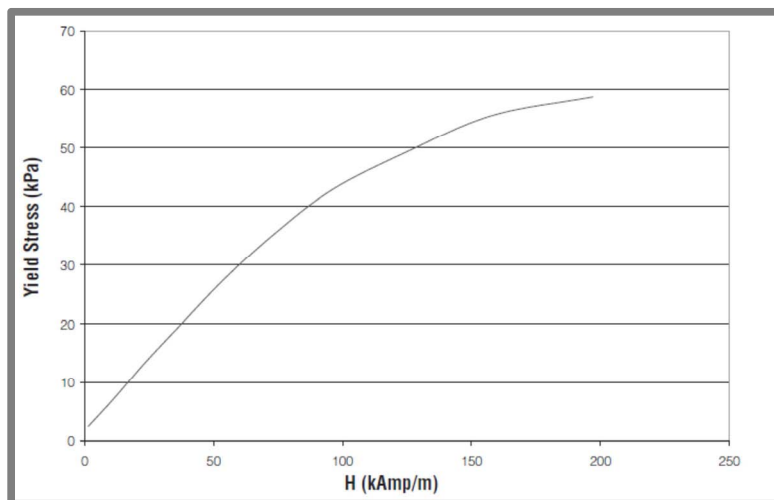
Kolektiv kolem Xinchunga [16] porovnával závislost průběhu síly vyvíjené tlumičem na budícím proudu. Bylo zjištěno, že síla vyvozovaná tlumičem je zpožděna za průběhem proudu. Autoři tento jev na základě jednoduchého FEM modelu vysvětlují vířivými proudy v jádře.

Vliv vířivých proudů na vznik magnetického pole v MR zařízení byl zaznamenán také v článku autorů Gütha & Maase [18, 21], kde autoři popisují konstrukci experimentální MR spojky určené pro měření odezvy MR kapaliny ve stříhovém módu. Autoři zjistili, že průběh magnetické indukce ve štěrbině je závislý na použitém materiálu jádra cívky. V rámci výzkumu byla navržena MR spojka s magnetickým obvodem z měkkého ferritu na rozdíl od často používané nízkouhlíkové oceli. V tomto případě byl měřen průběh magnetické indukce ve štěrbině v závislosti na elektrickém proudu cívkou obdélníkového průběhu a bylo zjištěno, že náběh magnetické indukce ve štěrbině přesně sleduje proud cívkou.

2.1.5 Regulační rozsah MR tlumiče

Regulační rozsah tlumiče určuje rozsah sil, který je možné při určité rychlosti vyvodit. Rozsah je dán nejen konstrukcí MR tlumiče, ale také degradačními procesy probíhajícími v MR kapalině.

Návrh konstrukce MR tlumiče je popsán ve zdroji [40]. Pro dosažení co největšího regulačního rozsahu MR tlumiče je třeba vyjít z nelineární závislosti meze kluzu na intenzitě magnetického pole. Magnetický obvod musí být navržen tak, aby ve štěrbině MR tlumiče bylo možné dosáhnout intenzity magnetického pole resp. magnetické indukce odpovídající bodu zalomení na závislosti meze kluzu MR kapaliny na intenzitě magnetického pole (obr. 2.14). V žádném bodě magnetického obvodu MR tlumiče nesmí dojít k magnetickému nasycení materiálu.



Obr. 2.14: Závislost meze kluzu MR kapaliny MR 140 na intenzitě magnetického pole [22]

Nejpodstatnější jevy, které vedou k degradaci kapalin, jsou popsány v literatuře [23-27]. Zejména se jedná o:

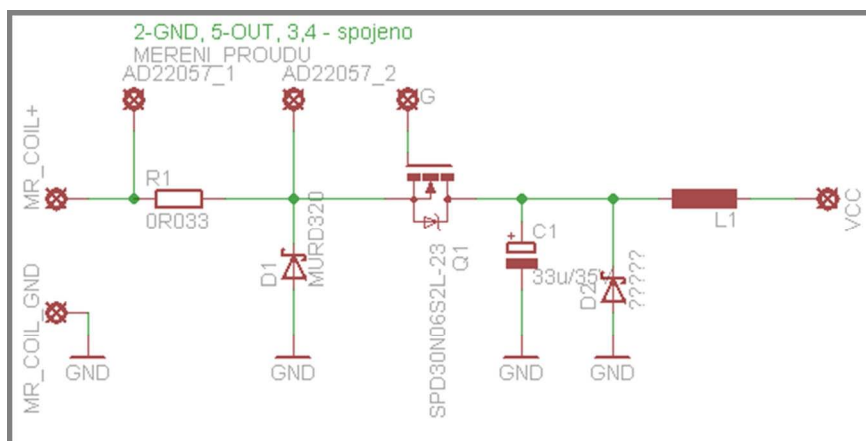
- Sedimentace – pokud kapalina není promíchávána, dochází k vydělování Fe částic od nosné kapaliny. Moderní MR kapaliny sedimentují díky aditivům v základové kapalině velmi pomalu.
- Provozní houstnutí – pokud je MR kapalina dlouhodobě zatěžována, zvyšuje se mez kluzu v neaktivovaném stavu. Důvodem je odlupování oxidických vrstev železných částic během interakce částic v průběhu zatěžování MR kapaliny.

- Pokles MR efektu v aktivovaném stavu – vlivem oxidace Fe částic dochází ke změně magnetických vlastností MR kapaliny. Zoxidované částice železa mají jiné magnetické vlastnosti než čisté železo. U částic zejména narůstá remanentní magnetismus a klesá mez magnetického nasycení.

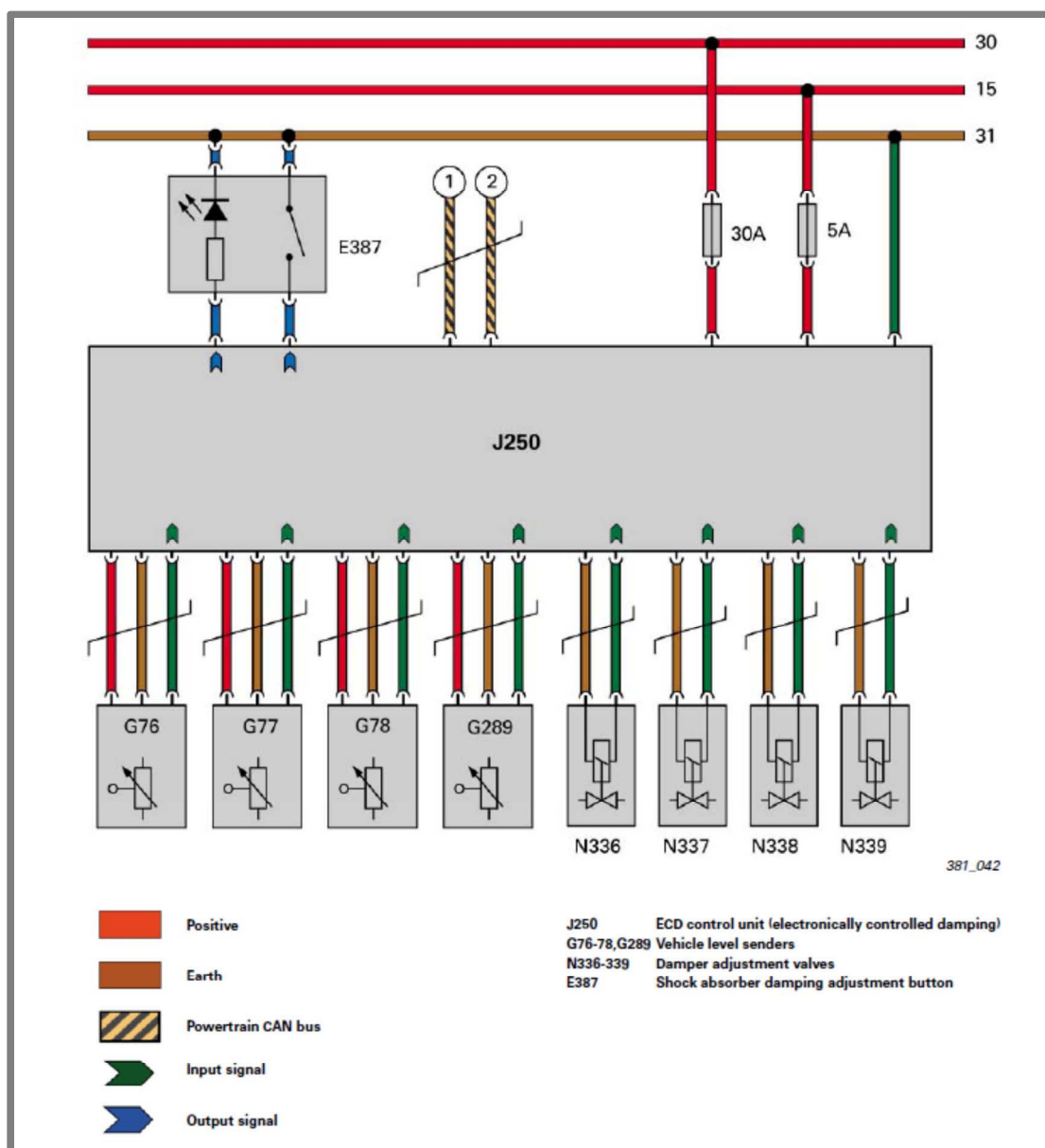
2.2 Princip regulátoru proudu používaného v řídicích jednotkách

2.2

Pro zjištění způsobu regulace proudu MR tlumičem byla rozebrána a analyzována řídicí jednotka odpružení Audi TT (2007).



Obr. 2.15: Schéma zapojení koncového stupně ŘJ Audi TT



Obr. 2.16: Blokové schéma řídicí jednotky Audi TT [28]

Ze zapojení koncového stupně (obr. 2.15) vyplývají následující skutečnosti:

- Na desce není zdroj vyššího napětí než palubní napětí automobilu.
- Koncový stupeň funguje ve spínaném režimu.
- Rychlost řízení MR tlumiče je limitována převážně dynamikou samotné cívky tlumiče.
- Z blokového schématu (obr. 2.16) vyplývá, že řídicí jednotka nemá k dispozici signál velikosti svislého zrychlení odpružené a neodpružené hmoty, nemůže být tedy použit Skyhook ani Groundhook algoritmus
- Řídicí obvod je realizován 16-bitovým mikrokontrolérem ST10F272B, což je 64 MHz mikrokontrolér se zabudovaným CAN řadičem, AD převodníkem (10b max. 25 kHz). Samotný

mikrokontrolér i spínací prvky v koncovém stupni mají řádově kratší odezvy, než je časová konstanta samotné cívky tlumiče.

2.3 Modely MR tlumiče

2.3

Pro semiaktivní způsob řízení je třeba znát velikost síly, která je generována tlumičem. Pro nasazení MR tlumiče v praxi je třeba mít výpočetně nenáročný, ale dostatečně přesný model MR tlumiče.

Modely MR tlumiče se dělí na 2 typy:

- neparаметrické modely
- parametrické modely

Z neparаметrických modelů je nejvíce rozšířen model pomocí Chebyshevových polynomů [29]. Nevýhodou tohoto typu modelů je, že jsou velmi složité a neexistuje obecná metodika návrhu neparаметrických modelů pro konkrétní tlumič.

Z parametrických modelů jsou nejrozšířenější modely:

2.3.1 Binghamský model

Binghamský model se často používá pro popis chování MR a ER kapalin. Model definuje závislost smykového napětí τ na smykovém spádu $\dot{\gamma}$ podle vzorce:

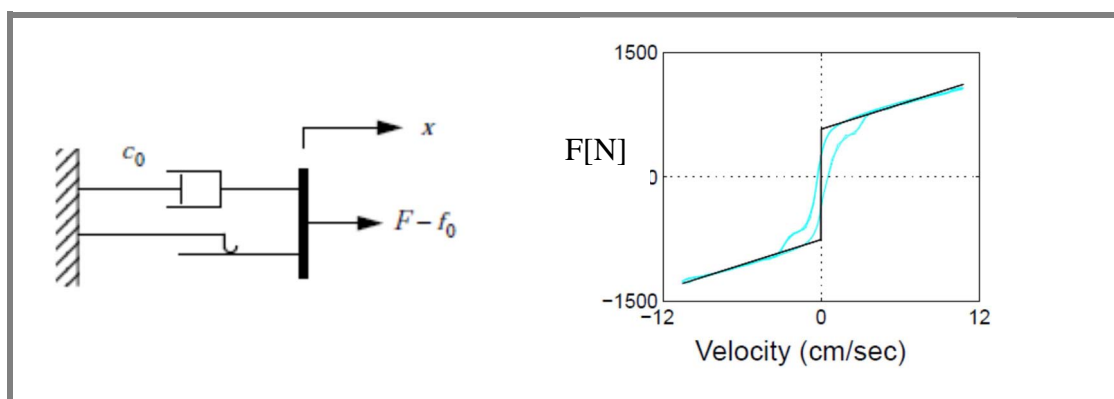
$$\tau = \tau_{y(\text{field})} \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

$\tau_{y(\text{field})}$ je mez kluzu závislá na magnetickém poli a η je viskozita.

Na základě tohoto modelu chování ER kapaliny byl týmem Stanwaye [30] navržen idealizovaný mechanický model ER tlumiče. Tento model (obr. 2.17) se skládá z Coulombova tření paralelně připojenému k viskóznímu tlumiči. Síla vyvozovaná takovýmto tlumičem je vyjádřena:

$$F = f_c \text{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (2.2)$$

kde c_0 je tlumicí koeficient, f_c je třecí síla, která je úměrná magnetickému poli. f_0 je síla způsobená tlakem plynové náplně za plovoucím pístkem.



Obr. 2.17: Binghamský model MR tlumiče a odpovídající F-v charakteristika[31]

Na obr. 2.17 vpravo je porovnání skutečné F-v charakteristiky MR tlumiče (modrá křivka) s modelem tlumiče (černá křivka). Z F-v charakteristiky je zřejmé, že model špatně předpovídá sílu pro nízké rychlosti.

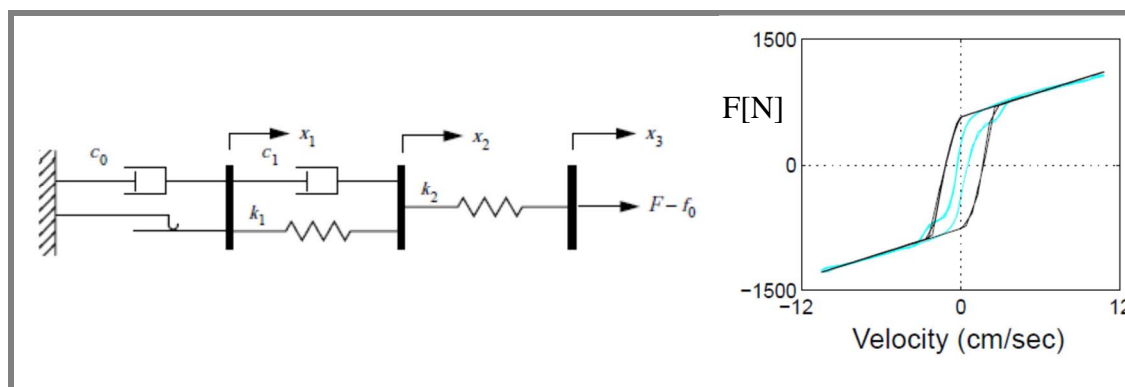
2.3.2 Gamota and Filisko model

Tento model (obr. 2.18) je rozšíření Binghamského modelu o viskoelastický člen zapojený do série [32]. Rovnice, podle které se síla počítá, je následující:

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \\ &= c_0\dot{x}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 \\ &= k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, |F| > f_c \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_2 + f_0 \\ &= k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, |F| \leq f_c \quad (2.4)$$

kde c_0 je tlumící koeficient tlumiče Binghamského modelu, k_1 , k_2 a c_1 jsou parametry viskoelastického modelu.



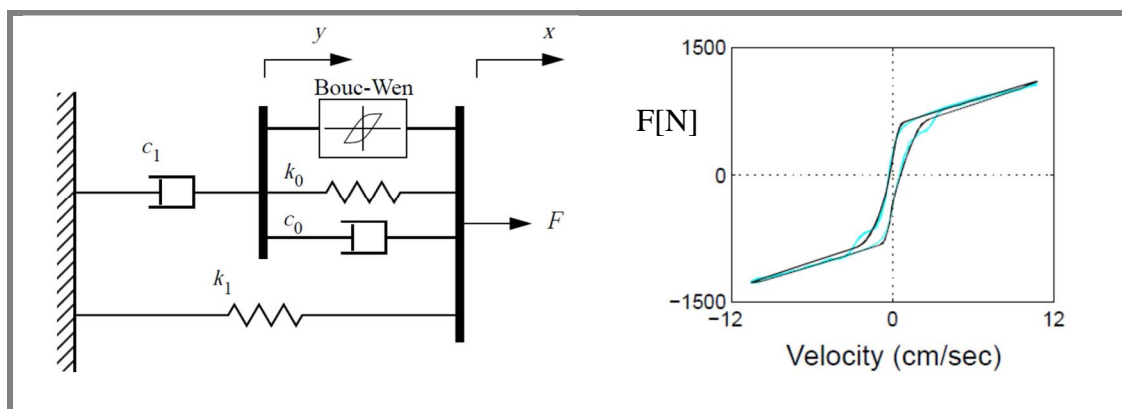
Obr. 2.18: Gamota-Filisko model a odpovídající F-v charakteristika [31]

F-v charakteristika modelu (obr. 2.18 vpravo) odpovídá charakteristice skutečného tlumiče v oblastech vyšších rychlostí. V oblasti nízkých rychlostí tento model zahrnuje hysterezi MR tlumiče, průběhy ale nejsou zcela shodné.

Nevýhodou tohoto modelu je, že ze soustavy rovnic je numerickou cestou velmi složité získat potřebné parametry.

2.3.3 Nový Bouc-Wen model

Nový Bouc-Wen model MR tlumiče navržený týmem Spencera [31], je na obr. 2.19:



Obr. 2.19: Nový Bouc-Wen model tlumiče a odpovídající F-v charakteristika [31]

Podle obr. 2.19 lze psát rovnici :

$$c_1 \dot{y} = \alpha z + k_0(x - y) + c_0(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2.5)$$

kde z je:

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2.6)$$

což vede na rovnici:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 - c_1)} [\alpha y + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (2.7)$$

celková síla může být vyjádřena:

$$F = \alpha z + k_0(x - y) + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_1(x - x_0) \quad (2.8)$$

což lze zjednodušit:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (2.9)$$

U tohoto modelu je „tuhost“ stlačeného plynu reprezentována proměnnou k_1 , viskózní tlumení pro vysoké rychlosti je dáno proměnnou c_0 , c_1 je tlumicí koeficient pro malé rychlosti, k_0 je tuhost při vysokých rychlostech a x_0 je výchylka pružiny k_1 . Všechny výše uvedené modely jsou navrženy pro konstantní úroveň napětí resp. proudu procházejícího cívkou tlumiče. Pro účely rychlého řízení MR tlumiče je třeba, aby parametrem modelu bylo i vstupní napětí na cívce tlumiče (u). Proto jsou navrženy následující závislosti:

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (2.10)$$

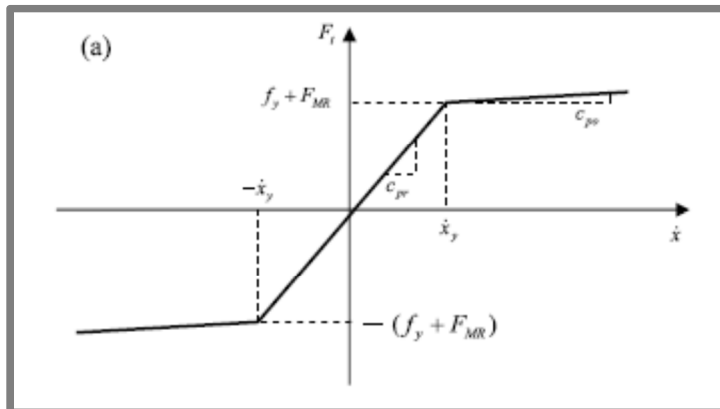
$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (2.11)$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}u \quad (2.12)$$

Konstanty konkrétního MR tlumiče jsou získávány numericky. Tento model je velmi přesný (obr. 2.19 vpravo), výpočetně je ovšem značně náročný.

2.3.4 Bi-viscous model

Tento model popsany kolektivem Wereleye [33] předpokládá, že MR tlumič má v závislosti na rychlosti nelineární charakteristiku složenou ze tří lineárních úseků (obr. 2.20).



Obr. 2.20: Bi-viscous F-v charakteristika tlumiče [31]

síla tlumiče F_t je určena jako:

$$F_t = \begin{cases} c_{pr} \cdot \dot{x} & -\dot{x}_y \leq \dot{x} \leq \dot{x}_y \\ c_{po} \cdot \dot{x} + f_y + F_{MR} & \dot{x} > \dot{x}_y \\ c_{po} \cdot \dot{x} - (f_y + F_{MR}) & \dot{x} < -\dot{x}_y \end{cases} \quad (2.13)$$

Kde \dot{x}_y je rychlost, při které dochází k mezi kluzu (závislé na proudu). Výpočet je:

$$\dot{x}_y = a \cdot i_B^2 + b \cdot i_B + c \quad (2.14)$$

Tento model MR tlumiče v sobě nezahrnuje hysterezi způsobenou stlačeným plynem v kompenzační komoře a remanentním magnetismem ocelových částí tlumiče. Hystereze způsobená stlačeným plynem je možné velmi jednoduše eliminovat změřením tuhosti této pružiny a odečítáním síly vyvozené pružinou pro každý zdvih. Hystereze způsobená remanentním magnetismem je v případě automobilových tlumičů zanedbatelná.

Tento model je výpočetně velmi jednoduchý, proto je vhodný k modelování tlumiče v iteračních modelech závěsu. Není ale dostatečně přesný, protože viskozita ve všech úsecích se v závislosti na proudu tlumičem také mění. Proto byl ve virtuálním modelu závěsu automobilu použit model tlumiče popsany v kapitole 4.4.2.

2.4 Semiaktivní algoritmy řízení tlumiče

Pro řízení tlumiče v semiaktivních systémech odpružení je známo mnoho algoritmů řízení. Semiaktivní algoritmy řízení závěsu automobilu mohou být rozděleny do dvou skupin:

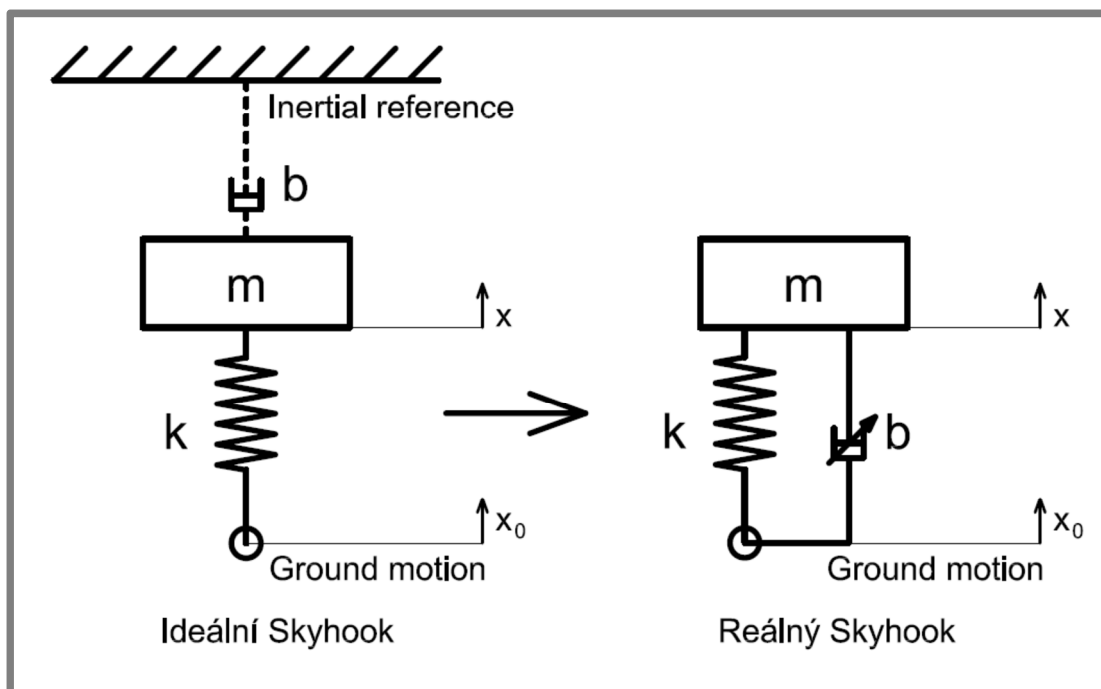
- Algoritmy určené ke zvýšení komfortu (Skyhook, acceleration driven control, balance control)
- Algoritmy určené ke zvýšení přítlaku kola na vozovku (Groundhook)

2.4.1 Princip Algoritmu Skyhook

Tým D. Karnoppa teoreticky navrhl první semiaktivní algoritmus Skyhook již v roce 1974 [34]. Semiaktivní algoritmus byl simulován na systém s jedním stupněm volnosti (obr. 2.21). Úplné izolace vibrací odpružené hmoty m by bylo možné dosáhnout, pokud by byl k dispozici tlumič s velmi vysokým tlumením b a s pevným bodem (inertial reference), ke kterému by bylo možné tlumič připevnit. V reálné situaci ale takový závěs obvykle není k dispozici, systém vypadá podle obrázku 2.21 – reálný Skyhook. Tlumič s tlumením b (obr. 2.21 vlevo) může v jistých případech vyvozovat stejně velkou sílu jako tlumič v případě ideálního Skyhooku.

Pravidlo pro řízení semiaktivního tlumiče je definováno jako:

$$F_d = \begin{cases} b\dot{x}, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0 \\ 0, & \dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$



Obr. 2.21: Konfigurace ideálního a reálného semiaktivního systému Skyhook s jedním stupněm volnosti

Tým Karnoppa počítal s hydraulickým tlumičem, který je možné pomocí ventilů vyřadit. V okamžicích, kdy směr rychlosti odpružené hmoty a relativní rychlosti

odpružené a neodpružené hmoty má opačné znaménko, by měl reálný tlumič v ideálním stavu působit silou $-b\dot{x}$, což není možné. Proto se v těchto případech předpokládá, že tlumič bude působit nulovou silou. MR tlumič ale nemůže (při nenulové rychlosti) působit nulovou silou. MR tlumič je v těchto případech přepnut do neaktivovaného stavu, tzn. tlumič působí nejmenší možnou silou [35,36]. Pravidlo na přepínání on/off Skyhook algoritmu MR tlumiče v systému se dvěma stupni volnosti (obr.1.3) je pak ve tvaru:

$$F_d = \begin{cases} b_{max}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \\ b_{min}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

Kde b_{max} je tlumení MR tlumiče s proudem odpovídajícím aktivovanému stavu a b_{min} je tlumení odpovídající MR tlumiči v neaktivovaném stavu.

Varianta Continuous Skyhook algoritmus s MR tlumičem se snaží za pomoci znalosti modelu MR tlumiče vyvodit sílu v aktivovaném stavu odpovídající tlumiči s lineární F-v charakteristikou.

Algoritmus byl porovnáván s pasivním nastavením v několika zdrojích. Simulace s hydraulickým tlumičem s možností přemostění tlumiče ukázaly, že zatímco u pasivního nastavení se vzrůstajícím útlumem tlumiče klesá zesílení na rezonančních frekvencích, amplitudy výchylky na vyšších frekvencích rostou. Algoritmus Skyhook nejlépe pracoval s velkým tlumením. Simulace Skyhook algoritmu v systémech se dvěma stupni volnosti a s charakteristikami reálného MR tlumiče ukazují podstatné zlepšení izolace odpružené hmoty od vibrací [41].

2.4.2 Princip algoritmu Balance control (Relative displacement control)

Tento algoritmus popsany týmem Liu [37] je alternativou k algoritmu Skyhook. Algoritmus se snaží vyrušit sílu pružiny pomocí tlumiče. Vstupem do algoritmu je relativní posun a relativní rychlost mezi odpruženou hmotou a základnou. Zrychlení odpružené hmoty lze vyjádřit jako:

$$\ddot{y}_2 = -\frac{1}{m}(F_k + F_d) \quad (2.17)$$

kde F_k je síla pružiny a F_d je síla tlumiče

$$F_k = k(y_2 - y_1), F_d = b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \quad (2.18)$$

Absolutní hodnota zrychlení tedy je:

$$|\ddot{y}_2| = \frac{|F_k| + |F_d|}{m}, (y_2 - y_1)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \leq 0 \quad (2.19)$$

$$|\ddot{y}_2| = \frac{|F_k| - |F_d|}{m}, (y_2 - y_1)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) > 0 \quad (2.20)$$

Pravidlo pro určení síly, jakou má MR tlumič působit je pro Continuous balance control:

$$F_d = \begin{cases} \max[b_{min}, \min[\frac{-k(y_2 - y_1)}{\dot{y}_2 - \dot{y}_1}, b_{min}]](y_2 - y_1), & (y_2 - y_1)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \leq 0 \\ b_{min}(y_2 - y_1), & (y_2 - y_1)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) > 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

Pro variantu on/off balance control se výpočet požadované síly změní na:

$$F_d = \begin{cases} b_{max}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (y_2 - y_1)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \leq 0 \\ b_{min}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (y_2 - y_1)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) > 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

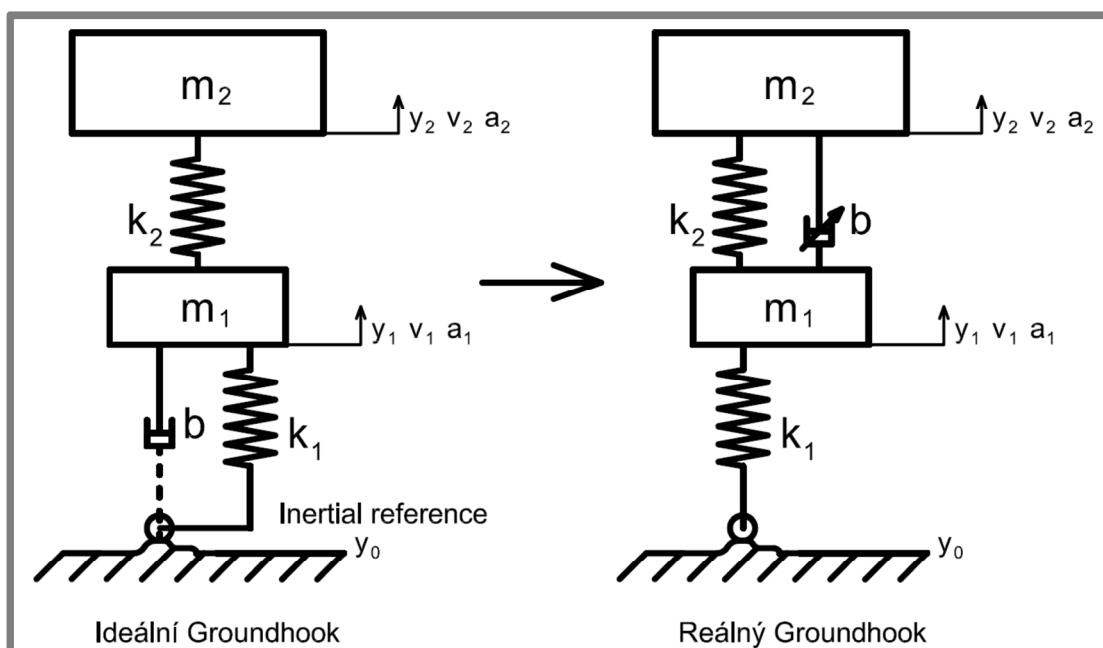
2.4.3 Princip algoritmu Acceleration-driven-damping control

Využití tohoto algoritmu je výhodné v případě, kdy je požadována minimalizace svislého zrychlení odpružené hmoty. Výhodou oproti Skyhook algoritmu je zejména velmi jednoduché vyhodnocení. Potřebnými vstupními signály jsou pouze relativní rychlost odpružené a neodpružené hmoty a zrychlení odpružené hmoty. Pravidlo pro řízení MR tlumiče je dáno rovnicí:

$$F_d = \begin{cases} b_{max}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \ddot{y}_2(y_2 - y_1) \leq 0 \\ b_{min}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \ddot{y}_2(y_2 - y_1) > 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

2.4.4 Princip algoritmu Groundhook

Algoritmus Groundhook popsaný týmem Ahmadiana [38] má zlepšovat přítlak kola na vozovku. Principiálně funguje podobně jako algoritmus Skyhook. V tomto případě je ale ideální tlumič s tlumením b vložen mezi povrch vozovky a neodpruženou hmotu (obr. 2.22 vlevo).



Obr. 2.22: Konfigurace ideálního a reálného semiaktivního systému Groundhook

Sílu takového tlumiče je možné působit v některých okamžicích i za pomoci reálného tlumiče mezi odpruženou a neodpruženou hmotou (obr. 2.22 vpravo).

$$F_d = \begin{cases} b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (\dot{y}_1 - \dot{y}_0)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \\ 0, & (\dot{y}_1 - \dot{y}_0)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

Pokud bude použit MR tlumič změní se síla podle rovnice:

$$F_d = \begin{cases} b_{max}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (\dot{y}_1 - \dot{y}_0)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \\ b_{min}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (\dot{y}_1 - \dot{y}_0)(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

2.4.5 Princip algoritmu Hybrid control

Tento algoritmus popsaný skupinou Ahmadiana [38] je kombinací Skyhook a Groundhook algoritmu, kde každému z algoritmů je možné přiřadit rozdílnou váhu. Pravidlo pro určení síly je následující:

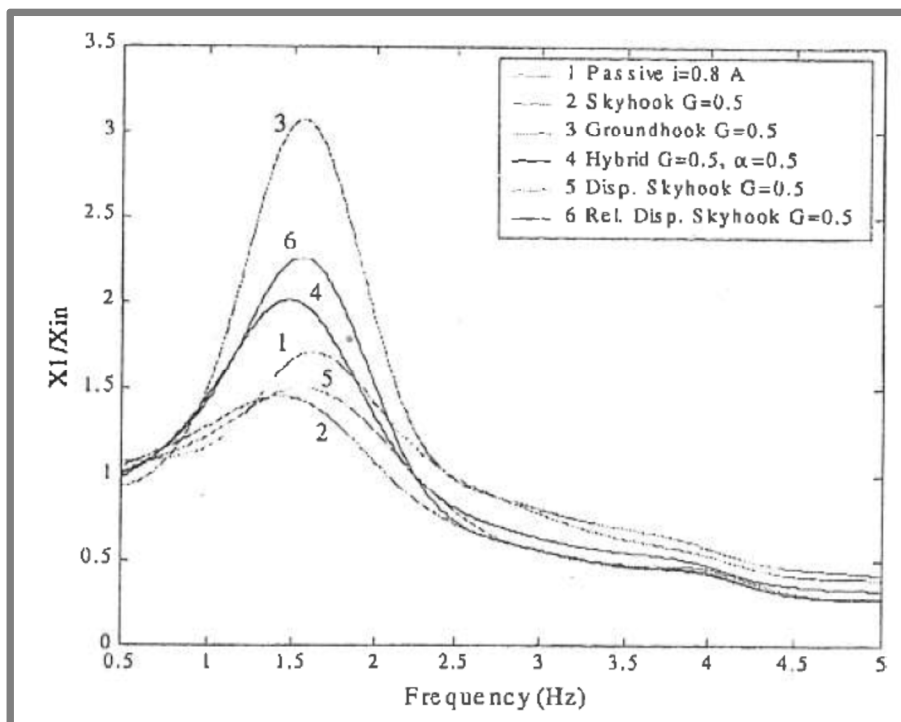
$$F_d = G[\alpha\sigma_{sky} + (1 - \alpha)\sigma_{gnd}]$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \leq 0, & \quad \sigma_{sky} = \dot{y}_2 \\ \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) > 0, & \quad \sigma_{sky} = 0 \\ \dot{y}_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \leq 0, & \quad \sigma_{gnd} = \dot{y}_1 \\ \dot{y}_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) > 0, & \quad \sigma_{gnd} = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

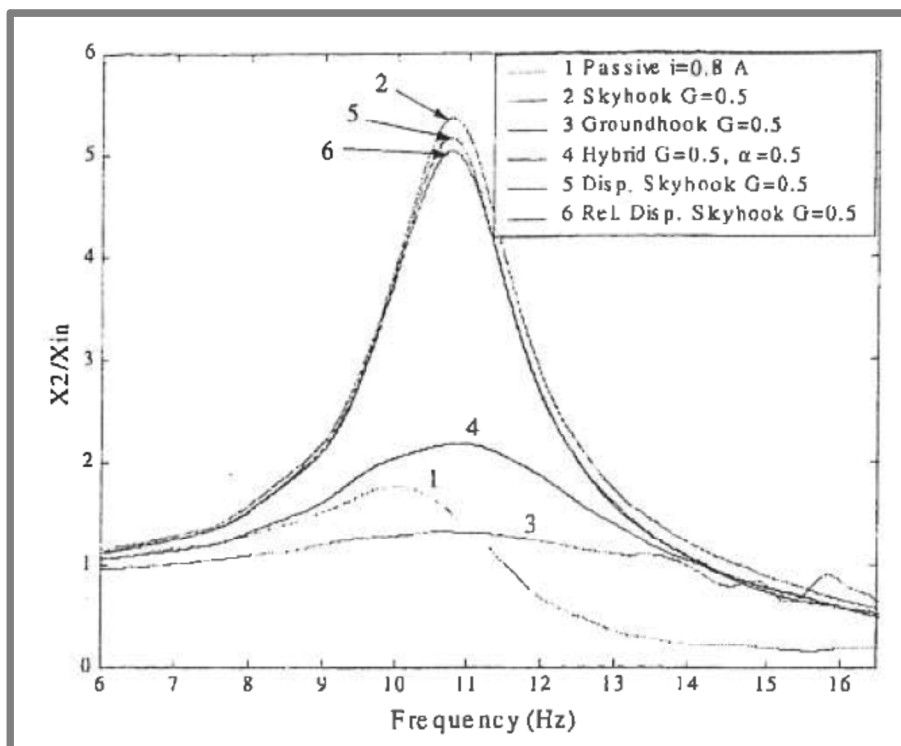
2.4.6 Porovnání kvality odpružení jednotlivých algoritmů:

Porovnáváním efektivity jednotlivých algoritmů na závěsu se dvěma stupni volnosti s vlastními frekvencemi 1.5 a 10.5 Hz se zabýval tým Ahmadiana [38].

Porovnání kvality odpružení je na obrázcích 2.23 a 2.24. Z obrázků je patrné, že nejlepšího odpružení odpružené hmoty je dosaženo s algoritmem Skyhook, nejhoršího s algoritmem Groundhook. Pro odpružení neodpružené hmoty je nejlepší algoritmus Groundhook, nejhorší je Skyhook. Hybrid control byl nastaven na váhu 0,5, tzn. přikládá stejnou váhu Skyhook i Groundhook algoritmu.

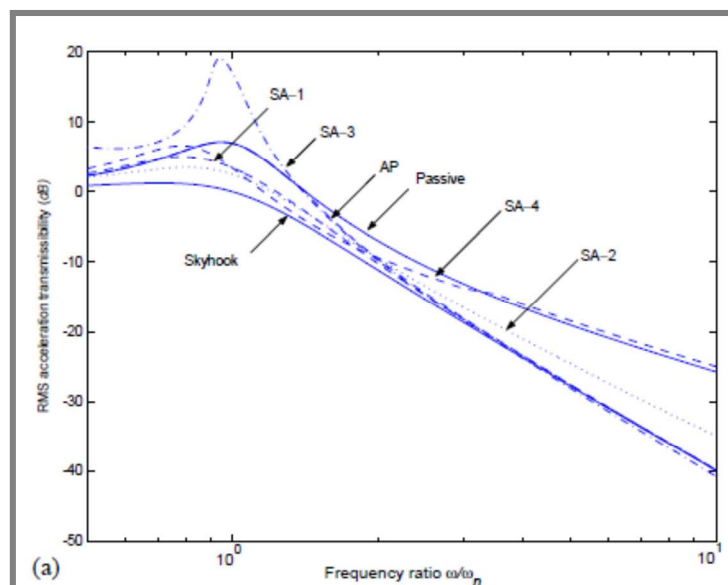


Obr. 2.23: Frekvenční přenos odpružené hmoty



Obr. 2.24: Frekvenční přenos neodpružené hmoty

Na obr. 2.25 jsou porovnány výsledky simulace semiaktivních algoritmů provedených týmem Liu [37]. Simulace byly provedeny na systému s jedním stupněm volnosti. Schopnost maximální izolace odpružené hmoty od vibrací má opět algoritmus Continuous Skyhook. Algoritmus Balance control není vhodný na potlačení vibrací na rezonanční frekvenci kmitavého systému.



Obr. 2.25: Porovnání přenosů pro různé algoritmy řízení. SA-1 – Continuous skyhook, SA-2 on-off skyhook SA3-continuous balance control, SA-4 on-off balance control, AP - adaptivní pasivní

V literatuře je popsáno mnoho variací na semiaktivní algoritmy řízení tlumiče. Nejlepších výsledků z hlediska izolace odpružené hmoty od vibrací dosahuje algoritmus Continuous Skyhook. Simulace algoritmu Groundhook ukazují velký potenciál pro zlepšení přitlaku kola na vozovku. Experimentálně byla efektivita algoritmu Groundhook MR tlumičem testována pouze v laboratorních podmínkách na systému se dvěma stupni volnosti týmem Ahmadiana [38]. Při tomto experimentu byl ale jako vstupní signál použit sweep signál a jako měřítko kvality sloužila amplitudově-frekvenční charakteristika, která přesně neodráží přitlak kola na vozovku, ale sleduje pouze amplitudu v závislosti na frekvenci. Simulace semiaktivních algoritmů aplikované na virtuální model odpružení zadního kola motocyklu, provedené týmem Poussot-Vassala [35], potvrzují výsledky experimentu Ahmadiana. V těchto simulacích byl ale zanedbán vliv časové odezvy MR tlumiče na řídicí signál. Zanedbání časové odezvy MR tlumiče může vést až k disfunkci semiaktivních algoritmů v systémech s reálnými MR tlumiči.

3 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

První semiaktivní způsoby řízení tlumiče byly v teoretické rovině navrženy již v 70. letech. Z analýzy výsledků simulací vyplývá možnost dosažení podstatně lepší efektivity odpružení oproti pasivnímu způsobu nastavení. Algoritmy nebyly navrženy na konkrétní typ tlumiče, tlumič je brán pouze jako generátor síly. Reálné tlumiče ale mají omezené možnosti generování potřebné síly, čímž mohou výrazně snížit dosažitelnou kvalitu odpružení semiaktivně řízených závěsů.

V současnosti se u sériově vyráběných vozů s MR tlumiči používá pouze adaptivní způsob odpružení – dosud používané závěsy s MR tlumiči nefungují v plně semiaktivním režimu. Důvodem jsou vlastnosti MR tlumiče, které jejich použití v semiaktivních závěsech omezují či znemožňují. Mezi tyto omezující vlastnosti patří zejména dlouhá odezva MR tlumiče na řídicí signál a omezený rozsah tlumiče.

Pro návrh kvalitnějších systémů odpružení s MR tlumiči je nejprve nutné tyto omezující parametry popsat a zjistit jejich příčiny. Pokud jsou známy příčiny vzniku omezujících parametrů, vliv některých z nich je možné potlačit. Znalost omezujících parametrů je také nutná k posouzení vlivu na efektivitu semiaktivních algoritmů. V dosavadním výzkumu nebyla problematika vlivu časové odezvy MR tlumiče na efektivitu semiaktivních algoritmů zkoumána.

Časová odezva MR tlumiče může být velmi výrazně ovlivněna způsobem řízení MR tlumiče. Ačkoliv možné metody zrychlení odezvy MR tlumiče pomocí vhodného návrhu regulátoru byly popsány, v praxi byly využity pouze u velkých MR tlumičů určených pro tlumení vibrační budov. Parametry těchto tlumičů jsou řádově jiné než MR tlumiče určené do automobilů a není tak možné posoudit, do jaké míry může vhodný způsob řízení parametry automobilových tlumičů urychlit.

Současný stav poznání není dostatečný k optimálnímu návrhu a využití plného potenciálu MR tlumičů v oblasti semiaktivního odpružení.

4 VYMEZENÍ CÍLŮ

Disertační práce se věnuje optimalizaci řídicího algoritmu MR tlumiče. Hlavním cílem je zjištění omezujících parametrů MR tlumiče a vlivu těchto parametrů na kvalitu různých algoritmů semiaktivního odpružení. Kvalita odpružení pomocí jednotlivých algoritmů bude vyhodnocována z dat fyzikálního modelu závěsu kola jedoucího po simulátoru vozovky. Byly definovány následující cíle:

- **Analýza limitujících prvků MR tlumiče**
- **Návrh optimálního regulátoru proudu pro MR tlumič**
- **Realizace fyzikálního modelu závěsu kola pro účely testování semiaktivních algoritmů**
- **Sestavení virtuálního modelu automobilu pro účely posuzování efektivity semiaktivních algoritmů**
- **Experimentální ověření efektivity semiaktivních algoritmů na fyzikálním modelu závěsu kola**

5 METODICKÝ PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ

V rámci řešení cílů práce bylo provedeno několik experimentů. Následující kapitola popisuje postup návrhu modelů a elektrických zapojení, uspořádání měřicích standů pro jednotlivé experimenty a způsob získání výsledků z naměřených dat. Diskuze výsledků a závěry z měření jsou v kapitole 6.

5.1 Postup určení limitujících parametrů MR tlumiče

Pro návrh optimálního regulátoru a pro vytvoření virtuálního modelu MR tlumiče je třeba znát jeho základní charakteristiky, které určují pracovní oblast tlumiče. Experimenty by také měly potvrdit příčiny omezujících vlastností a možnosti konstrukčních změn, které tyto omezující parametry eliminují.

5.1.1 Zjištění elektrických parametrů MR tlumiče

Pro optimální nastavení pracovního bodu PWM regulátoru bylo třeba změřit indukčnost a odpor cívky MR tlumiče.

Odpor cívky tlumiče byl změřen z Ohmova zákona. K cívce byl připojen zdroj konstantního napětí a pomocí bočníku sériově zapojeného do obvodu (obr. 261) se měřil proud. Podílem napětí a proudu byl získán odpor cívky. Odpor cívky se mění v závislosti na teplotě, čehož bylo využito pro měření teploty v MR tlumiči.

Indukčnost reálné cívky není konstantní, je závislá na velikosti proudu a frekvenci. Proto musí být zvolena správná měřicí metoda. V případě řízení MR tlumiče se předpokládá řízení ve spínaném režimu, proto byla indukčnost cívky získána z odezvy proudu cívkou na skok napětí. Na základě změřených průběhů napětí a proudu je možné vyjádřit indukčnost cívky z rovnice (5.6). Cívka spolu s odporem je z dynamického pohledu setrvačný článek. Takový systém je charakterizován přenosovou funkcí prvního řádu (5.1):

$$F(p) = \frac{\mathfrak{I}\{i(t)\}(p)}{\mathfrak{I}\{u(t)\}(p)} = \frac{R_L}{\frac{L}{R_L}p + 1} \quad (5.1)$$

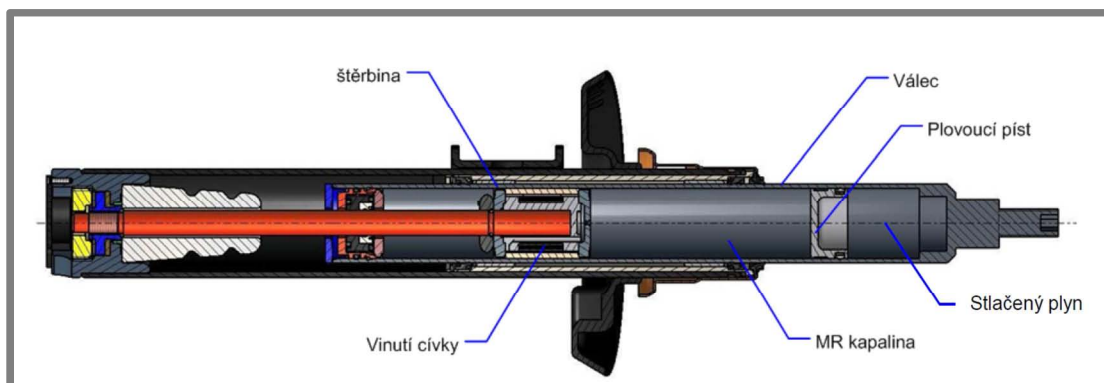
Kde $\mathfrak{I}\{i(t)\}(p)$ je Laplaceova transformace výstupu (proudu) a $\mathfrak{I}\{u(t)\}(p)$ je Laplaceova transformace výstupu (napětí). Parametr p je komplexní číslo. Se znalostí přenosové funkce je možno na základě vstupu (průběh napětí) zjistit výstup (proud cívkou). Výsledky měření jsou uvedeny v kapitole 6.1.1.

5.1.2 Měření dynamických charakteristik MR tlumiče

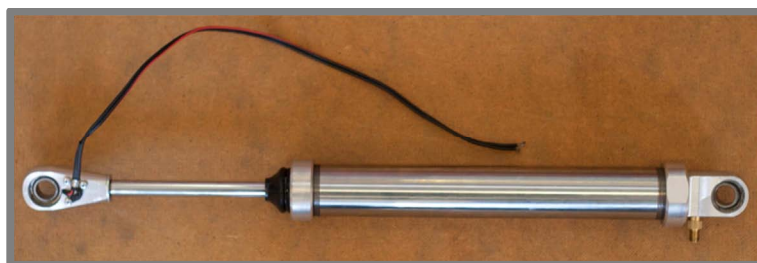
Hlavním důvodem měření bylo zjištění časové odezvy síly MR tlumiče na řídicí napětí, aby bylo možné vytvořit odpovídající model semiaktivního řízení a ověřit vliv časové odezvy MR tlumiče na efektivitu semiaktivních algoritmů. Analýza měřených dat by dále měla zjistit příčiny časové odezvy a možnosti redukce.

Měření probíhala na tlumiči s konstrukcí vycházející z MR tlumiče od firmy Delphi (obr.5.1). Originální tlumič byl konstrukčně upraven tak, aby bylo možné jednoduše

měnit MR kapalinu a tlak vzduchu v prostoru nad plovoucím pístem (obr. 5.2). Pístní skupina zůstala beze změny.



Obr. 5.1: Originální MR tlumič Delphi

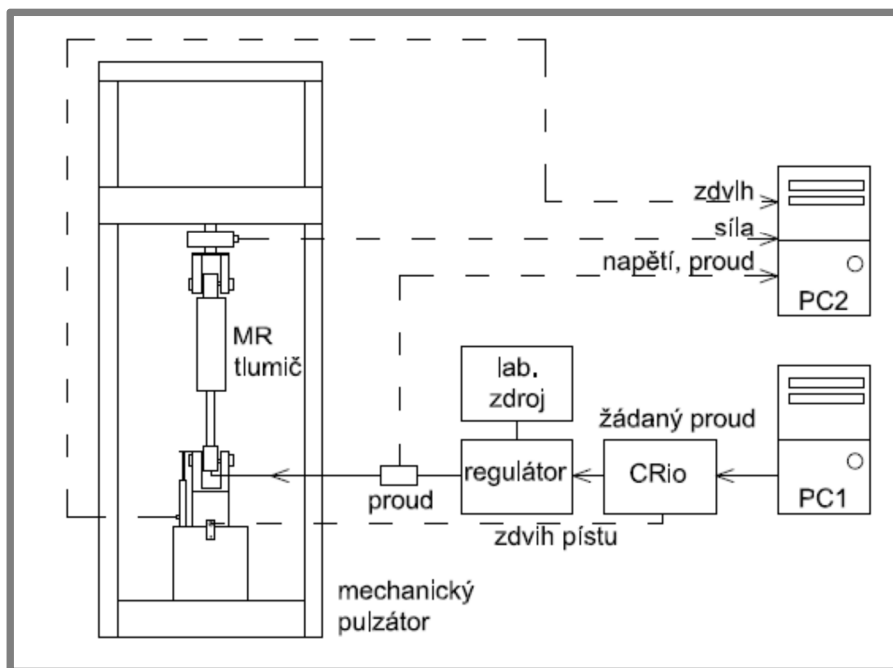


Obr. 5.2: Upravený MR tlumič Delphi

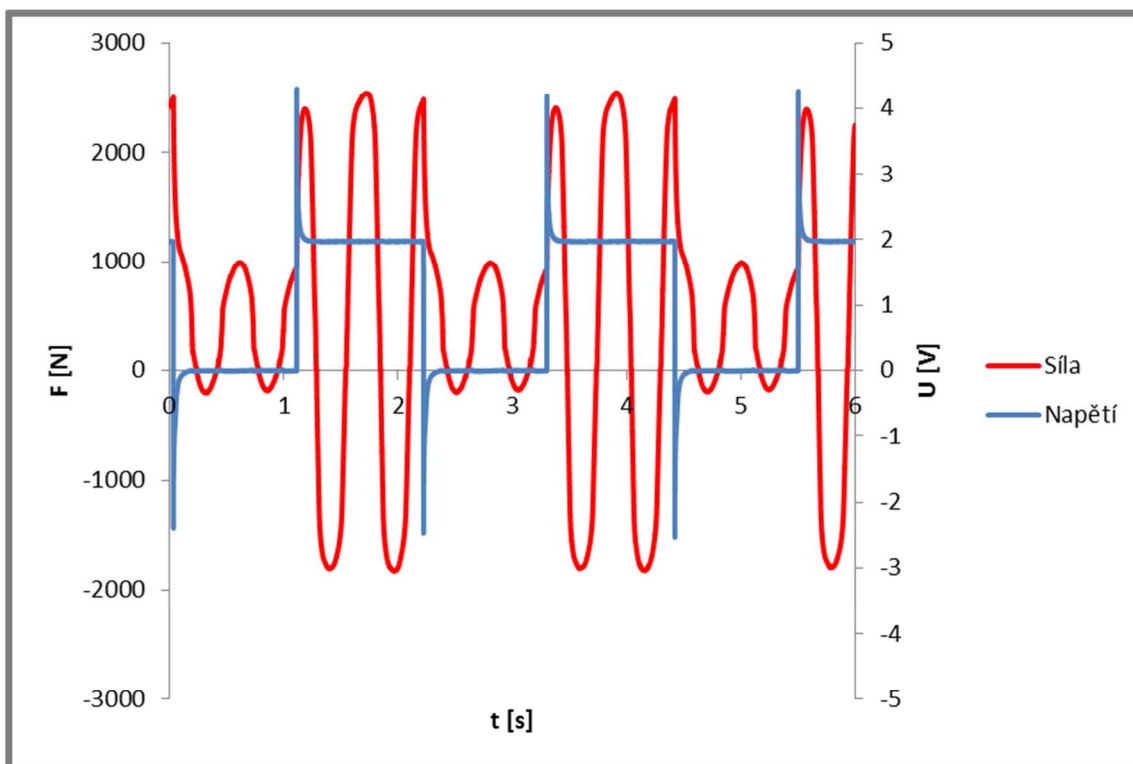
Časová odezva MR tlumiče byla určena ze změřených F-v charakteristik tlumiče bez proudu, s požadovaným maximálním ustáleným proudem a F-v charakteristikou v době sepnutí požadovaného proudu. Blokové schéma měřicího řetězce je na obr. 5.3.

F-v charakteristiky tlumiče byly měřeny v mechanickém pulzátoru. Všechny F-v charakteristiky byly získány z harmonického průběhu rychlosti. Rychlost pístu byla vypočítána derivací polohy z LVDT snímače, síla byla měřena snímačem síly HBM, proud byl měřen bočnickem s odporem 0.1Ω sériově zapojeným s cívkou MR tlumiče. Všechny signály byly zpracovány měřicí stanicí Dewetron DEWE-800.

Program v Labview cyklicky spínal napětí resp. proud do cívky MR tlumiče každou druhou periodu zdvihu tlumiče (obr. 5.4). Tento způsob zajistil, že F-v charakteristiky s požadovanými proudy jsou porovnávány s F-v charakteristikou s nulovým proudem za téměř stejných podmínek (teplota oleje, stav olej, tření ucpávek, tlak nad plovoucím pístkem). Předpokládá se, že energie 4 zdvihů (jedna spínací perioda) nemůže významně změnit teplotu a stav MR kapaliny.



Obr. 5.3: Měřicí aparatura pro měření odezvy MR tlumiče

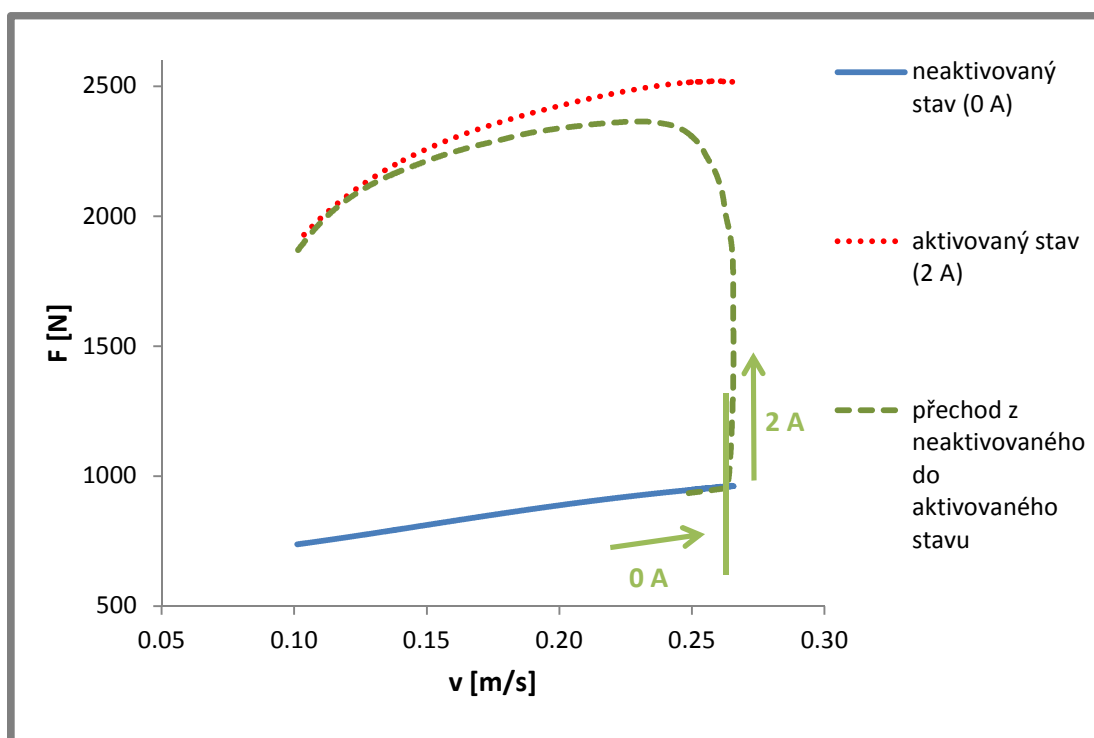


Obr. 5.4: Průběh elektrického napětí na cívce a odpovídající síla MR tlumiče

Samotné vyhodnocení se provádí pomocí skriptu v softwaru Matlab. V prvním kroku se ze změřených časových průběhů získají body do F-v charakteristiky pro aktivovaný a neaktivovaný stav. Těmito body se proloží polynom 4. řádu (obr. 5.5 – modrá a červená křivka). Následně je vyhodnocen nárůst síly při přechodu tlumiče z neaktivovaného do aktivovaného stavu (Obr 5.5 – zelená křivka). Z křivky je patrné, že napětí resp. proud do cívky MR tlumiče je spínán v oblasti maximální

pístové rychlosti. Z obrázku dále plyne, že před sepnutím proudu do cívky odpovídá síla v závislosti na rychlosti síle v neaktivovaném stavu. Po odeznění přechodného děje spojeného se sepnutím proudu do cívky se síla dostane v závislosti na pístové rychlosti na úroveň odpovídající aktivovanému stavu.

Pokud jsou známy F-v charakteristiky pro ustálený neaktivovaný stav, F-v charakteristiky pro ustálený aktivovaný stav, v každém okamžiku v závislosti na rychlosti je známo, jakou sílu by měl tlumič vyvozovat (před okamžikem sepnutí proudu sílu odpovídající neaktivovanému stavu, po okamžiku sepnutí sílu odpovídající aktivovanému stavu) a zároveň měříme sílu, kterou skutečně vyvozuje. Z těchto závislostí je pak možné vyjádřit procentuální závislost nárůstu síly na čase (obr. 5.6).

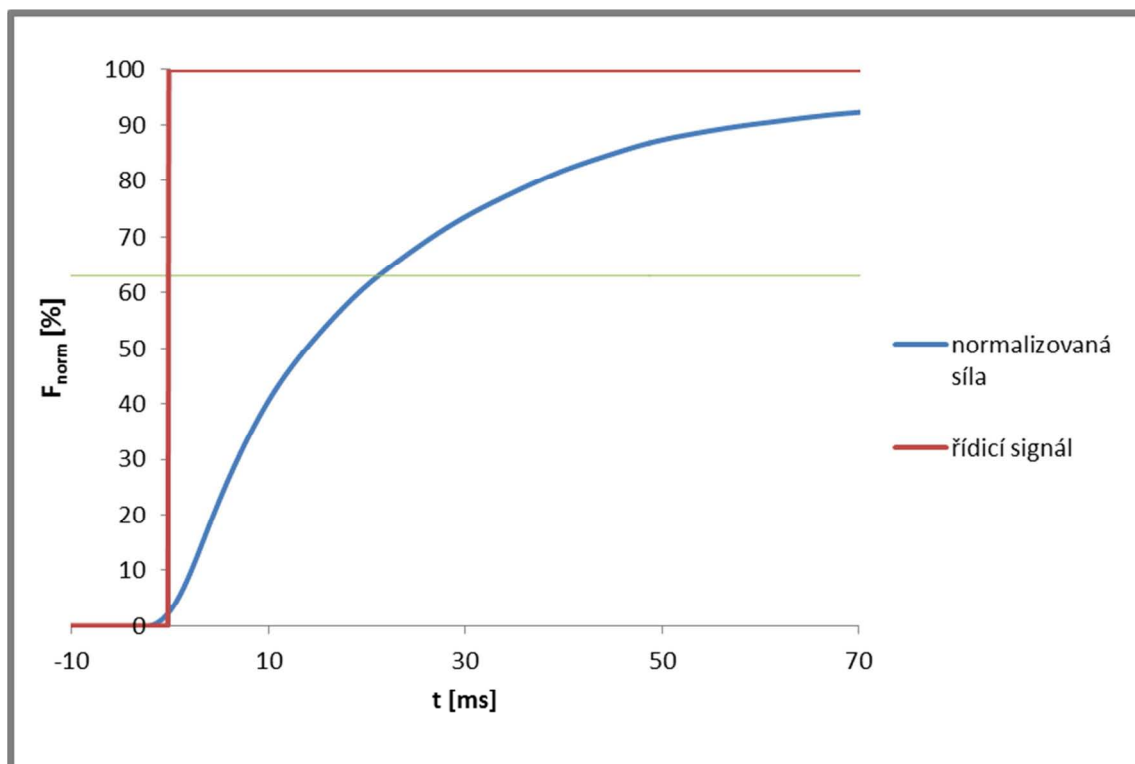


Obr. 5.5: Síla vyvozená MR tlumičem v aktivovaném stavu, neaktivovaném stavu a v průběhu přechodu z neaktivovaného do aktivovaného stavu

Časové konstanty tlumiče byly měřeny pro 4 různé pístové rychlosti (0.1 – 0.4 m/s) a dvě různé MR kapaliny: MR140 (40 objemových procent Fe) a MR110 (namíchaná kapalina z MR140, 10 objemových procent Fe, ředěno olejem J-3). Signály byly vzorkovány frekvencí 10 kHz. Řídicí napětí pro ovládání MR tlumiče bylo generováno programem v Labview spolu se stanicí CompactRio.

Ovládací napětí bylo dále přivedeno do výkonového PWM regulátoru vlastní konstrukce (viz kapitola 6.2), který převádí vstupní řídicí napětí na proud protékající cívku MR tlumiče. PWM regulátor byl napájen z laboratorního zdroje napětí.

Časové konstanty byly měřeny ve dvou různých režimech nastavení kontroléru. V prvním režimu byl tlumič řízen konstantním napětím, ve druhém režimu (proudovém) byl MR tlumič řízen PWM modulovaným signálem se vstupním napětím 30 V.



Obr. 5.6: Časová odezva síly MR tlumiče na jednotkový skok řídicího napětí

Dynamické chování tlumiče bylo modelováno setrvačným článkem prvního řádu. Pro takové systémy se za časovou konstantu považuje čas, který je nutný k dosažení 63,2 % z konečné ustálené hodnoty síly, pokud vstupním signálem (řídicí napětí) je skok napětí. Změřené časové konstanty MR tlumiče v závislosti na pístové rychlosti, velikosti a průběhu proudu se nacházejí v kapitole 6.1.

5.1.3 Zjištění vlivu vířivých proudů v jádře MR tlumiče na časovou odezvu magnetické indukce ve štěrbině

Ověření vzniku vířivých proudů vychází z Ampérova zákona. Pokud bychom totiž uvažovali cívku bez jádra (resp. elektricky nevodivé jádro s relativní permeabilitou $\mu_r=1$), průběh magnetické indukce v magnetickém obvodu by byl shodný s průběhem elektrického proudu cívkou podle rovnice:

$$\oint_c H \cdot dl = I_{vol}, \quad B = H \cdot \mu_0 \quad (5.2)$$

kde H je intenzita magnetického pole, l je délka uzavřené křivky c , I_{vol} je proud tekoucí cívkou a μ_0 je relativní permeabilita vakua

Vzhledem k tomu, že průběh magnetické indukce v obvodu MR tlumiče přesně nesleduje průběh el. proudu cívkou, dá se čekat, že v magnetickém obvodu dochází ke ztrátám (způsobeným hysterezí B-H křivky a vířivými proudy). Pokud je jádro cívky zhotoveno z elektricky vodivého materiálu a pokud se velikost magnetické indukce mění, lze vyjádřit velikost elektrického pole E z Faradayova zákona [39]:

Měřicí aparatura je na obr. 5.7. Aparatura se skládá z analyzátoru DEWE-50, kterým byly do softwaru Dewesoft 7.04 měřeny se vzorkovací frekvencí 20 kHz následující veličiny:

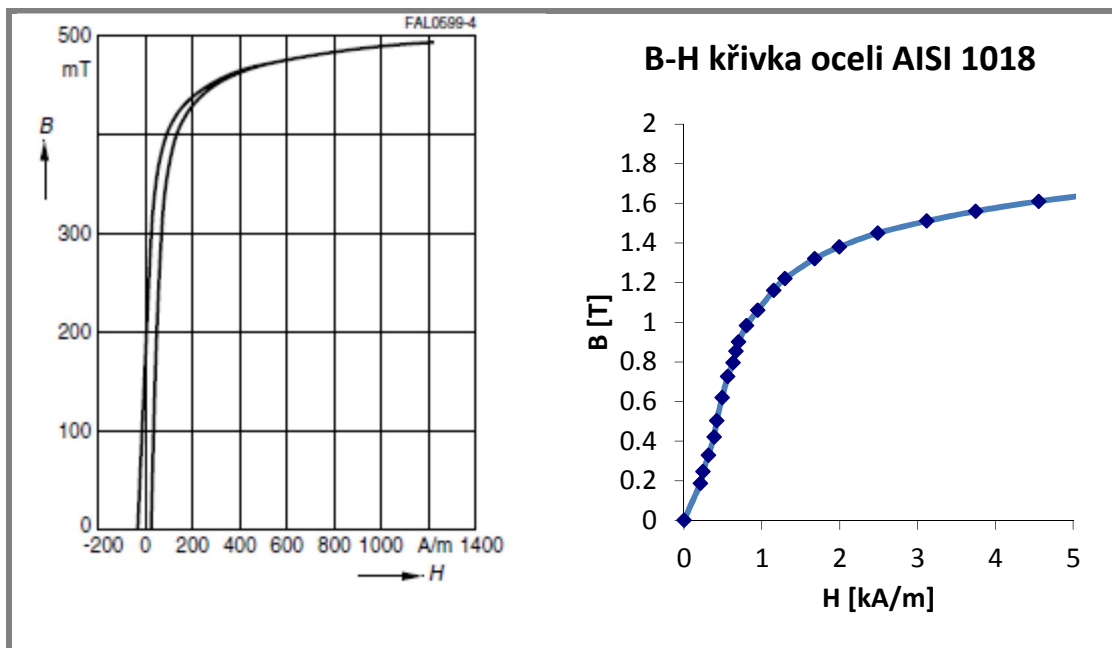
Tab. 5.1: měření odezvy magnetické indukce na elektrický proud - měřené veličiny

Kanál 0	El. proud - proudové kleště
Kanál 1	El. napětí na cívce
Kanál 4	Magnetická indukce - teslametr
Kanál 6	Ovládací napětí

Magnetická indukce byla měřena teslametrem F.W. Bell 5180, který disponuje analogovým výstupem s frekvenčním rozsahem 25 kHz, což je na daný účel dostačující. Měření proudu pomocí bočníku je vlivem skin efektu pro vysoké frekvence nepřesné, proto byl proud procházející obvodem měřen proudovými kleštěmi Fluke i30. Řídicí obdélníkový signál do regulátoru s periodou 400 ms byl generován Real-time počítačem Compact-Rio, ovládací SW byl napsán v SW LabView.

V prvním kroku bylo provedeno měření magnetické indukce ve štěrbině MR tlumiče bez MR kapaliny v závislosti na proudu do cívky MR tlumiče. Měření magnetické indukce ve štěrbině s MR kapalinou není možné, protože relativní permeabilita sondy $\mu_r = 1$. Pokud by tedy štěrbinu byla vyplněna MR kapalinou s $\mu_r > 1$ a část objemu štěrbinu by zabírala sonda, bylo by magnetické pole ve štěrbině nehomogenní a sonda by změřila menší magnetickou indukci než je ve skutečnosti v MR kapalině. Zjištění magnetické indukce ve štěrbině s MR kapalinou je možné za pomoci odladěného FEM modelu.

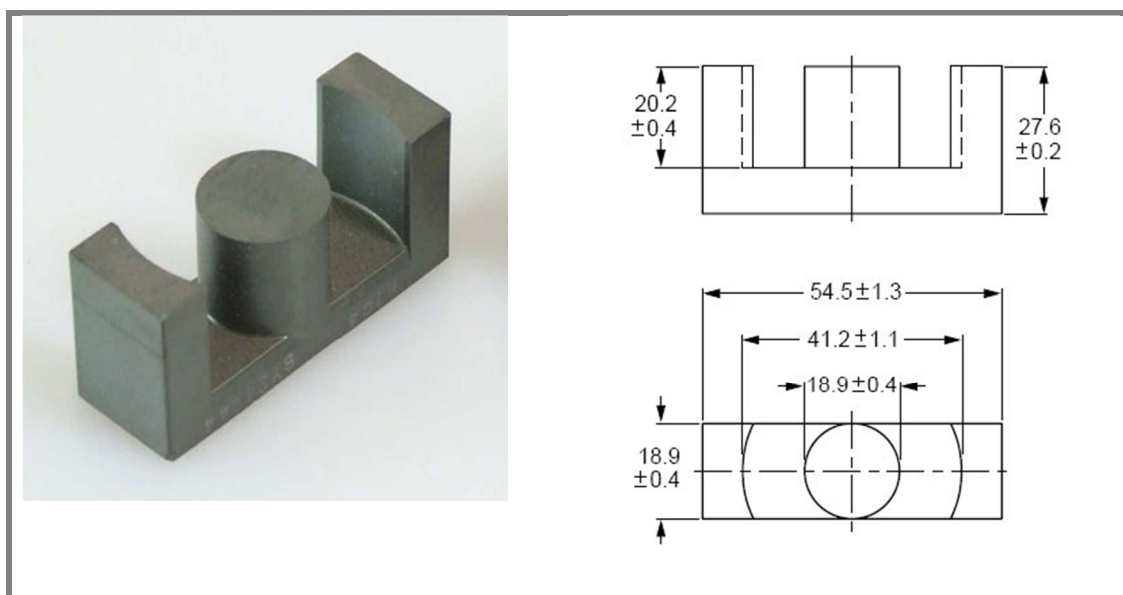
Aby bylo možné ověřit vliv vířivých proudů na vznik magnetické indukce v magnetickém obvodu, byl vytvořen simulátor magnetického obvodu z feritového materiálu N87 firmy TDK EPCOS. Tento feritový materiál se vyznačuje tím, že jeho elektrická vodivost je velmi nízká (100 MS/m^{-1}), ale relativní permeabilita oproti vzduchu stále velmi vysoká (2200). Vířivé proudy by tedy v obvodu měly být potlačeny a magnetická indukce ve štěrbině by měla přesně sledovat elektrický proud cívkou. Nevýhodou feritových materiálů oproti konstrukční oceli je nižší mez nasycení materiálu (obr. 5.8) a špatné mechanické vlastnosti.



Obr. 5.8: B-H křivka pro materiál N87 (vlevo) a oceli AISI 1018 (vpravo)

Mechanické vlastnosti tohoto materiálu umožňují obrábění pouze broušením. Kvůli vysokým nákladům na výrobu jádra na míru bylo na experiment použito sériově vyráběné jádro ETD 54/28/19 (obr. 5.9).

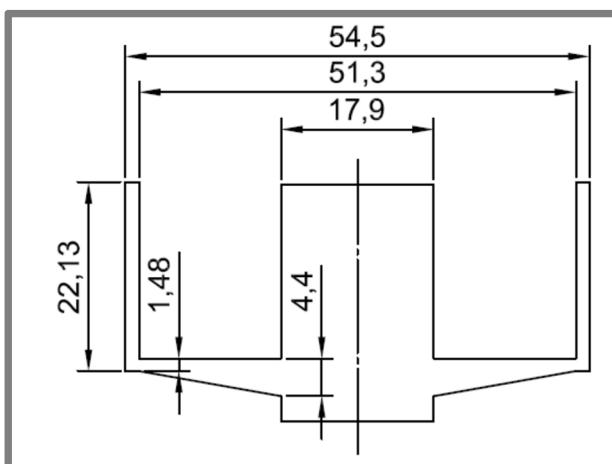
Jádro bylo vybráno tak, aby výsledná indukčnost cívky byla stejná nebo vyšší než cívka MR tlumiče s MR kapalinou. Tento požadavek byl stanoven s ohledem na ověření možnosti dostatečně rychlé odezvy PWM regulátoru. Cívka byla navinuta z měděného lakovaného drátu 0.8 mm. Počet závitů byl zvolen 300.



Obr. 5.9: Jádro ETD54/28/19

Na základě skutečných rozměrů jádra byl vytvořen magnetický model obvodu.

SW FEMM ale umí řešit pouze symetrické úlohy, proto byl tvar skutečného (nesymetrického) jádra přepočítán na symetrické tak, že průřezy (na kterých závisí magnetická indukce) jsou pro oba případy stejné (obr. 5.10).



Obr. 5.10: Ekvivalentní symetrické jádro pro účely FEM modelu

Z výsledků simulace vyplývá, že výsledná indukčnost cívky je 27.3 mH. Výsledky simulací a experimentu jsou uvedeny v kapitole 6.1.3.

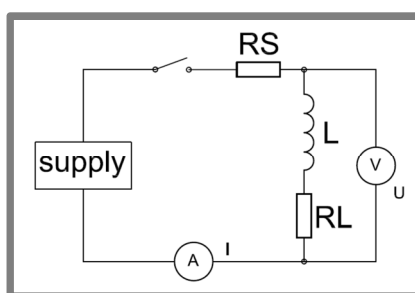
5.2 Návrh optimálního regulátoru proudu pro MR tlumič

5.2

Aby mohl být MR tlumič použit v závěsu se semiaktivním řízením charakteristiky, je třeba, aby charakteristika tlumiče mohla být měněna dostatečně rychle (přibližně 10x rychleji, než jsou nejvyšší regulované frekvence). V současnosti použité regulátory toho nejsou schopny dosáhnout.

MR tlumič je z elektrického pohledu cívka o indukčnosti L sériově zapojena s rezistorem o odporu R_L (obr. 5.11). Po připojení zdroje konstantního napětí se dá proud i vyjádřit rovnicí:

$$i = \frac{1}{L} \int u(t) dt, \quad u(t) = i \cdot R_L \Rightarrow i = \frac{U}{R_L} (1 - e^{-\frac{R_L t}{L}}) \quad (5.6)$$



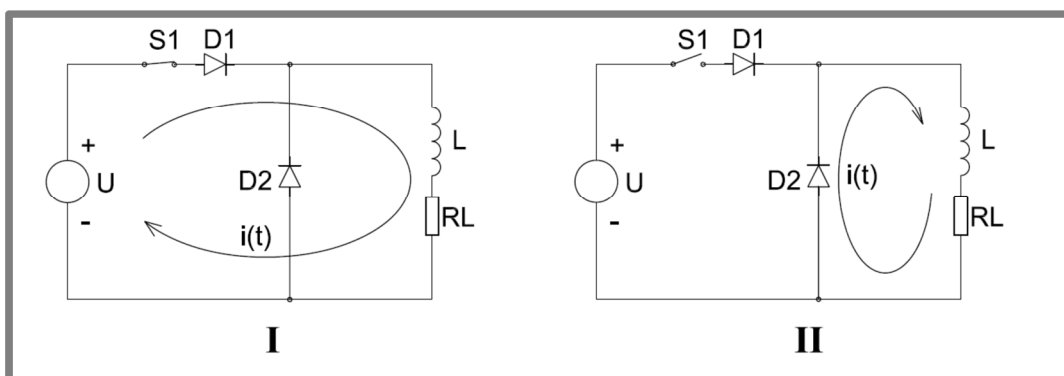
Obr. 5.11: Elektrické schéma obvodu MR tlumiče

Z této rovnice je patrné, že po připojení napětí na cívku tlumiče trvá nenulový čas $T = R_L/L$ než obvodem začne protékat 63.2 % požadovaného proudu. Proud cívkou způsobí zřetězení železných částic v MR kapalině a tím i změnu charakteristiky tlumiče. Pokud proud nedosahuje žádané velikosti, ani síla vyvozovaná tlumičem

neodpovídá požadovanému proudu. Pro efektivní semiaktivní řízení (Skyhook, Groundhook) je třeba dobu náběhu proudu minimalizovat.

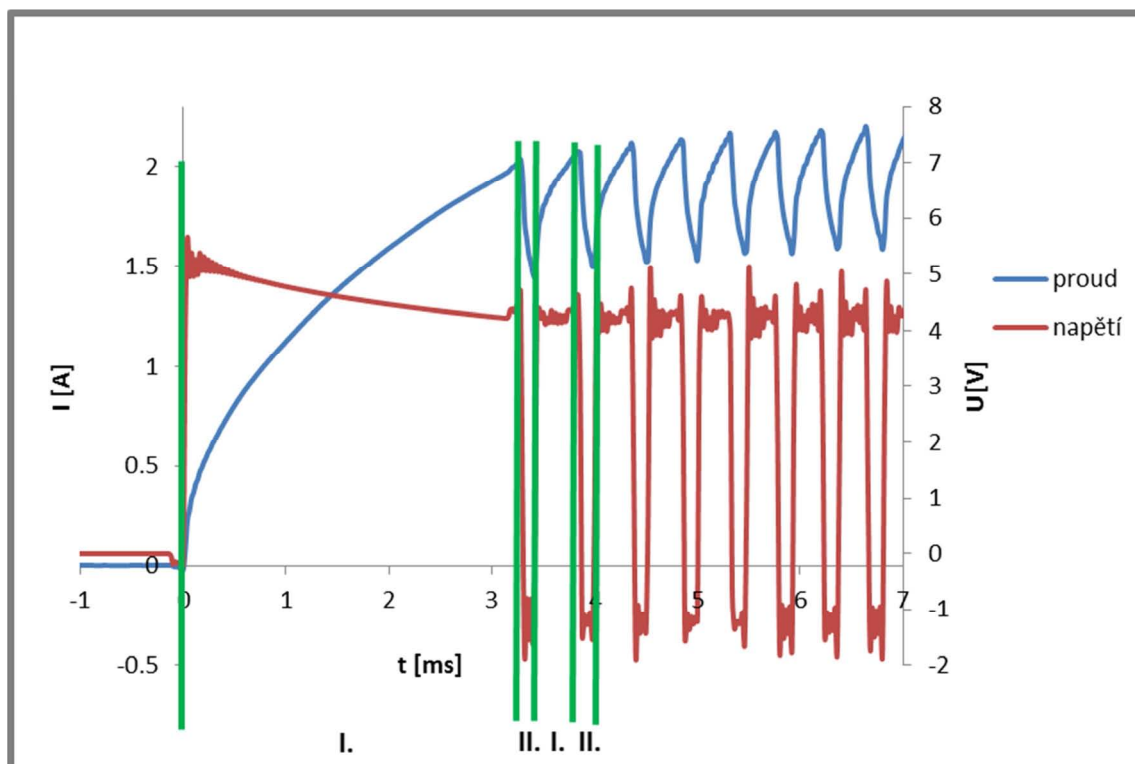
5.2.1 Volba principu regulace

Snížení doby odezvy je možné zvýšením napětí procházejícího cívkou po dobu, než je dosaženo požadovaného proudu. Poté je možné udržovat proud (s určitou mírou rozptylu) na konstantní úrovni. Z důvodů požadavku na vysokou účinnost je vhodné regulátor navrhnout jako spínaný v PWM režimu - step-down měnič. Jako akumulátor energie je využita samotná cívka MR tlumiče. Střídají se dva režimy (obr. 5.12).



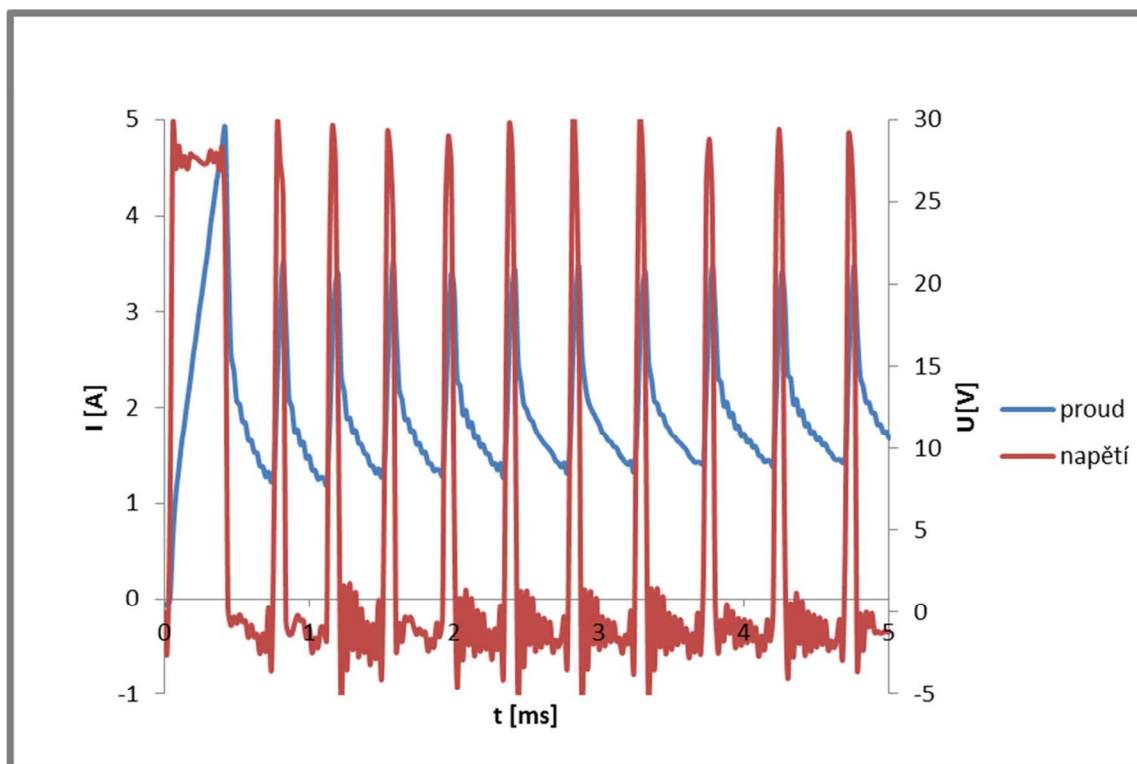
Obr. 5.12: Princip PWM step-down měniče

V režimu **I** je sepnut spínač $S1$, na cívku je připojeno napětí zdroje U . Jakmile se dosáhne požadovaného proudu (plus hystereze), spínač $S1$ se rozezne a zdrojem proudu se stává cívka L (režim **II**). Energie magnetického pole cívky je přeměněna na teplo v rezistoru RL a diodě $D2$. Odpovídající průběhy napětí a proudů jsou zaznamenány na obrázku 5.13.



Obr. 5.13: průběh napětí a proudu v PWM režimu s nízkým napětím (6 V)

Odezvu náběhu proudu je možno zkracovat zvyšováním napětí U zdroje (obr. 5.14). Na tomto principu byla navržena první verze PWM regulátoru. Tento regulátor byl použit pro měření odezvy MR tlumiče a pro regulaci proudu do tlumiče při testech semiaktivních algoritmů. Toto řešení má ale několik nevýhod. Pokud by mělo být dosaženo malého rozptylu proudu, musí se zvýšit spínací frekvence. Tím se ale zvýší i celkové ztráty v obvodu. Pokud frekvence bude nižší, zvětší se rozptyl proudu. Zvýšení napětí U také nesnižuje odezvu na požadavek snížení proudu. Doba odezvy při požadovaném poklesu proudu je určena napětím na cívce tzn. součtu napětí na rezistoru R_L a diodě D_2 . Energie uložená v magnetickém poli cívky se v těchto součástkách přeměňuje na teplo. Další nevýhodou je potřeba zdroje U s vyšším napětím než je napětí palubní sítě automobilu.



Obr. 5.14: Průběh napětí a proudu s vysokým napětím

Kvůli výše uvedeným nevýhodám byl navržen princip druhého PWM regulátoru, který tyto nevýhody eliminuje.

Na obvod byly kladeny následující požadavky:

- Nízké napájecí napětí výkonové části (počítá se s napájením z akumulátoru)
- Rychlá časová odezva náběhu i poklesu proudu
- Vysoká účinnost
- Řízení výstupního proudu napětím

Navrhovaný regulátor snižuje odezvu tlumiče při zachování vysoké míry efektivity, malém rozptylu proudu a minimalizaci počtu součástek. Předpokládá se, že regulátor je připojen na palubní síť automobilu (10 – 15 V), ale zapojení umožňuje napájení i výrazně menším napětím (4 V).

Principiální schéma funkce je na obrázcích 5.15 a 5.18-5.21. Regulátor se může nacházet v 5 různých stavech.

I:

Počáteční podmínky:

- Kondenzátor je nabit na napětí vyšší než U_c , než je napětí palubní sítě automobilu.
- Je požadavek na zvýšení proudu.

V tomto režimu komparátory vyhodnotí, že se zvýšil požadovaný proud. Dokud skutečný proud nedosáhne požadovaného proudu (plus hystereze), spínače S_2 , S_3 a S_5 jsou sepnuty. Na cívku tlumiče je tedy připojeno vyšší napětí (z kondenzátoru) než je napětí palubní sítě.

II.

Počáteční podmínky:

- Kondenzátor je nabit na napětí vyšší než U_c , které je vyšší než napětí palubní sítě automobilu.
- Bylo dosaženo požadovaného proudu, proud je vyšší pouze o nastavenou hysterezi

Sepnuty jsou spínače $S1$ a $S2$, zdrojem napětí resp. proudu je cívka L MR tlumiče, proud pomalu klesá.

III.

Počáteční podmínky:

- Kondenzátor je nabit na napětí vyšší než U_c , které je vyšší než napětí palubní sítě automobilu.
- Bylo dosaženo požadovaného proudu, požadovaný proud se nezměnil

Sepnut je spínač $S5$, zdrojem napětí resp. proudu je akumulátor automobilu.

IV.

Počáteční podmínky:

- Požadovaný proud se zmenšil, nebo napětí na kondenzátoru pokleslo pod nastavenou mez U_c , nebo nastaly tyto dvě podmínky zároveň.

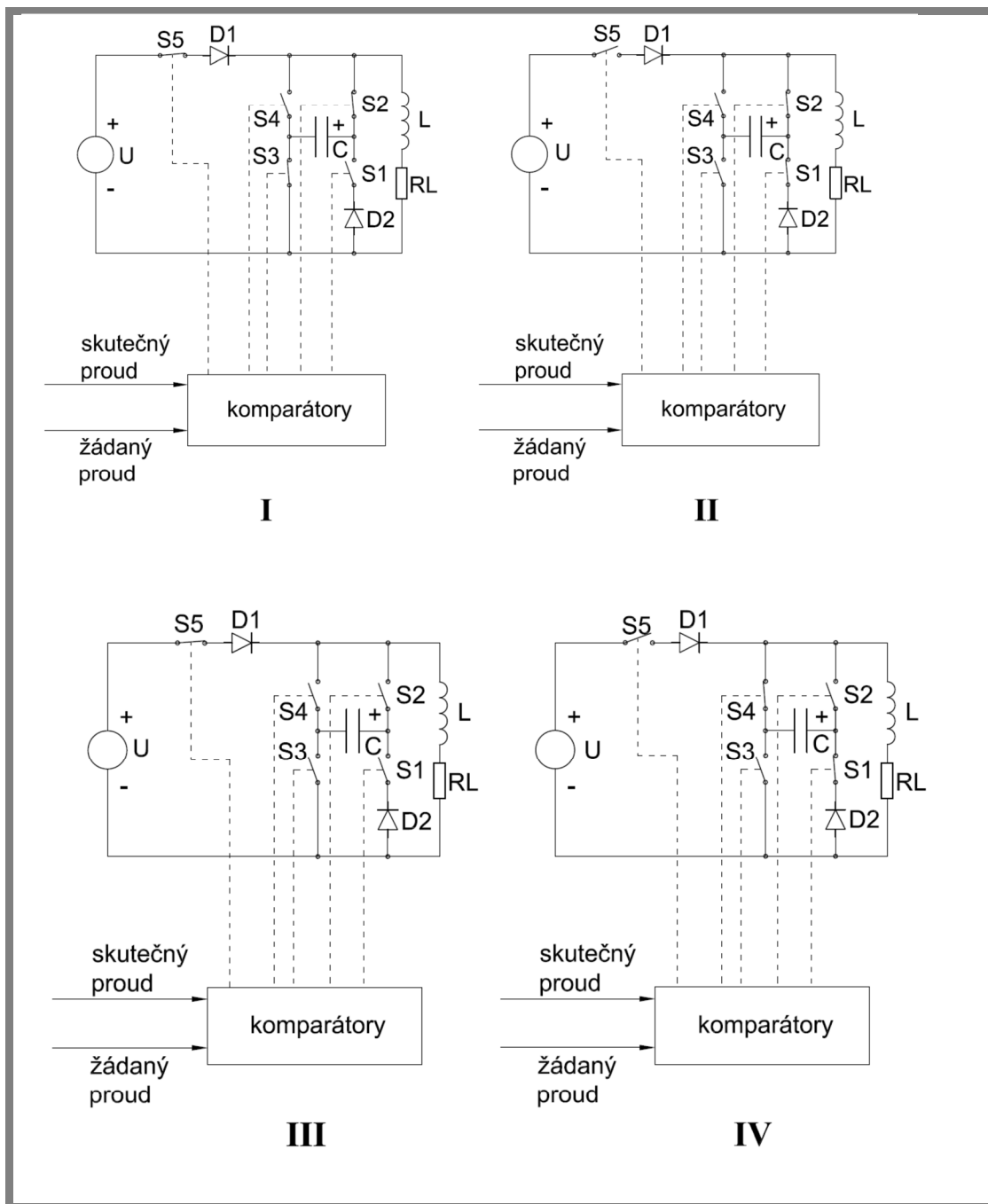
Sepnuty jsou spínače $S1$ a $S4$, zdrojem napětí resp. proudu je cívka MR tlumiče, kondenzátor se nabíjí, proud obvodem rychle klesá.

V.

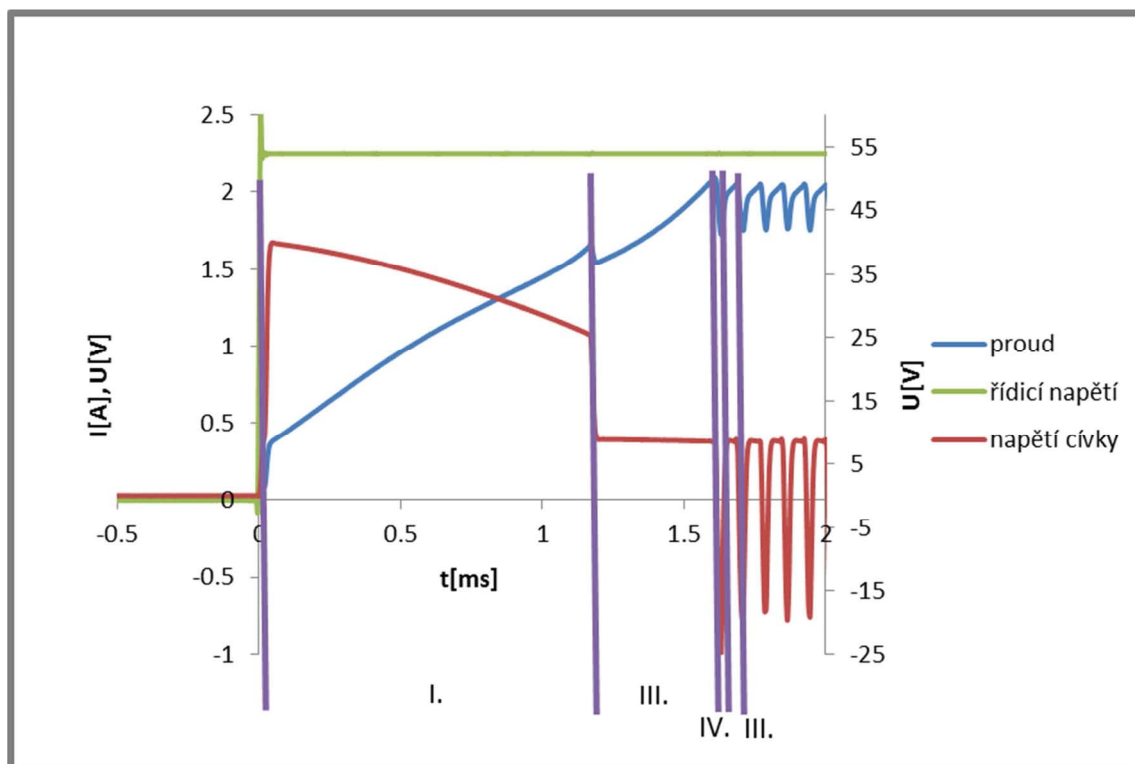
Počáteční podmínky:

- Požadovaný proud je nulový
- Skutečný proud je nulový
- Kondenzátor je nabit na napětí vyšší než U_c .

Všechny spínače jsou rozepnuty, obvodem tlumiče neprotéká žádný proud.

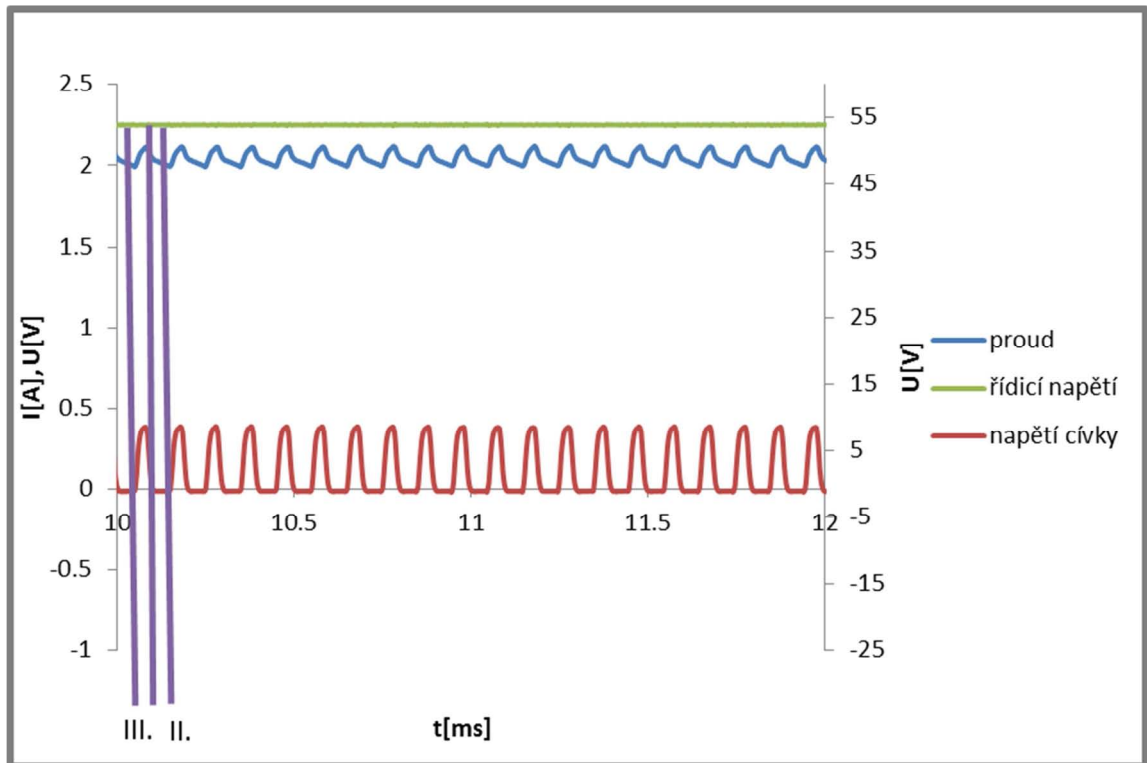


Obr. 5.15: Princip regulátoru v různých režimech



Obr. 5.16: Průběhy napětí a proudu s PWM regulátorem proudu – požadavek na nárůst proudu

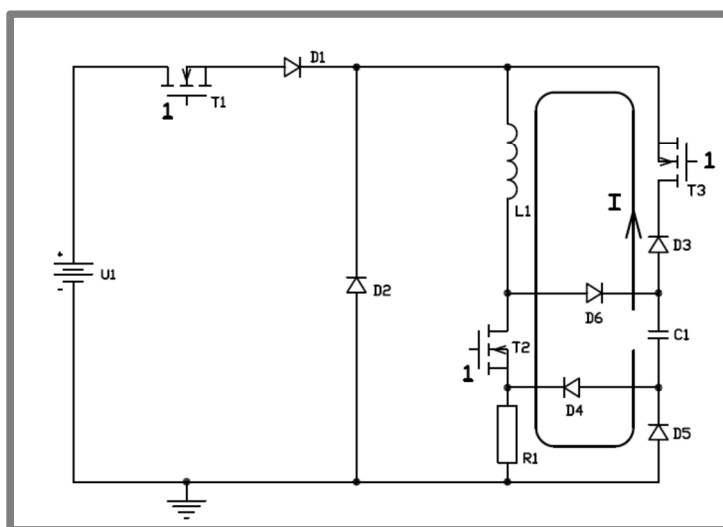
Na obr. 5.16 jsou průběhy napětí a proudu cívkou. Z obrázku je patrné, že v první fázi je cívka připojena na vyšší napětí z kondenzátoru (40V) a kondenzátor se postupně vybíjí. Po dosažení proudu přibližně 1.6 A se připojí napětí z napájecího zdroje (10V) až do dosažení požadovaného proudu (2 A). Poté je požadovaný proud udržován a zároveň je dobíjen kondenzátor (střídá se fáze III a IV). Jakmile napětí na kondenzátoru dosáhne požadované hodnoty, fáze IV je nahrazena fází II, čímž se zmenší spínací frekvence a rozptýl proud (obr. 5.17).



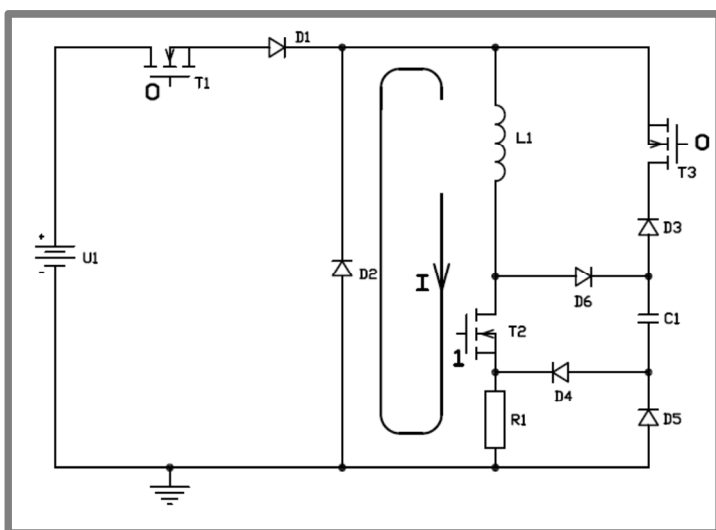
Obr. 5.17: Průběhy napětí a proudu s PWM regulátorem proudu – požadavek na konstantní proud

5.2.2 Obvodové řešení optimálního regulátoru proudu MR tlumiče

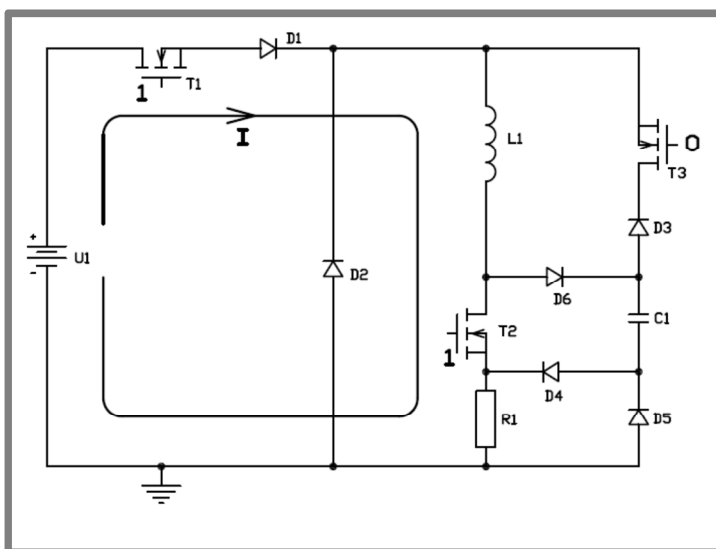
Spínací prvky musí být schopné spínat řádově v desítkách kHz a musí mít co nejmenší odpor v sepnutém stavu. Z toho důvodu byly použity tranzistory MOSFET s co nejmenším odporem R_{ds} v sepnutém stavu (IRF540 s $R_{ds} = 0,044 \Omega$). Elektrické zapojení bylo navrženo a simulováno v programu OrCadPSpice. Simulace ale musely být vzhledem k rychlým změnám proudů (a tím kolapsu simulací) v driverech MOSFET tranzistorů rozděleny na dvě části – koncový výkonový stupeň a logická část pro spínání tranzistorů. Konkrétní obvodová realizace výkonového stupně s naznačeným proudem v jednotlivých režimech je na obrázcích 257 - 260:



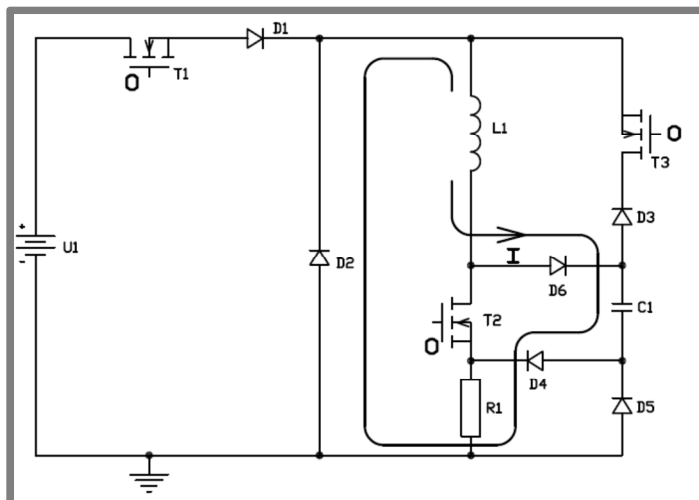
Obr. 5.18: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu I.



Obr. 5.19: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu II.



Obr. 5.20: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu III.



Obr. 5.21: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu IV.

Ovládací logika tranzistorů T2 a T3 je realizována pomocí rychlých CMOS klopných obvodů. Signál výstupní funkce je veden do MOSFET driverů, které zajistí velmi rychlé sepnutí tranzistorů. Na základě pravdivostní tabulky 5.2 byly sestaveny výstupní funkce s využitím minimalizace funkce pomocí Kaurnaughových map (Tab. 5.3, 5.4): Vstup IN je získán z komparátoru s hysterezí, který porovnává žádaný proud se skutečným. Vstup I(inc) je získáván z derivačního zesilovače vstupního ovládacího napětí s následným setrvačným článkem, který zajistí, že po nastavenou dobu po zvýšení ovládacího napětí bude tento signál v log. 1. Ze stejného derivačního zesilovače je získáván signál I(dec). Signál z derivačního článku je veden do setrvačného článku, který zajistí, že po nastavenou dobu po snížení ovládacího napětí bude tento signál v log. 1. Výsledný signál I(dec) je získán jako logický součet výstupu ze setrvačného článku a komparátoru, který se sepne, pokud je napětí na kondenzátoru C1 menší než nastavené.

Tab. 5.2: Pravdivostní tabulka pro ovládání tranzistorů

Pravdivostní tabulka				
IN	I(inc)	I(dec)	T2	T3
1	1	1	1	0
1	1	0	1	1
1	0	1	1	0
1	0	0	1	0
0	1	1	1	0
0	1	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	0	1	0

Tab. 5.3: Karnaughova mapa pro tranzistor T2

		I(dec)		
	I(inc)			
	1	1	0	1

IN	1	1	1	1
----	---	---	---	---

odpovídající logická funkce:

$$T2 = I(inc) \oplus IN \oplus \overline{I(dec)} \quad (5.7)$$

Tab. 5.4: Karnaughova mapa pro tranzistor T3

		I(dec)		
	I(inc)			
	0	0	0	0
IN	1	0	0	0

odpovídající logická funkce:

$$T3 = I(inc) \otimes IN \quad (5.8)$$

Celkové schéma včetně desky plošných spojů je v příloze 1.

5.3 Realizace fyzikálního modelu závěsu kola

5.3

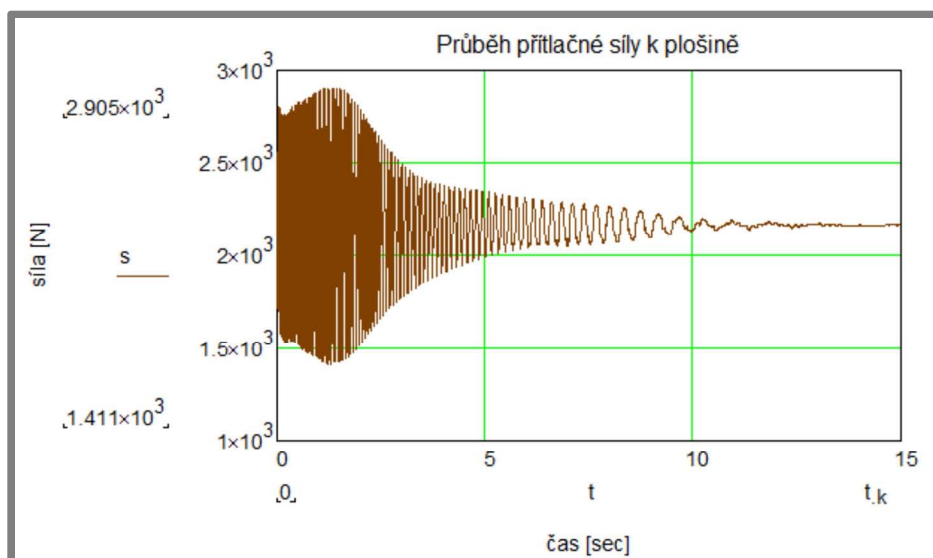
Cílem bylo vytvořit fyzikální model závěsu kola s podobnými modálními vlastnostmi jako závěs běžného osobního automobilu, na kterém je možné testovat semiaktivní algoritmy odpružení v laboratorních podmínkách. Pro laboratorní demonstraci byl zvolen fyzikální model ve zmenšeném měřítku.

5.3.1 Identifikace parametrů závěsu automobilu

Jako referenční byl zvolen závěs zadního kola Škody Fabie. Modální parametry Škody Fabia byly zjištěny měřením a vážením komponentů a pomocí částečné modální analýzy na Eusama testeru. Tento tester slouží k měření tlumičů a skládá se z plošiny, která vibruje s frekvencí v rozsahu 25 – 0 Hz. Testovaný vůz stojí kolem na této plošině a měří se síla na plošinu vyvozovaná kolem automobilu. Na časovém průběhu síly (obr. 5.22) se sleduje amplituda síly. Z té je možné vypočítat kritérium EUS:

$$EUS = \frac{F_{\min}}{F_{\text{mean}}} \quad (5.9)$$

kde F_{\min} je minimální síla a F_{mean} je střední hodnota síly.



Obr. 5.22: Výsledné průběhy testeru Eusama

Z tohoto průběhu je také možné určit rezonanční frekvenci neodpružené hmoty, což je frekvence, při které je amplituda největší.

5.3.2 Volba parametrů fyzikálního modelu

Jako fyzikální model závěsu automobilu sloužil experimentální vozík. Skládá se z několika komponent, které určují modální parametry vozíku (obr. 1.3, 5.23) – odpružená hmota m_2 , neodpružená hmota m_1 , magnetoreologický tlumič s proměnným tlumením b_2 , pružina k_2 a pneumatika s tuhostí k_1 a tlumením b_1 . Odpružená a neodpružená hmota může být změněna velmi jednoduše přidáním závaží do zásobníku resp. na držák nad zadním kolem. Konstrukcí vozíku jsou ale dány maximální přípustné hmotnosti. Zdánlivá tuhost pružiny (tuhost imaginární pružiny mezi odpruženou a neodpruženou hmotou uchycené na osu kola) může být v určitém rozsahu měněna pozicí uchycení reálné pružiny na zadní vidlici. Tuhost pneumatiky lze měnit tlakem v pneumatice. Měřítko zmenšení skutečného modelu u experimentálního vozíku bylo stanoveno přibližně na 3,4. Parametry závěsu automobilu a experimentálního vozíku, které jsou vstupními parametry do modelů, jsou v tabulce 5.5.

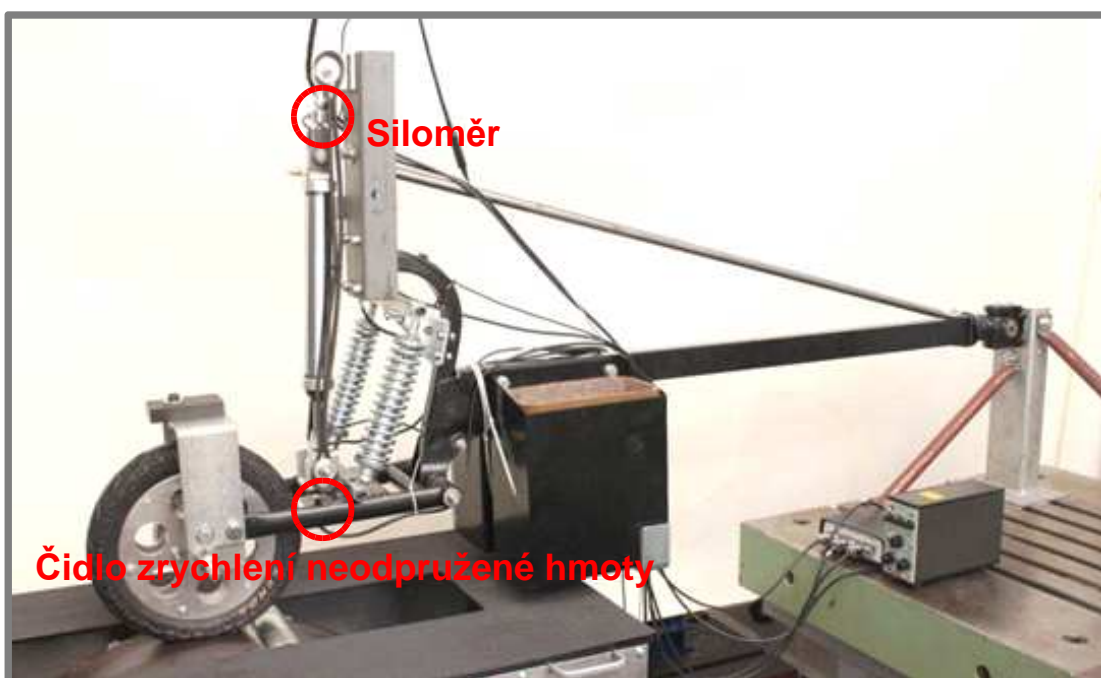
Tab. 5.5: Parametry čtvrtinového modelu

Parametry čtvrtinového modelu zadní nápravy Škody Fabia	Čtvrtinový model experimentálního vozíku	
	Použité v modelu	Použité v modelu
Dynamická tuhost pneumatiky (2bary) [N/mm]	197	57.80
Redukovaná odpružená hmota [kg]	148.40	56.62
Redukovaná neodpružená hmota [kg]	20.4	7.97
Tuhost hlavní pružiny	21.35	

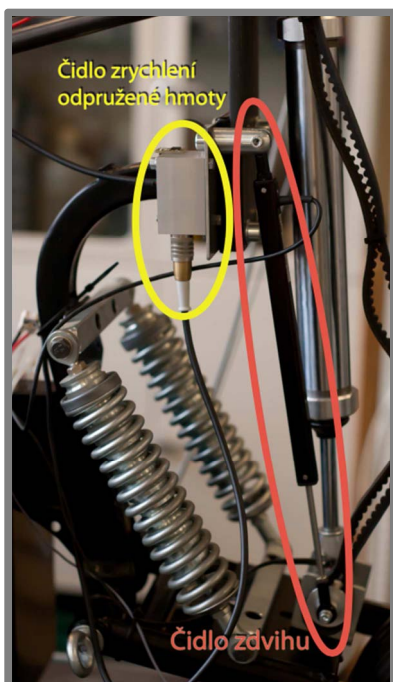
[N/mm]		
Tuhost stabilizátoru [N/mm]	12	
Celková tuhost [N/mm]	33.35	7.38
Statická tuhost pneumatiky (2 bary) [N/mm]	156	44

Kolo experimentálního vozíku jede po simulátoru vozovky. Simulátor vozovky se skládá z bubnu o průměru 0.8 m poháněného elektromotorem s frekvenčním měničem, kterým je možné nastavit rychlost jízdy. Na tento buben je upevněn přejezdový práh vytvořený z trubky kruhového profilu. Výška příčného prahu v jeho maximu je 21 mm a jeho délka je 55 mm. Simulátor vozovky je osazen tenzometry, které měří přítlak kola na vozovku, a indukčností čidlem otáček na určení rychlosti otáčení.

Aby bylo možné vyhodnocovat odezvu vozíku, bylo třeba vozík osadit senzory. Umístění čidel na vozíku je na obr. 5.23 a 5.24. Typ použitých snímačů je v tab. 5.6:



Obr. 5.23: Experimentální vozík

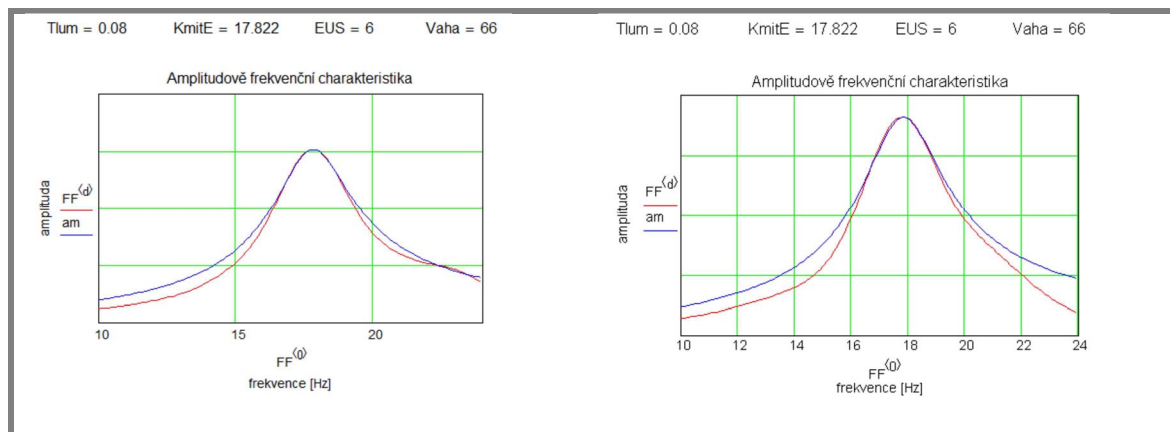


Obr. 5.24: Detail umístění čidel

Tab. 5.6: Přehled snímačů na experimentálním vozíku a simulátoru vozovky

Funkce snímače	Typ snímače
Čidlo zrychlení odpružené hmoty	BK4332
Čidlo zrychlení neodpružené hmoty	AD7260
Siloměr tlumiče	HBM U9B/5kN
Čidlo zdvihu	VLP 15 SA
Čidlo otáček simulátoru vozovky	Carlo Gavazzi – IA05BSF
Síla na vozovku	Lepené tenzometry s citlivostí 2740 kg/mV/V

Výsledné charakteristiky modelu a reálného automobilu je na obr. 5.25. Červenou čarou je znázorněna amplituda výchylky neodpružené hmoty Eusama testu a modře je znázorněna amplituda předpokládané výchylky pokud by bylo tlumení konstantní v celém rozsahu frekvencí a amplitud.



Obr. 5.25: Amplitudově-frekvenční charakteristika experimentálního vozíku (vpravo) a jeho modelu (vlevo) v konfiguraci bez tlumiče

5.3.3 Volba vhodného rozsahu MR tlumiče

Ve zdroji [1] je uveden výpočet tlumení pro optimální tlumení z hlediska pohodlí i bezpečnosti. Charakteristika MR tlumiče ve vozíku by měla být zvolena tak, aby pokryla obě optimální varianty.

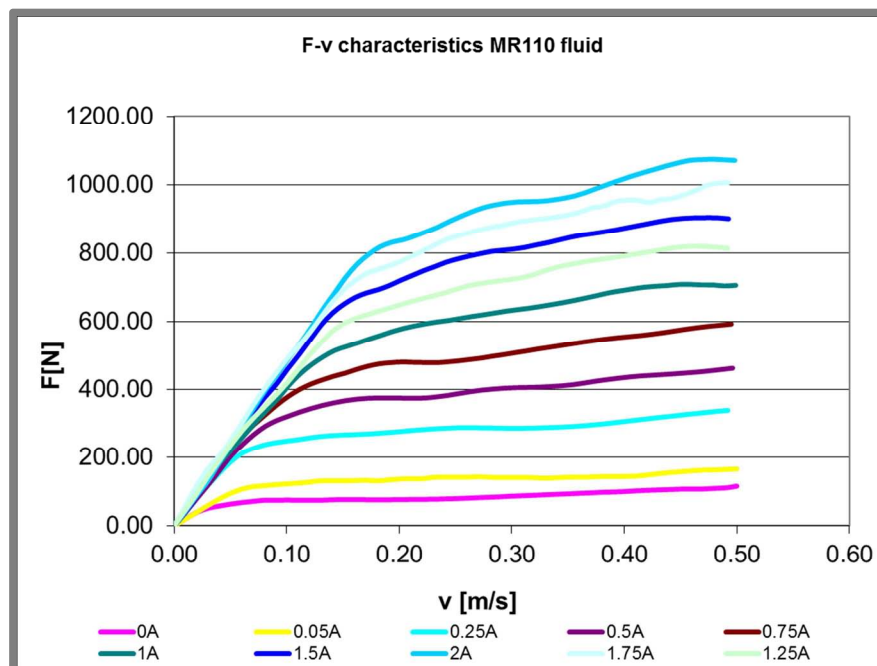
Nastavení pro optimální pohodlí:

$$b_2 = k_2 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{k_1}} = 7380 \sqrt{\frac{7.97 + 56.62}{57800}} = 246 \text{ Ns} / \text{m} \quad (5.10)$$

Nastavení pro optimální bezpečnost:

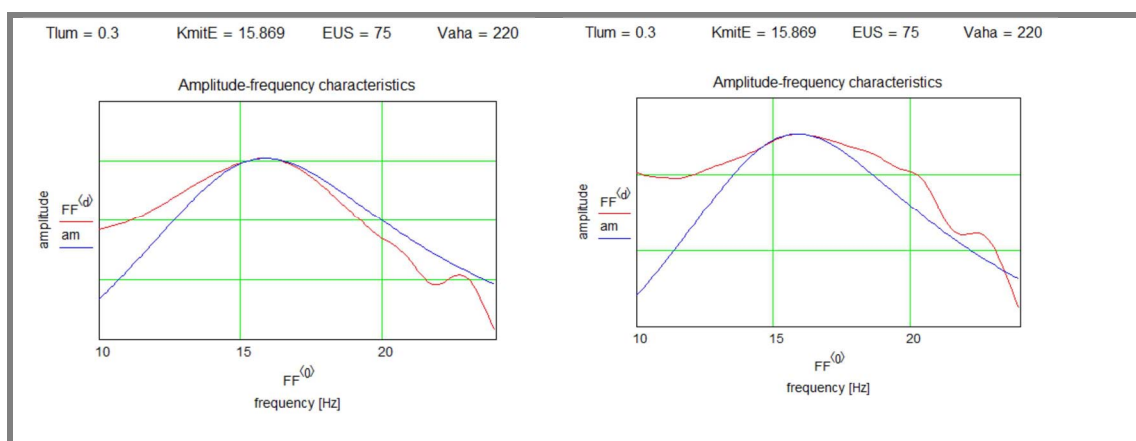
$$b_2 = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)k_2^2}{k_1} - \frac{2k_2 m_1 m_2}{m_1 + m_2} + \frac{k_1 m_1 m_2^2}{m_1 + m_2}} = \sqrt{\frac{(7.97 + 56.62)7380^2}{57800} - \frac{2 \cdot 7380 \cdot 7.97 \cdot 56.62}{7.97 + 56.62} + \frac{57800 \cdot 7.97 \cdot 56.62^2}{7.97 + 56.62}} = 558 \text{ Ns} / \text{m} \quad (5.11)$$

Na vozíku je použit upravený semiaktivní MR tlumič Delphi. Pokud by se ale ve vozíku použil neupravený tlumič, tlumící síly by byly i pro nejměkčí nastavení příliš velké. Tlumící síly mohou být zmenšeny pozicí uchycení mezi vidlici a rám vozíku přepákováním. V tomto případě se ovšem zmenší rychlosti pístu. MR tlumič má ale nelineární F-v charakteristiku, při malých rychlostech je tlumící koeficient značně vyšší než pro vyšší rychlosti (obr. 5.26). Pro vyšší proudy a nižší rychlosti by navíc nebyla patrná téměř žádná změna v útlumu, i pokud by se proud zvyšoval.



Obr. 5.26: F-v charakteristika MR tlumiče Delphi s kapalinou MR110

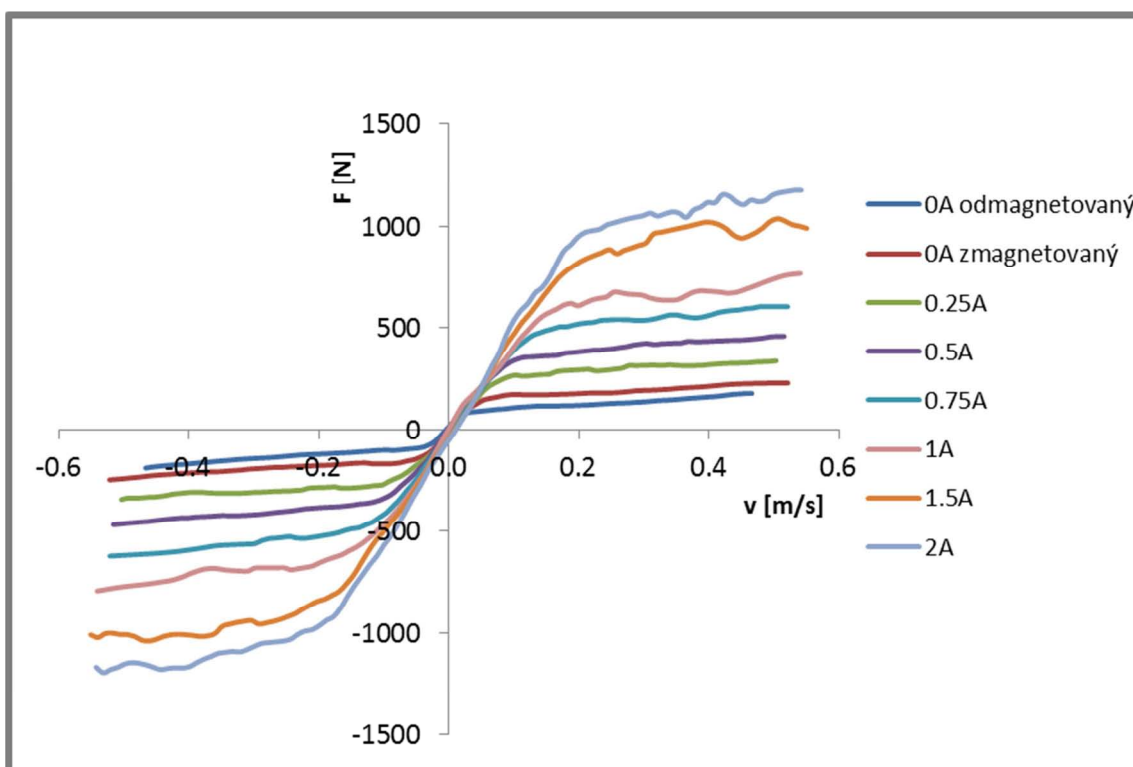
Proto je žádoucí co nejmenší přepákování (v našem případě 2). Abychom snížili síly tlumiče, naředili jsme původní MR kapalinu základovým olejem Durasyn 162. Poté bylo provedeno měření s různým nastavením tlumiče. Při proudu 1,25 A byly charakteristiky experimentálního vozíku a Škody Fabie (obr. 5.27) velmi blízké. Vzhledem k tomu, že maximální trvalý přípustný proud tlumičem je 2 A, je možné výrazně měnit tlumení vozíku. Po vyhodnocení měření byla namíchána kapalina s větším poměrem železných částic (15 %) a další měření pak probíhala s touto kapalinou.



Obr. 5.27: Amplitudově-frekvenční charakteristika modelu automobilu (vpravo) a modelu experimentálního vozíku (vlevo) v konfiguraci s MR tlumičem

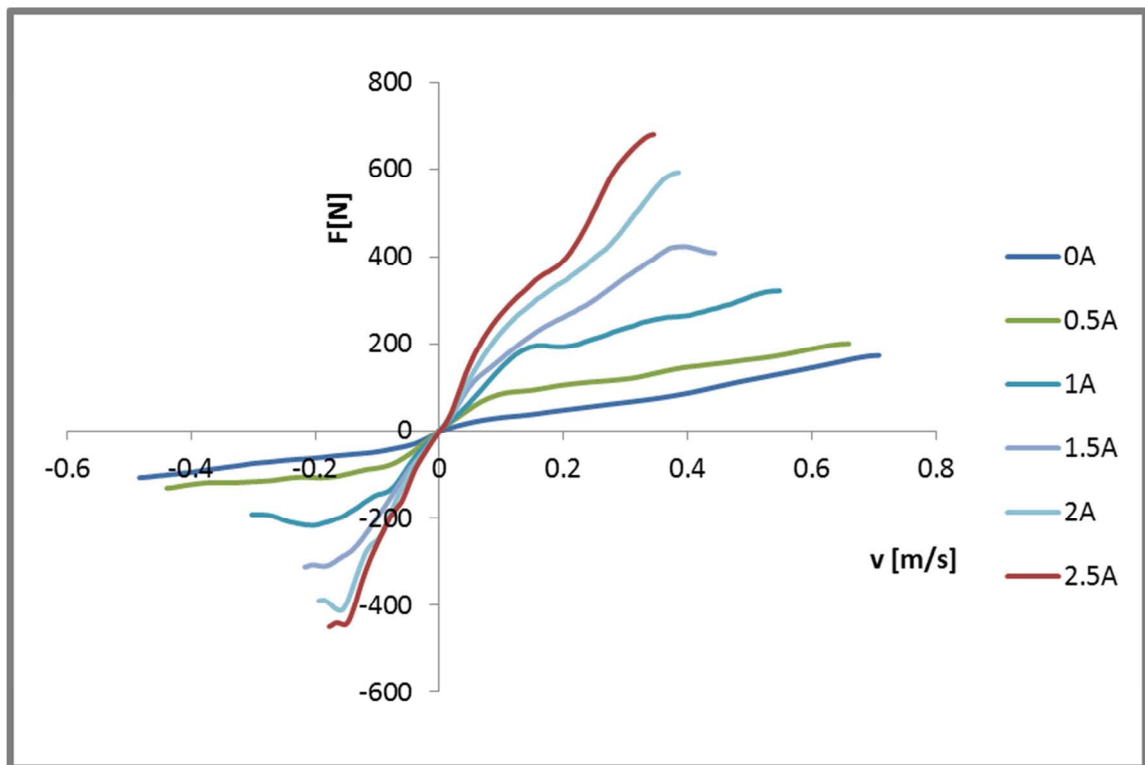
Na obr. 5.28 jsou zobrazeny F-v charakteristiky MR tlumiče s namíchaným olejem s 15 % objemu Fe částic. Pokud se ovšem do modelu zadaly tlumicí charakteristiky změřené na pulzátoru, výsledky simulace se neshodovaly s reálnými měřeními, oproti realitě byl vozík přetlumený. Proto byly získány F-v charakteristiky MR tlumiče přímo z přejezdové zkoušky a porovnány s charakteristikami získanými

z pulzátoru.. Experimentální vozík je totiž vybaven snímačem tlumicí síly a rychlost zdvihu byla získána derivací zdvihu.



Obr. 5.28: F-v charakteristika tlumiče s MR kapalinou MR115PAO2 změřená na pulzátoru

Takto získané charakteristiky jsou na obr. 5.29. Z tohoto obrázku vyplývá, že síly při odpovídajících rychlostech jsou menší. Tento jev je pravděpodobně způsoben nedostatečným rozmícháním MR kapaliny v tlumiči experimentálního vozíku. Kvůli tomu byl Model MR tlumiče v simulacích sestaven na základě F-v charakteristik z obrázku 5.29. V reálném nasazení MR tlumiče je třeba provést zkoušky na míru změny F-v charakteristiky v důsledku sedimentace železných částic.



Obr. 5.29: F-v charakteristika tlumiče s MR kapalinou MR115PAO2 změřená na vozíku při přejezdové zkoušce s rychlostí 10 km/h

5.4 Sestavení virtuálního modelu odpružení automobilu

Po odladění vlastností vozíku byl naprogramován model v SW Matlab. Tento model iteračně počítá s nastavitelným vzorkováním zrychlení, rychlosti a polohy a vychází z Newtonových pohybových rovnic dle obr.1.3:

$$a_1 = \frac{F_{k1} - b_1(v_1 - v_0) + F_{b2} - F_{k2} - m_1 g}{m_1} \quad (5.12)$$

$$a_2 = \frac{F_{k2} - F_{b2} - m_2 g}{m_2} \quad (5.12)$$

$$F_{k1} = k_1(y_1 - y_0) \quad (5.13)$$

$$F_{k2} = k_2(y_2 - y_1) \quad (5.14)$$

F_{b2} se v každém kroku získává podle rozdílu rychlostí $v_2 - v_1$ z virtuálního modelu MR tlumiče (obr. 1.3). Výstupem z modelu jsou parametry, které určují efektivitu odpružení z hlediska pohodlí a z hlediska bezpečnosti jízdy.

5.4.1 Metodika pro posuzování kvality odpružení

Kvalita odpružení byla posuzována podle dvou hledisek – z hlediska pohodlí a z hlediska bezpečnosti. Porovnávání kvality odpružení probíhalo pro všechny algoritmy na simulaci přejezdu nerovnosti typu příčný práh.

5.4.1.1 Kvalita odpružení z hlediska pohodlí

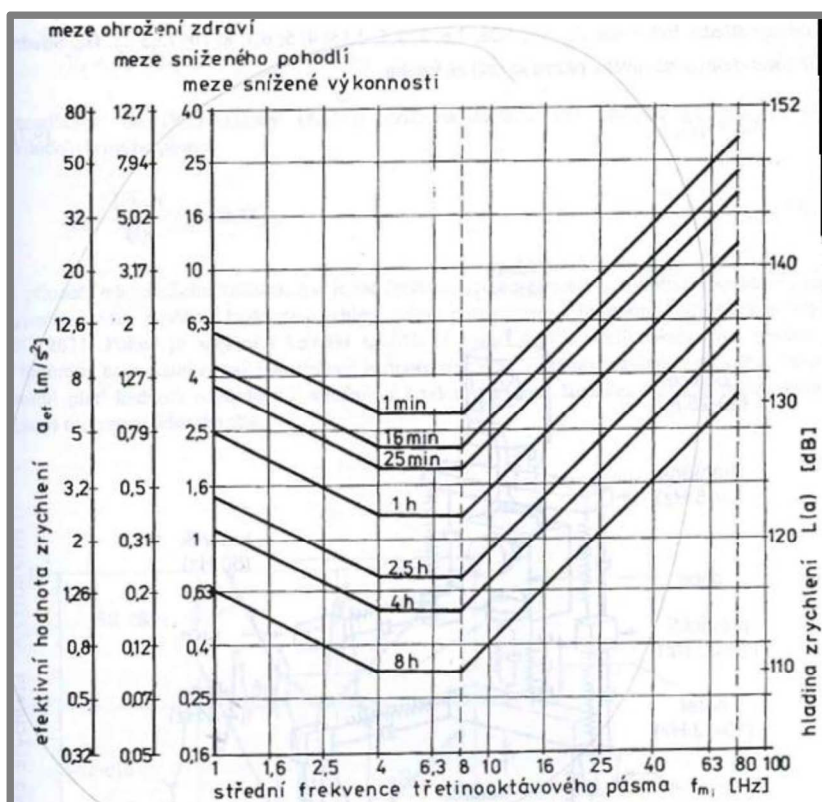
Aby mělo nasazení semiaktivních či aktivních systémů smysl, musí tyto systémy dosahovat lepších výsledků než pasivní způsob odpružení. Pro porovnání je tedy třeba stanovit relevantní veličiny charakterizující efektivitu odpružení.

Jednou z hlavních funkcí odpružení je zajistit co nejvyšší komfort. Tím se rozumí zejména velikost vibrací, které se přenášejí do odpružené hmoty. Vibrace působící na člověka způsobují zpomalení reakce a únavu, proto je třeba jejich míru minimalizovat.

Relevantní veličinou, podle které se obvykle posuzuje či porovnává odpružení automobilu, je efektivní hodnota zrychlení ve svislém směru:

$$a_{ef} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T a_z^2(t) dt} \quad (5.15)$$

Tento výpočet se používá pro hodnocení účinků kmitání na člověka dle ISO2631. Míra škodlivosti pro lidský organismus je ale dále závislá i na délce působení vibrací, směru vibrací a frekvenci vibrací (obr. 5.30).



Obr. 5.30: povolené meze vibrací v závislosti na čase a frekvenci [1]

Pokud předpokládáme, že stejnosměrná složka svislého zrychlení je rovna nule a měření probíhá diskrétně, pak komfort může být vyjádřen pomocí směrodatné odchylky:

$$\sigma(a_2) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_2^2} \quad (5.16)$$

Následující vztahy popisují celkovou úroveň vibrací, ale nezohledňují vstup do systému (nerovnost vozovky, rychlost vozidla). Pokud je třeba způsoby odpružení porovnat, je třeba porovnávat směrodatné odchylky pro stejnou vozovku, stejnou rychlost přejezdu a stejný časový úsek.

5.4.1.2 Kvalita odpružení z hlediska bezpečí

Pro bezpečnost jízdy je důležitým parametrem síla, kterou působí kolo na vozovku. Pokud se síla v závislosti na čase výrazně mění (v extrémě kolo ztrácí kontakt s vozovkou), je schopnost kola přenášet brzděné a boční síly při jízdě v zatáčce omezena. Síla mezi kolem a vozovkou by tedy měla být co nejstálější. Kvalita odpružení z hlediska bezpečí je definována podílem směrodatné odchylky a statické síly na vozovku [1]:

$$\frac{\sigma_F}{F_{stat}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F - F_{stat})^2}}{F_{stat}} \quad (5.17)$$

Vzhledem k tomu, že F_{stat} je pro experimentální vozík konstanta, lze kvalitu odpružení vyjádřit přímo jako směrodatnou odchylku síly:

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F - F_{stat})^2} \quad (5.18)$$

Tento zjednodušený výpočet byl použit pro model i pro měření kvality odpružení z hlediska bezpečí.

5.4.2 Sestavení virtuálního modelu MR tlumiče

Charakteristika MR tlumiče je do modelu zadána parametricky. Charakteristika se pro každý proud skládá ze tří lineárních úseků.

$$F_1 = b_b v - (f_f + I g_f) + \frac{(f_f + I g_f)}{b_a + I g_a} b_b \quad (5.19)$$

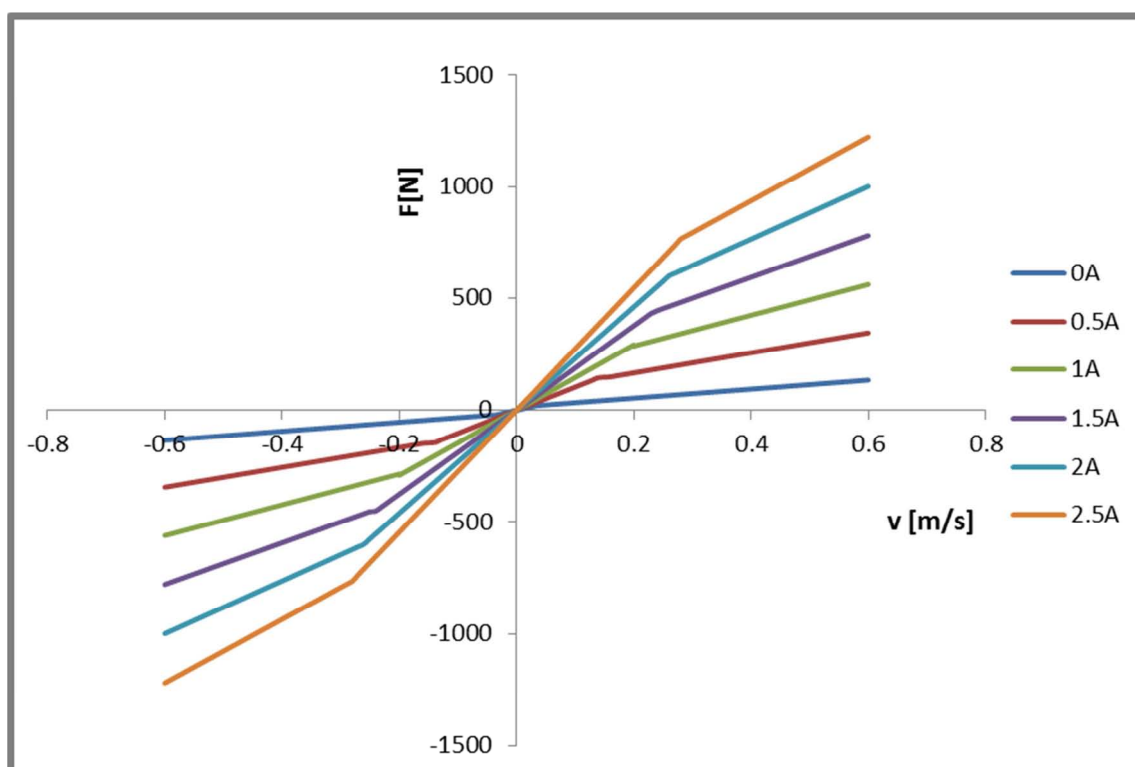
$$F_2 = (b_a + g_a I) v \quad (5.20)$$

$$F_3 = b_b v + (f_f + I g_f) + \frac{(f_f + I g_f)}{b_a + I g_a} b_b \quad (5.21)$$

Kde:

$f_f = 20 \text{ N}$	síla zlomu pro proud $I = 0 \text{ A}$
$g_f = 150 \text{ N/A}$	gradient bodu zlomu
$b_a = 600 \text{ Ns/m}$	konstanta tlumení před zlomem
$g_a = 850 \text{ Ns/m/A}$	gradient tlumení před zlomem
$b_b = 200 \text{ Ns/m}$	konstanta tlumení za zlomem
$g_b = 490 \text{ Ns/m/A}$	gradient tlumení za zlomem

Výsledné charakteristiky, které jsou použity ve všech simulacích v kapitole 6.3, jsou na obr. 5.31:



Obr. 5.31: F-v charakteristika tlumiče použitá v modelu

Z obr. 5.31 dále vyplývá, že tlumič by měl dle výpočtu (5.10, 5.11) pokrýt jak požadavek na optimální komfort, tak i požadavek na bezpečnost jízdy. Pro 0,5 m/s vychází tlumicí koeficient 233 Ns.m^{-1} a pro proud 2,5 A 2335 Ns.m^{-1} . Tlumič je ale přepákováný, a proto může být ekvivalentní tlumicí koeficient tlumiče b_2 nastaven v rozmezí $58,3 \text{ Ns.m}^{-1}$ do $583,8 \text{ Ns.m}^{-1}$.

5.5 Princip semiaktivních algoritmů řízení MR tlumiče

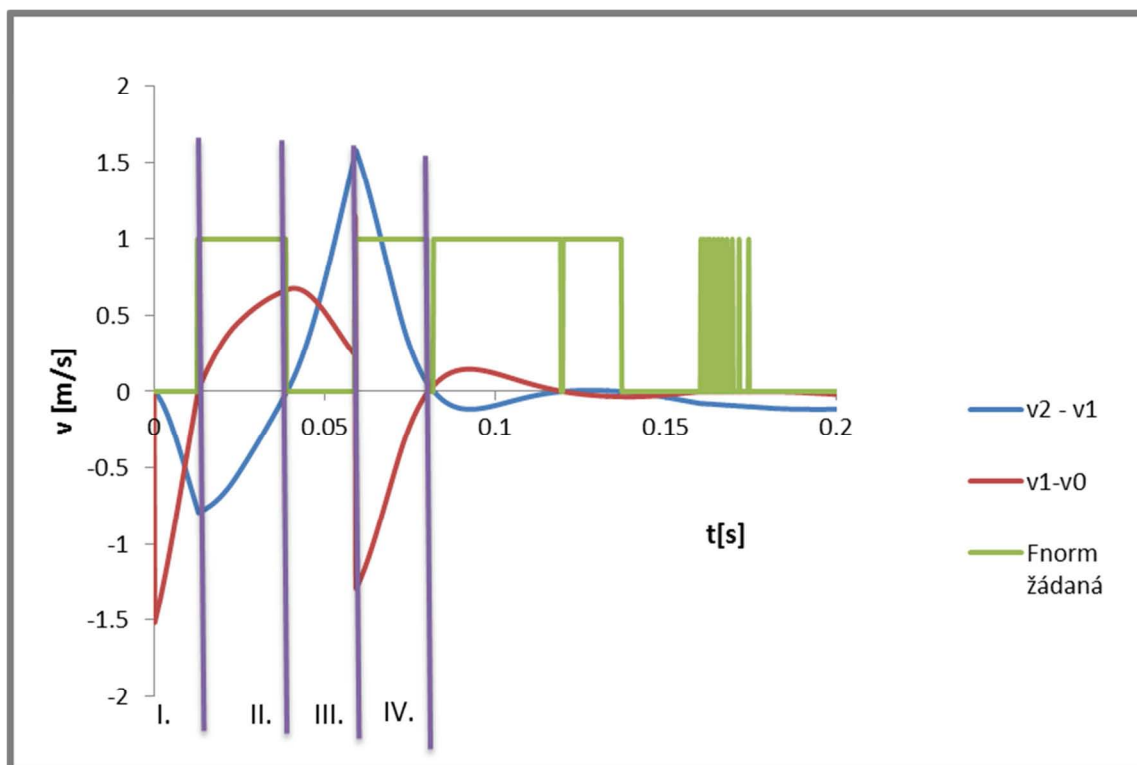
Po sestavení virtuálního modelu závěsu je možné simulovat semiaktivní algoritmy řízení MR tlumiče s modelem, který zahrnuje omezený rozsah MR tlumiče a

nastavitelnou časovou odezvu MR tlumiče. Algoritmy byly testovány na nerovnosti typu příčný práh. Byly zvoleny tři semiaktivní algoritmy. Simulovány byly varianty s algoritmem Skyhook, Groundhook a Modifikovaný groundhook. Pro ověření virtuálního modelu bylo provedeno měření adaptivního pasivního nastavení a algoritmu Modifikovaný groundhook. Efektivita semiaktivních algoritmů byla následně porovnán s adaptivním pasivním způsobem odpružení. Všechny semiaktivní algoritmy byly typu on/off. To znamená, že požadovaný proud procházející cívkou tlumiče mohl nabývat pouze dvou hodnot: b_{2L} pro stav s nízkým tlumením a b_{2H} pro stav s vysokým tlumením. Pravidla pro spínání jsou uvedena v následujících podkapitolách.

5.5.1 Groundhook

Řízení semiaktivním algoritmem typu groundhook by mělo vzhledem k pasivnímu nastavení tlumiče umožnit dosažení lepšího přítlaku kola na vozovku za cenu zhoršení jízdního komfortu. Tento algoritmus lze nadefinovat tak, že pokud je rychlost neodpružené hmoty (vůči povrchu země) opačná než relativní rychlost odpružené ku neodpružené hmotě (tzn. pokud jde kolo nahoru od povrchu a tlumič se stlačuje nebo pokud jde směrem k povrchu a tlumič se roztahuje), přepne se tlumič do stavu s vysokým tlumením b_{2H} :

$$F_{gh} = \begin{cases} b_{2H}(v_2 - v_1), & (v_1 - v_0)(v_2 - v_1) < 0 \\ b_{2L}(v_2 - v_1), & (v_1 - v_0)(v_2 - v_1) \geq 0 \end{cases} \quad (5.22)$$



Obr. 5.32: Spínání proudu do tlumiče – algoritmus Groundhook (simulace)

Regulační algoritmus je ilustrován na obr. 5.32. Červená křivka zobrazuje průběh rychlosti neodpružené hmoty vůči vozovce, modrá zobrazuje pístovou rychlost tlumiče (rozdíl rychlostí odpružené a neodpružené hmoty) a zeleně je zobrazená požadovaná normovaná síla F_{norm} :

$$F_{norm} = \frac{F(v, I)}{F_{max}(v, I)} \quad (5.23)$$

Kde F_{max} je síla v ustáleném stavu, kterou tlumič působí při dané rychlosti a proudu. Fialové čáry rozdělují průběh na čtyři fáze, které se opakují:

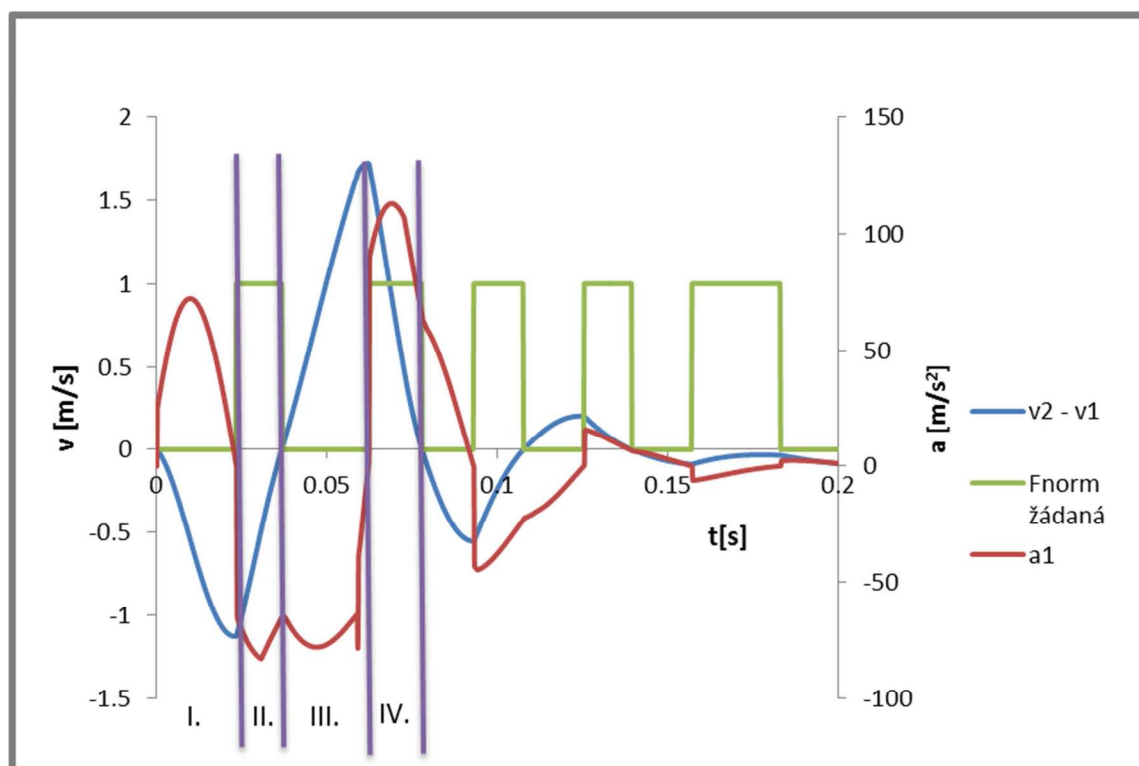
- I. Kolo najíždí na práh, pneumatika se stlačuje (neodpružená hmota se přibližuje k vozovce), tlumič se také stlačuje. Síla na vozovku se zvyšuje.
- II. Kolo se začíná vzdalovat od vozovky (neodpružená hmota se vzdaluje od vozovky), tlumič se stlačuje, síla kola na vozovku klesá. Pro zachování co největší síly na vozovku je nutné přepnout tlumič do stavu s vysokým tlumením.
- III. Kolo se vzdaluje od vozovky, tlumič se roztahuje a tím kolo dále táhne od vozovky. Tlumič je třeba přepnout do stavu s malým tlumením.
- IV. Kolo se začíná přibližovat k vozovce, tlumič se roztahuje. Pro zachování konstantní síly na vozovku je třeba přepnout tlumič do stavu vysokého tlumení.

5.5.2 Modifikovaný groundhook

Vychází se z toho, že pokud je zrychlení kola nenulové, je porušena rovnováha gravitační a potenciální síly pružiny (pneumatiky). V případě, že kolo zrychluje směrem k vozovce, je gravitační síla větší než síla vyvozená pružinou (pneumatikou). Naopak pokud je gravitační síla menší než síla vyvozená pružinou, kolo získá zrychlení směrem od vozovky.

Praktická aplikace algoritmu je následující:

$$F_{ghmod} = \begin{cases} b_{2H}(v_2 - v_1), & a_1(v_2 - v_1) \geq 0 \\ b_{2L}(v_2 - v_1), & a_1(v_2 - v_1) < 0 \end{cases} \quad (5.24)$$



Obr. 5.33: Spínání proudu do tlumiče – algoritmus modifikovaný Groundhook (simulace)

Regulační algoritmus je ilustrován na obr. 5.33. Červená křivka zobrazuje průběh zrychlení neodpružené hmoty, modrá zobrazuje pístopovou rychlost tlumiče (rozdíl rychlostí odpružené a neodpružené hmoty) a zeleně je zobrazena požadovaná normovaná síla F_{norm} :

$$F_{norm} = \frac{F(v, I)}{F_{max}(v, I)} \quad (5.25)$$

Kde F_{max} je síla v ustáleném stavu, kterou tlumič působí při dané rychlosti a proudu. Fialové čáry rozdělují průběh na čtyři fáze, které se opakují:

- I. Zrychlení neodpružené hmoty je větší než nula, rychlost je menší než nula. Práh tlačí na kolo, tlumič se stlačuje. Síla je oproti statické síle na buben větší. Tlumič je třeba nechat na nulovém proudu. Pokud by byl proud větší, zrychlovala by i odpružená hmota
- II. Zrychlení je menší než nula, rychlost je menší než nula. Neodpružená hmota zpomaluje – tlumič se začíná vzdalovat od prahu, stlačuje se. Je třeba zabrzdit neodpruženou hmotu – je třeba přepnout tlumič do stavu s vyšším tlumením.
- III. Zrychlení je menší než nula, rychlost je větší než nula. Neodpružená hmota zpomaluje (je tlačena pružinou, mění se směr rychlosti, kolo se začíná blížit vozovce), tlumič se roztahuje, je třeba ho přepnout do stavu s nižším tlumením (nenulový proud by bránil vrácení kola na vozovku).
- IV. Zrychlení je větší než nula, rychlost je větší než nula. Kolo se dotklo vozovky, je žádoucí neodpruženou hmotu brzdit a zapnout tlumič na maximální proud

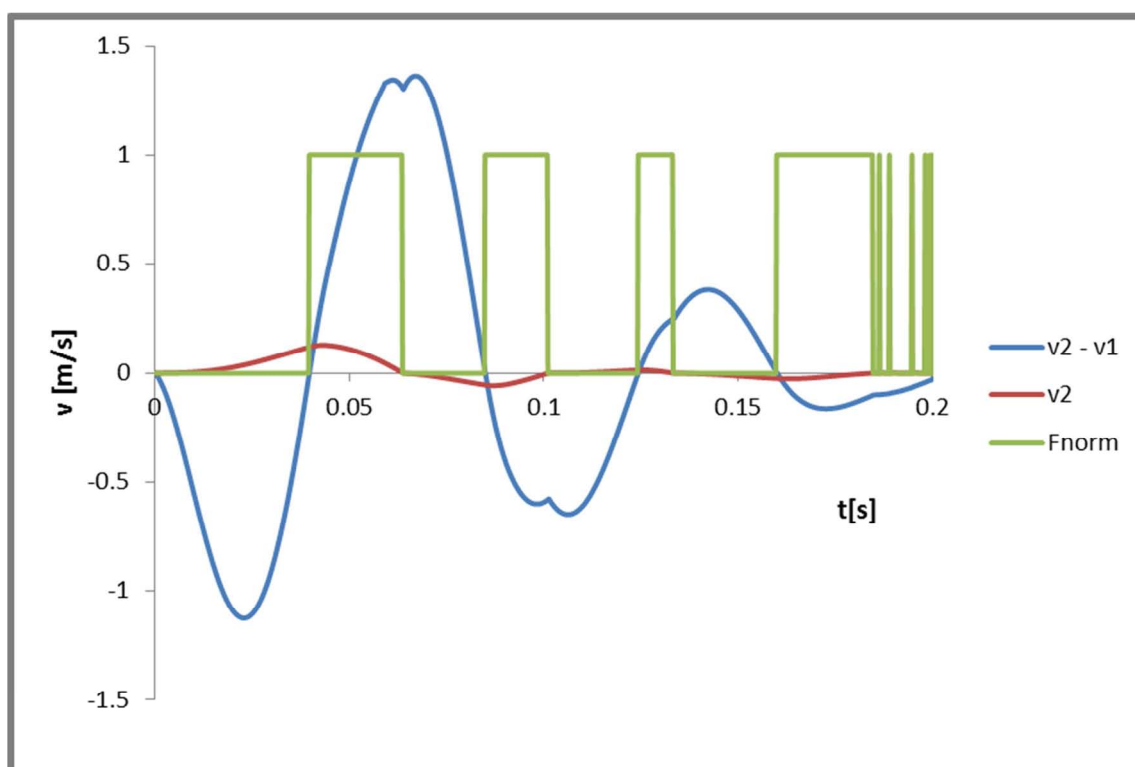
5.5.3 Skyhook

Tento algoritmus je nadefinován tak, že pokud rychlost odpružené hmoty a relativní rychlost odpružené vůči neodpružené hmotě má stejné znaménko (tzn. odpružená hmota se pohybuje v kladném směru a tlumič se roztahuje, nebo odpružená hmota se pohybuje v záporném směru a tlumič se stlačuje), aplikuje se síla dle vzorce:

$$F_{sa} = \begin{cases} b_{2H}(v_2 - v_1), & v_2(v_2 - v_1) \geq 0 \\ b_{2L}(v_2 - v_1), & v_2(v_2 - v_1) < 0 \end{cases} \quad (5.26)$$

kde b_{2H} je tlumicí koeficient MR tlumiče v sepnutém stavu a b_{2L} je tlumicí koeficient MR tlumiče v rozepnutém stavu.

Okamžiky spínání ilustruje obr. 5.34. Červená křivka znázorňuje rychlost odpružené hmoty, modrá křivka zobrazuje relativní rychlost odpružené vůči neodpružené hmotě a zelená křivka je ovládací signál do MR tlumiče. Pokud je zelená křivka v hodnotě 1, tlumičem prochází požadovaný proud pro aktivovaný stav, pokud je zelená křivka na nule, tlumičem neprochází žádný proud.



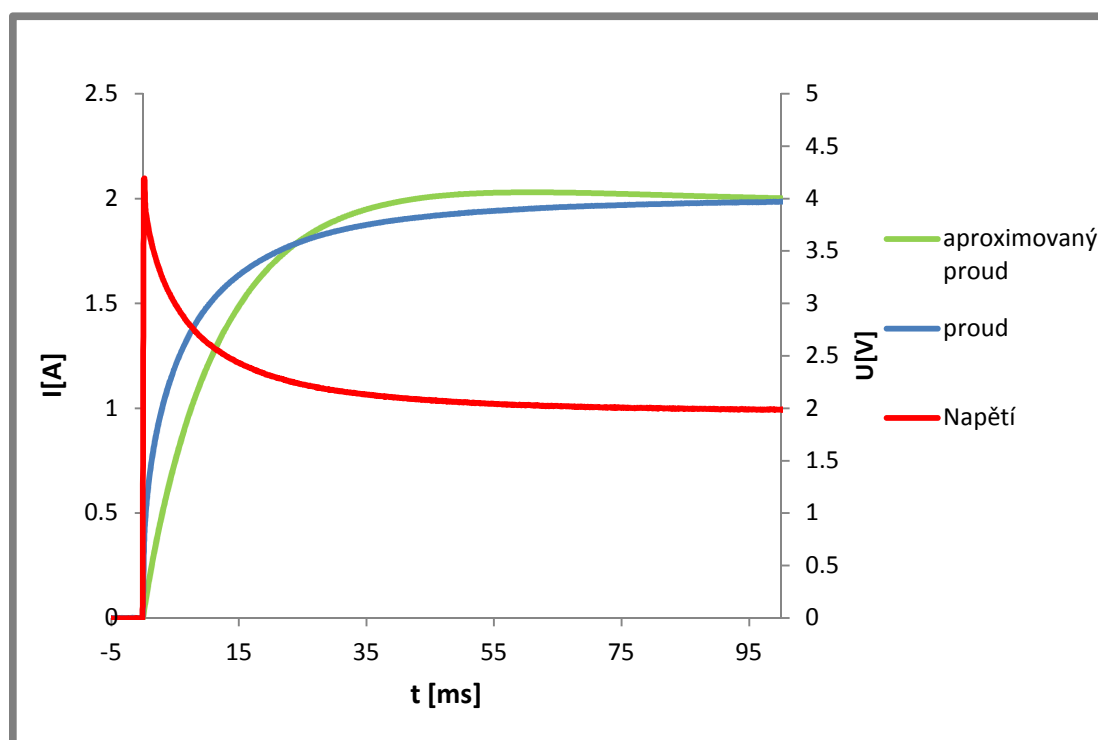
Obr. 5.34: Spínání proudu do tlumiče – simulace algoritmu Skyhook

6 ANALÝZA A INTERPRETACE

6.1 Limitující prvky MR tlumiče

6.1.1 Elektrické parametry MR tlumiče

Pro návrh řízení tlumiče bylo nejprve třeba identifikovat základní parametry MR tlumiče, zejména indukčnost cívky. Se znalostí indukčnosti cívky je možné předpovídat průběh proudu v závislosti na přiloženém napětí. Indukčnost cívky byla měřena pro různé pístové rychlosti a různé proudy.

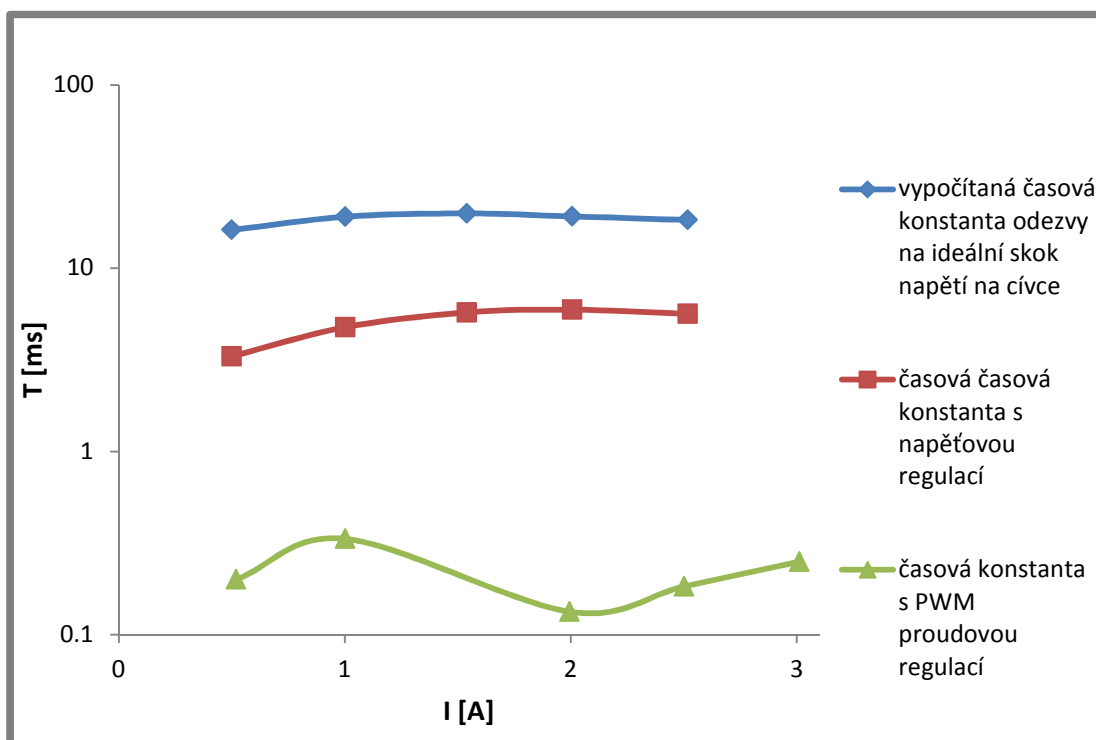


Obr. 6.1: Průběh napětí a proudu MR tlumičem Delphi

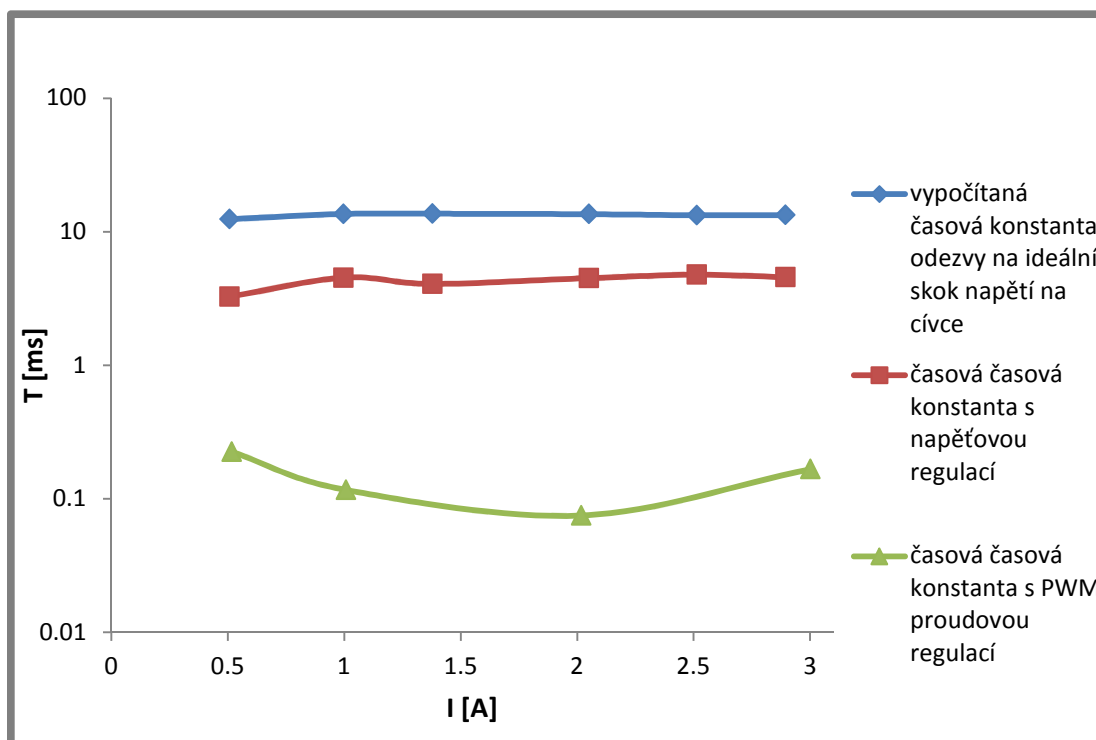
Průměrná indukčnost cívky byla s magnetoreologickou kapalinou MR140 18.5 mH. Indukčnost byla ověřena za pomoci přenosové funkce. Pokud se změřená indukčnost dosadí do přenosové funkce (2) a jako vstupní veličina se zadá průběh elektrického napětí z obr. 6.1, je výsledný aproximovaný proud na obr. 6.1 zeleně. Z obrázku je patrné, že průběh vypočítaného proudu není zcela shodný s průběhem skutečného proudu, nicméně míra shody je poměrně dobrá. Rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny nelineární B-H křivkou materiálu, a tím nekonstantní relativní permeabilitou materiálu jádra cívky. Indukčnost cívky se mění v závislosti na koncentraci železných částic v nosné kapalině. Pokud byl MR tlumič naplněn MR kapalinou s 10 objemovými procenty Fe částic, byla výsledná indukčnost 13.8 mH. Pro návrh regulátoru není třeba znát přesnou velikost indukčnosti, je třeba řádová znalost. Elektrický odpor cívky byl změřen v závislosti na teplotě v rozmezí 0.95 – 1.12 Ω .

6.1.2 Časová odezva MR tlumiče

obr. 6.2 porovnává odezvu proudu na skok řídicího napětí v závislosti na velikosti proudu v ustáleném stavu. Časová konstanta LR obvodu (modrá křivka) je vypočítána z experimentálně zjištěné indukčnosti a změřeného odporu. Tato křivka ukazuje dobu odezvy proudu, pokud by byl na přívodní svorky MR tlumiče připojen ideální jednotkový skok napětí (tranzistor T1 by měl v sepnutém stavu odpor 0Ω).



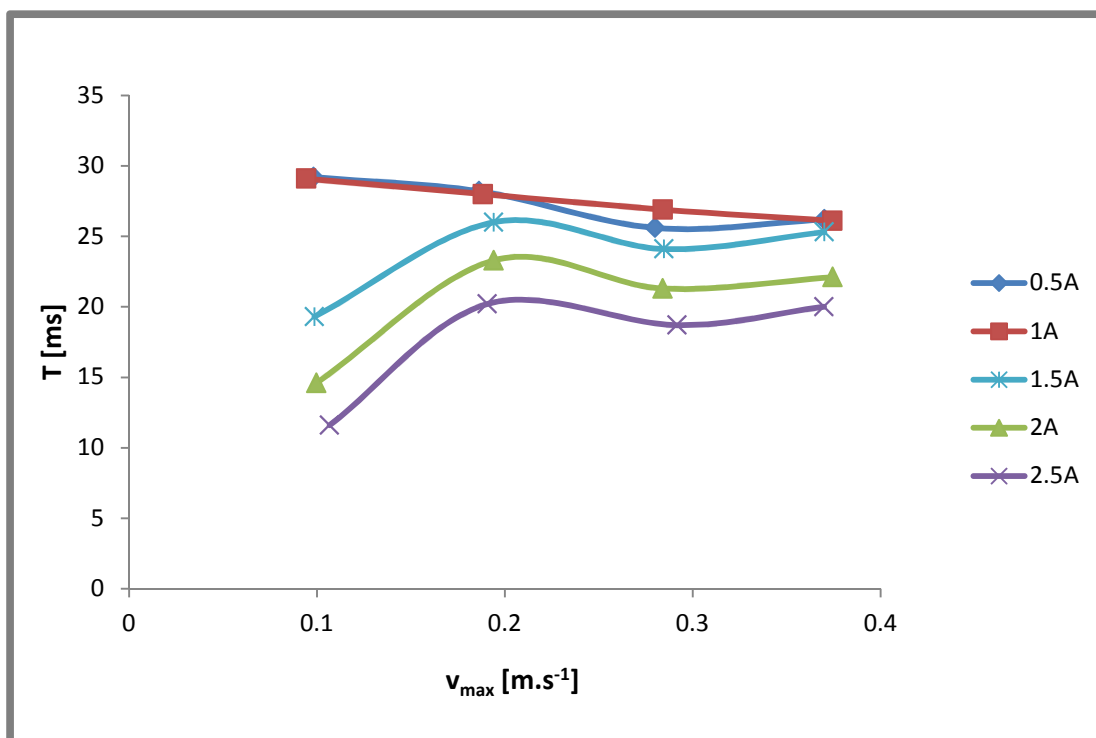
Obr. 6.2: Porovnání časových konstant MR tlumiče s kapalinou MR140 v různých režimech



Obr. 6.3: Porovnání časových konstant MR tlumiče s kapalinou MR110 v různých režimech

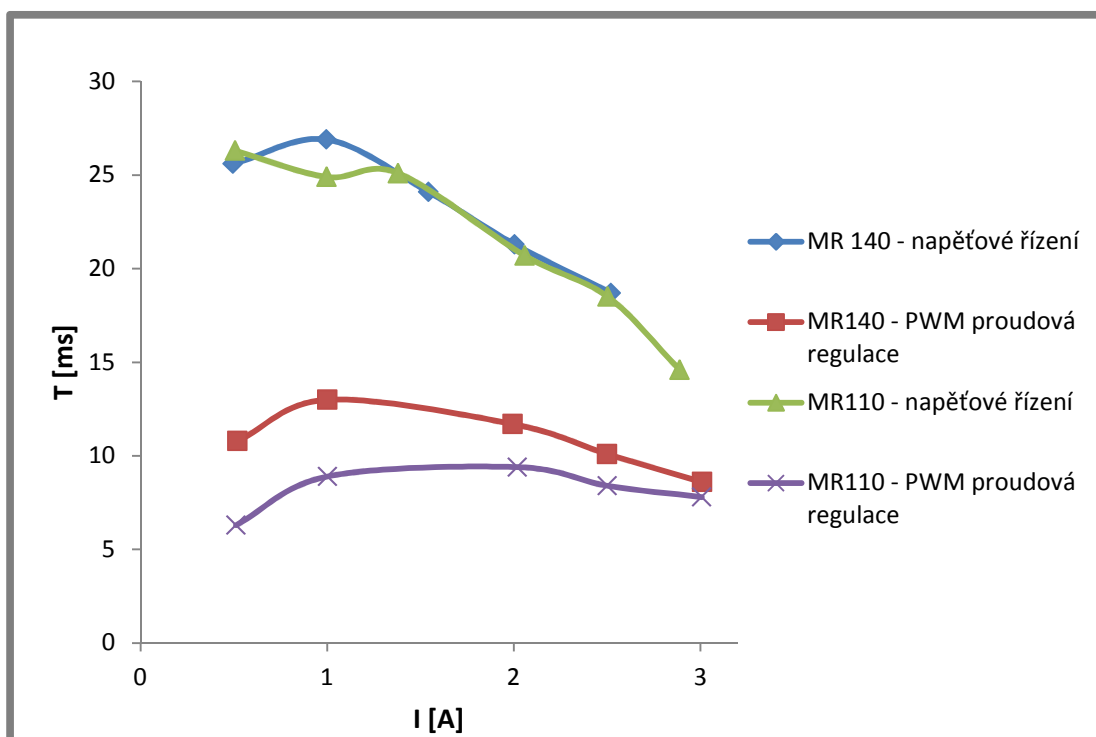
Časové konstanty odezvy proudu na jednotkový skok řídicího napětí s obvyklým způsobem řízení byly určeny z měření s PWM regulátorem v napěťovém režimu. V tomto regulátoru byly použity FET tranzistory, které mají v sepnutém stavu odpor přibližně 1.25Ω . Tento odpor způsobuje, že napětí na svorkách cívky MR tlumiče je v okamžiku sepnutí vyšší, než po skončení přechodového děje. Z rovnice (5.6) je zřejmé, že toto vyšší napětí v okamžiku sepnutí urychlí celkovou odezvu proudu na jednotkový skok řídicího napětí do regulátoru. Odpor tranzistoru v sepnutém stavu ale způsobuje značné výkonové ztráty, což snižuje účinnost řízení a potřebu chlazení driveru.

Zelená křivka ukazuje časové konstanty odezvy proudu na jednotkový skok řídicího napětí, pokud kontrolér pracuje v proudovém PWM režimu. Kontrolér byl napájen z laboratorního stabilizovaného zdroje s nastaveným napětím 30 V. Z obr. 6.2 a 6.3 je patrné, že tento způsob řízení zredukoval časovou konstantu na velmi malé hodnoty. Vzhledem k nízké vzorkovací frekvenci (10 kHz) jsou tyto změřené hodnoty zatíženy větší relativní chybou. Nejdelší změřená časová konstanta byla 0.4 ms, což je méně, než je předpokládaná doba odezvy MR kapaliny samotné. V tomto případě již další zvyšování napětí a urychlování náběhu proudu bude mít minimální účinek na celkovou dobu odezvy MR tlumiče.



Obr. 6.4: Porovnání časových konstant síly MR tlumiče v napěťovém režimu

obr. 6.4 ukazuje časové konstanty odezvy síly na jednotkový skok řídicího napětí (s kontrolérem v napěťovém režimu) pro 5 různých proudů v závislosti na maximální pístové rychlosti. Ze závislosti vyplývá, že se zvyšujícím se proudem zrychluje odezva síly MR tlumiče.



Obr. 6.5: Porovnání časových konstant síly MR tlumiče

Na obr. 6.5 jsou vykresleny časové konstanty odezvy síly MR tlumiče na jednotkový skok řídicího napětí pro rychlost 0.3 m/s pro 2 typy oleje a pro napěťový a PWM proudový způsob řízení MR tlumiče. Z grafu je patrné, že pokud se použil PWM proudový způsob řízení, celková doba odezvy síly tlumiče byla značně zredukována. Pokud se ale celková časová odezva MR tlumiče porovná s časovou odezvou MR kapaliny, resp. s časovou odezvou proudu, je více než 10 x delší. Tento rozpor může být vysvětlen vířivými proudy v jádru MR tlumiče v okamžiku sepnutí proudu do tlumiče.

Experimenty jasně ukazují, že s běžně používaným způsobem regulace jsou doby odezvy MR tlumiče příliš dlouhé na efektivní semiaktivní regulaci. Vhodný způsob řízení značně zkrátí časovou odezvu. Doba odezvy MR tlumiče je ale i v případě použití optimálního proudového regulátoru stále příliš dlouhá. Hlavní příčinou dlouhé odezvy v tomto případě jsou pravděpodobně vířivé proudy v magnetickém obvodu, které jsou zkoumány v následující kapitole.

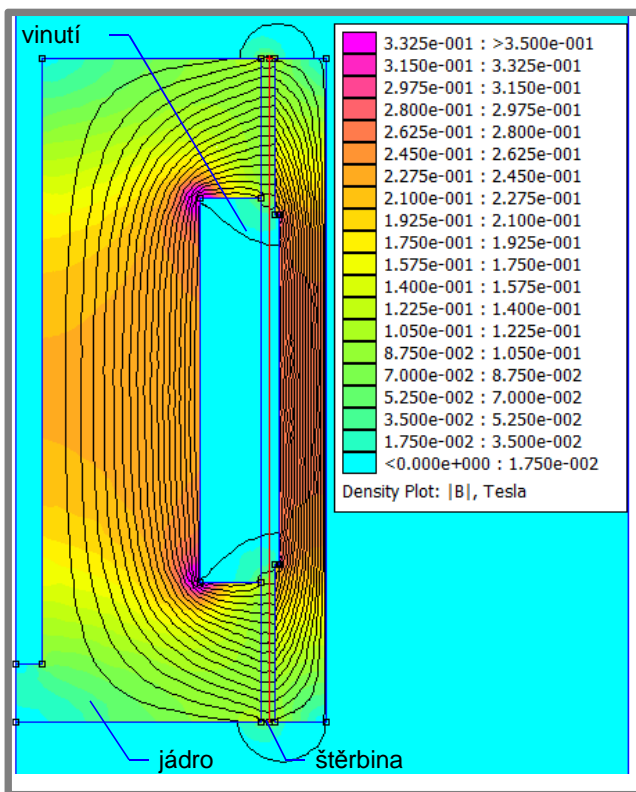
6.1.3 Experiment na zjištění vlivu materiálu na dobu odezvy magnetické indukce ve štěrbině v závislosti na elektrickém proudu

Experiment se skládal ze tří částí:

- Měření magnetické indukce ve štěrbině pístu MR tlumiče v závislosti na stejnosměrném proudu
- Měření odezvy magnetické indukce ve štěrbině pístu MR tlumiče jako odezva na skok el. proudu
- Měření odezvy magnetické indukce ve štěrbině magnetického simulátoru jako odezva na skok el. proudu

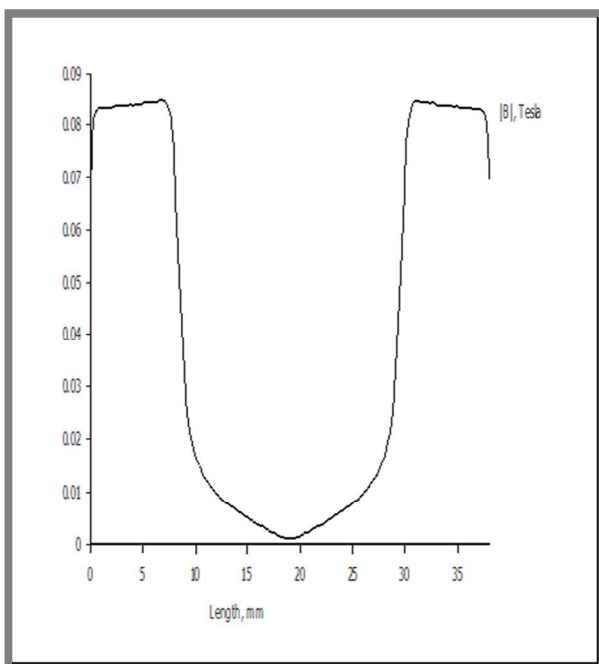
6.1.3.1 Měření magnetické indukce ve štěrbině pístu MR tlumiče

Měření magnetické indukce ve štěrbině pístu v závislosti na stejnosměrném proudu bylo důležité kvůli ověření FEM modelu. Měření probíhala při proudu 1 A. Maximální změřená hodnota magnetické indukce ve štěrbině byla 91 mT, dle modelu je magnetická indukce ve štěrbině 85 mT (obr. 6.6, 6.7).



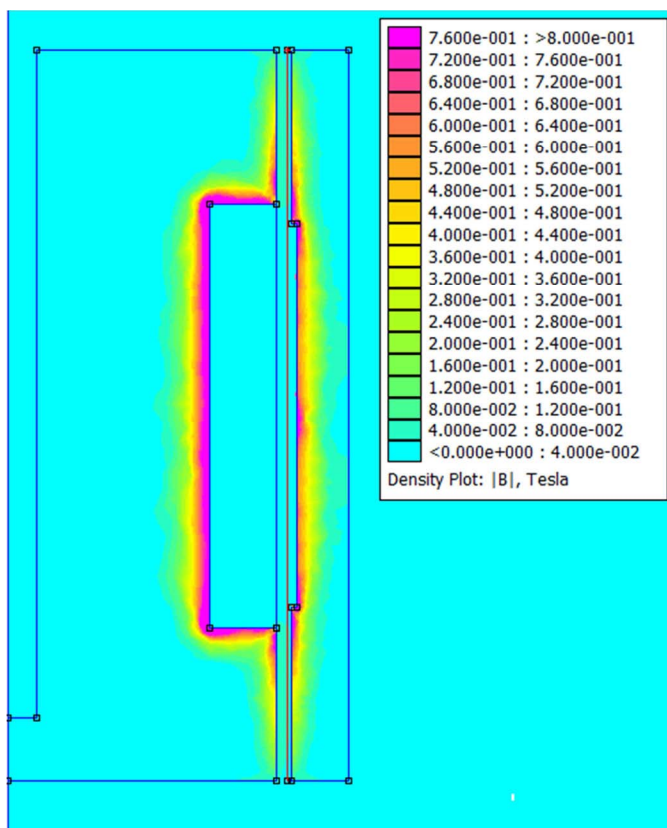
Obr. 6.6: Průběh magnetických siločar v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny, 0 Hz, 1 A

Nepřesnost modelu je přibližně 7%. Může být způsobena volbou materiálu, resp. přesností zvolené B-H křivky. V modelu byla pro materiál jádra použita konstrukční ocel AISI 1018.

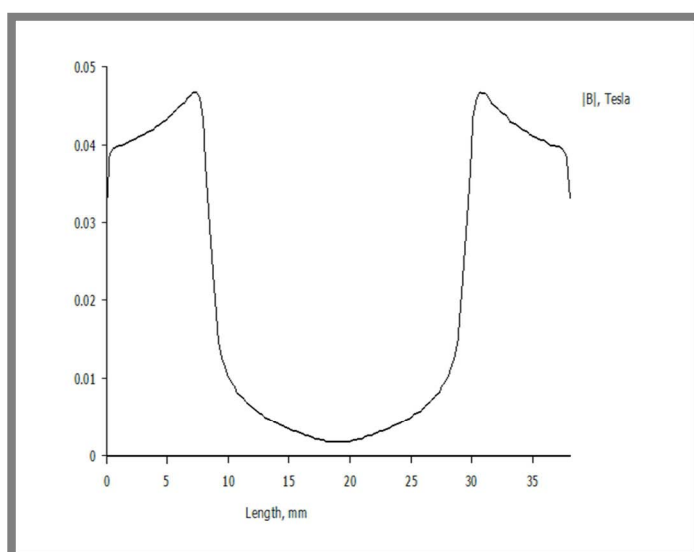


Obr. 6.7: Průběh magnetické indukce ve šterbině cívky MR tlumiče 0Hz, 1A

Obrázky 6.8 a 6.9 zobrazují simulaci rozložení magnetické indukce v jádře, pokud je cívka napájena harmonickým proudem o velikosti 1 A a frekvenci 200Hz. Z obrázku 6.8 je zřejmé, že největší magnetická indukce (způsobena vířivými proudy) je v jádře v blízkosti cívky, naopak ve šterbině dochází k poklesu magnetické indukce na průměrnou hodnotu 43 mT (obr. 6.9).

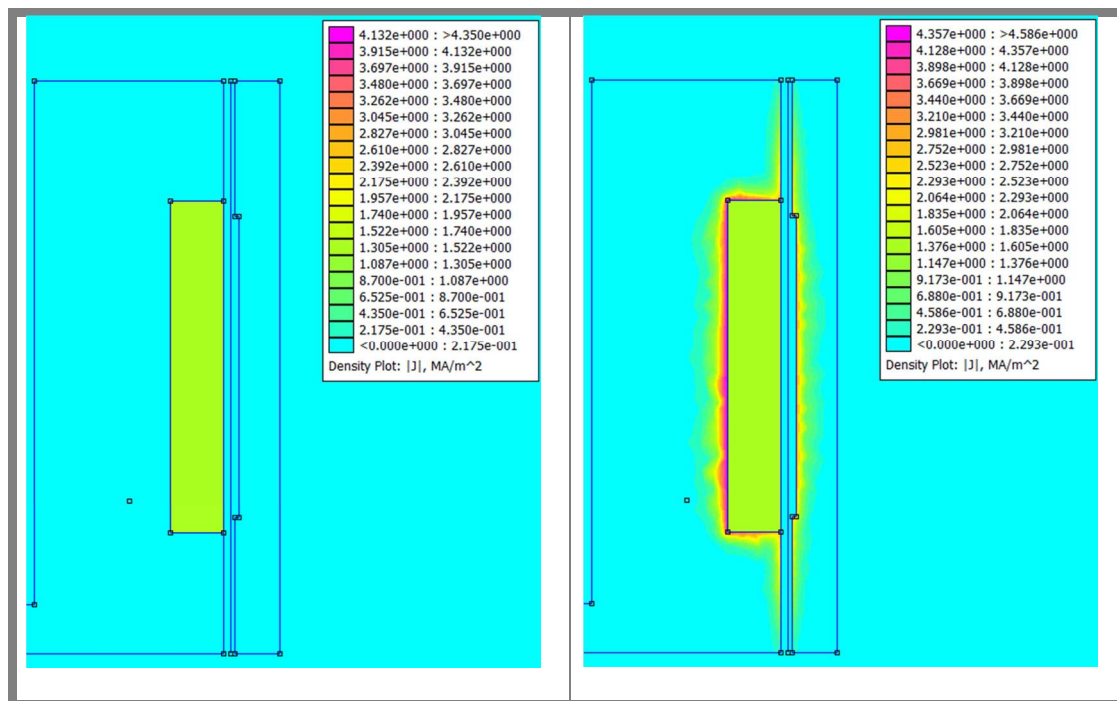


Obr. 6.8: Rozložení magnetické indukce v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny, 200 Hz, 1 A

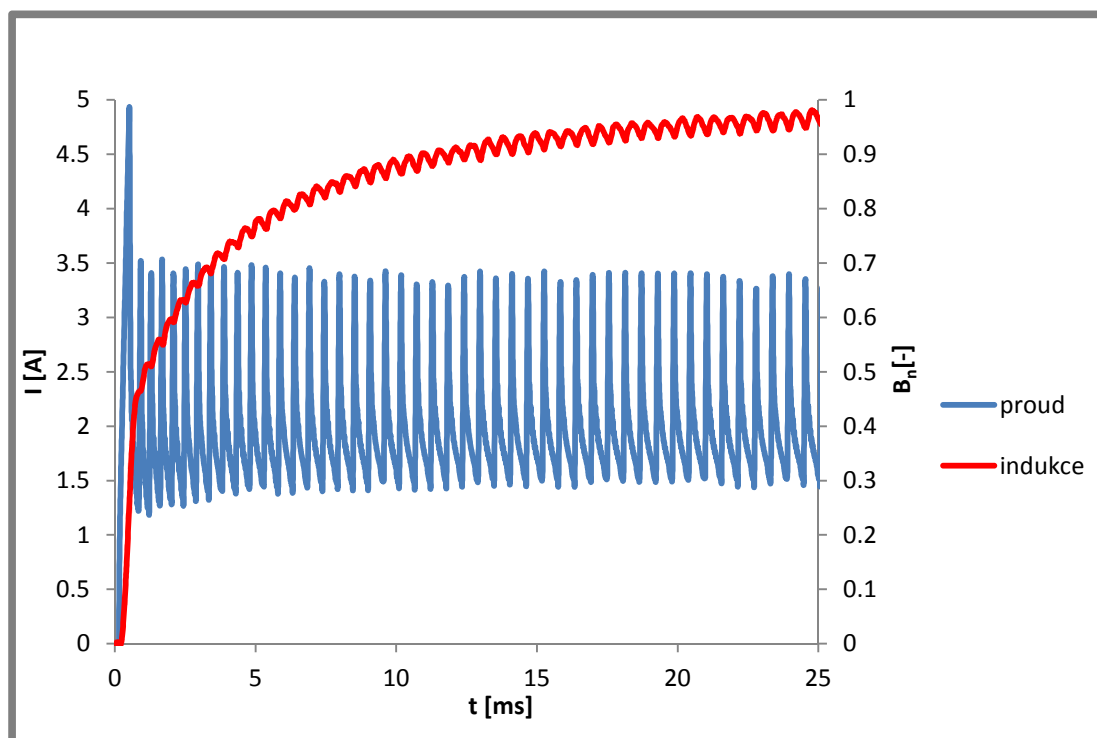


Obr. 6.9: Průběh magnetické indukce ve šterbině cívky MR tlumiče 200Hz, 1A

obr. 6.10 zobrazuje proudovou hustotu. Pokud je elektrický proud cívkou stacionární, je patrné, že proud protéká čistě cívkou. Pokud je elektrický proud cívkou nestacionární, je patrné, že v jádře v blízkosti cívky jsou generovány vířivé proudy, jejichž proudová hustota je značně vyšší než proudová hustota v cívce.



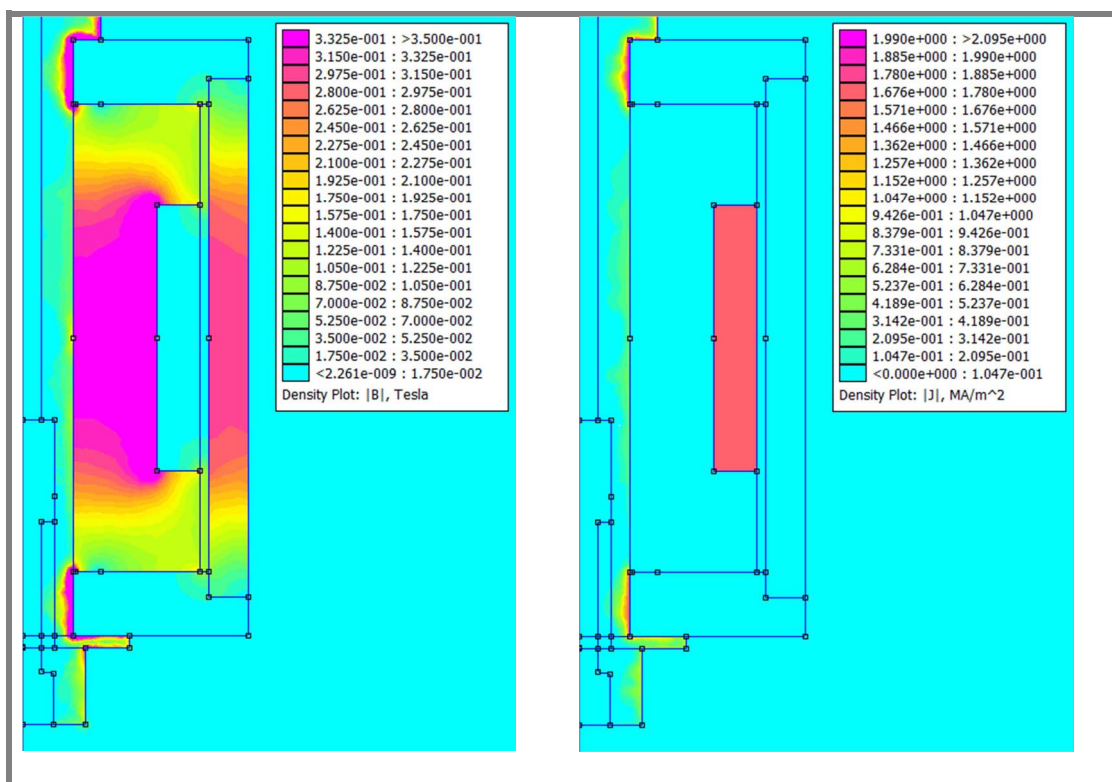
Obr. 6.10: Rozložení proudové hustoty v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny pro proud cívkou 1 A a frekvenci 0 Hz (vlevo) a 200 Hz (vpravo)



Obr. 6.11: Časová odezva magnetické indukce ve štěrbině pístu MR tlumiče na skok řídicího napětí

Pro ověření vlivu vířivých proudů byl proveden experiment, který měl zjistit závislost průběhu magnetické indukce na elektrickém proudu. Pokud by v jádře vířivé proudy nevznikaly, do oblasti nasycení B-H křivky by musely mít tyto dvě veličiny shodný průběh. Obr. 6.11 ale ukazuje, že průběh magnetické indukce je od průběhu elektrického proudu zcela rozdílný.

Na základě modelu byl navržen modifikovaný píst z feritového materiálu N87. Výsledky simulace (obr. 6.12) ukazují, že pokud se na jádro použije tento materiál, jsou při frekvenci 200 Hz vířivé proudy v jádře zcela eliminovány. Magnetická indukce ve štěrbině se vzduchem je 102 mT. Pokud ale bude píst tlumiče ponořen do MR kapaliny, magnetická vodivost obvodu bude vyšší a při vyšších proudech dojde k nasycení. Při proudu 2 A vychází magnetická indukce ve štěrbině přibližně 303 mT, zatímco pro originální píst a proud 2 A vychází magnetická indukce ve štěrbině 450 mT. S feritovým jádrem je tedy očekáván regulační rozsah MR tlumiče zhruba o 1/3 oproti variantě s ocelovým jádrem.

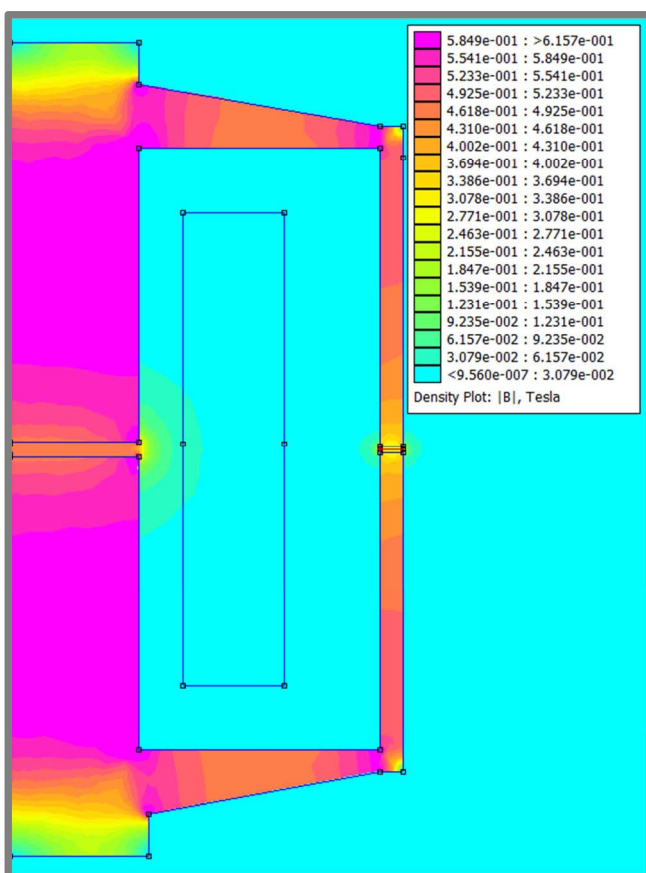


Obr. 6.12: Rozložení proudové hustoty v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny pro proud cívkou 1 A a frekvenci 0 Hz (vlevo) a 200 Hz (vpravo)

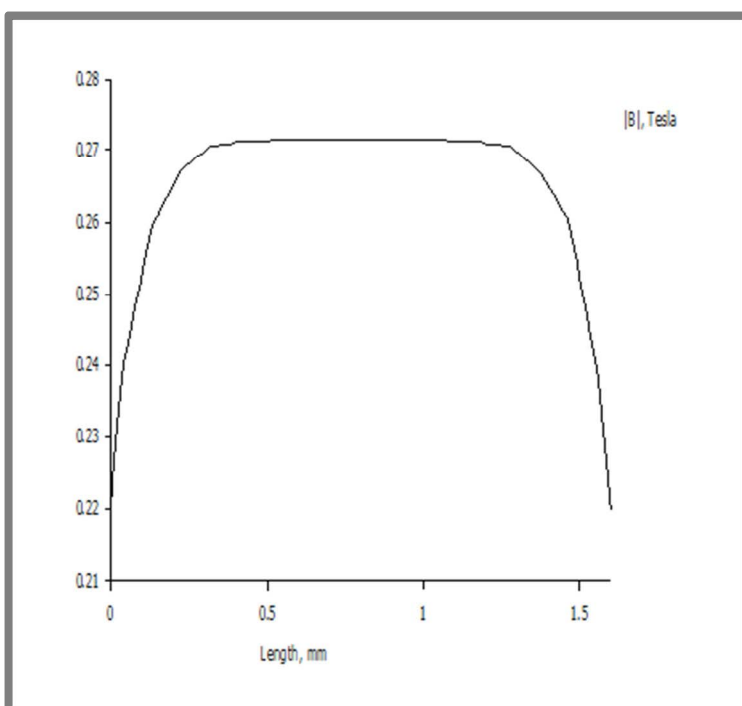
6.1.3.2 Měření průběhu magnetické indukce v simulátoru magnetického obvodu z feritového materiálu

Na obrázku 6.13 je znázorněna simulace rozložení magnetické indukce v simulátoru magnetického obvodu. Na obrázku 6.14 je pak odpovídající rozložení magnetické indukce ve štěrbině. Pro střídavý proud 2 A o frekvenci 200 Hz je rozložení magnetické indukce velmi podobné, jen velikost magnetické indukce ve štěrbině je ve srovnání se stejnosměrným proudem vyšší – 302 mT. Tento jev je pravděpodobně

způsoben nelineární B-H křivkou v pracovní oblasti. Program FEMM také umožňuje určit indukčnost cívky, která vyšla 27 mH.



Obr. 6.13: Průběh magnetických siločar v jádře magnetického simulátoru, 0Hz, 2A.

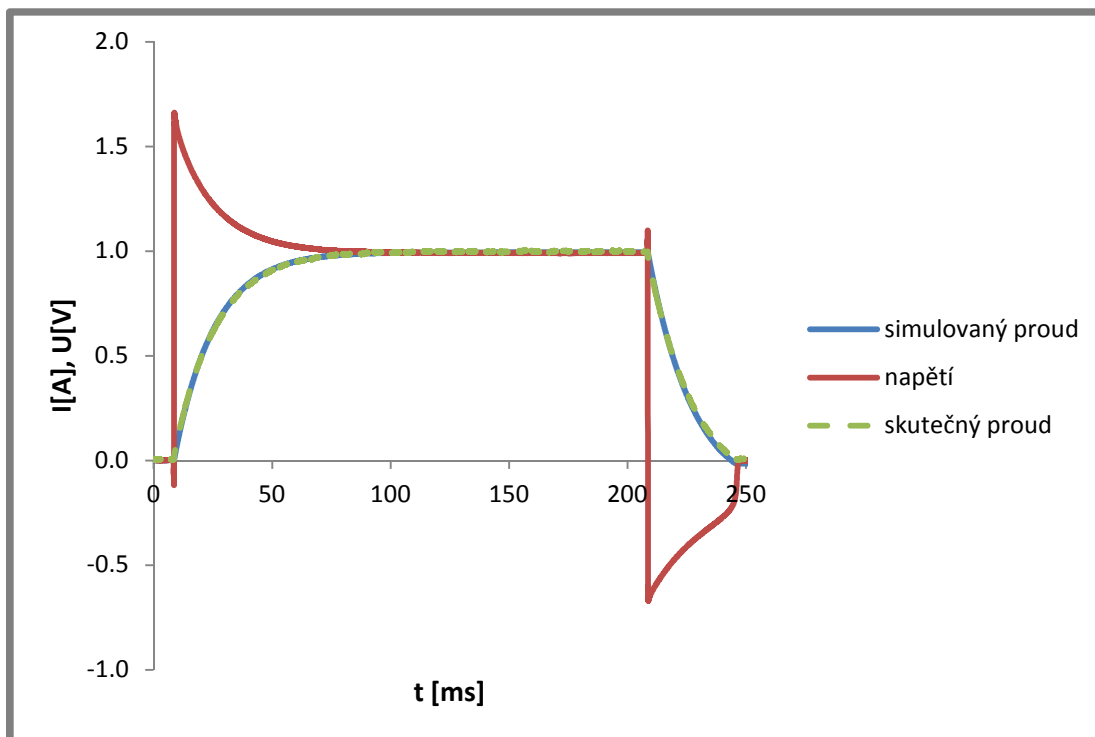


Obr. 6.14: Průběh magnetické indukce ve štěrbině 200Hz, 1A

Pokud se cívka modeluje dynamickou soustavou prvního řádu, je indukčnost cívky z ferritového materiálu určena na 27 mH. Hodnota indukčnosti je zjišťována z odezvy na skok napětí.

$$i(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt, \Rightarrow L = \frac{1}{i(t)} \int u(t) dt \quad (6.1)$$

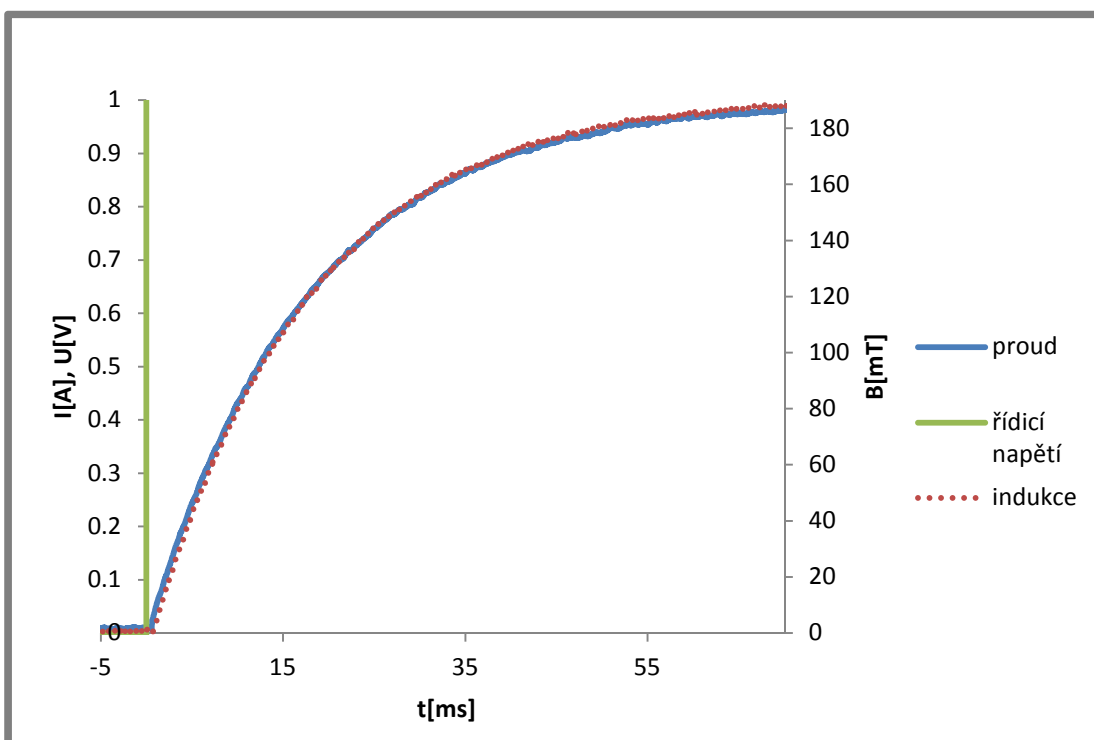
Průběh skutečného proudu a proudu vypočítaného z modelu cívky s indukčností 27 mH a odporu cívky $R_L = 0.996 \Omega$ je na obr. 6.15.



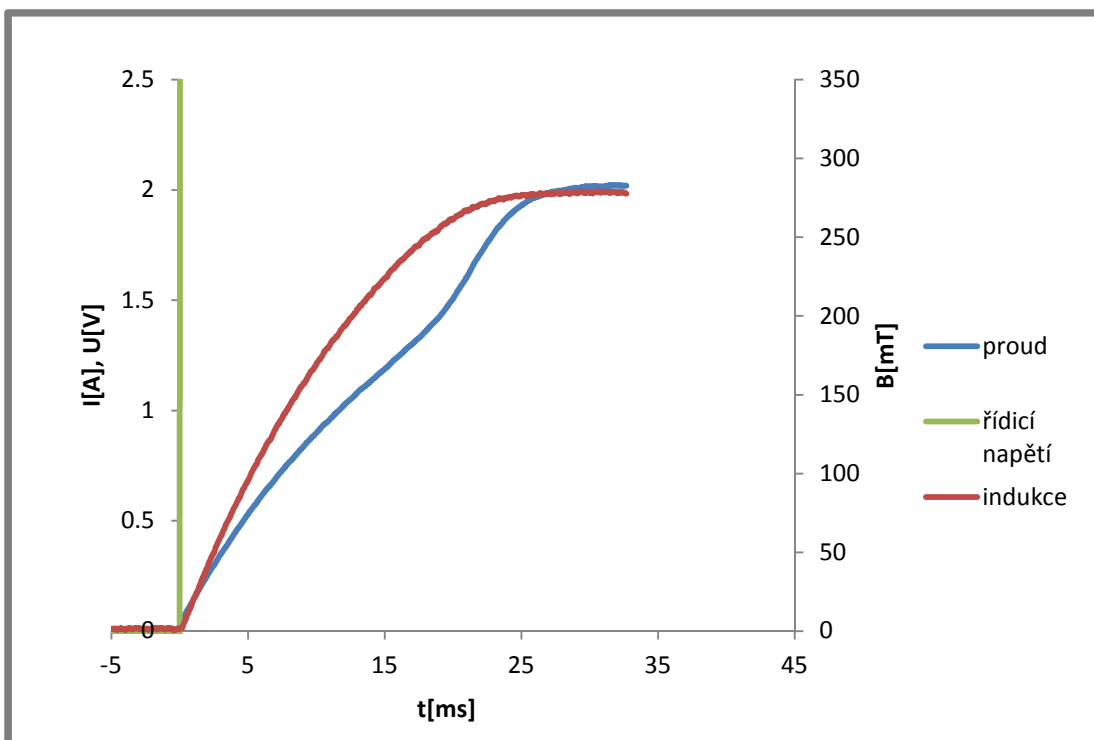
Obr. 6.15: Odezva proudu feritovou cívkou na skok napětí – porovnání skutečného a simulovaného průběhu

Z obrázku je patrné, že shoda průběhu proudu modelu a reálné cívky je velmi dobrá. Obrázky 6.16, 6.17 zobrazují nárůst napětí a magnetické indukce ve štěrbině jako odezvu na jednotkový skok řídicího napětí do PWM regulátoru v napěťovém režimu. Pokud je maximální proud 1 A (obr. 6.16), je patrné, že magnetická indukce přesně sleduje elektrický proud a časová konstanta je 17.6 ms. Obrázek 6.17 zobrazuje odezvy pro maximální proud 2A. V tomto případě je zřejmé, že časová konstanta náběhu proudu je 15,8 ms, časová konstanta náběhu magnetické indukce ve štěrbině je 10,3 ms. Důvodem rychlejší doby odezvy magnetické indukce než odezvy proudu je nelineární B-H křivka materiálu, a tím i změna relativní permeability v závislosti na magnetické indukci v jádře. Pro nižší elektrický proud je permeabilita vyšší a magnetická indukce vzrůstá v závislosti na proudu rychle. Pro vyšší proudy je relativní permeabilita nižší, a pokud se proud zvětší o stejný přírůstek, vzroste magnetická indukce méně. Za bodem nasycení se magnetická indukce s nárůstem proudu téměř nebude měnit. Tento jev také vysvětluje, proč je celková časová

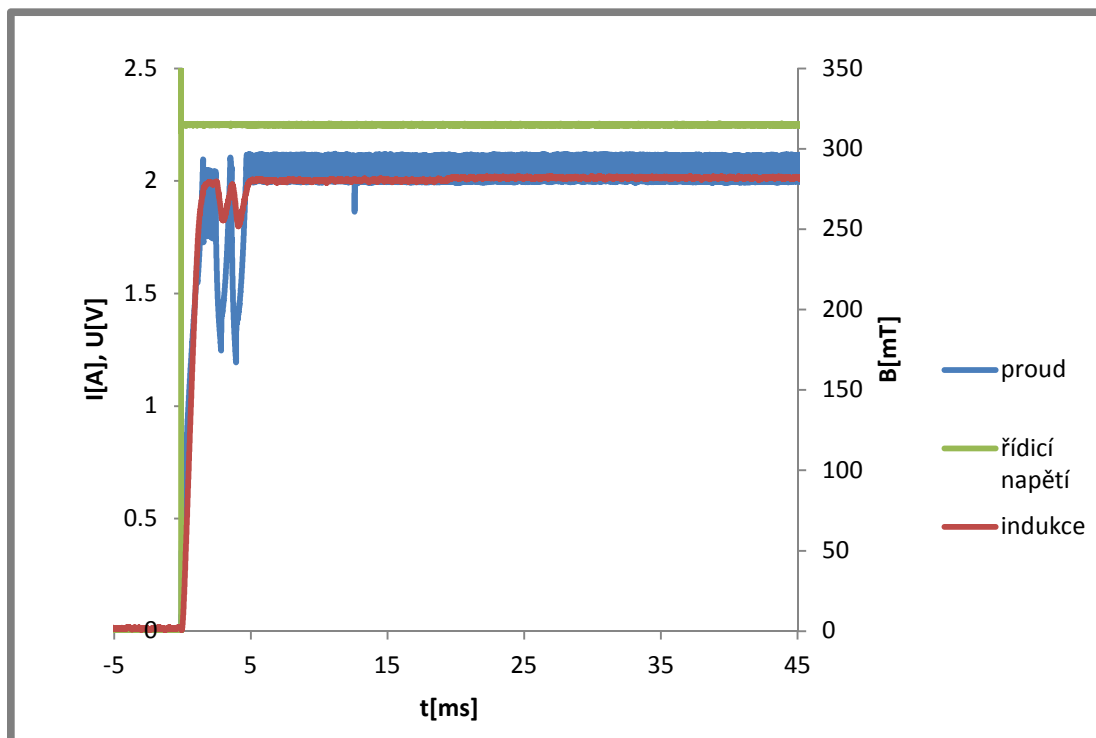
odezva MR tlumiče rychlejší pro vyšší proudy, jak ukázala měření v kapitole 2.1 a měření týmu Ahmadiana [17].



Obr. 6.16: Časová odezva el. proudu a mag. Indukce na skok řídicího napětí v napěťovém režimu, max. proud 1 A.

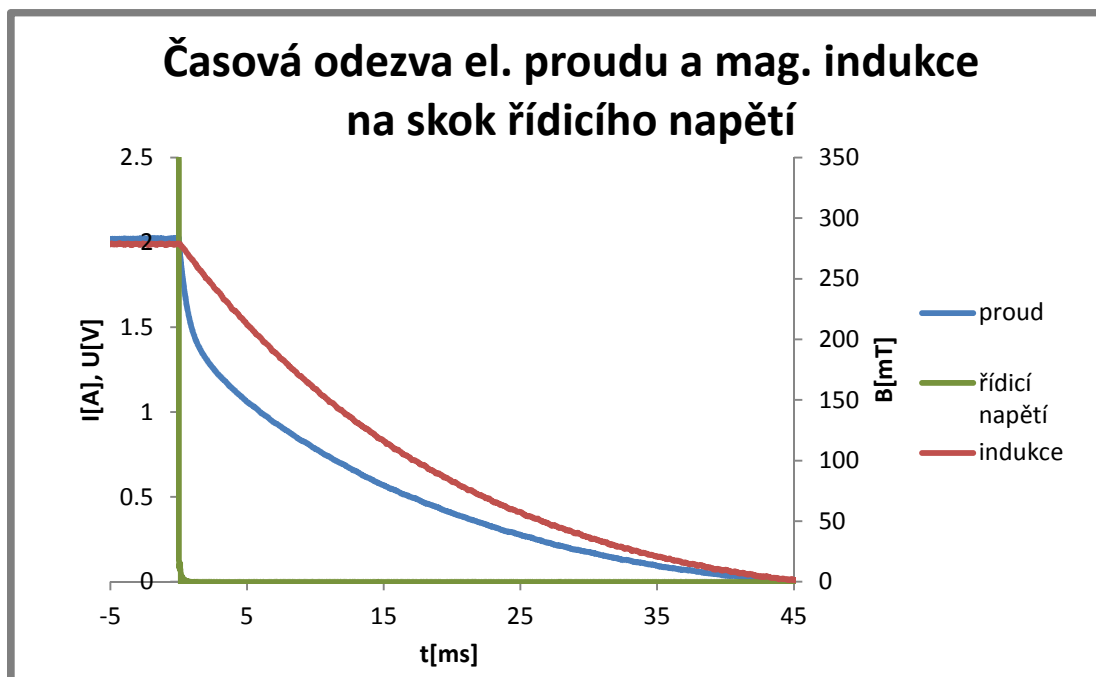


Obr. 6.17: Časová odezva el. proudu a mag. Indukce na skok řídicího napětí v napěťovém režimu, max. proud 2 A..

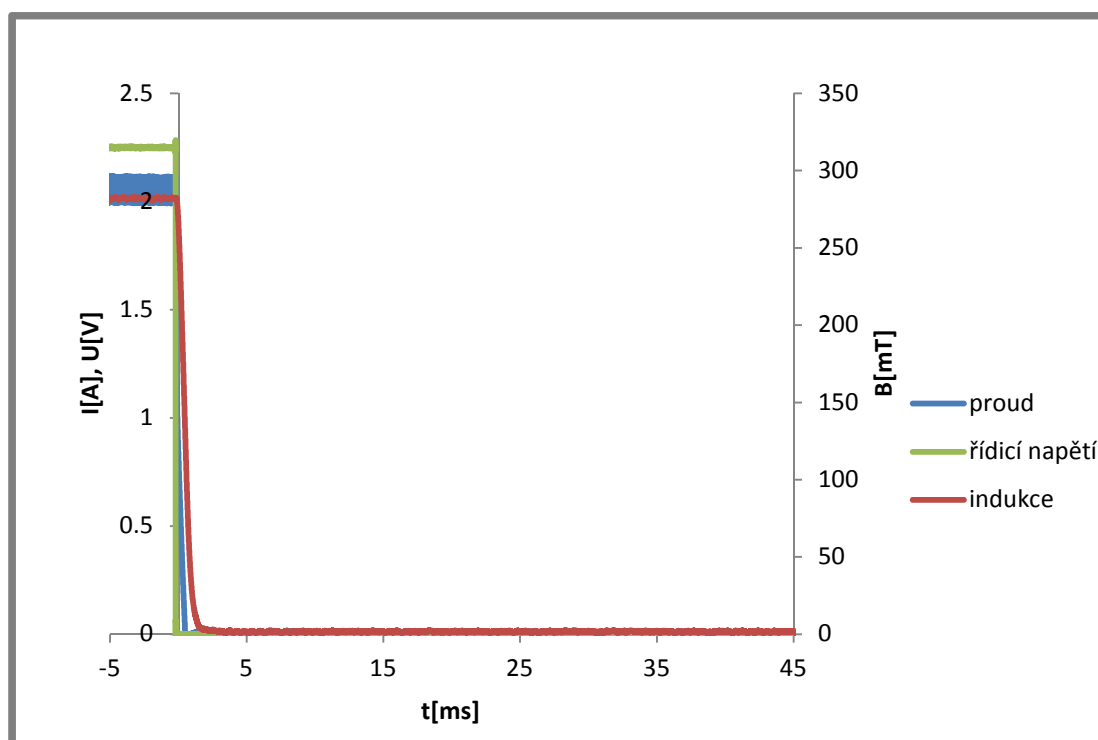


Obr. 6.18: Časová odezva el. proudu a mag. indukce na skok řídicího napětí – proudový režim

obr. 6.18 zobrazuje odezvu elektrického proudu a magnetické indukce byl-li PWM regulátor přepnut do proudového režimu. V tomto případě je patrné, že nárůst magnetické indukce ve štěrbině je několikanásobně kratší než v napěťovém režimu. Změřená časová konstanta náběhu proudu je 0,79 ms, časová konstanta náběhu magnetické indukce je v tomto režimu 0,78 ms.



Obr. 6.19: Časová odezva el. proudu a mag. indukce na skokový pokles řídicího napětí – napěťový režim



Obr. 6.20: Časová odezva el. proudu a mag. indukce na skokový pokles řídicího napětí – proudový režim

Obrázky 6.19 a 6.20 porovnávají pokles proudu a elektrické indukce jako odezvu na skok řídicího napětí. Opět je patrné několikanásobné zkrácení časových konstant el. proudu a magnetické indukce.

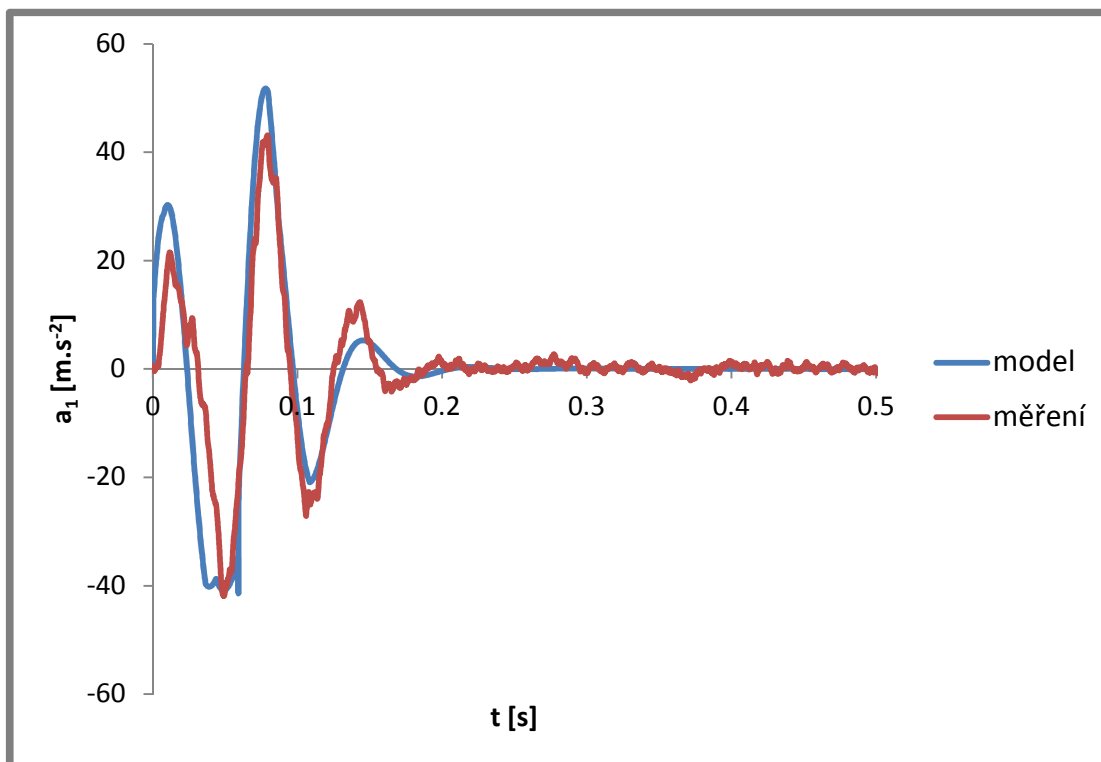
Experimenty potvrdily vliv vířivých proudů na vznik magnetického pole ve štěrbině pístu MR tlumiče. Zároveň byla ověřena funkčnost proudového regulátoru.

V případě pístu MR tlumiče vyrobeného z elektricky vodivého materiálu není možné dosáhnout rychlé časové odezvy ani za použití navrhovaného proudového regulátoru. Pokud je magnetický obvod navržen z magneticky vodivého a elektricky nevodivého materiálu, s optimálním proudovým regulátorem je možné dosáhnout časové odezvy magnetické indukce ve štěrbině v kratším čase, než je časová odezva MR kapaliny na změnu magnetické indukce ve štěrbině.

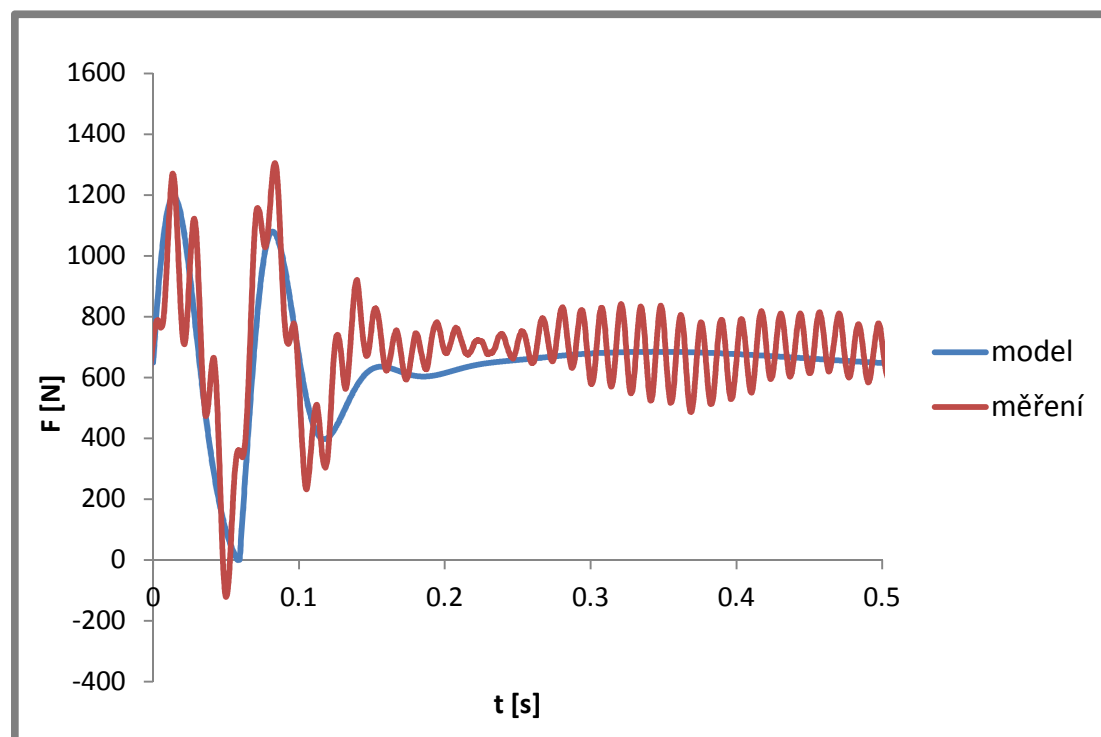
6.2 Ověření Fyzikálního závěsu kola s virtuálním modelem pomocí přejezdové zkoušky 6.2

Obr. 6.21 zobrazuje průběh zrychlení neodpružené hmoty přejezdové zkoušky pro rychlost 10 km/h (červená křivka) a průběh zrychlení neodpružené hmoty z modelu experimentálního vozíku (modrá křivka). Z grafu vyplývá, že výsledky z modelu se velmi dobře shodují s výsledky z experimentu. Obrázek 6.22 zobrazuje průběh přítláčné síly na simulátor vozovky (při proudu tlumičem 1 A). Z průběhů je patrné, že na průběhu síly z reálného experimentálního vozíku jsou namodulovány další frekvence (vlastní frekvence simulátoru vozovky). Pro vyhodnocení směrodatné

odchylky je proto signál vyfiltrován filtrem typu dolní propust (10. řád, frekvence filtru 50Hz).



Obr. 6.21: Porovnání zrychlení neodpružené hmoty modelu a měření experimentálního vozíku



Obr. 6.22: Porovnání přítláčné síly na vozovku modelu a měření experimentálního vozíku

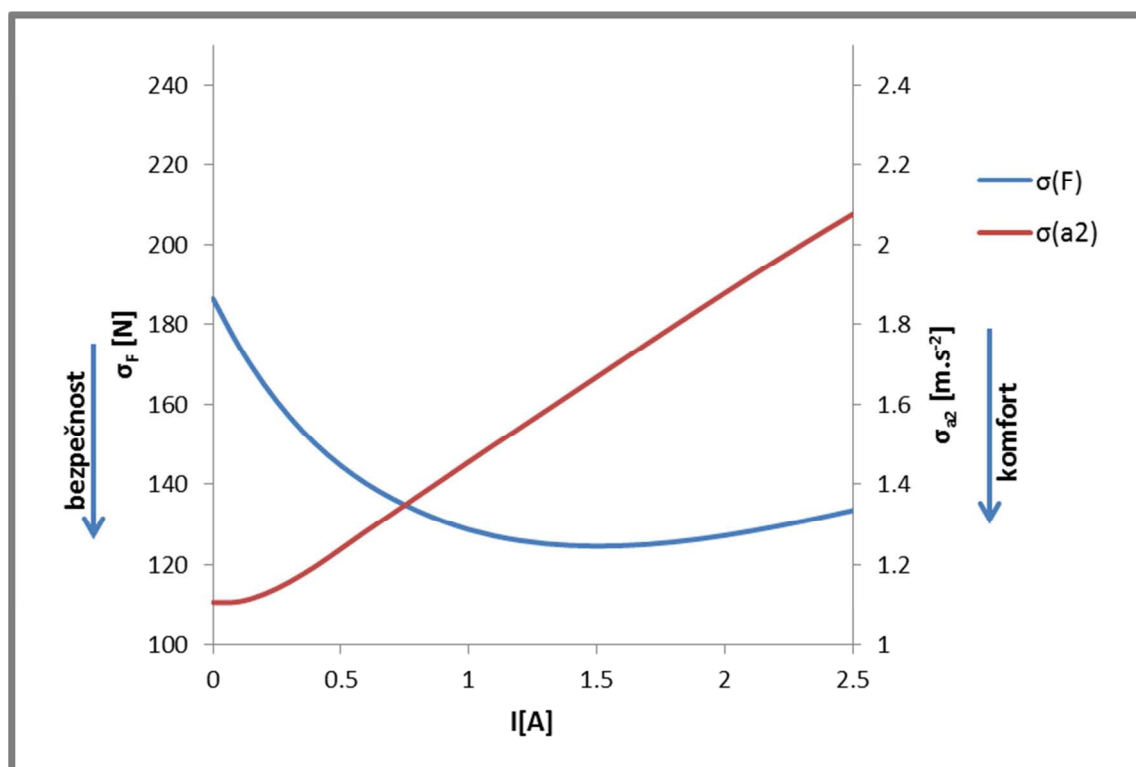
6.3 Porovnání efektivity algoritmů řízení tlumiče

Efektivita semiaktivních algoritmů řízení MR tlumiče závisí na vlastnostech tlumiče s proměnnou charakteristikou. Důležitý je zejména regulační rozsah semiaktivního tlumiče a jeho dynamika. Vliv těchto parametrů je testován na virtuálním modelu experimentálního vozíku. Model byl ověřen několika měřeními s různým nastavením tlumiče v adaptivním pasivním režimu a měřeními s modifikovaným algoritmem Groundhook.

Porovnávány byly nejpoužívanější algoritmy řízení – on/off Skyhook, on/off Groundhook. Vzhledem k obtížné praktické realizaci algoritmu Groundhook byl navržen algoritmus Modifikovaný groundhook, který by měl umožnit zlepšení přítlaku, ale jeho praktická realizace je oproti Groundhook algoritmu výrazně jednodušší.

6.3.1 Efektivita pasivního způsobu řízení tlumiče

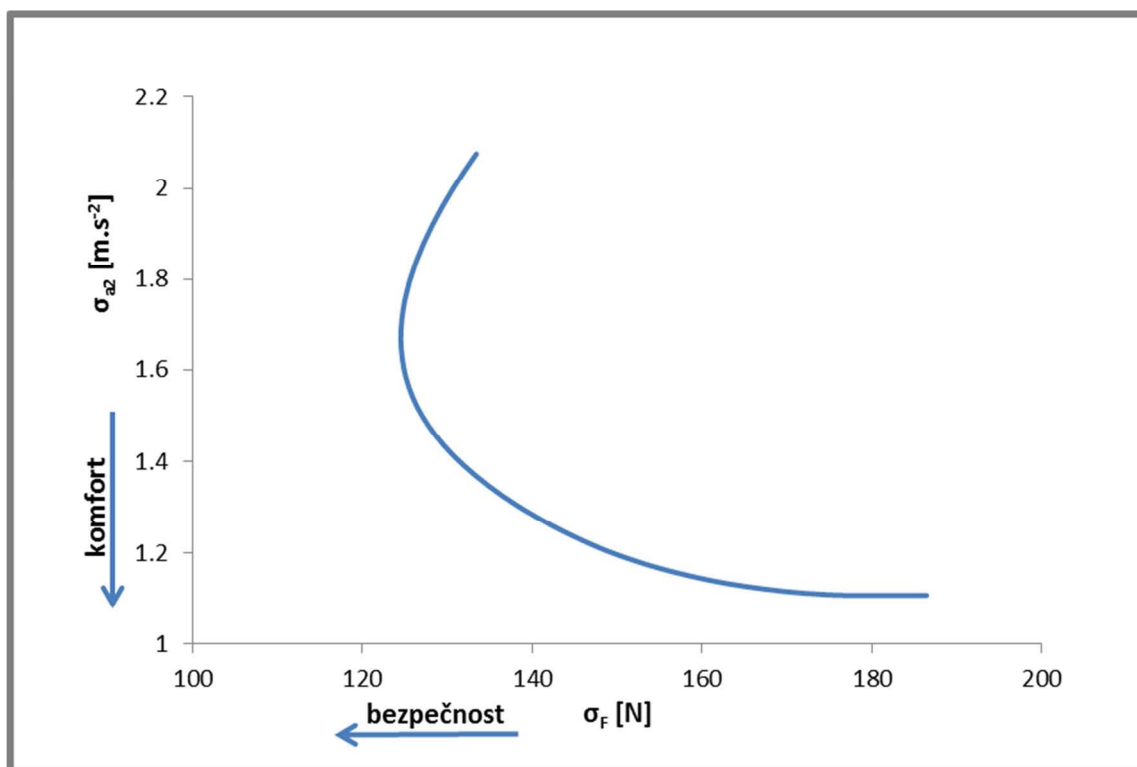
Pasivní způsob odpružení je nejjednodušší a nejvíce rozšířený. Pasivní varianta odpružení neumožňuje měnit parametry odpružení během jízdy, resp. jedná-li se o adaptivní pasivní způsob odpružení tlumení tlumiče je možné měnit, ale vzhledem k periodě hlavních rezonančních frekvencí systému jen velmi pomalu. Tento způsob je ale také konstrukčně nejjednodušší a tím i nejlépejší.



Obr. 6.23: Jízdní bezpečnost a komfort v závislosti na proudu MR tlumičem – simulace

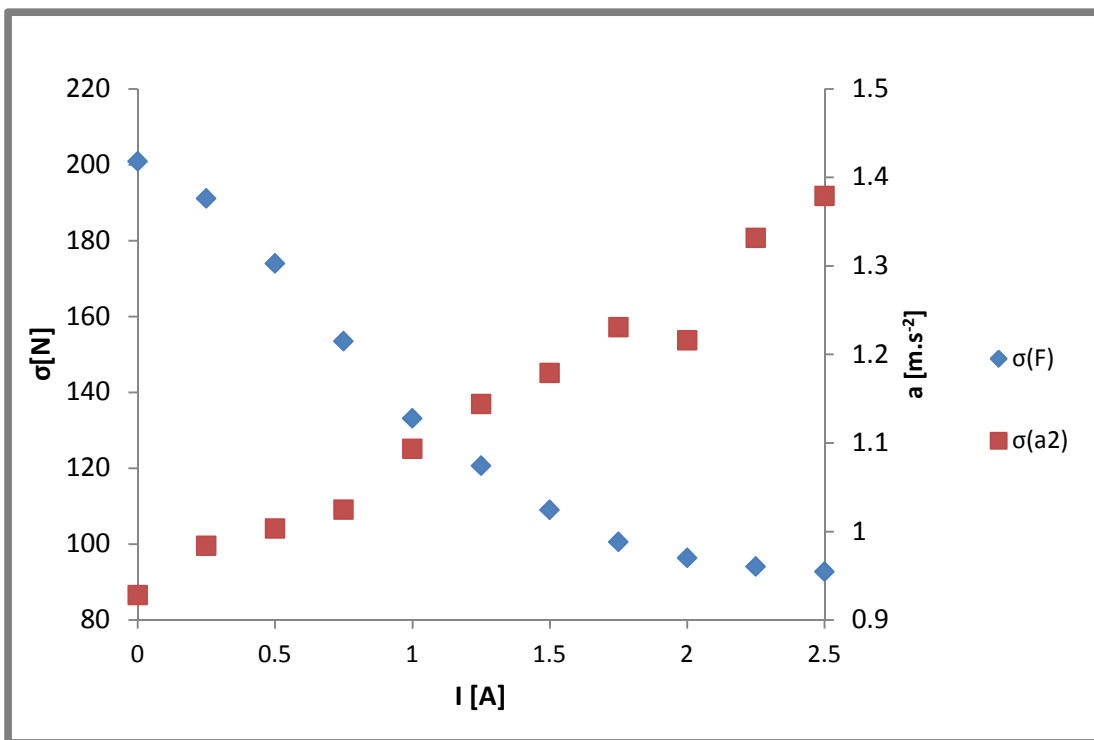
Obr. 6.23 zobrazuje simulaci závislosti jízdního komfortu a bezpečnosti jízdy na simulátoru vozovky při rychlosti 10 km/h v závislosti na nastavení tlumiče.

S rostoucím proudem do tlumiče (zvyšování tlumení) se snižuje komfort (roste směrodatná odchylka zrychlení odpružené hmoty) a do proudu 1,6 A se zvyšuje bezpečnost jízdy (klesá směrodatná odchylka síly na vozovku). Na obr. 6.24 je vynesena závislost jízdního komfortu na bezpečnosti jízdy. Z těchto dvou grafů je patrné, že pracovní rozsah tlumiče je od 0 A do 1,6 A. Nemá smysl nastavovat vyšší proud než 1,6 A, protože pokud se stále zvyšuje tlumení MR tlumiče, začne se zhoršovat jak jízdní pohodlí, tak i bezpečnost jízdy. Z charakteristiky také vyplývá, že další snižování tlumicího koeficientu už by bylo nesmyslné, protože komfort se již nezvyšuje, ale zhoršuje se přítlak kola na vozovku. Dá se tedy říci, že pro přejezd nerovností typu příčný práh je rozsah MR tlumiče zvolen vhodně, protože pokrývá jak variantu s nejvyšším dosažitelným komfortem (proud 0,2 A), tak i variantu s největším dosažitelným přítlakem (1,6 A).

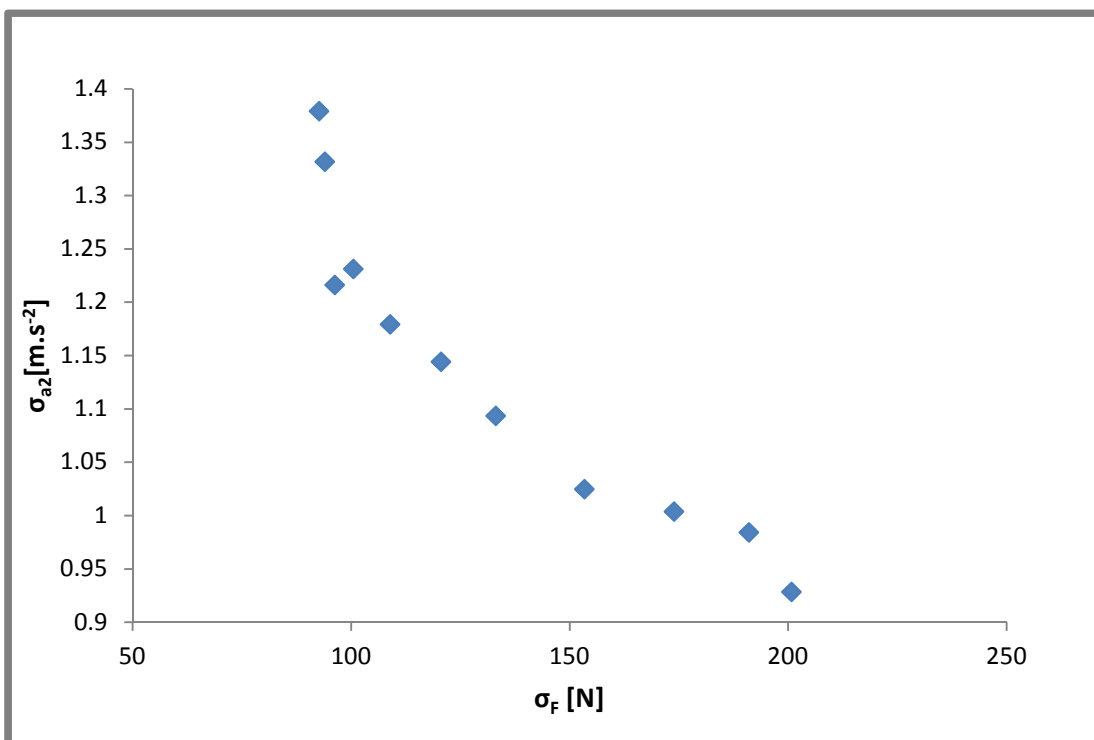


Obr. 6.24: Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti jízdy – výsledky z modelu

Obr. 6.25, 6.26 zobrazují změřenou závislost jízdního komfortu a bezpečnosti jízdy na simulátoru vozovky při rychlosti 10 km/h v závislosti na nastavení tlumiče. Průběh směrodatné odchylky zrychlení odpružené hmoty je velmi podobný se simulací, absolutní hodnoty zrychlení se liší. Tyto rozdíly jsou způsobeny filtrací signálu čidla zrychlení odpružené hmoty filtrem typu pásmová propust s dolní frekvencí 0,4 Hz (vyloučení SS složky) a horní frekvencí 35 Hz (vyloučení vlastních frekvencí dílů experimentálního vozíku). Rozdíly mezi simulací experimentálního vozíku a reálným měřením jsou zejména při nulovém proudu. V případě měření se zdá, že komfort narůstá s klesajícím proudem až po stav bez proudu. Tyto rozdíly mohou být způsobeny pasivními odpory v uchycení kyvné vidlice experimentálního vozíku, které způsobují přidavné tlumení. To je v modelu zanedbáno.



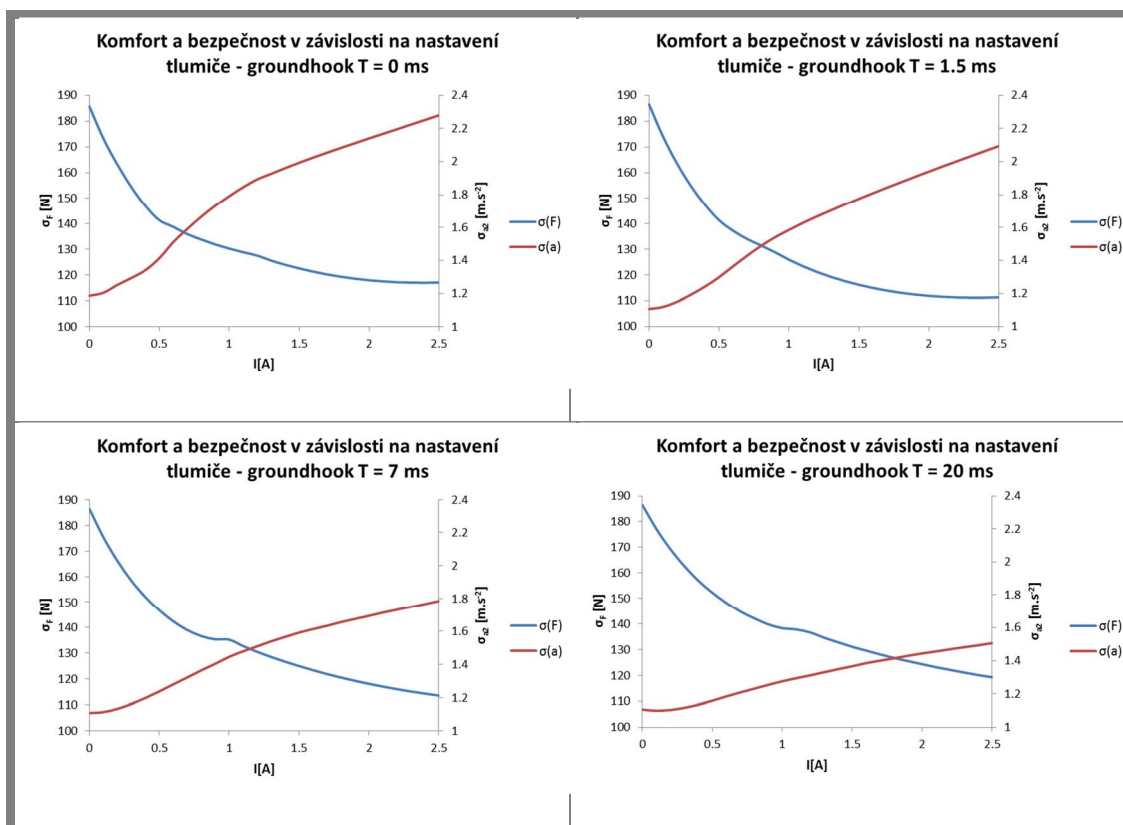
Obr. 6.25: Jízdní bezpečnost a komfort v závislosti na proudu MR tlumičem – měření



Obr. 6.26: Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti jízdy – měření na experimentálním vozíku

6.3.2 Efektivita semiaktivního algoritmu Groundhook

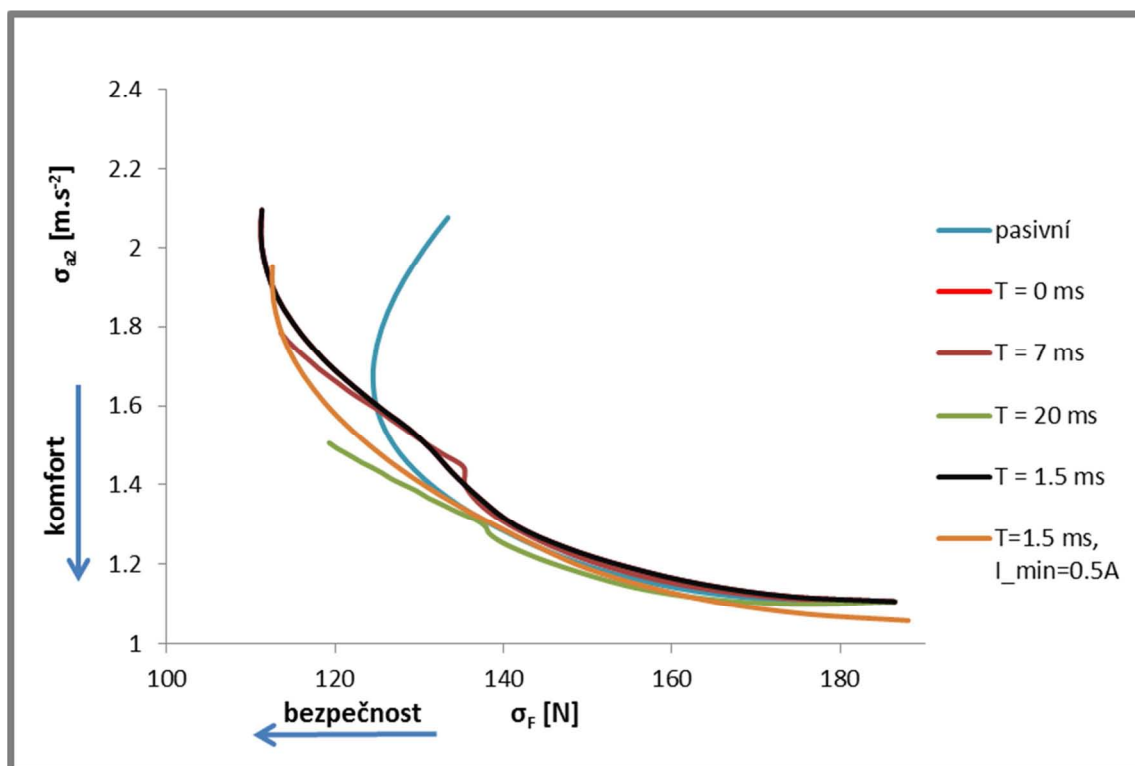
Obrázky 6.27 a 6.28 porovnávají kvalitu odpružení algoritmu Groundhook s MR tlumičem s různou časovou konstantou. První varianta je Groundhook algoritmus s MR tlumičem, který je schopen se přepnout z jedné charakteristiky do druhé okamžitě. Druhý obrázek odpovídá časové konstantě tlumiče $T = 1.5$ ms, což koresponduje s hodnotou, o které se předpokládá, že je dosažitelná v případě použití feritového materiálu na obvod jádra cívky MR tlumiče. Třetí varianta pracuje s časovou konstantou 7 ms, což je hodnota, které je možné dosáhnout za použití stávající konstrukce MR tlumiče a PWM regulátoru. Čtvrtý obrázek odpovídá variantě, kdy je MR tlumič řízen v napěťovém režimu.



Obr. 6.27: Porovnání rozptylu zrychlení odpružené hmoty a přítlaku na vozovku v závislosti na nastavení MR tlumiče resp. Groundhook algoritmu

Je zřejmé, že pro nízké maximální proudy nemá smysl algoritmus Groundhook používat, protože body leží nad křivkou pro pasivní odpružení (obr. 232). Oproti pasivnímu odpružení je Groundhook algoritmus schopen dosáhnout vyšší bezpečnosti (pro vyšší proudy ve stavu b_{2H}). Pokud je časová konstanta MR tlumiče 1.5 ms, efektivita algoritmu je téměř stejná jako by časová konstanta tlumiče byla nulová (černá a červená křivka jsou v zákrytu). S prodlužující se časovou konstantou ale klesá maximální dosažitelná bezpečnost jízdy. Pokud má MR tlumič časovou konstantu 0 nebo 1.5 ms, je patrné, že proud větší než 2 A a tím i vyšší tlumení MR tlumiče již nezlepšuje přítlak, pouze zhoršuje komfort. U algoritmu Groundhook má značný vliv i nastavení tlumiče ve stavu s nízkým tlumením. Pokud je proud ve stavu s nízkým tlumením nastaven na hodnotu 0.5A, je patrné, že při zachování přítlaku je možné pro vyšší proudy ve stavu s vysokým tlumením dosáhnout lepšího komfortu.

Optimální nastavení MR tlumiče pro přejezd nerovnosti typu příčný práh je tedy 0.5 A pro b_{2L} a 2 A pro b_{2H} .



Obr. 6.28: Porovnání komfortu a bezpečnosti v závislosti na nastavení tlumiče (simulace algoritmu Groundhook)

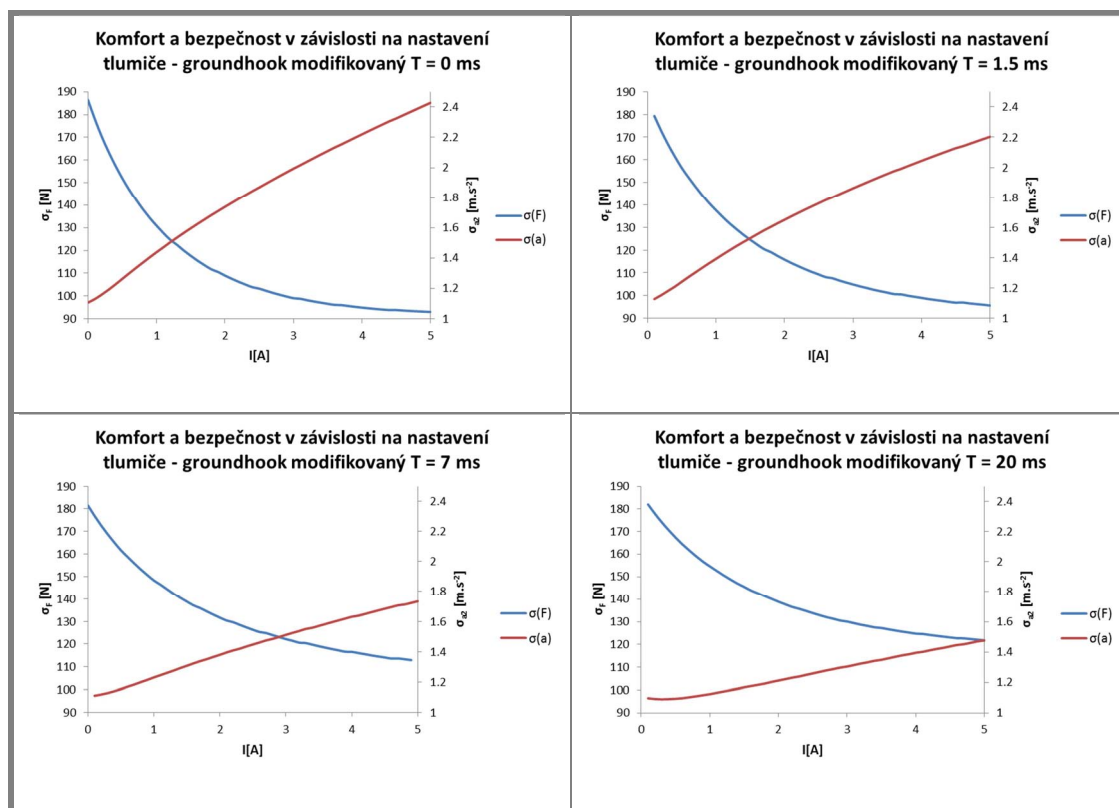
V praxi je ale tento algoritmus velmi složitě využitelný. Problémem je získání rychlosti neodpružené hmoty vůči vozovce. V laboratorních podmínkách je možné použít laserový snímač vzdálenosti, v reálném nasazení se kvůli vysoké pravděpodobnosti rychlého znečištění snímače nedá s tímto čidlem počítat. Proto byl navržen modifikovaný Groundhook algoritmus, který by měl také zvyšovat bezpečnost jízdy. Tento algoritmus ale místo relativní rychlosti neodpružené hmoty vůči vozovce využívá pouze čidlo zrychlení na neodpružené hmoty a čidlo zdvihu tlumiče.

6.3.3 Efektivita semiaktivního algoritmu Modifikovaný groundhook

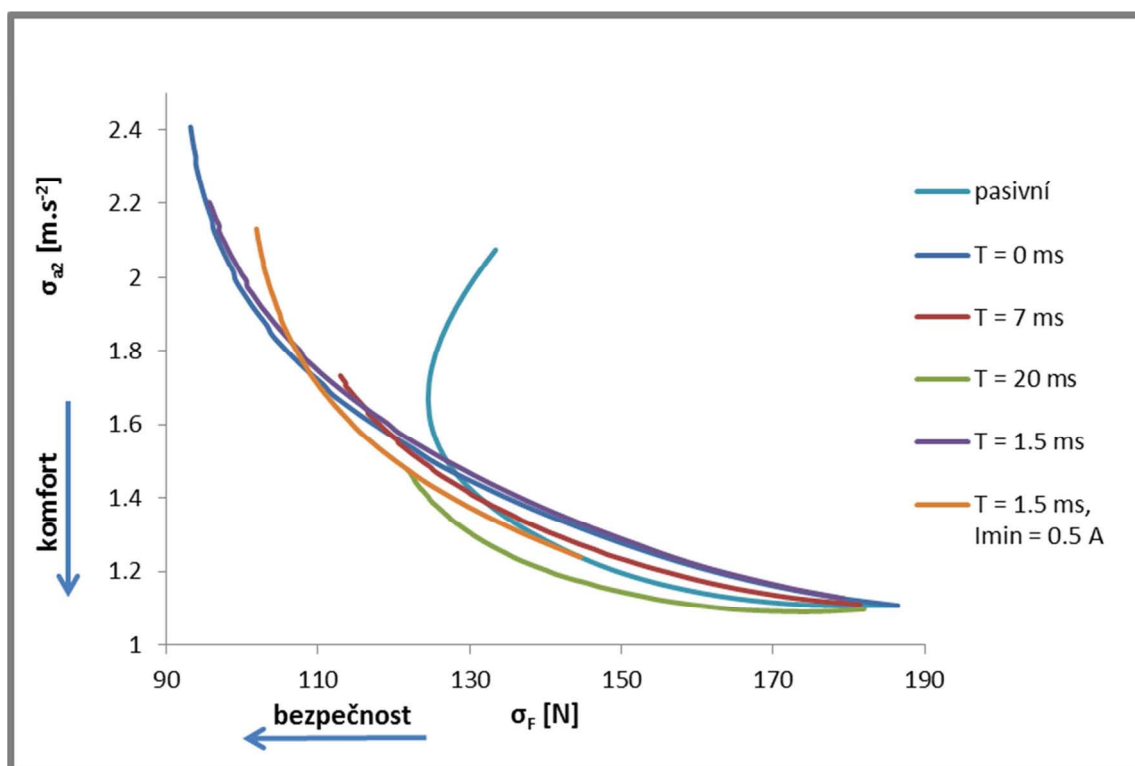
Obrázky 6.29 a 6.30 porovnávají kvalitu odpružení algoritmu Modifikovaný groundhook s MR tlumičem s různou časovou konstantou.

Z obrázků vyplývá, že pokud je časová konstanta MR tlumiče krátká (menší než 1.5 ms), zajistí algoritmus pro vyšší proudy výrazně vyšší bezpečnost jízdy oproti pasivnímu nastavení. Naopak pro nižší proudy je při stejné míře bezpečnosti horší komfort, než je tomu u pasivního nastavení, a tak tedy nemá smysl tento algoritmus v této pracovní oblasti používat. Zajímavá je varianta, kdy je nastaven minimální proud do tlumiče 0.5 A. V tomto případě je pak komfort pro různé bezpečnosti srovnatelný s pasivním nastavením, avšak pro vyšší proudy je možno dosáhnout největší míry pohodlí při zachování vysoké bezpečnosti. Pokud se průběhy srovnají

s průběhy pro Groundhook algoritmus (obr. 232), vychází, že s modifikovaným Groundhook algoritmem je možné pro časovou konstantu MR tlumiče 1.5 ms dosáhnout lepších výsledků než s Groundhook algoritmem.



Obr. 6.29: Porovnání rozptylu zrychlení odpružené hmoty a přítlaku na vozovku v závislosti na nastavení MR tlumiče resp. Modifikovaného Groundhook algoritmu



Obr. 6.30: Porovnání komfortu a bezpečnosti v závislosti na nastavení tlumiče (simulace algoritmu Modifikovaný groundhook)

Simulace byly provedeny pro větší rozsah proudů 0 - 5A. S tímto algoritmem je možné dosáhnout největší bezpečnosti, pokud je regulační rozsah tlumiče co největší. Pokud se zvyšuje proud ve stavu b_{2L} , při proudech menších jak 2.5 A je možné dosáhnout vyššího komfortu při zachování bezpečnosti. Pro vyšší proudy už bezpečnost příliš neroste a výrazně se zmenšuje komfort. Počítáme-li ovšem s omezeným (reálným) rozsahem tlumiče, největší bezpečnosti je možné dosáhnout, má-li tlumič charakteristiku b_{2L} odpovídající proudu 0.5 A a charakteristiku b_{2H} odpovídající proudu 3 A (tzn. rozsah tlumiče by měl být změněn například namícháním MR kapaliny s větším poměrem MR částic).

Pokud je časová konstanta tlumiče příliš dlouhá (20 ms), je dosaženo většího komfortu při zachování určité hladiny bezpečnosti jízdy. Tento jev ale bude platit na konkrétní typ přejezdu. Vysvětlení je na obrázku 6.31. Před nájezdem na příčný práh je tlumič ve stavu s nízkým tlumením. Ve fázi II. přichází povel na přepnutí tlumiče do stavu s vysokým tlumením. Vlivem dynamiky ale dochází k nárůstu síly po exponenciálně (fialová křivka) a síla tak kolísá ve stavu s malým a velkým tlumením jen ve velmi malém rozsahu.

Známe-li časovou konstantu T MR tlumiče, je možné určit poměr velikosti aktuální síly v závislosti na čase od sepnutí resp. rozepnutí proudu do tlumiče vzhledem k síle při dané rychlosti v ustáleném stavu. (obr. 6.31, fialová křivka).

Po sepnutí proudu se poměr aktuální síly ku síle při dané rychlosti v ustáleném stavu vypočítá jako:

$$p = p_0 + (1 - p_0) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (6.2)$$

Po rozepnutí proudu se poměr aktuální síly ku síle při dané rychlosti v ustáleném stavu vypočítá jako:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (6.3)$$

kde:

p je aktuální poměr

p_0 je poměr v době sepnutí resp. rozepnutí

t je čas od sepnutí resp. od rozepnutí

T je časová konstanta MR tlumiče

Výpočet aktuální síly se získá ze vzorce:

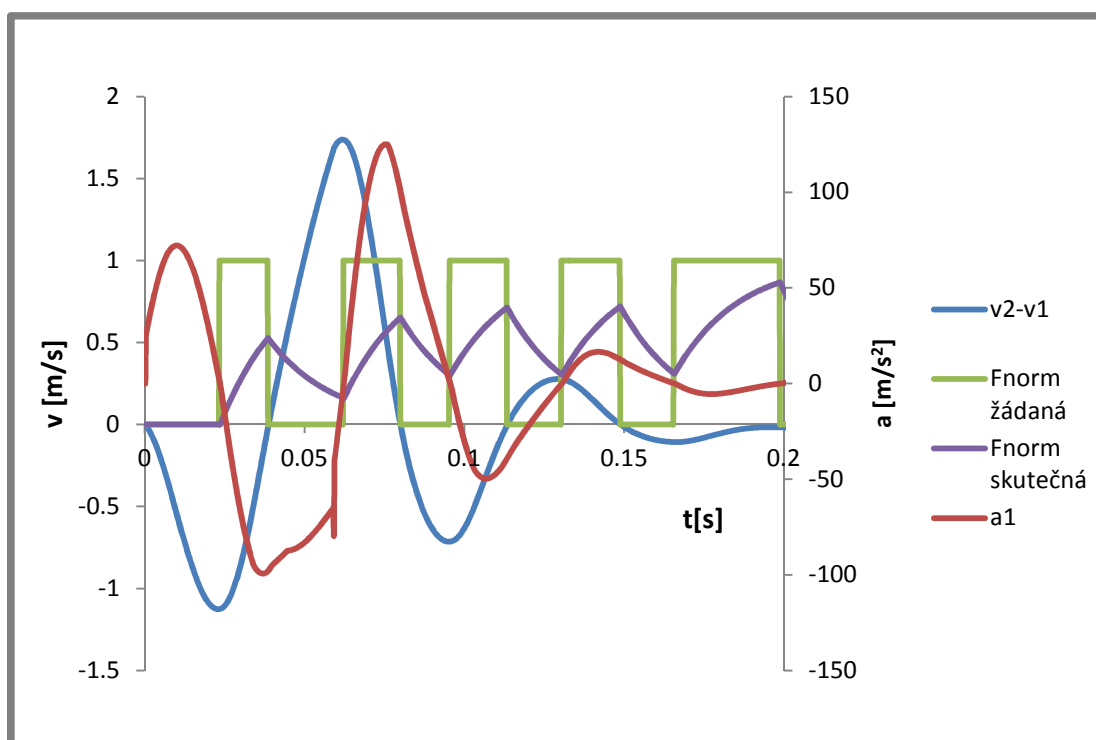
$$F_A = F(v, I) \cdot p \quad (6.4)$$

kde:

F_A je aktuální síla

$F(v, I)$ je síla získaná z F - v charakteristik pro danou rychlost a proud v ustáleném stavu

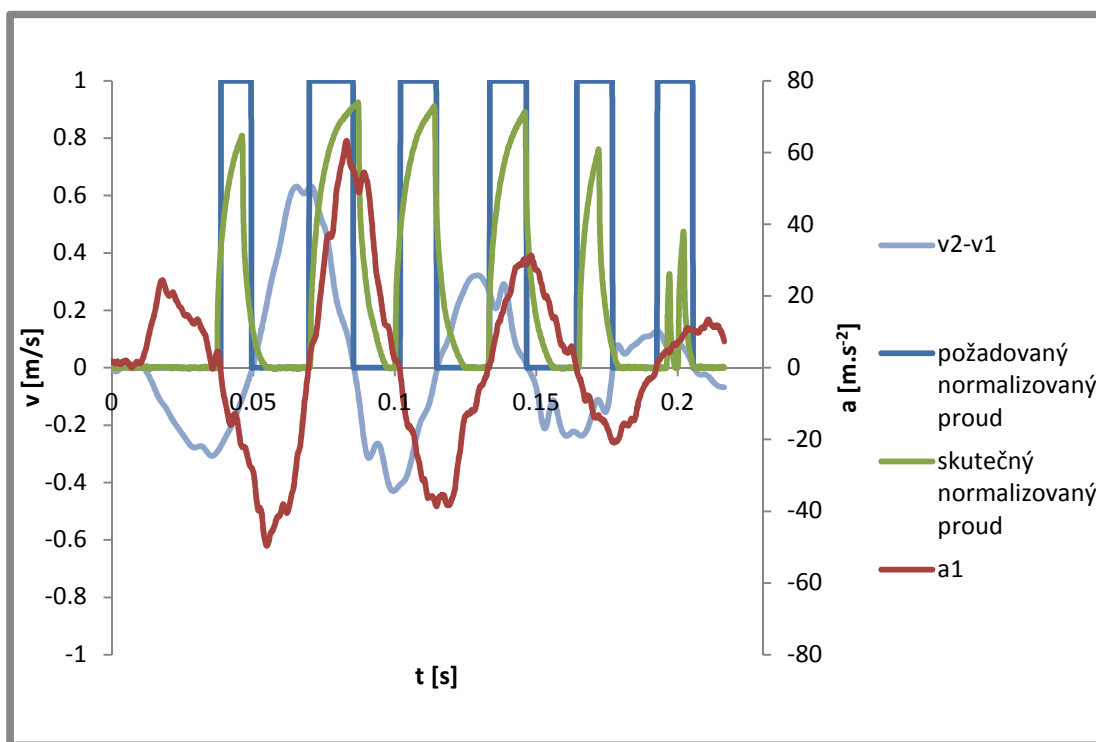
p je aktuální poměr



Obr. 6.31: Průběh skutečné normované síly se započítáním dynamiky MR tlumiče ($T = 20$ ms)

Tento algoritmus byl ověřen měřením na experimentálním vozíku. Pro řízení byl použit real-time computer NI CompactRio spolu s PWM regulátorem. Algoritmus

byl vyzkoušen pro různá nastavení dynamiky MR tlumiče a pro proudy v aktivovaném stavu 2 a 2,5 A.



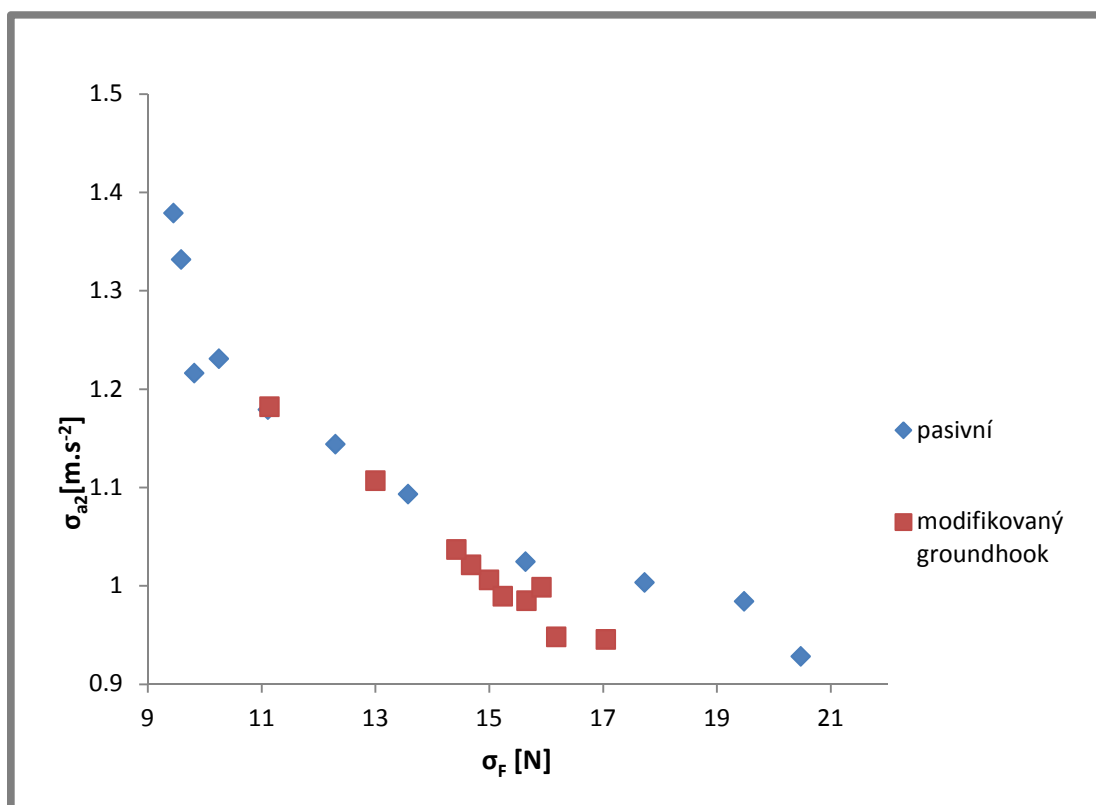
Obr. 6.32: Průběh spínání proudu do tlumiče Modifikovaného groundhook algoritmu v napětovém režimu (max. proud 2 A)

Obr. 6.32 ukazuje, že regulační smyčka spíná proud do tlumiče v požadovaných momentech. Dále je patrné, že v napětovém režimu je i náběh požadovaného proudu velmi pomalý vzhledem k době, kdy má být tlumič ve stavu s vysokým tlumením.

Tab. 6.1: Porovnání směrodatné odchylky síly a zrychlení odpružené hmoty v závislosti na nastavení tlumiče pro Groundhook algoritmus

napětí do cívky [V]	Časová konstanta tlumiče (MR110) [ms]	min. proud [A]	max. proud [A]	σ_F [N]	σ_a [ms ⁻²]
4.16	20.7	0	2A	17.05	0.95
5.12	18.5	0	2.5	16.18	0.95
15		0	2	15.66	0.98
15		0	2.5	15.00	1.01
30	9.4	0	2	15.92	1.00
30	8.4	0	2.5	14.68	1.02
45	9.2	0	2	15.24	0.99
45		0	2.5	14.43	1.04
30		0.5	2.5	13.00	1.11
30		1	2.5	11.14	1.18

V tabulce 6.1 jsou hodnoty směrodatné odchylky síly a zrychlení v závislosti na nastavení regulace tlumiče. Korespondující hodnoty jsou zobrazeny na obr. 6.33. Z grafu je patrné, že kvalita odpružení s modifikovaným Groundhook algoritmem je lepší než pasivní nastavení, ale čím je tlumič nastaven na rychlejší odezvu, tím se výsledky blíží pasivnímu nastavení. Při nastavení minimálního proudu na hodnotu 0,5 A, nebo 1 A, je patrné, že dosažené úrovně kvality odpružení je možno dosáhnout i za použití pasivního nastavení. Paradoxem tedy je, že nejlépe tento algoritmus pracuje s pomalým tlumičem (v napěťovém režimu) a jeho přínos spočívá v možnosti dosažení vyššího komfortu. Prioritně by ale měl zvyšovat bezpečnost jízdy. Naměřené výsledky se ale shodují se simulací (obr. 6.30).

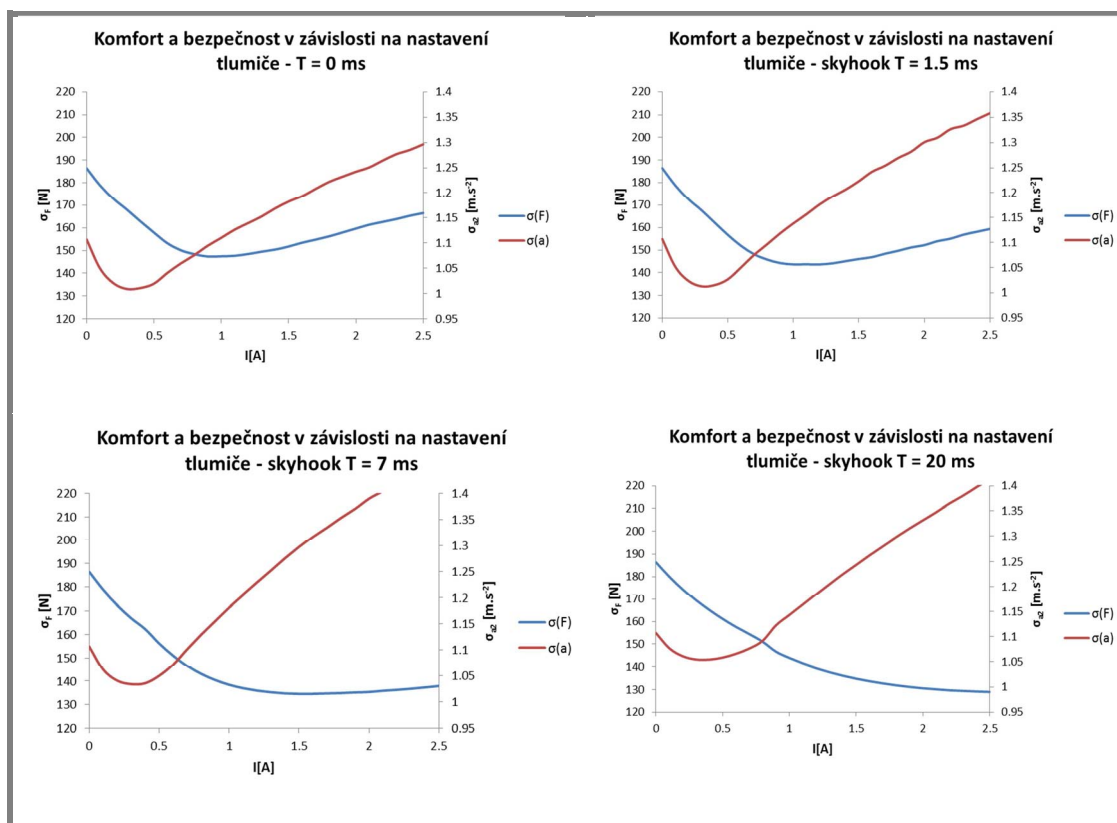


Obr. 6.33: Porovnání kvality odpružení Modifikovaného groundhook algoritmu a pasivního nastavení (měření)

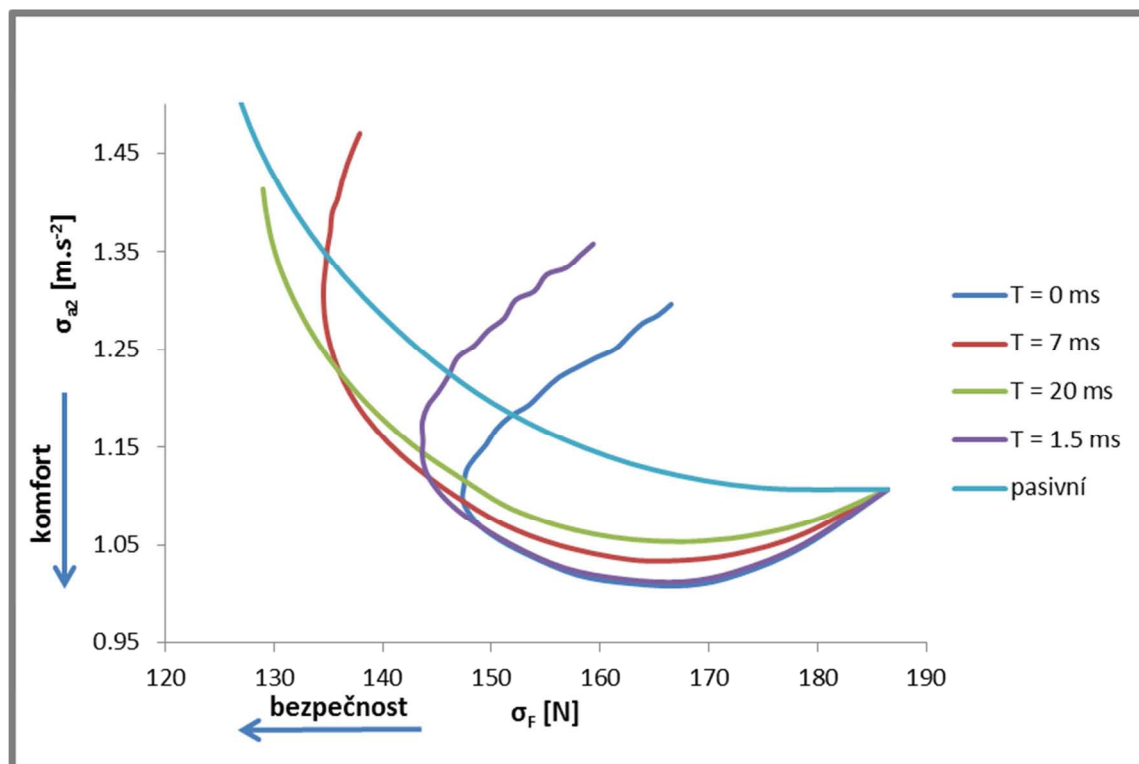
6.3.4 Efektivita semiaktivního algoritmu Skyhook

Obr. 6.34 zobrazuje rozptyl zrychlení odpružené hmoty (komfort) a rozptyl přítláčné síly na vozovku (bezpečnost). Na obrázku jsou porovnány čtyři varianty. První varianta je Skyhook algoritmus s MR tlumičem, který je schopen se přepnout z jedné charakteristiky do druhé okamžitě. Druhý obrázek odpovídá časové konstantě tlumiče $T = 1.5$ ms, což odpovídá hodnotě, o které se předpokládá, že je dosažitelná v případě použití feritového materiálu na obvod jádra cívky MR tlumiče. Třetí varianta pracuje s časovou konstantou 7 ms, což je hodnota, které je možné dosáhnout za použití stávající konstrukce MR tlumiče a PWM regulátoru. Čtvrtý obrázek odpovídá variantě, kdy je MR tlumič řízen v napěťovém režimu. Z grafů vyplývá, že čím je časová konstanta MR tlumiče delší, tím je největší dosažitelný

komfort menší. Skyhook algoritmus by měl být schopen oproti pasivnímu řízení zajistit větší komfort.



Obr. 6.34: Porovnání rozptylu zrychlení odpružené hmoty a přtlaku na vozovku v závislosti na nastavení MR tlumiče resp. Skyhook algoritmu



Obr. 6.35: Porovnání komfortu a bezpečnosti v závislosti na nastavení tlumiče (simulace algoritmu Skyhook)

Porovnání kvality odpružení Skyhook algoritmu s pasivním nastavením tlumiče je na obr. 6.35. Využití algoritmu má smysl jen v oblasti, kde se pracovní bod nachází pod křivkou v pasivním režimu. Z obrázku je patrné, že nejlepší výsledky algoritmus podává, je-li časová odezva tlumiče nulová. Pokud je časová odezva tlumiče 1.5 ms, algoritmus pracuje v oblasti s nejlepším komfortem téměř shodně. S prodlužující se časovou odezvou MR tlumiče se ale maximální dosažitelný komfort snižuje. Nejlepšího komfortu je dosaženo ve všech případech pro max. proud 0.4 A.

V této kapitole bylo porovnáno několik způsobů řízení MR tlumiče na nerovnosti typu příčný práh. Nejprve byl podroben analýze adaptivní pasivní způsob regulace. Bylo zjištěno, že regulační rozsah MR tlumiče je dostatečný k pokrytí jak maximálního pohodlí, tak maximálního dosažitelného přítlaku kola na vozovku. Pomocí algoritmu Groundhook je možné dosáhnout vyššího přítlaku kola na vozovku, ale jen v případě, že časová konstanta MR tlumiče je dostatečně krátká. Praktická aplikace tohoto algoritmu je navíc obtížná. Proto byl navržen algoritmus Modifikovaný groundhook. Pomocí tohoto algoritmu je opět možné dosáhnout lepšího přítlaku než jakákoliv varianta s adaptivním pasivním nastavením. Opět je ale zásadním limitem časová konstanta MR tlumiče. Se Skyhook algoritmem je dle očekávání možné dosáhnout lepšího komfortu odpružení, než s jakoukoliv variantou adaptivního pasivního nastavení. Efektivita algoritmu je také ovlivněna časovou konstantou MR tlumiče, dobrých výsledků algoritmu by ale mělo být dosaženo i s tlumičem s poměrně dlouhou časovou konstantou.

7 ZÁVĚR

7.1 Splnění cílů práce

- **Byl potvrzen a popsán zásadní vliv časové odezvy MR tlumiče na efektivitu semiaktivních algoritmů řízení MR tlumiče.**

Byl navržen virtuální model závěsu automobilu, na kterém byly simulovány semiaktivní algoritmy řízení MR tlumiče. Do virtuálního modelu byl implementován model MR tlumiče včetně časové odezvy MR tlumiče, která byla experimentálně změřena. Výsledky modelu ukazují, že zejména pro algoritmy zlepšující přítlak kola na vozovku (typu Groundhook) jsou velmi citlivé na dobu odezvy MR tlumiče. Časová odezva současných MR tlumičů s běžnými regulátory je příliš dlouhá na efektivní využití těchto algoritmů. Virtuální model byl verifikován experimentem na fyzikálním demonstrátoru závěsu kola. Výsledky z virtuálního modelu vykazují stejné trendy jako výsledky z fyzikálního demonstrátoru.

- **Byl navržen optimální PWM proudový regulátor, který je schopný i u současných MR tlumičů značně urychlit jejich dobu odezvy.**

Časová odezva MR tlumiče na řídicí signál je ovlivněna regulátorem. Ideální regulátor MR tlumiče by měl bez časového prodlení zajistit požadovaný tok proudu cívkou MR tlumiče v závislosti na řídicím signálu. Z elektrického hlediska je MR tlumič setrvačný článek, který vzniká spojením indukčnosti a odporu cívky MR tlumiče. Rychlý náběh resp. pokles proudu v takových obvodech je možné zajistit připojením zvýšeného napětí na cívku do okamžiku dosažení požadovaného proudu. Navrhovaný PWM proudový regulátor je toho schopen, a to i s napájením z palubní sítě automobilu s nízkým napětím (12V). Regulátor je schopen zajistit požadovaný proud za dobu kratší, než je odezva MR kapaliny, což zajistí redukci doby odezvy i u stávajících MR tlumičů.

- **Byly navrženy úpravy stávající konstrukce MR tlumiče snižující dobu odezvy MR tlumiče na úroveň řádově jednotek milisekund, což umožňuje efektivní využití algoritmů typu Groundhook.**

Na základě rozboru celkové časové odezvy MR tlumiče byly určeny příčiny dlouhé odezvy MR tlumiče. Po eliminaci vlivu indukčnosti cívky na dobu náběhu el. proudu obvodem pomocí vhodného způsobu regulace, neklesla časová odezva na hodnoty odpovídající časové odezvě MR kapaliny. Experimentem bylo zjištěno, že časový průběh magnetické indukce ve štěrbině MR tlumiče neodpovídá průběhu proudu cívkou. Za pomoci FEM simulací bylo zjištěno, že příčinou jsou vířivé proudy v magnetickém obvodu, které potlačují magnetické pole vyvolané proudem ve vinutí elektrické cívky. Tyto vířivé proudy je možné eliminovat, pokud je na magnetický obvod použit elektricky nevodivý materiál. Experimenty s Feritovým materiálem N87 potvrdily možnost urychlení časové odezvy magnetického pole ve štěrbině pístu MR tlumiče. Experiment potvrzující snížení časové odezvy takto rekonstruovaného MR tlumiče nemohl být z důvodu dlouhých dodacích lhůt zakázkových ferritových dílců do disertační práce zařazen.

7.2 Praktický význam dosažených výsledků

- Simulace semiaktivních algoritmů na virtuálním modelu závěsu kola ukázaly, že současné MR tlumiče mají natolik dlouhou časovou odezvu, že nemohou efektivně pracovat se semiaktivními algoritmy typu Groundhook.
- Bylo navrženo a realizováno patentované obvodové řešení PWM proudového regulátoru, které je oproti současnému způsobu regulace schopné urychlit časovou odezvu MR tlumiče. Rychlý proudový regulátor je nezbytný pro řízení MR tlumiče v semiaktivních závěsech.
- Byla navržena konstrukční úprava MR tlumiče, která by měla zajistit zásadní redukci časové odezvy MR tlumiče na řídicí signál. Rychlý MR tlumič je nezbytnou podmínkou pro efektivní využití semiaktivních algoritmů řízení MR tlumiče

7.3 Doporučení pro rozšíření výzkumu

- Experimentální ověření snížení doby odezvy MR tlumiče s feritovým pístem
- Ověření nárůstu efektivity semiaktivních algoritmů MR tlumiče, pokud se sníží doba odezvy MR tlumiče
- Simulace algoritmů řízení nejen na přejezd typu příčný práh, ale na typické průběhy nerovností vozovky
- Rozšíření simulací on/off semiaktivních algoritmů o algoritmy s plynulou regulací

LITERATURA

- [1] VLK, František. Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení. řiditelnost, ovladatelnost, stabilita. vyd. 2. Brno: Prof.Ing.FrantišekVlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [2] DYKE, S.J. a B. F. J. SPENCER. A comparison of semi-active control strategies for the MR damper. In: *Intelligent Information Systems*. 1997, s. 580-584. ISBN 0-8186-8218-3.
- [3] WINSLOW, W.M. Induced Fibration of Suspensions. *Journal of Applied Physics*. 1949, roč. 20, č. 12. s.1137-1140.
- [4] RABINOW, J., The magnetic fluid clutch, *AIEE Trans.*, 1948, č. 67, p. 1308.
- [5] *Audi TT Coupé '07 - SuspensionSystem* [online]. Ingolstadt : AUDI AG, 05/06 [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: www.volkspage.net/technik/ssp/ssp/SSP_381.pdf.
- [6] GEHM, R. Delphi Improves Cadillac's Ride. *Automotive Engineering International*. 2001, č. 109, s. 32-33.
- [7] WANG, D. H., X.X. BAI a W.H. LIAO. 2010 An integrated relative displacement self-sensing Magnetorheological damper: prototyping and testing. *Smart Materials and Structures*. 2010, roč. 19, č. 10.
- [8] CHOI, S. B., M.H. LEE a B. K. LEE. VibrationControlof MR Seat Damper for Commercial Vehicles. *Journal of Intelligent Materials System and Structures*. 2002, roč. 11, č. 12, s. 936-944.
- [9] MC. MANUS, S.J., K.A. ST. CLAIR, P.É. BOILEAU, J. BOUTIN a S. RAKHEJA. Evaluation of Vibration and Shock Attenuation Performance of a suspension Seat with a Semi-Active Magnetorheological Fluid. *Journal of Sound and Vibration*. 2002, roč. 253, č. 1, s. 313-327.
- [10] YANG, G., B.F. Jr. SPENCER, J.D. CARLSON a M.K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, *Engineering Structures*. 2002, roč. 24, č. 3, s. 309-323.
- [11] CHEN, Ch., J. M. RICLES, R. SAUSE a R. CHRISTENSON. Experimental evaluation of an adaptive inverse compensation technique for real-time simulation of a large-scale magneto-rheological fluid damper. *Smart Materials and Structures*. 2010, roč. 19, č. 2.
- [12] OK, S.Y., KIM, D.S., PARK, K.S., KOH, H.M.. Semi-active fuzzy control of cable-

stayed bridges using magneto-rheological dampers. *Engineering structures*. 2006, roč. 29, č. 5, 776-788.

[13] KIM, In-Ho, Hyung-Jo JUNG a Jeong-Hoi KOO. Experimental evaluation of a self-powered smart damping system in reducing vibrations of a full-scale stay cable. *Smart Materials and Structures*. 2010, roč. 10, č. 11.

[14] LI, Z. C. a J. WANG. A gun recoil system employing a magnetorheological fluid damper. *Smart Materials and Structures*. 2012, roč. 21, č. 10.

[15] STRECKER, Z. a B. RŮŽIČKA. The Application of MR Dampers in the Field of Semiactive Vehicle Suspension. In: *Mechatronics*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012, s. 149-154. ISBN 978-3-642-23243-5.

[16] XINCHUN, G. G. PENGFEI a O. JINGPING. Study of the response time of MR dampers. In: *Proc. SPIE 7493*. Weihai, China, 2009. DOI: 10.1117/12.840217.

[17] KOO, J. H., F. D. GONCALVES a M. AHMADIAN. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. *Smart Mater. Struct.* 2006, roč. 15, č. 2.

[18] MAAS, J. a D. GÜTH. Experimental Investigation of the Transient Behavior of MR Fluids. In: *ASME Conference on Smart Material, Adaptive Structures and Intelligent System*. Scottsdale, Arizona, USA, ASME, 2011. ISBN 978-0-7918-5471-6.

[19] GONCALVES, F. D., M. AHMADIAN a J. D. CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*. 2006, roč. 15, č. 1.

[20] YANG, G., B. SPENCER, H. JUNG a J. CARLSON. Dynamic Modeling of Large-Scale Magnetorheological Damper Systems for Civil Engineering Applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2004, roč. 130, č. 9.

[21] CORDING, D., D. GÜTH a J. MAAS. MRF based Clutch with Integrated Electrical Drive. In: *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2011. ISBN 978-1-4577-0838-1. DOI: 10.1109/AIM.2011.6027038.

[22] LORD CORPORATION, MRF-140CG *Magneto-Rheological Fluid*. Datasheet – Lord Corporation, 2008.

[23] CHENG, H. B., P. HOU, P.J. ZHANG a N. M. WERELEY. Effect of storage and ball milling on the sedimentation and rheology of a novel magnetorheological fluid. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009, roč. 149, č. 1.

[24] CARLSON, J.D. What makes a Good MR fluid? *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2002, roč. 13, č. 7-8.

- [25] ULICNY, J. C., M. P. BALOGH, N. P. POTTER a R. A. WALDO. Magnetorheological fluid durability test—Iron analysis. *Materials Science and Engineering: A*. 2007, roč. 443, 1-2. DOI: 10.1016.
- [26] SUNKARA, S. R., T. W. ROOT, J. C. ULICNY a D. J. KLINGENBERG. Iron oxidation and its impact on MR behavior. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009, roč. 149, č. 1.
- [27] ROUPEC, J. *Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 140 s.
- [28] Audi AG, Audi TT '07 Coupé - suspension system. Audi AG, Ingolstadt 2007.
- [29] EHRGOTT, R. C. a S. F. MASRI. Modeling the oscillatory dynamic behaviour of electrorheological materials in shear. *Smart Materials and Structures*. 1992, roč. 1, č. 4.
- [30] STANWAY, R., J.L. SPROSTON a N.G. STEVENS. Non-linear modelling of an electro-rheological vibration damper. *Journal of Electrostatics*. 1987, roč. 20, č. 2, s. 167-184.
- [31] SPENCER, S. J. DYKE, M. K. SAIN a J. D. CARLSON. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997, roč. 123, č. 3, s. 238-238.
- [32] GAMOTA, M. R. a F. E. FILISKO. Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: Moderate frequencies. *Journal of Rheology*. 1991, roč. 35, č. 3.
- [33] WERELEY, N. M., Li PANG a G. M. KAMATH. Idealized Hysteresis Modeling of Electrorheological and Magnetorheological Dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1998, roč. 9, č. 8.
- [34] KARNOPP, D., M. J. CROSBY a R. A. HARWOOD. Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. *Journal of Engineering for Industry*. 1973, roč. 96, č. 2, s. 619-626.
- [35] POUSSOT-VASSAL, C., C. SPELTA, O. SENAME, S.M. SAVERSI a L. DUGARD. Survey and performance evaluation on some automotive semi-active suspension control methods: A comparative study on a single-corner model. *Annual Reviews in Control*. 2012, roč. 36, č. 1, s. 148-160.
- [36] SPELTA, C., S. M. SAVARESI a L. FABBRI. Experimental analysis of a motorcycle semi-active rear suspension. *Control Engineering Practice*. 2010, roč. 18, č. 11, s. 1239-1250.

[37] LIU, Y., T. P. WATERS a M. J. BRENNAN. A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances. *Journal of Sound and Vibration*. 2005, roč. 280, 1-2, s. 21-39.

[38] AHMADIAN, M., F. D. GONCALVES a C. SANDU. An experimental analysis of suitability of various semiactive control methods for magneto-rheological vehicle suspensions. *Smart Structures and Materials*. 2005, roč. 5760, č. 20.

[39] SMYTHE, W.R. *Static and Dynamic Electricity*. USA: McGraw-Hill, Inc., 1968. ISBN 978-0070594203.

[40] LORD CORPORATION, *Magnetic circuit design*. Engineering Note – Lord Corporation, 1999.

[41] YAO, G. Z., F. F. YAP, G. CHEN, W. H. LI a S. H. YEO. MR damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system. *Mechatronics*. 2012, roč. 12, č. 7, s. 963-973.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A ZNAČEK

m_1 [kg]	- hmotnost neodpružené hmoty
m_2 [kg]	- hmotnost odpružené hmoty
k_1 [N.m ⁻¹]	- tuhost pneumatiky
k_2 [N.m ⁻¹]	- tuhost pružiny
b_1 [N.s.m ⁻¹]	- tlumení pneumatiky
b_2 [N.s.m ⁻¹]	- tlumení tlumiče
PID	- proporčně integračně derivační regulátor
K_p	- proporční složka PID regulátoru
K_i	- integrační složka PID regulátoru
PWM	- pulzně šířková modulace
τ [Pa]	- smykové napětí
γ' [s ⁻¹]	- smykový spád
η [Pa.s]	- viskozita
$\mathfrak{S}\{i(t)\}(p)$	- Laplaceova transformace proudu
$\mathfrak{S}\{u(t)\}(p)$	- Laplaceova transformace napětí
T [s]	- časová konstanta
p	- imaginární číslo
LVDT	- elektrický transformátor používaný k měření posunu
H [A.m ⁻¹]	- intenzita magnetického pole
B [T]	- magnetická indukce
μ_0 [H.m ⁻¹]	- permeabilita vakua
E [V.m ⁻¹]	- intenzita elektrického pole
μ_r [-]	- relativní permeabilita
U [V]	- elektrické napětí
R_L [Ω]	- elektrický odpor
L [H]	- elektrická indukčnost
EUS [-]	- kritérium Eusama pro určení přítlaku kola na vozovku
F_{min} [N]	- minimální síla na plošinu Eusama testeru
F_{mean} [N]	- průměrná hodnota síly na plošinu Eusama testeru
a_{ef} [m.s ⁻²]	- svislé efektivní zrychlení odpružené hmoty
$\sigma(a_2)$ [m.s ⁻²]	- směrodatná odchylka zrychlení odpružené hmoty
$\sigma(F)$ [N]	- směrodatná odchylka síly na vozovku
f_f [N]	- síla zlomu pro proud $I = 0$ A
g_f [N.A ⁻¹]	- gradient bodu zlomu
b_a [Ns.m ⁻¹]	- konstanta tlumení před zlomem
g_a [Ns.m ⁻¹ .A ⁻¹]	- gradient tlumení před zlomem
b_b [Ns.m ⁻¹]	- konstanta tlumení za zlomem
g_b [Ns.m ⁻¹ .A ⁻¹]	- gradient tlumení za zlomem

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1: Závislost jízdního pohodlí na jízdní bezpečnosti [501].....	13
Obr. 1.2: Závěs BOSE s lineárními elektromotory.....	14
Obr. 1.3: Čtvrtinový model odpružení automobilu.....	15
Obr. 1.4: Frekvenční charakteristika závěsu kola.....	15
Obr. 1.5: Řízení s otevřenou smyčkou.....	16
Obr. 1.7: Princip MR tlumiče [504].....	16
Obr. 2.1: Definice časové konstanty T MR tlumiče	18
Obr. 2.2: Časová závislost síly pro různé proudy [520]	19
Obr. 2.3: Časová odezva tlumiče v závislosti na pístové rychlosti.....	20
Obr. 2.4: Časová odezva proudu na jednotkový skok	20
Obr. 2.5: Závislost doby odezvy řídicího obvodu na proudu	21
Obr. 2.6: Vliv pístové rychlosti MR tlumiče na délku časové odezvy	21
Obr. 2.7: Slit-flow reometr [515].....	22
Obr. 2.8: Normalizovaná mez kluzu v závislosti na době průletu MR částice aktivní zónou.....	23
Obr. 2.9: Tlumič Lord MRD-9000	24
Obr. 2.10: Elektrický model MR tlumiče	24
Obr. 2.11: Blokové schéma regulátoru proudu	24
Obr. 2.12: Odezvy signálů na skok požadovaného proudu	25
Obr. 2.13: Porovnání doby náběhu proudu za použití napěťového a proudového regulátoru	25
Obr. 2.14: Závislost meze kluzu MR kapaliny MR 140 na intenzitě magnetického pole [522].....	26
Obr. 2.15: Schéma zapojení koncového stupně ŘJ Audi TT.....	27
Obr. 2.16: Blokové schéma řídicí jednotky Audi TT [530].....	28
Obr. 2.17: Binghamský model MR tlumiče a odpovídající F-v charakteristika[533]	29
Obr. 2.18: Gamota-Filisko model a odpovídající F-v charakteristika[533]	30
Obr. 2.19: Nový Bouc-Wen model tlumiče a odpovídající F-v charakteristika [533]	31
Obr. 2.20: Bi-viscous F-v charakteristika tlumiče [533]	32
Obr. 2.22: Konfigurace ideálního a reálného semiaktivního systému Groundhook..	35
Obr. 2.23: Frekvenční přenos odpružené hmoty.....	37
Obr. 2.24: Frekvenční přenos neodpružené hmoty.....	37
Obr. 2.25: Porovnání přenosů pro různé algoritmy řízení. SA-1 – Continuous skyhook, SA-2 on-off skyhook SA3-continuous balance control, SA-4 on-off balance control, AP - adaptivní pasivní.....	38
Obr. 5.1: Originální MR tlumič Delphi	42
Obr. 5.2: Upravený MR tlumič Delphi	42
Obr. 5.3: Měřicí aparatura pro měření odezvy MR tlumiče	43
Obr. 5.4: Průběh elektrického napětí na cívce a odpovídající síla MR tlumiče	43
Obr. 5.5: Síla vyvozovaná MR tlumičem v aktivovaném stavu, neaktivovaném stavu a v průběhu přechodu z neaktivovaného do aktivovaného stavu.....	44
Obr. 5.6: Časová odezva síly MR tlumiče na jednotkový skok řídicího napětí	45
Obr. 5.7: Měřicí aparatura pro měření časové odezvy magnetické indukce ve šterbině na proud cívkou.	46

Obr. 5.8: B-H křivka pro materiál N87 (vlevo) a oceli AISI 1018 (vpravo).....	48
Obr. 5.9: Jádru ETD54/28/19	48
Obr. 5.10: Ekvivalentní symetrické jádro pro účely FEM modelu	49
Obr. 5.11: Elektrické schéma obvodu MR tlumiče	49
Obr. 5.12: Princip PWM step-down měniče.....	50
Obr. 5.13: průběh napětí a proudu v PWM režimu s nízkým napětím (6 V)	51
Obr. 5.14: Průběh napětí a proudu s vysokým napětím.....	52
Obr. 5.15: Princip regulátoru v různých režimech	54
Obr. 5.16: Průběhy napětí a proudu s PWM regulátorem proudu – požadavek na nárůst proudu	55
Obr. 5.17: Průběhy napětí a proudu s PWM regulátorem proudu – požadavek na konstantní proud	56
Obr. 5.18: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu I.....	56
Obr. 5.19: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu II.	57
Obr. 5.20: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu III.	57
Obr. 5.21: Proud ve výkonovém stupni regulátoru ve stavu IV.....	58
Obr. 5.22: Výsledné průběhy testeru Eusama	60
Obr. 5.23: Experimentální vozík	61
Obr. 5.24: Detail umístění čidel.....	62
Obr. 5.25: Amplitudově-frekvenční charakteristika experimentálního vozíku (vpravo) a jeho modelu (vlevo) v konfiguraci bez tlumiče	63
Obr. 5.26: F-v charakteristika MR tlumiče Delphi s kapalinou MR110	64
Obr. 5.27: Amplitudově-frekvenční charakteristika modelu automobilu (vpravo) a modelu experimentálního vozíku (vlevo) v konfiguraci s MR tlumičem	64
Obr. 5.28: F-v charakteristika tlumiče s MR kapalinou MR115PAO2 změřená na pulzátoru	65
Obr. 5.29: F-v charakteristika tlumiče s MR kapalinou MR115PAO2 změřená na vozíku při přejezdové zkoušce s rychlostí 10 km/h.....	66
Obr. 5.30: povolené meze vibrací v závislosti na čase a frekvenci [501]	67
Obr. 5.31: F-v charakteristika tlumiče použitá v modelu	69
Obr. 5.32: Spínání proudu do tlumiče – algoritmus Groundhook (simulace).....	70
Obr. 5.33: Spínání proudu do tlumiče – algoritmus modifikovaný Groundhook (simulace)	72
Obr. 5.34: Spínání proudu do tlumiče – simulace algoritmu Skyhook	73
Obr. 6.1: Průběh napětí a proudu MR tlumičem Delphi	74
Obr. 6.2: Porovnání časových konstant MR tlumiče s kapalinou MR140 v různých režimech.....	75
Obr. 6.3: Porovnání časových konstant MR tlumiče s kapalinou MR110 v různých režimech.....	76
Obr. 6.4: Porovnání časových konstant síly MR tlumiče v napěťovém režimu.....	77
Obr. 6.5: Porovnání časových konstant síly MR tlumiče	77
Obr. 6.6: Průběh magnetických siločar v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny, 0 Hz, 1 A	79
Obr. 6.7: Průběh magnetické indukce ve štěrbině cívky MR tlumiče 0Hz, 1A	79
Obr. 6.8: Rozložení magnetické indukce v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny, 200 Hz, 1 A.....	80
Obr. 6.9: Průběh magnetické indukce ve štěrbině cívky MR tlumiče 200Hz, 1A	80

Obr. 6.10: Rozložení proudové hustoty v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny pro proud cívkou 1 A a frekvenci 0 Hz (vlevo) a 200 Hz (vpravo).....	81
Obr. 6.11: Časová odezva magnetické indukce ve štěrbině pístu MR tlumiče na skok řídicího napětí	81
Obr. 6.12: Rozložení proudové hustoty v jádře MR tlumiče bez MR kapaliny pro proud cívkou 1 A a frekvenci 0 Hz (vlevo) a 200 Hz (vpravo).....	82
Obr. 6.13: Průběh magnetických siločar v jádře magnetického simulátoru, 0Hz, 2A.	83
Obr. 6.14: Průběh magnetické indukce ve štěrbině 200Hz, 1A.....	83
Obr. 6.15: Odezva proudu feritovou cívkou na skok napětí – porovnání skutečného a simulovaného průběhu	84
Obr. 6.16: Časová odezva el. proudu a mag. Indukce na skok řídicího napětí v napěťovém režimu, max. proud 1 A.	85
Obr. 6.17: Časová odezva el. proudu a mag. Indukce na skok řídicího napětí v napěťovém režimu, max. proud 2 A.....	85
Obr. 6.18: Časová odezva el. proudu a mag. Indukce na skok řídicího napětí – proudový režim.....	86
Obr. 6.19: Časová odezva el. proudu a mag. Indukce na skokový pokles řídicího napětí – napěťový režim	86
Obr. 6.20: Časová odezva el. proudu a mag. Indukce na skokový pokles řídicího napětí – proudový režim	87
Obr. 6.21: Porovnání zrychlení neodpružené hmoty modelu a měření experimentálního vozíku.....	88
Obr. 6.22: Porovnání přítláčné síly na vozovku modelu a měření experimentálního vozíku.....	88
Obr. 6.23: Jízdní bezpečnost a komfort v závislosti na proudu MR tlumičem – simulace	89
Obr. 6.24: Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti jízdy – výsledky z modelu..	90
Obr. 6.25: Jízdní bezpečnost a komfort v závislosti na proudu MR tlumičem – měření	91
Obr. 6.26: Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti jízdy – měření na experimentálním vozíku	91
Obr. 6.27: Porovnání rozptylu zrychlení odpružené hmoty a přítlaku na vozovku v závislosti na nastavení MR tlumiče resp. Groundhook algoritmu.....	92
Obr. 6.28: Porovnání komfortu a bezpečnosti v závislosti na nastavení tlumiče (simulace algoritmu Groundhook).....	93
Obr. 6.29: Porovnání rozptylu zrychlení odpružené hmoty a přítlaku na vozovku v závislosti na nastavení MR tlumiče resp. Modifikovaného Groundhook algoritmu	94
Obr. 6.30: Porovnání komfortu a bezpečnosti v závislosti na nastavení tlumiče (simulace algoritmu Modifikovaný groundhook).....	95
Obr. 6.31: Průběh skutečné normované síly se započítáním dynamiky MR tlumiče ($T = 20$ ms)	96
Obr. 6.32: Průběh spínání proudu do tlumiče Modifikovaného groundhook algoritmu v napěťovém režimu (max. proud 2 A)	97
Obr. 6.33: Porovnání kvality odpružení Modifikovaného groundhook algoritmu a pasivního nastavení (měření)	98

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1: měření odezvy magnetické indukce na elektrický proud - měřené veličiny	47
Tab. 5.2: Pravdivostní tabulka pro ovládání tranzistorů.....	58
Tab. 5.3: Karnaughova mapa pro tranzistor T2.....	58
Tab. 5.4: Karnaughova mapa pro tranzistor T3.....	59
Tab. 5.5: Parametry čtvrtinového modelu	60
Tab. 5.6: Přehled snímačů na experimentálním vozíku a simulátoru vozovky.....	62
Tab. 6.1: Porovnání směrodatné odchylky síly a zrychlení odpružené hmoty v závislosti na nastavení tlumiče pro groundhook algoritmus	97

PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE

STRECKER, Z.; RŮŽIČKA, B. The Application of MR Dampers in the Field of Semiactive Vehicle Suspension. In *Mechatronics*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 2011. p. 149 - 154. ISBN 978-3-642-23243-5.

STRECKER, Z.; MAZŮREK, I. Semiactive Damper in an Experimental Trolley Suspension. In *Proceedings of the 53rd International Conference of Machine Design Departments*. 1. Brno, Brno University of Technology. 2012. p. 281 - 286. ISBN 978-80-214-4533-8.

STRECKER, Z. Limity řízení magnetoreologických tlumičů. Košice, C-Press. 2010. p. 265 - 622. ISBN 978-80-970-294-1-8.

DLUGOŠ, J.; ROUPEC, J.; STRECKER, Z.; MAZŮREK, I. Problems of FEM Simulation of Magnetorheological Clutch's Magnetic Circuit. In *Engineering Mechanics 2013*. 19th international Conference. Praha, IT ASCR. 2013. p. 29 - 30. ISBN 978-80-87012-46-8.

ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.; STRECKER, Z.; KLAPKA, M. The Behavior of the MR Fluid During Durability Test. *Journal of Physics: Conference Series*. 2012. 412(1). p. 1 - 8. ISSN 1742-6588.

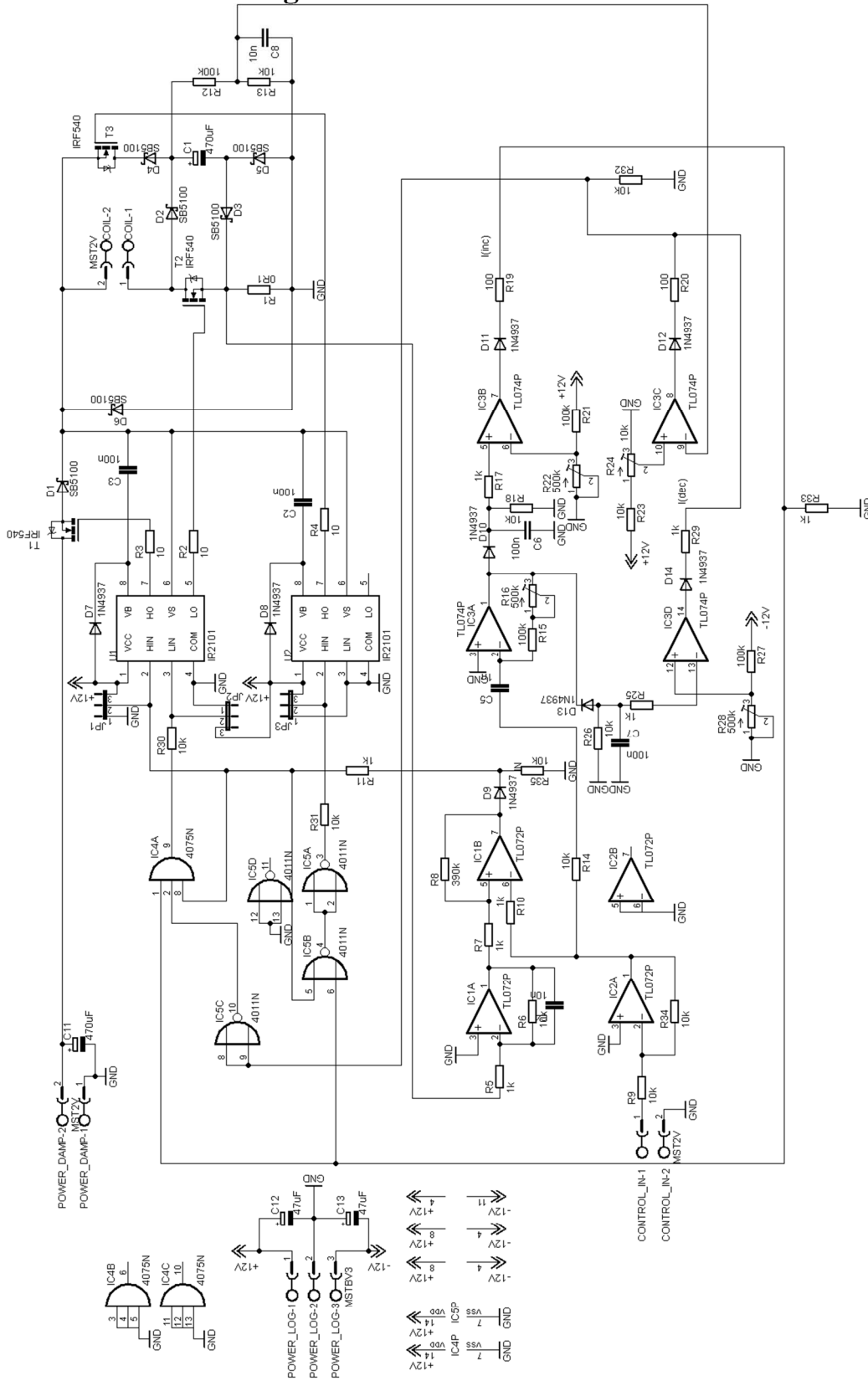
ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.; STRECKER, Z. Changing the behavior of MR fluids during long term operation. In *Engineering Mechanics 2011*. 17th international Conference. Brno, IT ASCR. 2011. p. 519 - 522. ISBN 978-80-87012-33-8.

MAZŮREK, I.; ROUPEC, J.; KLAPKA, M.; STRECKER, Z. Load and rheometric unit for the test of magnetorheological fluid. *MECCANICA*. 2013. 48(3). p. 631 - 641. ISSN 0025-6455.

KLAPKA, M.; MAZŮREK, I.; STRECKER, Z. The analysis of automotive differential vibrations by means of bifurcation diagrams. In *Engineering Mechanics 2011, Book of full texts*. 1. Prague, Institute of Termomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic. 2011. p. 287 - 290. ISBN 978-80-87012-33-8.

PŘÍLOHY

Příloha 1: Schéma regulátoru



Příloha 2: Rozmístění součástek

