

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2020

**JAN
GREGOR**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gregor** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **473675**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a optimalizace mechanismu stavěče dveří automobilu

Název bakalářské práce anglicky:

Design and Optimization of Mechanism of Car Door Limiter

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s používanými a publikovanými variantami řešení mechanismu stavěče dveří automobilu.
- 2) Seznamte se s metodami globální optimalizace mechanismů.
- 3) Vytvořte simulační model některé existující nebo publikované varianty mechanismu stavěče.
- 4) Navrhněte alternativní řešení mechanismu stavěče.
- 5) Vytvořte simulační model navržené varianty mechanismu stavěče včetně případných mechatronických prvků.
- 6) Proveďte optimalizaci parametrů navržené varianty mechanismu stavěče s pomocí simulačního modelu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] V. Stejskal, M. Valášek, Kinematics and Dynamics of Machinery, Marcel Dekker, New York 1998.
- [2] C. Coello, Evolutionary Multiobjective Optimization: Current and Future Challenges. In Benitez, J., Cordon, O., Hoffmann, F., and Roy, R., (ed.): Advances in Soft Computing Engineering, Design and Manufacturing. Springer-Verlag. 2003, pp. 243–256.
- [3] K. Sedlaczek, P. Eberhard, Using augmented Lagrangian particle swarm optimization for constrained problems in engineering, Structural and Multidisciplinary Optimization 32 (2006) pp. 277-288.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Jan Gregor
Název bakalářské práce:	Návrh a optimalizace mechanismu stavěče dveří automobilu
Anglický název:	Design and Optimization of Mechanism of Car Door Limiter
Akademický rok:	2019/2020
Studijní program:	Teoretický základ strojní inženýrství
Ústav/odbor:	Mechaniky, mechatroniky a biomechaniky Odbor mechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Prof. Ing. Zbyněk Šika, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 48 Počet obrázků: 43 Počet příloh: 1
Klíčová slova:	Stavěč dveří automobilu, Magnetoreologický tlumič, Fenomenologický model, Simulační model, Optimalizace genetickými algoritmy
Keywords:	Car door limiter, Magnetorheological damper, Phenomenological model, Simulation model, Optimization by genetic algorithm
Anotace:	Práce se zabývá návrhem mechanismu stavěče dveří automobilu s využitím magnetoreologického tlumiče. Byly vytvořeny různé simulační modely v Simulinku s ohledem na různý přístup k modelování tlumiče. Pro mechanismus stavěče bylo navrženo řízení a jeho parametry byly následně optimalizovány pomocí genetických algoritmů.
Abstract:	The thesis deals with design of mechanism of car door limiter using magnetorheological damper. Several simulation models were created in Simulink considering different approaches to damper modeling. Possible control strategy was described and that control strategy was optimized by genetic algorithm.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Prof. Ing. Zbyňku Šikovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a pomoc při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně za použití uvedené literatury a programů.

V Praze dne

Jan Gregor

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam souborů na přiloženém CD.....	8
1 Úvod.....	9
2 Cíle práce	10
3 Přehled používaných řešení mechanismu stavěče dveří automobilu.....	11
4 Magnetoreologické tlumiče	16
4.1 Simulační modely magnetoreologického tlumiče.....	17
4.1.1 Jednoduchý fenomenologický model	17
4.1.2 Modely typu Bouc-Wen	18
4.1.3 Nelineární hysteresezní biviskózní model	19
5 Globální optimalizace mechanismů pomocí genetických algoritmů	21
5.1 Princip genetických algoritmů.....	21
5.2 Využití genetických algoritmů	22
6 Simulace chování magnetoreologického tlumiče	23
6.1 Jednoduchý model	23
6.2 Upravený Bouc-Wen model	25
6.3 Biviskózní hysteresezní model	26
7 Simulační model mechanismu stavěče	28
7.1 Simulační model stavěče dveří.....	29
7.2 Výsledky simulačního modelu stavěče pro různé modely tlumiče.....	33
8 Návrh řízení mechanismu stavěče.....	37
8.1 Řízení 1	37
8.1.1 Využití PID regulátoru	40
8.2 Řízení 2	41
9 Optimalizace stavěče pomocí genetických algoritmů.....	43
9.1 Cílová funkce	43
9.2 Výsledky optimalizace	44
10 Závěr	46
11 Literatura	47

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma stavěče Door Arrester [1]	11
Obr. 2 Stavěč zajišťující zastavení v libovolné poloze [5]	12
Obr. 3 Vestavěný stavěč do závěsu dveří [6]	12
Obr. 4 Hydraulický stavěč vestavěný v závěsu dveří [8]	13
Obr. 5 Hydraulický stavěč dveří [9]	13
Obr. 6 Brzdný mechanismus elektrického stavěče [10]	14
Obr. 7 Elektrický stavěč dveří [10]	14
Obr. 8 Schéma uspořádání stavěče využívajícího magnetoreologický tlumič [11]	14
Obr. 9 Umístění klasického stavěče ve dveřích automobilu [12]	15
Obr. 10 Charakteristika magnetoreologické tlumiče v porovnání s jinými typy tlumiče [13]	16
Obr. 11 Jednoduchý fenomenologický model MR tlumiče	17
Obr. 12 Rozšířený Bouc-Wen model	18
Obr. 13 Nelineární hysterese biviskózní model [20]	19
Obr. 14 Princip genetických algoritmů [21]	21
Obr. 15 Graf průběhu síly v čase pro jednoduchý fenomenologický model	24
Obr. 16 Graf závislosti síly na rychlosti pro jednoduchý model	24
Obr. 17 Graf průběhu síly v čase pro upravený Bouc-Wen model	25
Obr. 18 Graf závislosti síly na rychlosti pro upravený Bouc-Wen model	26
Obr. 19 Graf průběhu síly v čase pro biviskózní hysterese model	27
Obr. 20 Graf závislosti síly na rychlosti pro biviskózní hysterese model	27
Obr. 21 Mechanismus stavěče	28
Obr. 22 Vektorová smyčka	29
Obr. 23 Uvolnění tělesa 2	31
Obr. 24 Uvolnění tělesa 3	31
Obr. 25 Uvolnění tělesa 4	32
Obr. 26 Průběh úhlu natočení dveří v čase při otevírání dveří (Bouc-Wen model)	34
Obr. 27 Průběh úhlu natočení dveří v čase při otevírání dveří (biviskózní hysterese model)	34
Obr. 28 Porovnání tlumící síly při napětí 3 V a 12 V (Bouc-Wen model)	35
Obr. 29 Porovnání tlumící síly při proudu 0 A a 2,5 A (biviskózní hysterese model)	35
Obr. 30 Průběh úhlu natočení dveří φ v čase při napětí v tlumiči 3 V (Bouc-Wen model)	36
Obr. 31 Průběh úhlu natočení dveří v čase při proudu 2.5 A (biviskózní hysterese model)	36
Obr. 32 Moment působící na dveře	37
Obr. 33 Schéma řídicí smyčky	38
Obr. 34 Charakteristiky síla-rychlost pro $U=0$ V (vlevo) a pro $U=12$ V (vpravo)	38
Obr. 35 Průběh natočení dveří při působení vnějších vlivů na aktivní mechanismus stavěče	39
Obr. 36 Průběh síly při zastavování dveří	39
Obr. 37 Schéma regulace pomocí PID regulátoru	40

Obr. 38 Průběh natočení dveří při použití PID regulátoru.....	40
Obr. 39 Průběh síly při zastavování dveří s využitím PID regulátoru.....	41
Obr. 40 Průběh natočení dveří při signalizaci překážky v cestě pohybu	42
Obr. 41 Průběh síly při zastavení dveří v důsledku přítomnosti překážky	42
Obr. 42 Srovnání průběhu polohy x optimalizovaného a neoptimalizovaného modelu	45
Obr. 43 Srovnání průběhu sil optimalizovaného a neoptimalizovaného modelu.....	45

Seznam souborů na přiloženém CD

- PDF verze bakalářské práce (*BP_Gregor.pdf*)
- SIMULINK simulační modely:
 - modifiedBoucWen.slx*
 - Biviscous_hysteresis_model.slx*
 - base_MR_model.slx*
 - stavec.slx*
 - stavec_Biviscous_hysteresis.slx*
 - stavec_1.slx*
 - stavec_2.slx*
 - stavec_1v2.slx*
- Matlab soubory:
 - Parametry_stavec.m*
 - stavec_optim.m*
 - stavec_cost.m*

1 Úvod

Skoro každý uživatel automobilu se někdy setkal s problémem při otevírání dveří. Například při vystupování z vozidla může nastat situace, kdy vzhledem k omezenému prostoru by bylo vhodné zastavit dveře v určité poloze, ale konstrukce mechanismu stavěče dveří to neumožňuje. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno spousta mechanismů, které tento problém odbourávají a jsou navrženy tak, aby umožňovaly zastavení dveří v libovolné poloze. I tyto mechanismy mají ale spoustu nevýhod. Tyto nevýhody lze poměrně úspěšně odstranit použitím aktivním nebo semi-aktivním prvkem, může se jednat o speciálně konstruovaný hydraulický tlumič, elektoreologický tlumič nebo magnetoreologický tlumič. Výhodou je možnost použití mikroprocesoru, kterým lze na základě dat z různých senzorů celý proces řídit.

Dveře vybavené aktivním nebo semi-aktivním prvkem lze zastavit v libovolné poloze dané rozsahem pohybu dveří. Dále na rozdíl od klasických dveří je aktuátor, na základě informací získaných ze senzorů, schopen vyvinout mnohem větší sílu v situacích, kdy je to potřeba a nehrozí tak problémy s nežádoucím pohybem dveří vlivem větru nebo zemské tíže při parkování ve svahu. Také díky vybavení systémem kolizních senzorů nehrozí střet s překážkou při otevírání.

Použití aktivního nebo semi-aktivního prvku pro otevírání a zavírání dveří automobilu má celou řadu výhod. I přesto je dnes stále nejpoužívanějším typem ruční otevírání se stavěčem umožňujícím stabilizaci dveří pouze ve dvou nebo třech předem definovaných polohách, a to především proto, že tato varianta je poměrně spolehlivá, lehká a levná.

V této práci je zpracován přehled různých mechanismů stavěče dveří využívající různé principy. Hlavní náplní práce je zkoumání možnosti využití komerčně dostupného magnetoreologického tlumiče jako stavěče dveří, který by bylo možno vestavět do libovolných dveří a společně s doplněním určitých potřebných snímačů by vytvořil říditelný, funkční, snadno ovladatelný a bezpečný mechanismus stavěče dveří. Parametry výsledného mechanismu budou optimalizovány pomocí metod globální optimalizace, konkrétně genetickými algoritmy.

2 Cíle práce

Cíle práce a kapitoly ve kterých byly tyto cíle řešeny jsou:

- **Seznamte se s používanými a publikovanými variantami řešení mechanismu stavěče dveří automobilu.**

V kapitole 3 je zpracován přehled různých mechanismů stavěče dveří používaných v automobilech.

- **Seznamte se s metodami globální optimalizace mechanismů.**

V kapitole 5 je stručné seznámení s optimalizací pomocí genetických algoritmů a její využití při řešení praktických problémů.

- **Vytvořte simulační model některé existující nebo publikované varianty mechanismu stavěče.**

S ohledem na další využití ve stavěči dveří byly v kapitole 4 probrány různé existující modely magnetoreologického tlumiče a v kapitole 6 byly vytvořeny simulační modely 3 modelů tlumičů a bylo srovnáno jejich chování.

- **Navrhněte alternativní řešení mechanismu stavěče.**

Mechanismus stavěče je navržen v úvodu kapitoly 7.

- **Vytvořte simulační model navržené varianty mechanismu stavěče včetně případných mechatronických prvků.**

Tvorba simulačního modelu mechanismu stavěče je popsána v kapitole 7, v kapitole 8 je návrh a realizace řízení mechanismu.

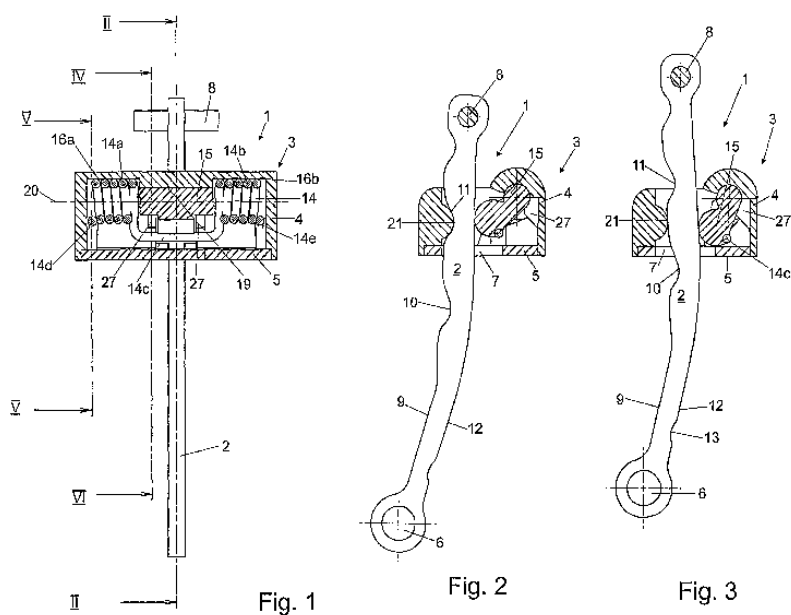
- **Proveďte optimalizaci parametrů navržené varianty mechanismu stavěče s pomocí simulačního modelu.**

Optimalizace parametrů mechanismu stavěče dveří byla provedena v kapitole 9.

3 Přehled používaných řešení mechanismu stavěče dveří automobilu

Stavěč dveří automobilu je mechanismus sloužící k zafixování otevřených dveří automobilu v určité poloze. Takové mechanismy se dají rozdělit podle několika kritérií. V první řadě dle počtu poloh, ve kterých lze dveře zafixovat. Z tohoto hlediska můžeme mít stavěče s předem přesně definovaným počtem poloh a stavěče umožňující zastavení v libovolné poloze. Druhým hlediskem je konstrukce a umístění v rámu dveří vzhledem k závěsům dveří. Lze tak rozlišit stavěče vestavěné přímo do závěsu dveří a stavěče mimo závěs dveří. Vzhledem k úsilí vynaloženému k zavírání/otevírání dveří a vzhledem ke schopnosti zastavit dveře a držet je v definované poloze jsou výhodnější stavěče neintegrovány do závěsu dveří. Pro stavěče mimo závěs dveří je potřeba menší úsilí k pohybu, což je výhodné u manuálního i automatického otevírání. Naopak výhodou stavěčů integrovaných do závěsu dveří může být menší zabraný prostor. Dále můžeme rozlišit, zda stavěč může sloužit zároveň i jako pohon, který pohybuje dveřmi.

Nejběžněji používané mechanismy stavěčů dveří automobilu jsou takové, které plní pouze funkci zastavení pohybu a k pohybu dveří dochází ručním otevíráním. Pověštinou se jedná o mechanismy obsahující pružinu, která předepíná nějaký element. Základním takovým typem stavěče je například patent [1] z roku 2009 (Obr. 1), který má



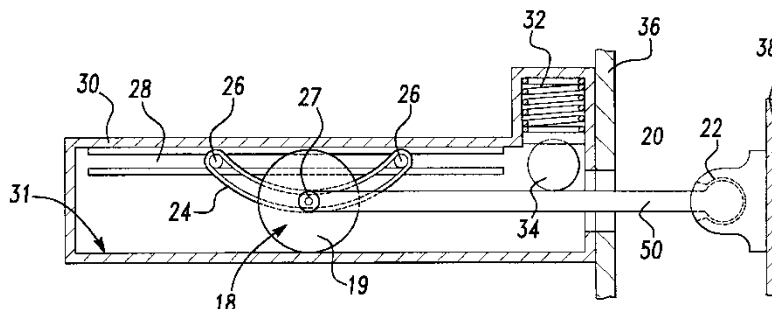
Obr. 1 Schéma stavěče Door Arrester [1]

dvě předdefinované polohy. Pouzdro 4 je součástí dveří. Pro zajištění v dané poloze je využito zkrtné pružiny 14, která je předepjatá mimo definované polohy 10 a 11. Stejný princip využívá i patent [2] z roku 2008, ale namísto pružiny je zde přítlak do drážek realizován pomocí pružných členu ze syntetické pryskyřice.

Jelikož zastavení pouze v několika málo definovaných polohách není příliš praktické, protože může vzniknout situace, kdy je nepraktické využití jakékoliv z předdefinovaných poloh, a abychom mohli pohodlně vystoupit z vozidla, je potřeba stavěč umožňující zastavení v libovolné poloze [3]. Nejjednodušším řešením vznikne

úpravou klasického stavěče z [1], kdy použijeme širší rameno bez drážek a v pouzdře bude předpínán třecí element. Jako příklad provedení může posloužit patent [4]. Velkou nevýhodou takového mechanismu je ovšem jeho rychlé opotřebení, v důsledku potřeby vytvářet a překonávat tření pro funkci správnou mechanismu.

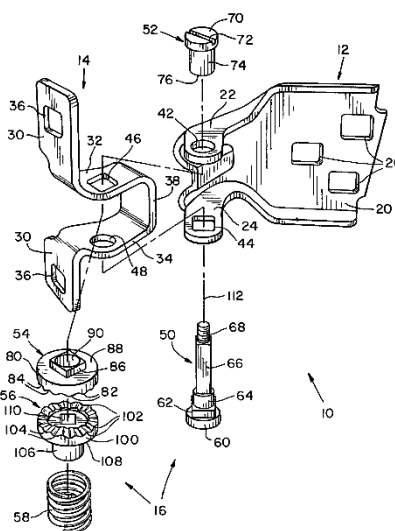
Alternativním řešením stavěče, který umožňuje zastavení dveří v libovolné poloze je patent [5] (Obr. 2). Pružina 32 je namontována



Obr. 2 Stavěč zajišťující zastavení v libovolné poloze [5]

v předepjatém stavu a tlačí přes rameno 50 brzdny disk 19 proti povrchu 31 a tím se generuje tření, které zajišťuje dveře ve stabilní poloze. Při otevírání nebo zavírání dveří se brzdny disk 19 posune ve vedení 24 do nestabilní polohy a tím se přeruší kontakt mezi brzdny diskem 19 a povrchem skříně 31, zanikne tření a mechanismus se může libovolně pohybovat díky vedení 28. Namísto pružiny 32 lze alternativně rameno předepínat torzní pružinou umístěnou v sférickém kloubu 22 [5].

Dalším konstrukčním řešením jsou stavěče integrované do závěsu dveří. Jednou z možností je řešení v patentu [6] (Obr. 3). Při pohybu dveří dochází ke vzájemnému pootočení členu 54, který je nepohyblivě spojen pomocí čtyřhranu k tělesu 14, a členu 56, který je stejným způsobem připojen k tělesu 12. Pružina je namontována tak,

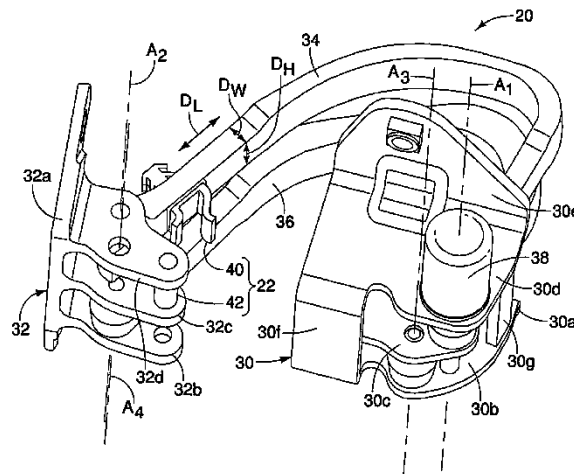


Obr. 3 Vestavěný stavěč do závěsu dveří [6]

aby vracela členy 54 a 56 drážkami do sebe a k vychýlení dveří ze zastavené polohy bylo potřeba vyvinout sílu na stlačení pružiny. Stavěč má přesně definovaný počet poloh zastavení, který je definován počtem drážek na členu 54 v možném maximálním úhlu

otevření dveří. Obdobně je řešen i patent [7], kde ale namísto do sebe zapadajících drážek je opět třecí člen a stavěč má tak libovolný počet poloh zastavení.

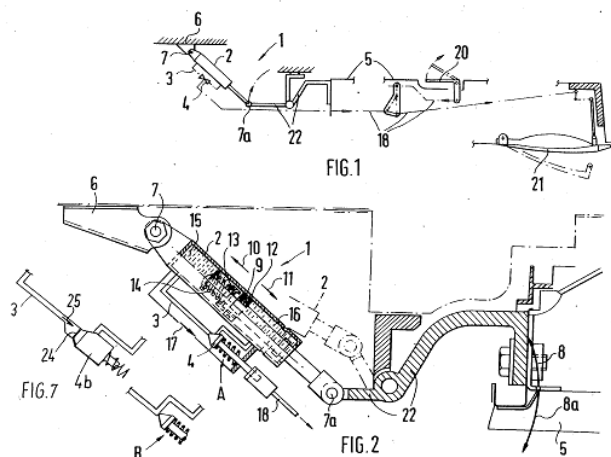
Výhodou všech výše uvedených mechanismů je jejich jednoduchost a nezávislost na elektrické nebo jiné energii. Dále uvedené mechanismy už nevyužívají pouze pružiny, ale i jiných prvků.



Obr. 4 Hydraulický stavěč vestavěný v závěsu dveří [8]

Další skupinou jsou mechanismy využívající hydraulický princip. Příkladem může být patent [8]. Jedná se o hydraulický stavěč vestavěný v závěsu dveří (Obr. 4). Umožňuje zastavení v libovolné poloze. Hydraulický pohon představuje válec 38. Válec má dvě komory pro hydraulickou kapalinu tvaru válcových výsečí, které jsou odděleny jednou pevnou a jednou rotující přepážkou. Válec 38 je pevně spojen se sestavou 30, zatímco rotující přepážka uvnitř válce je přes osu, kolem které rotuje, pevně připojena k ramenu 20.

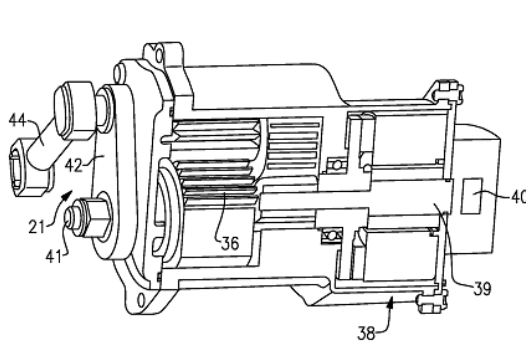
Taktéž hydraulický mechanismus stavěče, ale v provedení mimo závěs dveří s klasickým hydraulickým tlumičem je z patentu [9] (Obr. 5). Pohybem pístu v hydraulickém válci 2 dochází k rotaci dveří 5 kolem pantu 22. Hlavní součástí stavěče je řídicí okruh 3 a ventil 4, který slouží zároveň jako blokující a bezpečnostní. V otevřené poloze B je médium umožněn volný průchod mezi komorami skrze řídicí okruh a lze volně



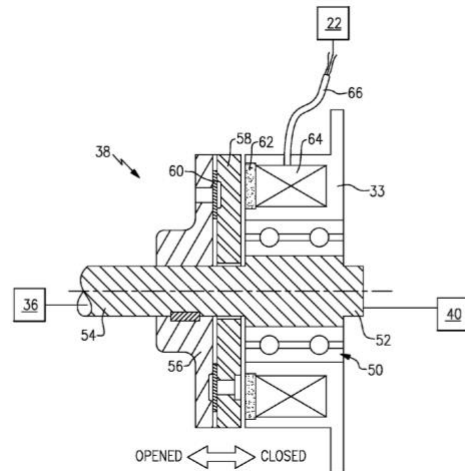
Obr. 5 Hydraulický stavěč dveří [9]

pohybovat dveřmi. V zavřené poloze A jsou dveře zastaveny v dané poloze. Funkce ventilu může být řízena mechanicky, například bovdenovým lankem, nebo elektrickým spínačem, například pomocí relé nebo servopohonu.

Odlišnou konstrukci využívá elektrický stavěč dveří s nekonečným počtem možných poloh využívající k zastavení dveří tření a magnetické pole (Obr. 7) [10]. Spojení



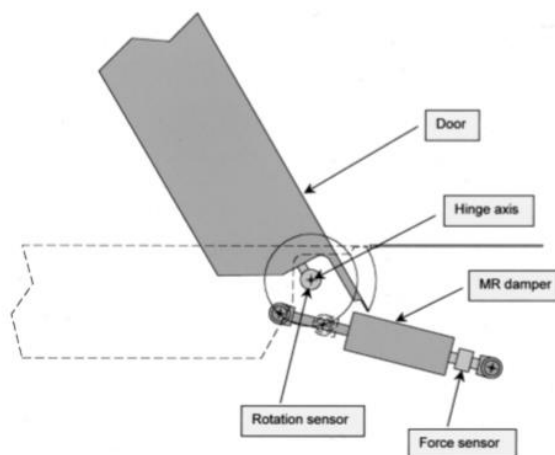
Obr. 7 Elektrický stavěč dveří [10]



Obr. 6 Brzdny mechanismus elektrického stavěče [10]

s dveřmi zajišťuje mechanismus 21, převod 36 a hřídel 39, omezení pohybu je prováděno brzdny mechanismem 38 (Obr. 6). Na hřídel 39 je pomocí pera připevněn kotouč 56, na kterém je permanentní magnet 58. Ten je listovými pružinami 60 a vlastním magnetickým polem tlačěn na třecí plochy 62 na statorové části brzdnyho mechanismu 33. Pokud do cívky 64 pošleme elektrický proud ve správné polaritě, magnetické pole vzniklé v cívce zapříčiní přerušeni styku v dosedacích třecích plochách 62 a hřídel 39 se může volně pohybovat. Lze také využít opačnou polaritu proudu ke zvětšení přitlaku mezi magnetem a statorem. Nevýhodou tohoto stavěče je jeho závislost na elektrické energii, bez které nelze stavěč uvolnit a pohnout dveřmi (lze ale musíme překonat třeni mezi statorem a permanentním magnetem).

Zajímavou skupinou jsou stavěče dveří využívající magnetoreologický tlumič. Schéma možného provedeni je na (Obr. 8). Stavěč umožňuje zastavení v libovolné pozici.



Obr. 8 Schéma uspořádání stavěče využívajícího magnetoreologický tlumič [11]

Tlumič je řízen elektrickým proudem a jelikož má velmi rychlou odezvu lze celý proces řídit mikroprocesorem, na základě dat z různých senzorů. [11] [3]

Využití magnetoreologického tlumiče pro konstrukci mechanismu stavěče bude využito v následujících částech práce. Cílem je využití dostupného komerčního magnetoreologického tlumiče jako stavěče dveří automobilu. Na (Obr. 9) je běžné řešení provedení stavěče dveří. Stavěč vytvářený v této práci má za cíl být náhradou tohoto klasického mechanismu, která by se dala vestavět do již stávajících dveří automobilu a na rozdíl od klasického stavěče by bylo možno dosáhnout větších stavěcích sil a tyto síly měnit podle potřeby a vnějších podnětů.

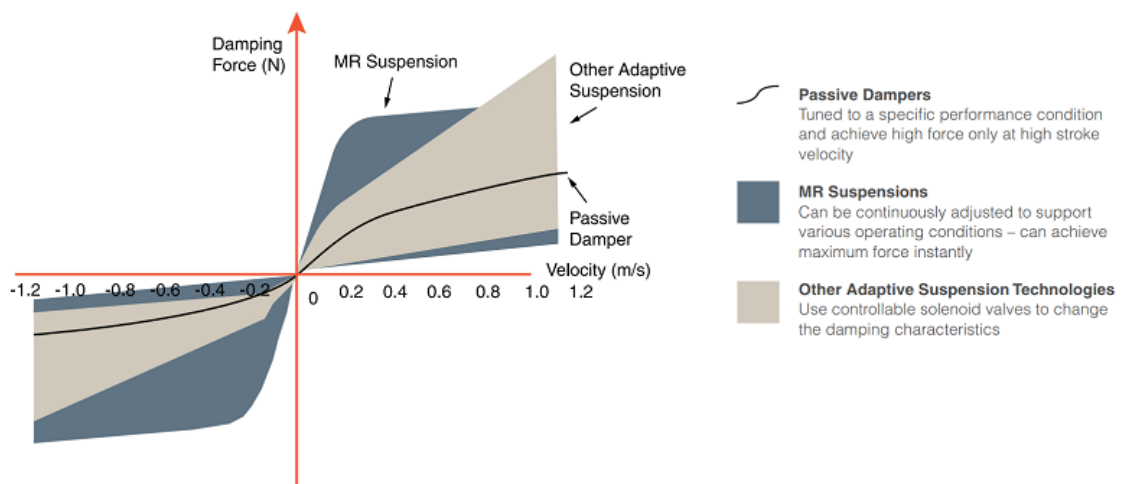


Obr. 9 Umístění klasického stavěče ve dveřích automobilu [12]

4 Magnetoreologické tlumiče

Konstrukcí se magnetoreologické tlumiče v podstatě neliší od klasických pasivních tlumičů, rozdílem je médium proudící mezi komorami a soustava cívek umožňující řízení magnetického pole aplikovaným elektrickým proudem. Médium v tlumiči, magnetoreologická kapalina, obsahuje drobné částice feromagnetika v oleji, které se v přítomnosti vnějšího magnetického pole seskupují a zvyšují viskozitu kapaliny. Viskozita magnetoreologické kapaliny je úměrná elektrickému proudu v cívkách, při odstranění magnetické pole se kapalina okamžitě navrácí do svého přirozeného stavu.

Z charakteristiky tlumiče síla/rychlost pro tlumič s magnetoreologickou kapalinou od LORD Corporation [13] (Obr. 10) lze vyzorovat hlavní přednosti magnetoreologických tlumičů oproti pasivním tlumičům, a to možnost řízení, možnost vyvinutí velké tlumící síly a rychlá odezva.



Obr. 10 Charakteristika magnetoreologické tlumiče v porovnání s jinými typy tlumiče [13]

Komerčně používané a dostupné magnetoreologické tlumiče jsou například LORD RD tlumiče od LORD Corporation [13], MAGNERIDE od BWI GROUP [14] nebo mRHEO S-ACTIVE od ARUS MR TECH [15]. Tlumič MAGNERIDE je navržen a určen primárně pro aplikace v tlumících systémech pozemních vozidel, zbylé dva tlumiče mají univerzální použití a byly by možné využít i pro účely stavěče dveří automobilu. Čas odezvy je u těchto tlumičů menší než 15 ms, což umožňuje velice dobré řízení tlumiče. Řídící napětí pro tyto tlumiče je v rozsahu 0 až 12 V stejnosměrného napětí.

4.1 Simulační modely magnetoreologického tlumiče

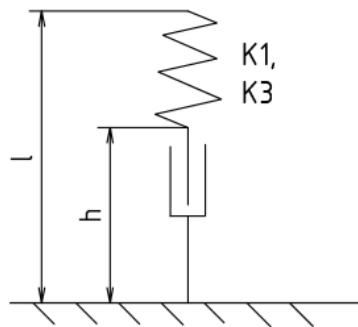
Existuje celá řada přístupů k modelování chování magnetoreologického tlumiče. Pro náš případ, kdy nás zajímá chování tlumiče a jeho působení v rámci nějaké soustavy těles a nezajímá nás vnitřní struktura tlumiče, jsou vhodné takzvané fenomenologické modely.

Fenomenologické modely nejsou tak přesné jako modely fyzikální a nepopisují vnitřní strukturu tlumiče, nejsou tudíž vhodné pro úpravu vlastností tlumiče, ale jejich výpočetní čas je menší a dají se tak použít v reálném řízení. Pro modelování se používají především dva základní prvky – tlumič a pružina. Fenomenologických modelů existuje celá řada lišící se především schopností odpovídajícím způsobem popsat chování tlumiče, především jeho hysterezi a chování při záporných rychlostech, a výpočtovou náročností.

Možnými modely jsou jednoduchý model, biviskózní hysterezní model, Bingham model, Gamota-Filisko model nebo různé modely typu Bouc-Wen. [16]

4.1.1 Jednoduchý fenomenologický model

Jednoduchý fenomenologický model je sestaven z tlumícího prvku a sériově zapojené nelineární pružiny (Obr. 11). [17]



Obr. 11 Jednoduchý fenomenologický model MR tlumiče

$$\frac{dh}{dt} = v \quad (4.1)$$

$$\Delta = l - h \quad (4.2)$$

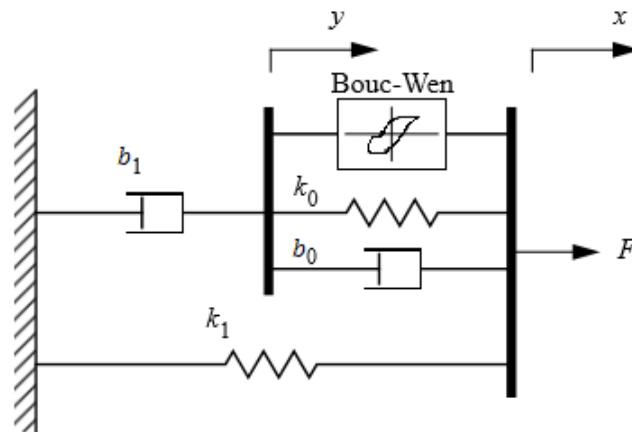
$$F = K1 \cdot \Delta + K3 \cdot \Delta^3 \quad (4.3)$$

$$v = v(i, F) \quad (4.4)$$

Rychlost v z rovnice (4.1) lze získat z charakteristiky tlumiče síla/rychlost, jelikož vlastnosti tlumícího prvku jsou silně závislé na rychlosti pohybu a na aplikovaném proudu, lze psát ve tvaru rovnice (4.4). Výhodou základního modelu je především krátký výpočetní čas simulace. I přes svou jednoduchost je ale tento model schopen popsat chování magnetoreologického tlumiče s dostatečnou přesností pro spoustu aplikací.

4.1.2 Modely typu Bouc-Wen

Bouc-Wen model je model, který dobře popisuje hysterese chování tlumiče. Existuje několik verzí modelů tohoto typu. Upravená verze základního Bouc-Wen modelu, takzvaný rozšířený Bouc-Wen model se používá pro lepší simulaci chování při malých hodnotách rychlosti a v oblasti, kde mají rychlost a zrychlení opačný směr (Obr. 12). V tomto modelu představuje k_1 tuhost celého tlumiče, koeficient tlumení b_0 představuje viskózní tlumení pozorované při vyšších rychlostech. Koeficient b_1 je zde zahrnut pro modelování chování při nižších rychlostech a tuhost k_0 pro řízení tuhosti při vysokých rychlostech. [16]



Obr. 12 Rozšířený Bouc-Wen model

Síla, působící z obou stran pevné přepážky, musí být stejná

$$b_1 \dot{y} = \alpha z + b_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) \quad (4.5)$$

Z rovnice (4.5) lze vyjádřit

$$\dot{y} = \frac{1}{b_0 + b_1} \cdot [\alpha z + b_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (4.6)$$

Pro evoluční proměnou z platí

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (4.7)$$

Výsledná síla vyvozená tlumičem

$$F = b_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (4.8)$$

nebo

$$F = \alpha z + b_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (4.9)$$

Aby bylo možno uvažovat závislost síly na řídicím elektrickém napětí aplikovaném do tlumiče, lze podle uvažovat koeficienty α , b_1 , b_0 jako funkce napětí

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (4.10)$$

$$b_1 = b_1(u) = b_{1a} + b_{1b} u \quad (4.11)$$

$$b_0 = b_0(u) = b_{0a} + b_{0b}u \quad (4.12)$$

kde u je pomocná proměnná uvažující řídicí napětí U_c aplikované do tlumiče jako systém prvního řádu

$$\dot{u} = -\eta(u - U_c) \quad (4.13)$$

4.1.3 Nelineární hysteresezní biviskózní model

Jelikož z experimentálního pozorování a měření závislosti síla-rychlost vyplývá nelineární hysteresezní chování tlumiče, saturace při vyšších rychlostech a silná závislost chování tlumiče na řídicím proudu, lze uvažovat sílu přenášenou přes tlumič skládající se ze dvou nezávislých funkcí

$$F = f_i(i)f_h(x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (4.14)$$

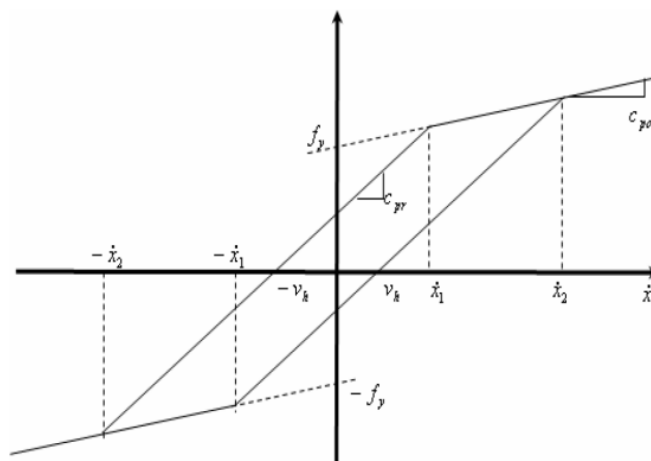
kde funkce f_i popisuje závislost chování tlumiče na řídicím proudu i a funkce f_h reprezentuje hysteresezní závislost chování na výchylce x , rychlosti \dot{x} a zrychlení \ddot{x} .

Pro popis závislosti řídicího proudu i lze uvažovat funkci (4.15). [18] Funkce je navržena jako zesilovací funkce s rostoucím proudem a zahrnuje omezení tlumící síly při vysokých rychlostech odpovídající reologickým vlastnostem MR kapaliny v tlumiči.

$$f_i = 1 + \frac{k_2}{1 + e^{-a_2(i+I_0)}} - \frac{k_2}{1 + e^{-a_2I_0}} ; i \geq 0 \quad (4.15)$$

Hysteresezní funkci můžeme vyjádřit rovnicí (4.16) odpovídající (Obr. 13). [20]

$$f_h = \begin{cases} c_{po}\dot{x} - f_y & \dot{x} \leq -\dot{x}_1 ; \ddot{x} > 0 \\ c_{pr}(\dot{x} - v_h) & -\dot{x}_1 \leq \dot{x} \leq \dot{x}_2 ; \ddot{x} > 0 \\ c_{po}\dot{x} + f_y & \dot{x}_2 \leq \dot{x} ; \ddot{x} > 0 \\ c_{po}\dot{x} + f_y & \dot{x}_1 \leq \dot{x} ; \ddot{x} < 0 \\ c_{pr}(\dot{x} + v_h) & -\dot{x}_2 \leq \dot{x} \leq \dot{x}_1 ; \ddot{x} < 0 \\ c_{po}\dot{x} - f_y & \dot{x} \leq -\dot{x}_2 ; \ddot{x} < 0 \end{cases} \quad (4.16)$$



Obr. 13 Nelineární hysteresezní biviskózní model [20]

kde f_y vyjadřuje sílu pro nulovou rychlost \dot{x} , v_h šířku hysterezní smyčky a c_{pr} , c_{po} představují koeficienty tlumení pro nízké, respektive vysoké rychlosti. Rychlosti v místě přechodu mezi křivkami tlumení pro nízké a vyšší rychlosti \dot{x}_1 a \dot{x}_2 lze vyjádřit rovnicemi (4.17) a (4.18).

$$\dot{x}_1 = \frac{f_y - c_{pr}v_h}{c_{pr} - c_{po}} \quad (4.17)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{f_y + c_{pr}v_h}{c_{pr} - c_{po}} \quad (4.18)$$

$$f_y = f_0 \cdot (1 + e^{a_1 v_m}) \quad (4.19)$$

$$v_h = k_4 v_m \quad (4.20)$$

Pro určení hodnot f_y , v_h lze zavést tyto veličiny jako funkci maximální rychlosti v_m dle rovnic (4.19) a (4.20). Parametry f_0 , a_1 , k_4 jsou konstanty, které by se určily z experimentálně získaných dat. Pro harmonické buzení lze maximální rychlost v_m určit z okamžitých hodnot výchylky, rychlosti a zrychlení dle rovnice (4.21).

$$v_m = \sqrt{(\dot{x})^2 - \ddot{x} \cdot x} \quad (4.21)$$

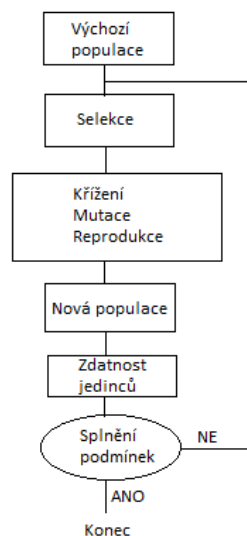
5 Globální optimalizace mechanismů pomocí genetických algoritmů

Pro hledání nejlepšího možného řešení daného problému používáme optimalizační metody. Při vícekriteriální optimalizaci hledáme místo jednoho řešení množinu různých řešení, která jsou kompromisem mezi požadovanými optimalizačními kritérii (Pareto množina). Pokud neznáme počet lokálních extrémů minimalizované cílové funkce, používáme globální optimalizační metody založené na heuristických postupech, například genetické algoritmy [20], [21], které se běžně využívají v praxi při řešení problémů z různých oborů. Pro optimalizaci parametrů stavěče bude použita právě globální optimalizace pomocí genetických algoritmů.

5.1 Princip genetických algoritmů

Genetické algoritmy simulují evoluci, uvažující každé jedno řešení simulačního modelu pro určité parametry jako jednoho jedince v populaci, uplatňují Darwinovský princip přirozeného výběru, kdy v každé generaci přežívají jen ta nejlepší a nejméně vhodná řešení. Na (Obr. 14) je znázorněn princip genetických algoritmů. Ten probíhá v následných bodech:

- Algoritmus vytvoří náhodnou sadu jedinců ve výchozí generaci
- Jedince v této generaci posoudí dle zdatnosti podle výběrové funkce (fitness function).
- Jedince s nejvyšší zdatností dále kříží (sloučení dvou jedinců), mutuje (náhodně změní určitou část jedince) nebo reprodukuje jedince beze změny do další generace.
- Pro novou populaci se opět posoudí zdatnost jedinců a postup se opakuje do té doby, než jsou splněny podmínky ukončení optimalizace, například bývá předem definován počet generací v genetických algoritmech nebo splnění určitého kritéria pro výběrovou funkci.



Obr. 14 Princip genetických algoritmů [21]

Výhodou genetických algoritmů je v tom, že neprohledávají prostor všech možných řešení, ale pouze ta řešení, která se osvědčí v rámci simulované evoluce. To výrazně zkracuje výpočetní čas optimalizace.

5.2 Využití genetických algoritmů

Genetické algoritmy jsou běžně používané při řešení různých inženýrských problémů. Můžou být používány pro zlepšení vlastností již stávajícího mechanismu (výrobku) nebo můžou být použity při návrhu, čím ušetří na prototypové výrobě a testování. Pro příklad byly zvoleny dvě konkrétní aplikace genetických algoritmů.

V článku [22] je pomocí genetických algoritmů optimalizována trajektorie robotického ramena s 5 stupni volnosti. Cílem je vytvořit hladkou trajektorii robotického ramena mezi body definovanými body. Jelikož možností a bodů v prostoru, kterými může trajektorie procházet je nespočet, je zde žádoucí využít právě genetické algoritmy, protože při prohledávání postupně celého řešení by mohlo dojít k nežádoucímu prodloužení výpočetního času. Výhodou využití optimalizace genetickými algoritmy v této aplikaci je, že oproti běžnému postupu definování trajektorie učením nedochází v kloubech robotického ramena k nežádoucímu namáhání, které může nastat právě při trasování trajektorie robotem.

Jiná aplikací, kde byly využity genetické algoritmy, je v článku [23]. Zde je optimalizace pomocí genetických algoritmů využita při návrhu redundantně poháněného paralelního mechanismu, nazývaného Sliding Star. Využití tohoto mechanismu je v obráběcích strojích, vzhledem k vhodným dynamickým vlastnostem a dobré tuhosti.

Využití genetických algoritmů se ovšem nevztahuje pouze na inženýrské aplikace, ale nachází uplatnění ve všech oborech, především tam, kde je velké množství objektů (v podstatě všechny problémy reálného světa) a není možné hledat optimální řešení klasickými matematickými metodami optimalizace (hledání extrémů v prostoru – časová náročnost) [21].

6 Simulace chování magnetoreologického tlumiče

Pro ilustraci chování magnetoreologického tlumiče byly provedeny simulace tří různých modelů magnetoreologických tlumičů, aby bylo možno zhodnotit a porovnat kvalitu jednotlivých simulačních modelů. Pro simulaci chování byla na vstup jednotlivých modelů přivedena harmonická sinusová výchylka polohy x o frekvenci 1 Hz a amplitudě 0,1 metrů a na vstupu bylo také přivedeno určité řídicí napětí nebo proud. U každého modelu tlumiče byla vykreslena charakteristika síla/rychlost a také časový průběh síly. Při porovnávání je třeba brát v úvahu, že se nejedná o stejné tlumiče, protože parametry v modelech nejsou získané z identifikace reálného tlumiče. S ohledem na provedou simulaci chování pro zvolené parametry je pak možno zvolit takový model magnetoreologického tlumiče, který nejlépe odpovídá generovanou silou reálným magnetoreologickým tlumičům (LORD RD [13], mRHEO S-ACTIVE [15]) dle jejich velikosti.

6.1 Jednoduchý model

Pro jednoduchý fenomenologický model je důležité, jakým způsobem budeme uvažovat charakteristiku tlumiče. Jedním ze způsobů je uvažovat pro dané řídicí napětí (nebo proud) tabulkovou závislost síly na rychlosti a pro danou rychlost mít výslednou sílu dle charakteristiky zadané tabulkou (interpolované i mimo body tabulky). Při tvorbě simulačního modelu byl ale využit biviškózní model, kdy je uvažováno, že pro nízké rychlosti má magnetoreologický kapalina vyšší koeficient tlumení (neboli v grafu závislosti síly na rychlosti má větší směrnici) než pro vyšší rychlosti, a to v obou směrech. Podle velikosti síly přenášené přes nelineární pružinu je zvolen koeficient tlumení pro nižší rychlosti c_{pr} nebo pro vyšší rychlosti c_{po} , z kterého se určí rychlost tlumiče podle charakteristiky pro určitý řídicí proud, jelikož závislost chování tlumiče na řídicím proudu i lze uvažovat dle [17] ve tvaru

$$v_p = ai^2 + bi + c \quad (6.1)$$

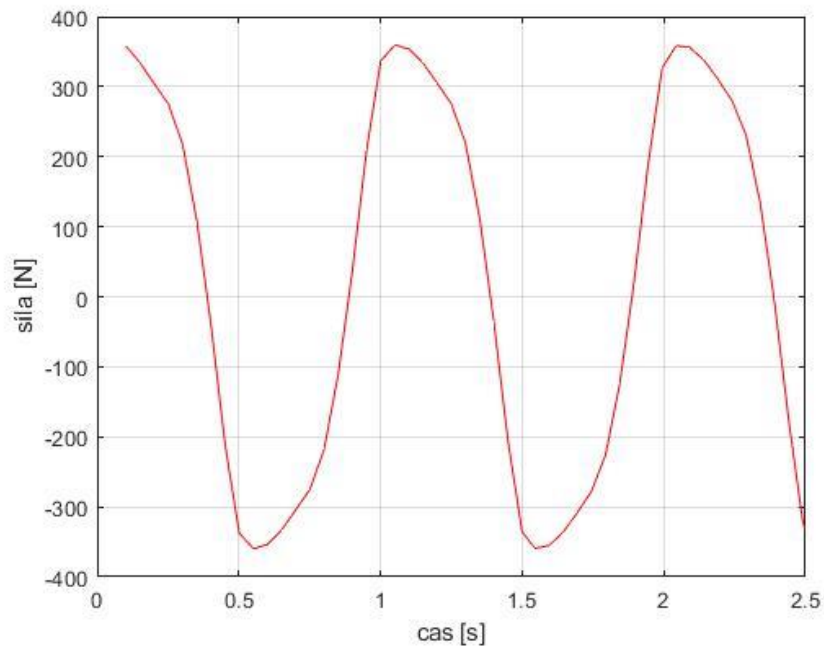
kde v_p je rychlost, při které se změní koeficient tlumení na nižší hodnotu v biviškózním modelu. Pro simulační model (simulační model je pojmenován *base_MR_model.slx*) byly uvažovány parametry dle tabulky 1.

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
c_{pr}	3816 N · s/m	K_1	6500 N/m
c_{po}	190 N · s/m	K_3	2700 N/m ³
a	-0,0315 m/s · A ²	b	0.08557 m/s · A
c	0.00773 m/s		

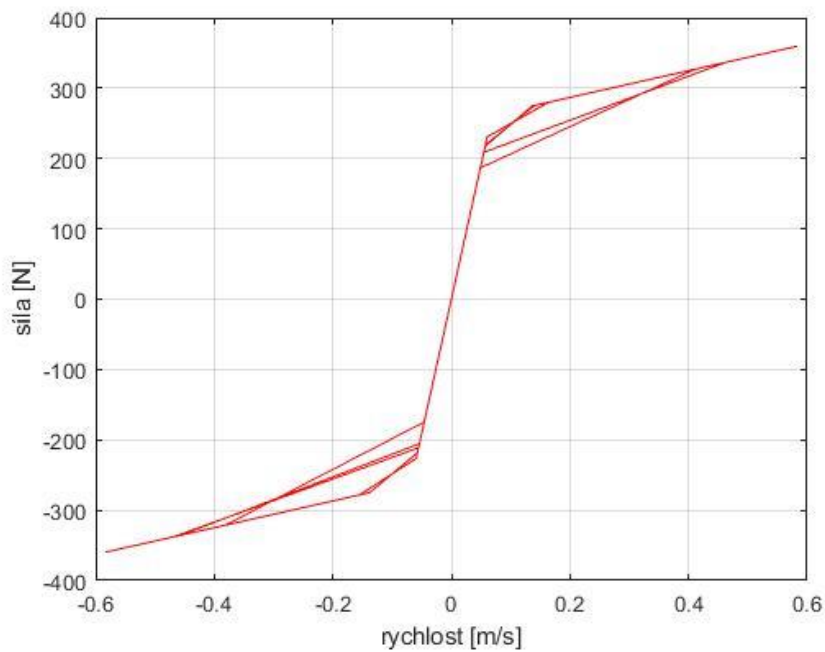
Tabulka 1 Parametry simulace jednoduchého fenomenologického modelu

Na vstup byly přivedena uvedená sinusová výchylka a také řídicí proud 1,5 A. Na (Obr. 15) je zobrazen časový průběh síly v tlumiči a na (Obr. 16) je zobrazena charakteristika tlumiče síla-rychlost.

Tento model je nejjednodušší možností, jak simulovat chování magnetoreologického tlumiče. Pro jeho dostatečnou přesnost je, ale potřeba získat hodnoty parametrů modelu z identifikace reálného tlumiče. Vzhledem k tomu, že pro tento model nejsou parametry určeny z reálného tlumiče, nebude s tímto typem modelu dále pracováno v simulačním modelu mechanismu stavěče.



Obr. 15 Graf průběhu síly v čase pro jednoduchý fenomenologický model



Obr. 16 Graf závislosti síly na rychlosti pro jednoduchý model

6.2 Upravený Bouc-Wen model

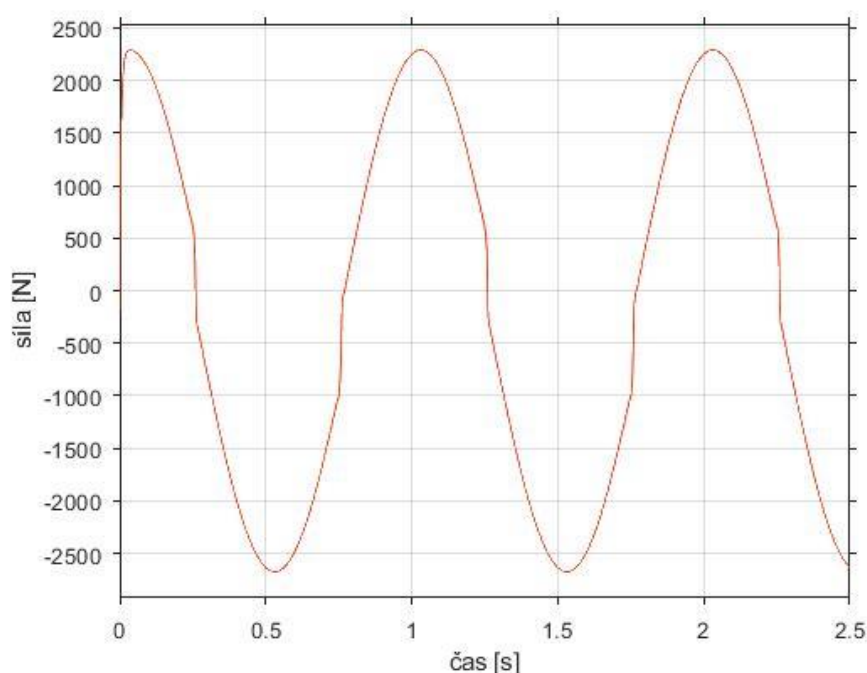
Při simulaci chování magnetoreologického tlumiče (poznámka: simulační model je pojmenován *modifiedBoucWen.slx*) byly pro hodnoty všech konstant vyskytujících se v modelu použity data z tabulky 2 dle [16]. Tyto parametry jsou získané z identifikace pro nás neznámého tlumiče a pro přesnost by bylo potřeba identifikovat použitý reálný magnetoreologický tlumič.

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
b_{0a}	$784 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$	α_a	$12\,441 \text{ N}/\text{m}$
b_{0b}	$1803 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m} \cdot \text{V}$	α_b	$38\,430 \text{ N}/\text{m} \cdot \text{V}$
b_{1a}	$14\,649 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$	β	$136\,320 \text{ m}^{-2}$
b_{1b}	$34\,622 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m} \cdot \text{V}$	γ	$2\,059\,020 \text{ m}^{-2}$
k_0	$3\,610 \text{ N}/\text{m}$	A	58
k_1	$840 \text{ N}/\text{m}$	n	2
x_0	0.225 m	η	190 s^{-1}

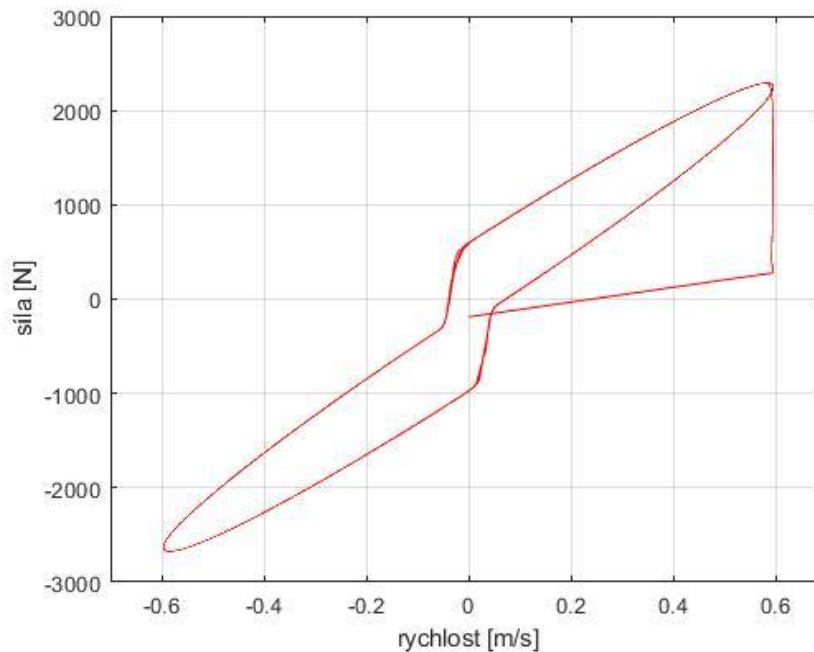
Tabulka 2 Parametry simulace modelu Bouc-Wen

Na vstup byla přivedena sinusová výchylka a také řídicí napětí 1,5 V. Na (Obr. 17) je zobrazen časový průběh síly v tlumiči a na (Obr. 18) je zobrazena charakteristika tlumiče síla-rychlost.

Upravený Bouc-Wen model je z použitých modelů nejnáročnější na výpočetní čas, ale nejlépe odpovídá reálnému chování tlumiče, kdy dochází k velice rychlému nárůstu tlumicí síly při zvyšující se rychlosti, tak jako je na ilustrační charakteristice na (Obr. 10) v kapitole 4. Při porovnání se zbylými dvěma typy modelů lze vidět, že se průběh charakteristiky u simulace Bouc-Wen modelu nejvíce blíží charakteristikám udávaných výrobcem tlumičů.



Obr. 17 Graf průběhu síly v čase pro upravený Bouc-Wen model



Obr. 18 Graf závislosti síly na rychlosti pro upravený Bouc-Wen model

6.3 Biviskózní hystereseční model

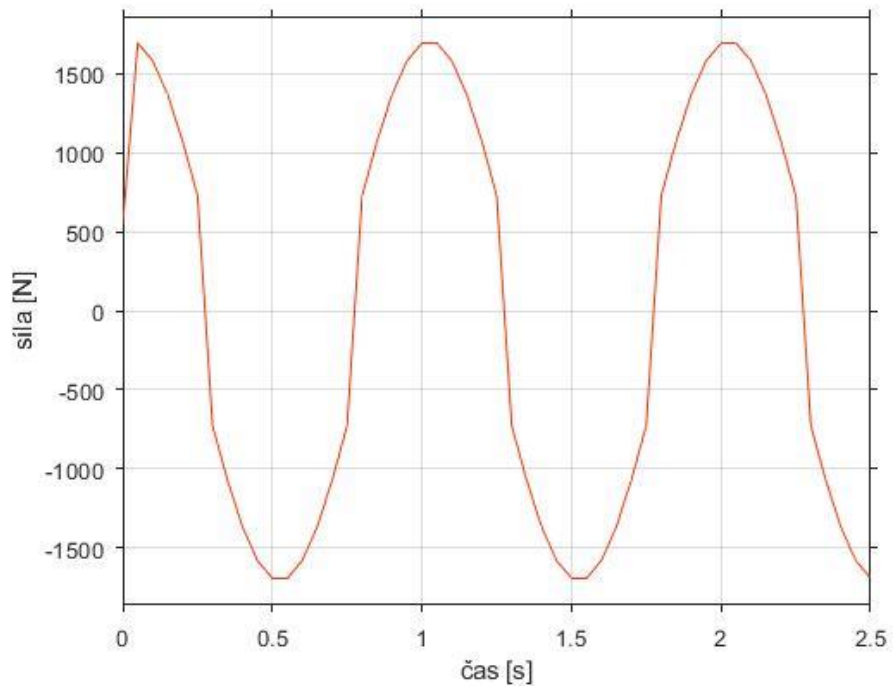
Pro simulační model (poznámka: simulační model je pojmenován *Biviscous_hysteresis_model.slx*) byly uvažovány parametry dle tabulky 3. Parametry stejně jako v předchozích dvou modelech nejsou z identifikace reálného použitého tlumiče, a tak jsou spíše orientační.

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
c_{pr}	$3816 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$	k_2	19.4
c_{po}	$190 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$	k_4	0.095
a_1	$1.75 \text{ s}/\text{m}$	I_0	0.05 A
a_2	2.85 A^{-1}	f_0	13.9 N

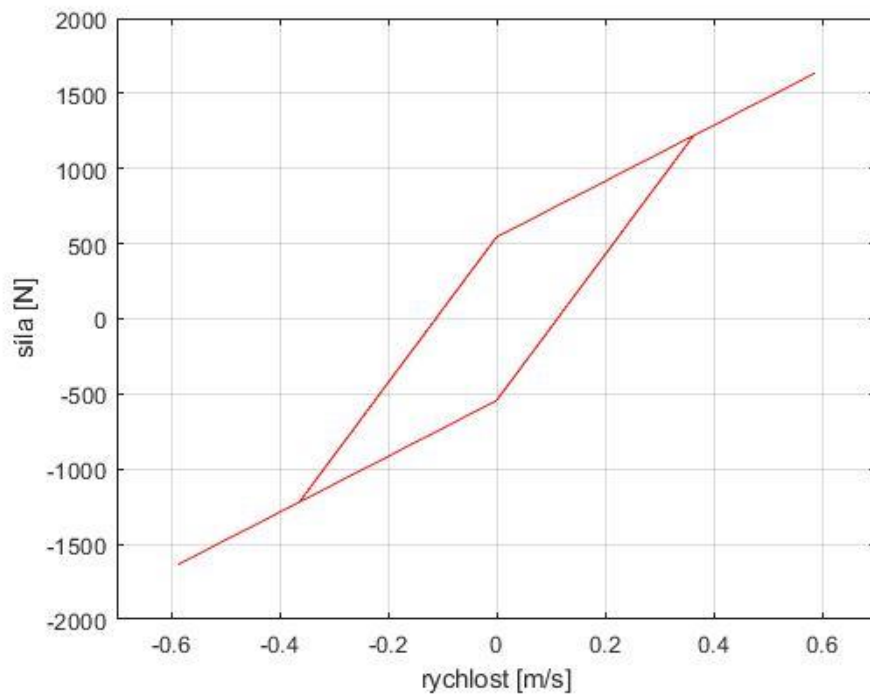
Tabulka 3 Parametry modelu biviskózního hystereseční modelu

Na vstup byla přivedena sinusová výchylka a také proud 1 A. Na (Obr. 19) je zobrazen časový průběh síly v tlumiči a na (Obr. 20) je zobrazena charakteristika tlumiče síla-rychlost.

Biviskózní hystereseční model dobře popisuje hystereseční chování magnetoreologického tlumiče a dobře reflektuje změnu chování tlumiče vlivem řídicího proudu (napětí), ale z celkového pohledu je tento model dosti zjednodušující a vůbec neuvažuje rozdílnost chování tlumiče pro záporné rychlosti. Jeho výhodou je výpočetní čas, který je v porovnání s modely typu Bouc-Wen mnohem kratší.



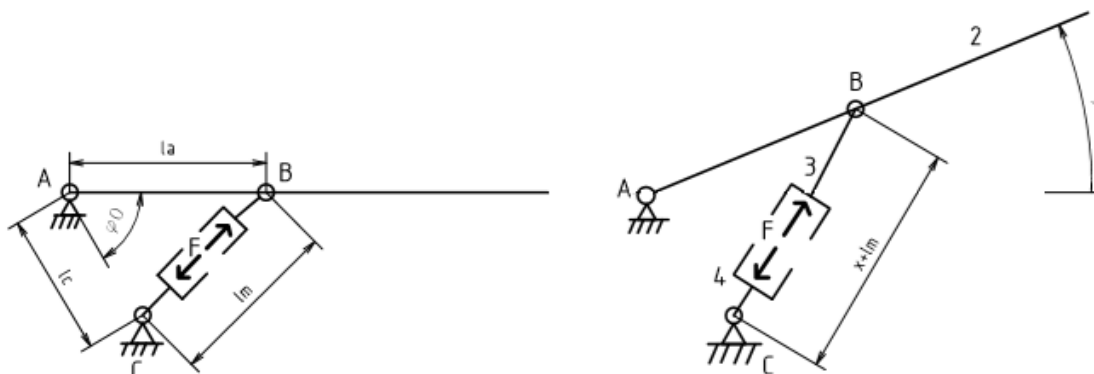
Obr. 19 Graf průběhu síly v čase pro biviskózní hysterezní model



Obr. 20 Graf závislosti síly na rychlosti pro biviskózní hysterezní model

7 Simulační model mechanismu stavěče

Pro tvorbu simulačního modelu byl vytvořen mechanický model stavěče vycházející z [24], obsahující magnetoreologický tlumič. Schéma mechanismu vychází z Obr. 9 z kapitoly 3, v zavřené poloze a v obecné poloze definované souřadnicí φ (nebo x) je na Obr. 21.



Obr. 21 Mechanismus stavěče

Mechanismus se skládá ze tří těles – těleso 2 představuje dveře automobilu, tělesa 3 a 4 tvoří tlumič. V uloženích A, B, C se nachází rotační vazby. Počet stupňů volnosti mechanismu je

$$n = 3(4 - 1) - 2(3 + 1) = 1 \quad (7.1)$$

Síla F je síla vyvozená tlumičem. Tato síla je funkcí relativní rychlosti tlumiče a řídicího napětí. Kinematiku mechanismu lze definovat souřadnicemi x a φ , mezi kterými platí vztahy vyplývající z geometrie

$$\varphi = f(x) = \arccos\left(\frac{l_a^2 + l_c^2 - (l_m + x)^2}{2l_al_c}\right) - \varphi_0 \quad (7.2)$$

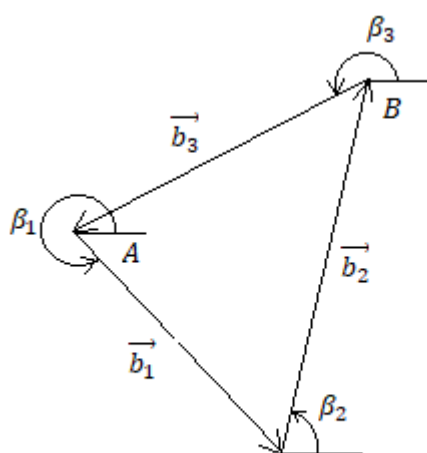
$$x = f^{-1}(\varphi) = \sqrt{l_a^2 + l_c^2 - 2l_al_c \cos(\varphi + \varphi_0)} - l_m \quad (7.3)$$

$$\varphi_0 = \arccos\left(\frac{l_a^2 + l_c^2 - l_m^2}{2l_al_c}\right) \quad (7.4)$$

Simulační model lze při tvorbě rozdělit na dvě části. První je simulační model samotného mechanismu stavěče a druhou částí je simulační model magnetoreologického tlumiče. Tyto dvě části se ale v konečném modelu propojí, protože poloha tlumiče x , rychlost tlumiče a síla vyvozená tlumičem F jsou vzájemné vstupy/výstupy obou modelů. Tvorbě simulačních modelů magnetoreologického tlumiče byla věnována kapitola 4 a kapitola 6.

7.1 Simulační model stavěče dveří

Při sestavování rovnic pro simulační model byl použit postup pro kinematické a dynamické řešení soustavy těles. Kinematické řešení mechanismu bylo založeno na vektorové metodě (Obr. 22). Mechanismus obsahuje jednu uzavřenou vektorovou smyčku, jednu závislou proměnnou q dle rovnice (7.5) a dvě závislé proměnné z_1, z_2 podle rovnice (7.6). Hodnoty velikostí délek vektorů a úhlů ve smyčce jsou uvedeny v tabulce 4.



Obr. 22 Vektorová smyčka

i	b_i	β_i
1	l_c	$2\pi - \varphi_0$
2	q	z_1
3	l_a	z_2

Tabulka 4 Parametry smyčky

$$\mathbf{q} = [q] = [l_m + x] \quad (7.5)$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \pi + \varphi \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

Vztahy mezi závislými a nezávislou proměnnou jsou pro nás známé dle rovnic (7.7) a (7.8).

$$z_1 = z_1(x) = \pi - \varphi_0 - \arccos\left(\frac{l_c^2 + (l_m + x)^2 - l_a^2}{2l_c(l_m + x)}\right) \quad (7.7)$$

$$z_2 = z_2(x) = \pi + \arccos\left(\frac{l_a^2 + l_c^2 - (l_m + x)^2}{2l_a l_c}\right) - \varphi_0 \quad (7.8)$$

Z vazbové rovnice (7.9) můžeme jejím rozepsáním do směrů x, y souřadného systému (rovnice (7.10) a (7.11)) a následně jejím dvojitým derivováním (rovnice (7.12) a (7.13)) získat řešení rychlostí závislých proměnných dle rovnice (7.17). Řešení rychlostí by šlo mimo jiné také získat analytickou derivací složek z_1, z_2 podle proměnné x , ale vzhledem k náročnosti této derivace bylo použito numerické řešení.

$$\vec{b}_1 + \vec{b}_2 + \vec{b}_3 = \vec{0} \quad (7.9)$$

$$b_1 \cos \beta_1 + b_2 \cos \beta_2 + b_3 \cos \beta_3 = 0 \quad (7.10)$$

$$b_1 \sin \beta_1 + b_2 \sin \beta_2 + b_3 \sin \beta_3 = 0 \quad (7.11)$$

$$J_q \dot{q} + J_z \dot{z} = \mathbf{0} \quad (7.12)$$

$$J_q \ddot{q} + J_z \ddot{z} + \mathbf{j}_{qz} = \mathbf{0} \quad (7.13)$$

$$J_q = \begin{bmatrix} \cos\beta_2 \\ \sin\beta_2 \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

$$J_z = \begin{bmatrix} -b_2 \sin\beta_2 & -b_3 \sin\beta_3 \\ b_2 \cos\beta_2 & b_3 \cos\beta_3 \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

$$\mathbf{j}_{qz} = \begin{bmatrix} -2\dot{b}_2 \sin\beta_2 \cdot \dot{\beta}_2 - b_2 \cos\beta_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_3 \cos\beta_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \\ 2\dot{b}_2 \cos\beta_2 \cdot \dot{\beta}_2 - b_2 \sin\beta_2 \cdot \dot{\beta}_2^2 - b_3 \sin\beta_3 \cdot \dot{\beta}_3^2 \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

$$\dot{z} = -J_z^{-1} J_q \dot{q} \quad (7.17)$$

Dalším krokem je vyjádření vektoru zrychlení středů těles soustavy ve tvaru

$$\mathbf{a} = \mathbf{V}_q \ddot{q} + \mathbf{V}_z \ddot{z} + \mathbf{a}_{qz} \quad (7.18)$$

kde jednotlivé vektory a matice představují

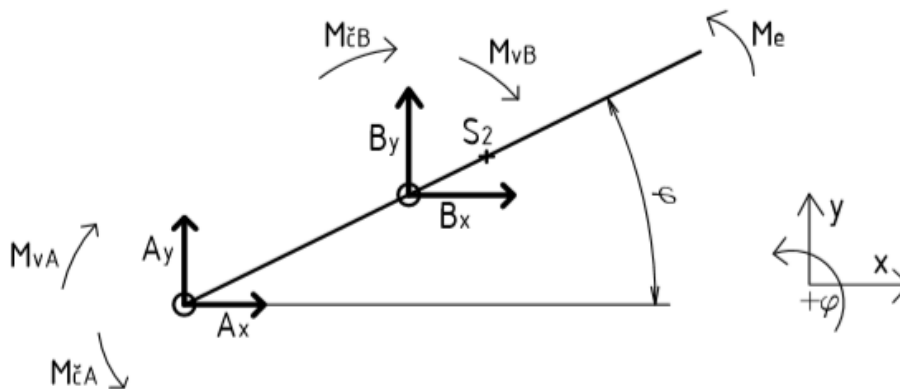
$$\mathbf{a} = [\ddot{x}_2 \quad \ddot{y}_2 \quad \ddot{\varphi}_2 \quad \ddot{x}_3 \quad \ddot{y}_3 \quad \ddot{\varphi}_3 \quad \ddot{x}_4 \quad \ddot{y}_4 \quad \ddot{\varphi}_4]^T \quad (7.19)$$

$$\mathbf{V}_q = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \cos\delta \quad \sin\delta \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (7.20)$$

$$\mathbf{V}_z = \begin{bmatrix} 0 & -d \sin\varphi \\ 0 & d \cos\varphi \\ 0 & 1 \\ -(l_m + x - d_3) \sin\delta & 0 \\ (l_m + x - d_3) \cos\delta & 0 \\ 1 & 0 \\ -d_4 \sin\varphi & 0 \\ d_4 \cos\varphi & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

$$\mathbf{a}_{qz} = \begin{bmatrix} -d \cos\varphi \cdot \dot{\varphi}^2 \\ -d \sin\varphi \cdot \dot{\varphi}^2 \\ 0 \\ -2\dot{x} \sin\delta \cdot \dot{\delta} - (l_m + x - d_3) \cos\delta \cdot \dot{\delta}^2 \\ 2\dot{x} \cos\delta \cdot \dot{\delta} - (l_m + x - d_3) \sin\delta \cdot \dot{\delta}^2 \\ 0 \\ -d_4 \cos\delta \cdot \dot{\delta}^2 \\ -d_4 \sin\delta \cdot \dot{\delta}^2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

Následným krokem je uvolnění jednotlivých těles a sestavení Newton-Eulerových rovnic pro tělesa 2, 3 a 4 (rovnice (7.23) až (7.31)). Ve všech kinematických dvojicích je uvažováno suché a viskózní tření.

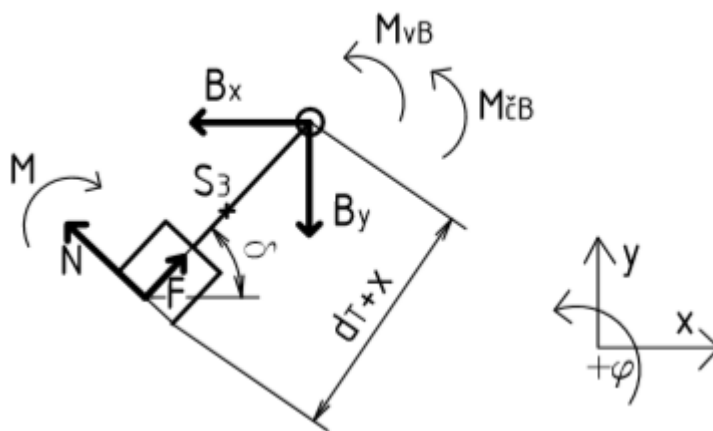


Obr. 23 Uvolnění tělesa 2

$$m_2 \ddot{x}_2 = -A_x - B_x \quad (7.23)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = A_y + B_y \quad (7.24)$$

$$I_2 \ddot{\varphi} = B_y l_a \cos \varphi - B_x l_a \sin \varphi - \text{sign}(\dot{\varphi}) \mu_{\check{c}} r_{\check{c}} \sqrt{A_x^2 + A_y^2} - \mu_{\check{c}} r_{\check{c}} \sqrt{B_x^2 + B_y^2} + M_e - 2\mu_v \dot{\varphi} \quad (7.25)$$

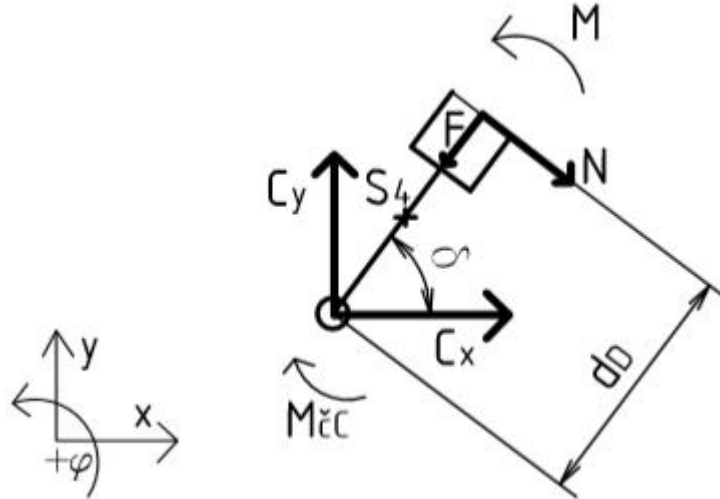


Obr. 24 Uvolnění tělesa 3

$$m_3 \ddot{x}_3 = -B_x - F \cos \delta - N \sin \delta - \mu_T \dot{x} \cos \delta - \text{sign}(\dot{x}) \mu_c N \cos \delta \quad (7.26)$$

$$m_3 \ddot{y}_3 = -B_y - F \sin \delta + N \cos \delta - \mu_T \dot{x} \sin \delta - \text{sign}(\dot{x}) \mu_c N \sin \delta \quad (7.27)$$

$$I_3 \ddot{\delta} = -M - N(d_T + x) + \mu_v \dot{\varphi} + \mu_{\check{c}} r_{\check{c}} \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (7.28)$$



Obr. 25 Uvolnění tělesa 4

$$m_4 \ddot{x}_4 = C_x + F \cos \delta + N \sin \delta - \mu_T \dot{x} \cos \delta - \text{sign}(\dot{x}) \mu_c N \cos \delta \quad (7.29)$$

$$m_4 \ddot{y}_4 = C_y + F \sin \delta - N \cos \delta - \mu_T \dot{x} \sin \delta - \text{sign}(\dot{x}) \mu_c N \sin \delta \quad (7.30)$$

$$I_4 \ddot{\delta} = M - N d_D - \mu_v \dot{\delta} - \text{sign}(\dot{\delta}) \mu_c r_{\check{c}} \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad (7.31)$$

Tuto soustavu rovnic lze zapsat v maticovém tvaru rovnicí (7.32), kde vektor \mathbf{R} je vektor neznámých, matice \mathbf{M} je matice hmotností a vektor \mathbf{Q} je vektorem vnějších silových účinků.

$$\mathbf{M} \mathbf{a} = \mathbf{D} \mathbf{R} + \mathbf{Q} \quad (7.32)$$

$$\mathbf{M} = \text{diag}([m_2, m_2, I_2, m_3, m_3, I_3, m_4, m_4, I_4,]) \quad (7.33)$$

$$\mathbf{R} = [A_x \quad A_y \quad B_x \quad B_y \quad C_x \quad C_y \quad N \quad M]^T \quad (7.34)$$

Neznámé vektory nakonec sestavíme do soustavy rovnic podle rovnice (7.35). Konstanta M_e , vystupující v rovnici (7.25), představuje vnější moment působící na mechanismus dveří (například silovým působením větru nebo člověka).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{D} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} & -\mathbf{V}_z & -\mathbf{V}_q \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{J}_z & \mathbf{J}_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{R} \\ \dot{\mathbf{z}} \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{a}_{qz} \\ -\mathbf{j}_{qz} \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

7.2 Výsledky simulačního modelu stavěče pro různé modely tlumiče

Pro simulační model celého mechanismu byly pro popis chování magnetoreologického tlumiče použity různé fenomenologické modely. Vstupy simulačního modelu jsou vnější podněty působící na dveře reprezentované externím momentem M_e a napětí vstupující do magnetoreologického tlumiče. Ze simulačního modelu lze získat průběhy pohybu tlumiče x a natočení dveří φ v reakci na vnější podněty, popřípadě derivace těchto souřadnic, tj. rychlosti a zrychlení. Lze také získat průběhy reakčních sil, které můžeme použít pro dimenzování čepů v rotačních vazbách.

V tabulce 5 jsou uvedeny parametry simulace (parametry magnetoreologického tlumiče jsou uvedeny v tabulce 2 v kapitole 6.2 pro Bouc-Wen model a v tabulce 3 v kapitole 6.3 pro biviskózní hysterezní model). Parametry rozměrů, hmotností a momentů setrvačností jsou voleny jako hodnoty odpovídající běžným dveřím automobilu. Hodnoty parametrů vystupujících v pasivních odporech jsou voleny dle odhadů z praktických zkušeností.

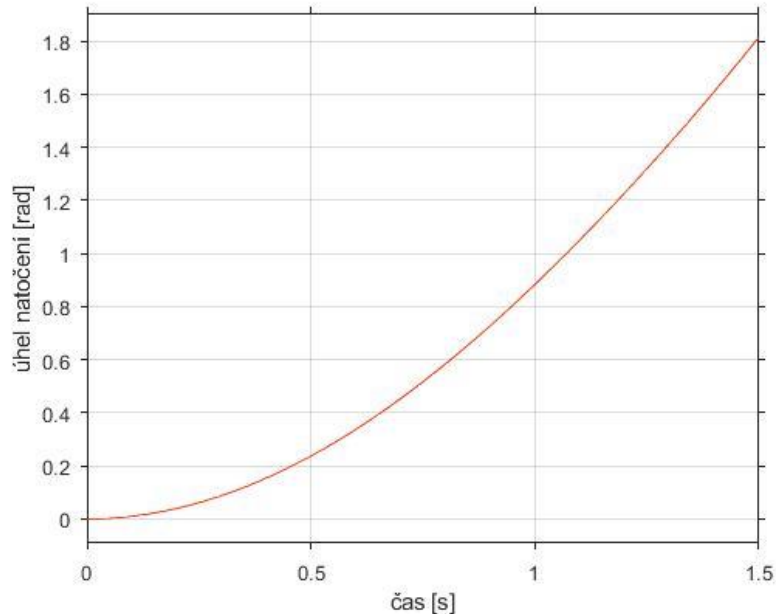
l_a	0,25 m	Rozměr uložení tlumiče vůči dveřím 1
l_c	0,04 m	Rozměr uložení tlumiče vůči dveřím 2
l_m	0,225 m	Rozměr MR tlumiče
d_T	0,1 m	Rozměr MR tlumiče 3
d_D	0,125 m	Rozměr MR tlumiče 4
d	0,6 m	Vzdálenost těžiště tělesa 2
d_3	0,05 m	Vzdálenost těžiště tělesa 3
d_4	0,05 m	Vzdálenost těžiště tělesa 4
μ_T	0,15	Součinitel viskózního tření
μ_v	0,15	Součinitel viskózního tření
m_2	18 kg	Hmotnost tělesa 2
m_3	0,5 kg	Hmotnost tělesa 3
m_4	0,5 kg	Hmotnost tělesa 4
I_2	6,3 kg.m ²	Moment setrvačnosti tělesa 2 k bodu A
I_3	0,5 kg.m ²	Moment setrvačnosti tělesa 3 k bodu B
I_4	0,5 kg.m ²	Moment setrvačnosti tělesa 4 k bodu C
M_e	10 Nm	Vnější moment
$r_{\check{c}}$	0,12	Čepový poloměr
$\mu_{\check{c}}$	0,15	Součinitel čepového tření
μ_c	0,12	Součinitel suchého tření

Tabulka 5 Parametry simulace modelu stavěče

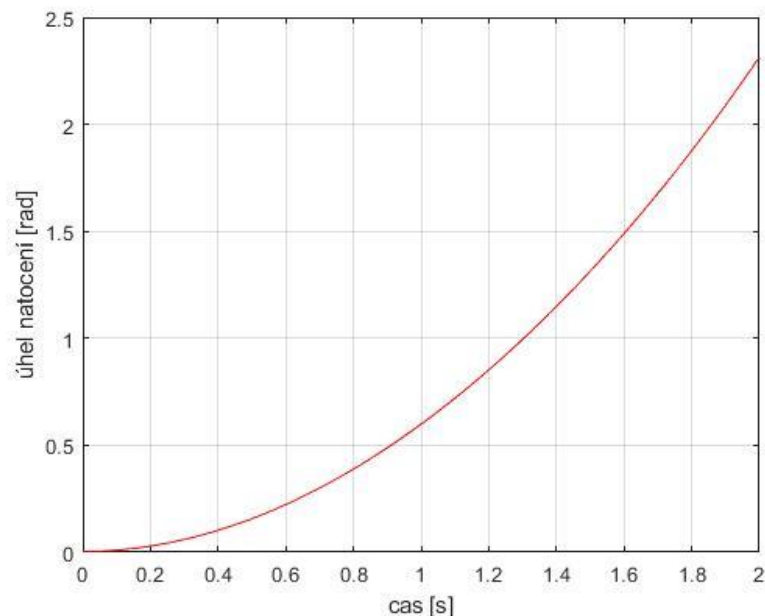
Simulační model stavěče s Bouc-Wen modelem tlumiče má název *stavec.slx*, model s biviskózním hysterezním modelem tlumiče má název *stavec_Biviscous_hysteresis.slx*.

Na (Obr. 26 a Obr. 27) lze vidět průběh úhlu natočení dveří φ při otevírání dveří konstantním externím momentem M_e pro dva různé použité simulační modely magnetoreologického tlumiče. Napětí posílané do magnetoreologického tlumiče pro snadný pohyb dveřmi musí být 0 V. Při nulovém napětí v tlumiči má kapalina v tlumiči nízkou viskozitu, síla v tlumiči je malá a tlumič se chová téměř lineárně

a nebrání v pohybu dveřmi, což je důležité z bezpečnostního hlediska mechanismu stavěče. V případě nouze by dveře šly otevřít bez ohledu na dostupnost elektrické energie. Rozdílná rychlost otevírání v závislosti na použitém modelu je způsobena tím, že parametry simulačních modelů tlumičů nejsou ze stejného identifikovaného magnetoeologického tlumiče. Pro větší externí moment, kterým jsou dveře otevírány je celý proces otevírání dveří časově kratší, čili uživatel bez potíží může zavírat dveře různými rychlostmi, tlumič s nulovým řídicím napětím mu v tom příliš nebrání a pro otevření dveří není potřeba ani velké síly.

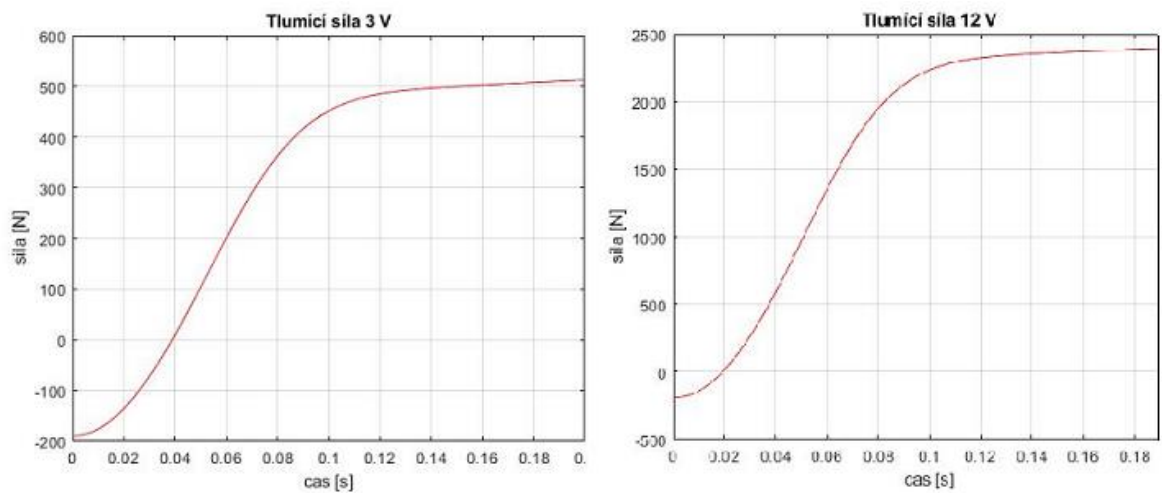


Obr. 26 Průběh úhlu natočení dveří v čase při otevírání dveří (Bouc-Wen model)

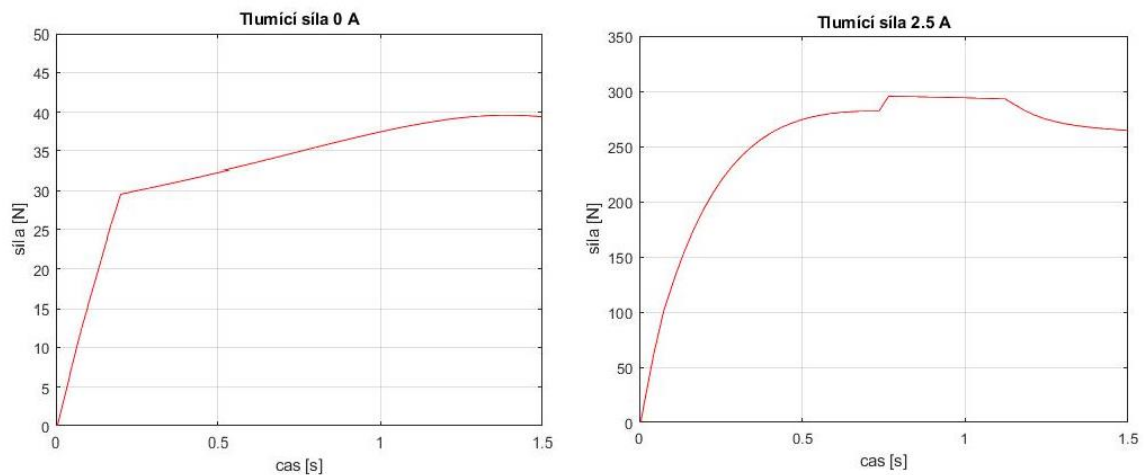


Obr. 27 Průběh úhlu natočení dveří v čase při otevírání dveří (biviskózní hysterezní model)

Pokud chceme dveře zastavit proti pohybu, musíme změnit vstupní napětí na určitou hodnotu. To může učinit uživatel, nebo změnu napětí může učinit mikroprocesor na základě dat ze senzorů. Velikost tlumící síly, pro dvě různé hodnoty napětí 3 V a 12 V u modelu s Bouc-Wen tlumičem, jako odezvu na působení externího momentu lze vidět na (Obr. 28). Na (Obr. 29) je pro stejnou situaci velikost tlumící sílu u modelu s biviskózním hysterezním tlumičem pro hodnoty proudu 0 A a 2,5 A. Pro větší působící externí moment by síla ke své maximální hodnotě nabíhala rychleji. Pokud srovnáme mezi sebou oba modely, je na první pohled zřejmé, že parametry neodpovídají stejnému tlumiči, jedná se o ukázkou reakce tlumiče na zvyšující se rychlost pohybu způsobenou vnějším momentem.

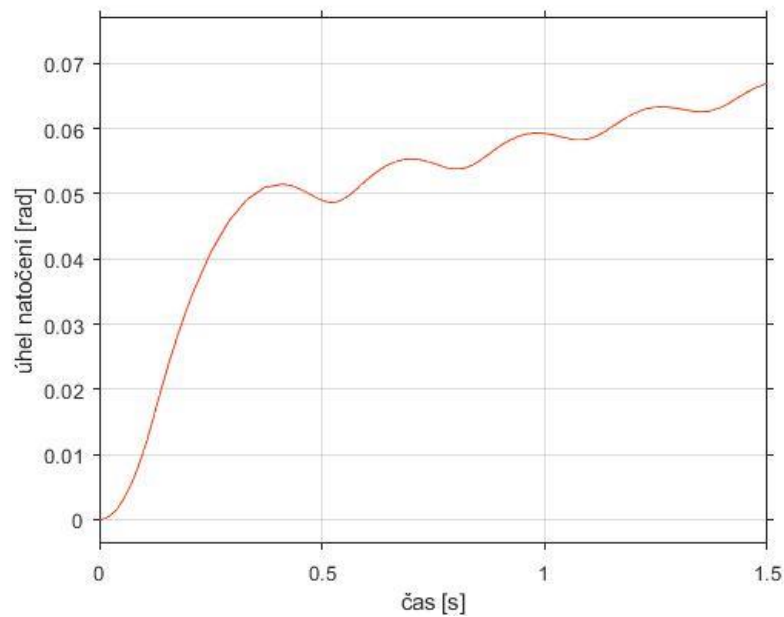


Obr. 28 Porovnání tlumící síly při napětí 3 V a 12 V (Bouc-Wen model)

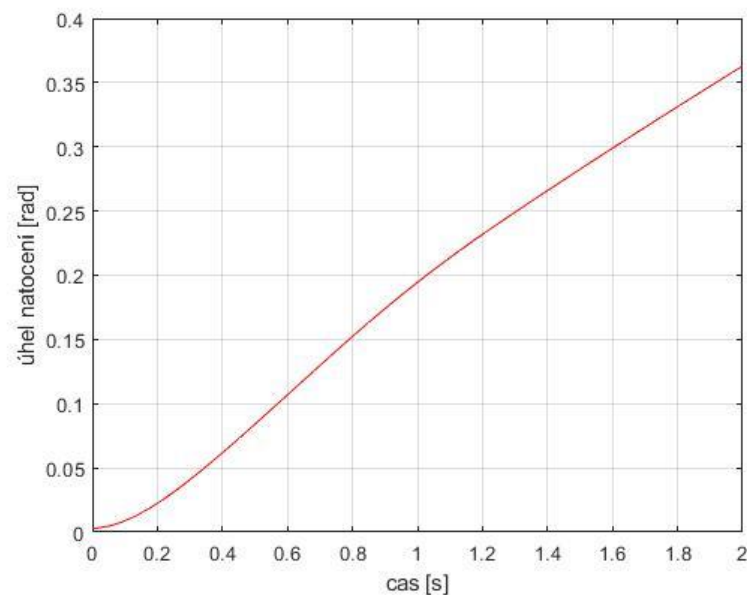


Obr. 29 Porovnání tlumící síly při proudu 0 A a 2,5 A (biviskózní hysterezní model)

Pokud vykreslíme úhel natočení dveří při hodnotě napětí v tlumiči 3 V (Obr. 30), zjistíme, že dveře se pod vlivem vnějšího momentu pohnou jen nepatrně. Obdobně lze vykreslit chování modelu s biviskózním hysterezním modelem tlumiče při hodnotě řídicího proudu 2,5 A (Obr. 31), kde taktéž dojde k výraznému zpomalení pohybu. Jelikož biviskózní hysterezní model je v tomto případě dosti zjednodušující, a i přestože vystihuje princip chování magnetoreologického tlumiče, vzhledem k lepším výsledkům simulací pro mechanismus stavěče s modelem Bouc-Wen bude návrh řízení mechanismu a následná optimalizace jeho parametrů provedena právě pro simulační model stavěče s modelem tlumiče Bouc-Wen. Dalším důvodem je, že použitý Bouc-Wen model poskytuje vzhledem k rozměrům a velikosti stavěče přesnější velikosti sil odpovídající reálným magnetoreologickým tlumičům.



Obr. 30 Průběh úhlu natočení dveří φ v čase při napětí v tlumiči 3 V (Bouc-Wen model)



Obr. 31 Průběh úhlu natočení dveří v čase při proudu 2.5 A (biviskózní hysterezní model)

8 Návrh řízení mechanismu stavěče

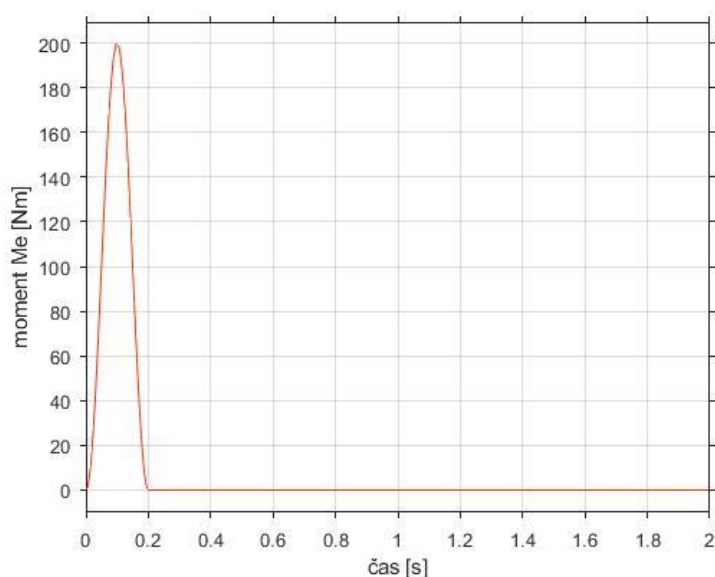
Řízení a změnu vlastností tlumiče lze docílit změnou řídicího napětí v tlumiči. Řídicí napětí magnetoreologického tlumiče je v rozmezí 0 až 12 V. Pro mechanismus stavěče budeme uvažovat dva způsoby řízení, označeny jsou jako řízení 1 a řízení 2.

První způsob uvažuje situaci, kdy jsou dveře otevřené a uživatel požaduje jejich fixaci v dané poloze, a to i v případě působení vnějších vlivů. Druhý způsob představuje zastavení dveří během otevírání na základě signálu z kolizních senzoru varujících před překážkou. Simulační model s prvním řízením je pojmenován *stavec_1.slx*, simulační model s druhým řízením je pojmenován *stavec_2.slx*.

8.1 Řízení 1

V prvním případě budeme simulovat působení vnějšího impulsu na zafixované dveře. Vnější impuls je v simulačním modelu představován jednou periodou funkce

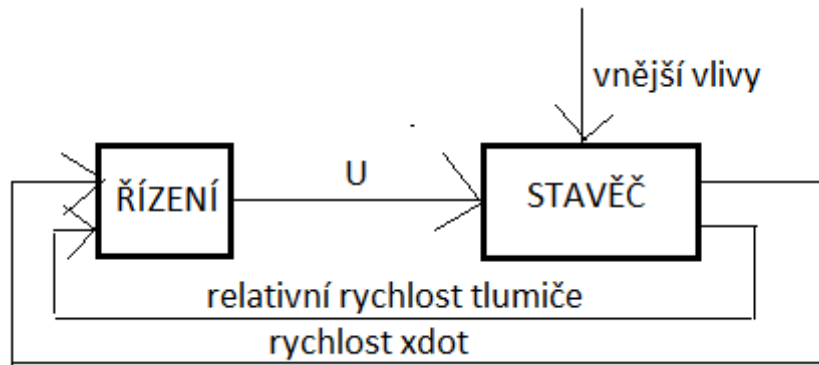
$$M_e = 100 \cdot (1 + \cos(10 \cdot \pi \cdot t + \pi)) \text{ Nm} \quad (8.1)$$



Obr. 32 Moment působící na dveře

pro čas t od 0 do 0,2 sekundy (Obr. 32). Cílem je, aby se dveře po působení tohoto momentu vychýlily ze své původní polohy minimálně. Poměrně velká amplituda vnějšího momentu M_e je volena s ohledem na to, že uvažovaným vnějším podmětem nemusí být jen drobné popostrčení od člověka nebo vítr, ale může dojít i k poměrně velkému nárazu na dveře a požadavkem s ohledem na bezpečnost je zastavení pohybu především při větších možných vnějších podnětů, a tudíž větších možných rychlostech dveří.

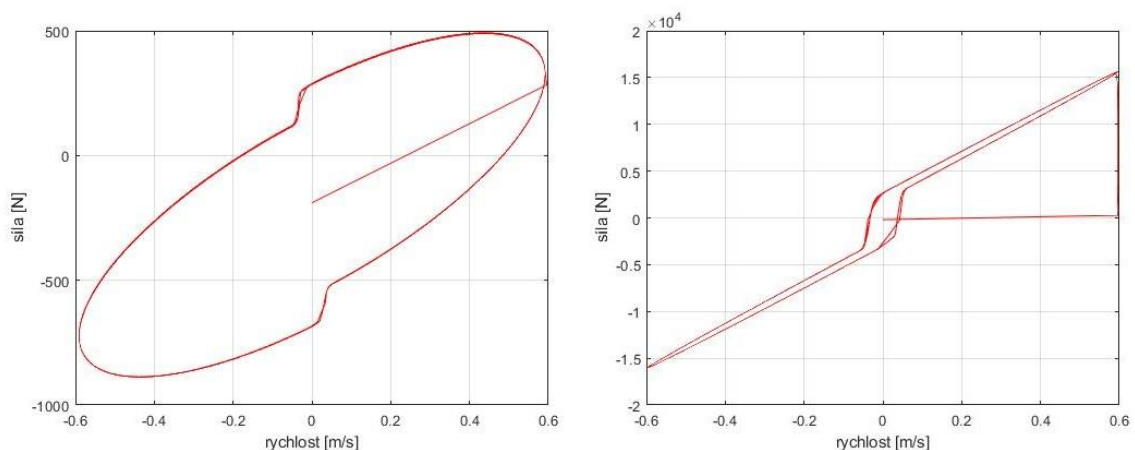
Pro řídicí algoritmus lze uvažovat jednoduché schéma (Obr. 33). Relativní rychlost tlumiče a rychlost \dot{x} (definuje pohyb celého mechanismu) jsou získávány pomocí lineárních senzorů, například by bylo možné využít LVDT (= linear variable differential transformer). Veličina U představuje řídicí stejnosměrné napětí, které je vstupem do magnetoreologického tlumiče.



Obr. 33 Schéma řídicí smyčky

Velikost řídicího napětí U bude záviset na velikosti vstupů, tj. rychlostí. Na základě vstupních veličin do systému jsme schopni definovat maximální sílu F_{max} a minimální sílu F_{min} v tlumiči pro danou relativní rychlost tlumiče. Tyto síly určíme z charakteristik tlumiče síla-rychlost, sílu F_{max} z charakteristiky pro napětí U_{max} (Obr. 34 vpravo) a sílu F_{min} z charakteristiky pro napětí U_{min} (Obr. 34 vlevo).

Požadovanou sílu F_d v magnetoreologickém tlumiči lze v nejjednodušším případě uvažovat přímo úměrnou rychlosti \dot{x} s konstantním parametrem přímé úměry.



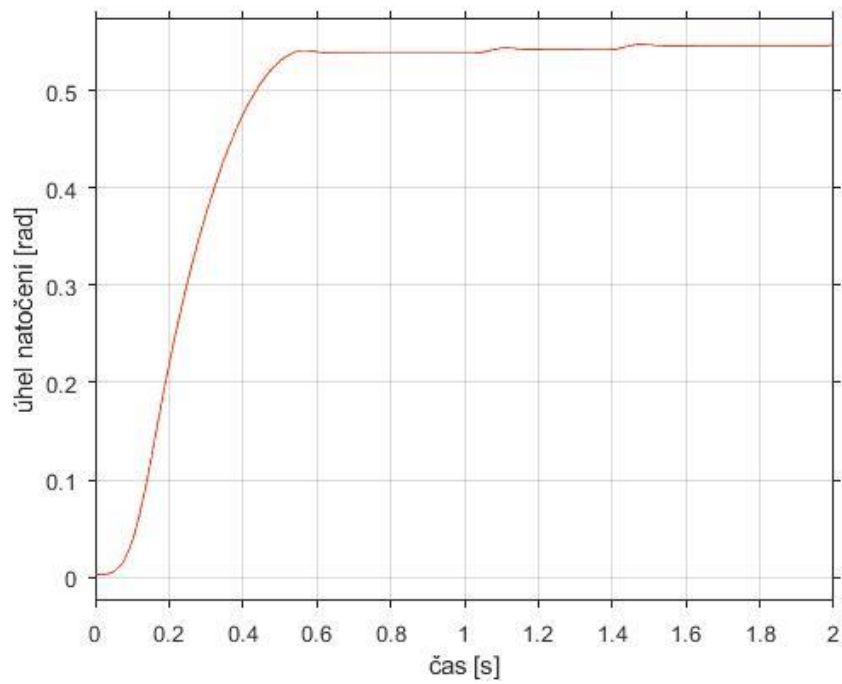
Obr. 34 Charakteristiky síla-rychlost pro $U=0$ V (vlevo) a pro $U=12$ V (vpravo)

Nakonec můžeme vyjádřit řídicí napětí (omezeno pouze do mezí U_{min} až U_{max}).

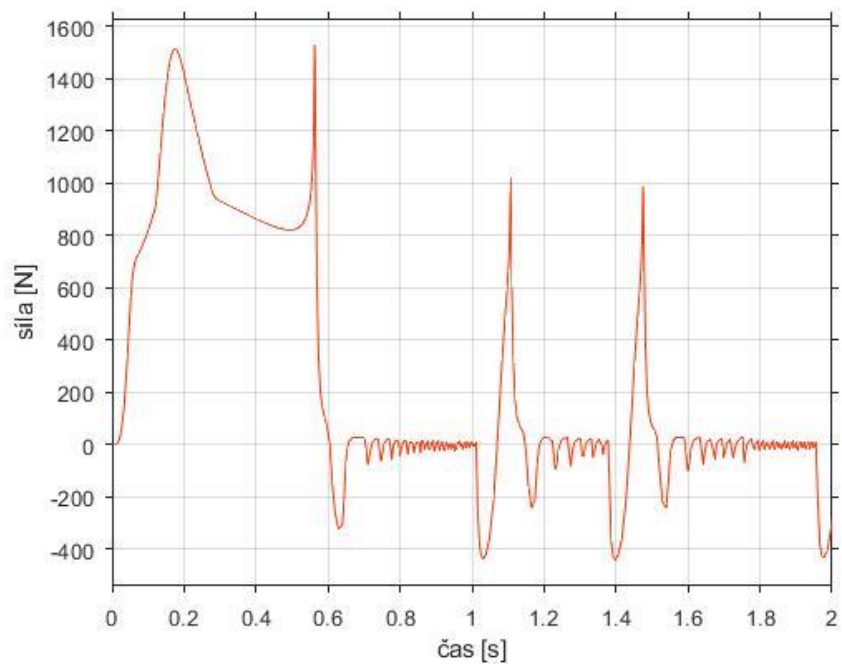
$$U = U_{max} - (U_{max} - U_{min}) \cdot \frac{F_{max} - F_d}{F_{max} - F_{min}} \quad (8.2)$$

Na Obr. 35 je znázorněna odezva stavěče (průběh natočení dveří) na vnější impuls (Obr. 32). Dojde k zastavení pohybu, ale navržené řízení není schopno rychle reagovat na vnější impuls momentu, dojde k velké výchylce z původní polohy a průběh síly v magnetoreologickém tlumiči je nepříznivý (Obr. 36). Proto bude snahou

v následující kapitole vylepšit řízení, abychom se přiblížili požadovaným vlastnostem mechanismu stavěče.



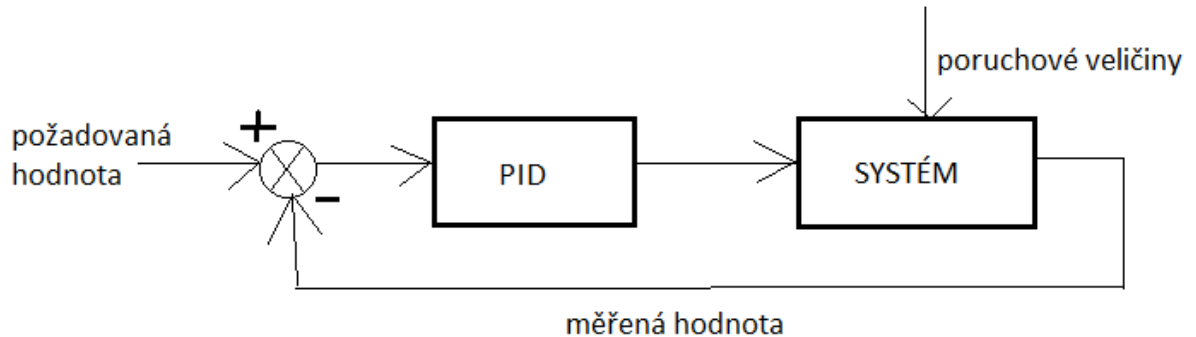
Obr. 35 Průběh natočení dveří při působení vnějších vlivů na aktivní mechanismus stavěče



Obr. 36 Průběh síly při zastavování dveří

8.1.1 Využití PID regulátoru

Možným zlepšením zastavení se dá docílit přidáním PID regulátoru. Ve schématu PID regulace (Obr. 37) bude v našem případě požadovanou hodnotou nulová rychlost \dot{x} a měřenou hodnotou aktuální hodnoty rychlosti \dot{x} .



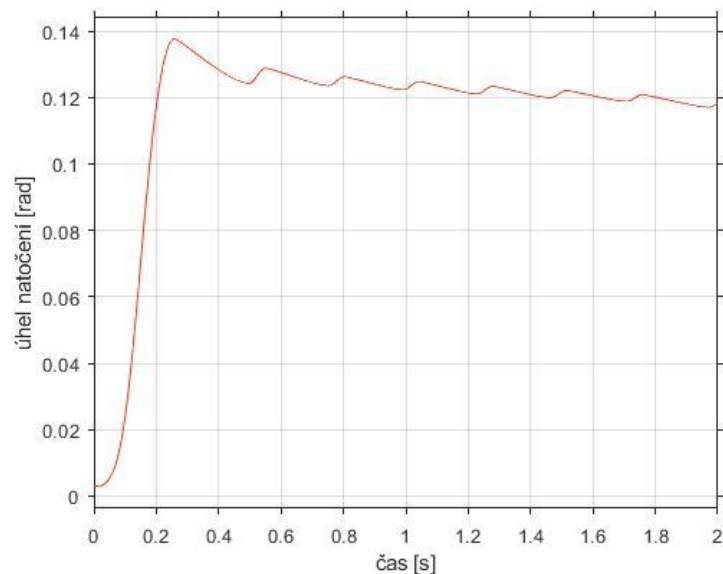
Obr. 37 Schéma regulace pomocí PID regulátoru

Parametry PID regulátoru byly zvoleny na základě funkce automatického ladění PID regulátoru v softwaru Simulink. Hodnoty parametrů jsou uvedeny v tabulce 6.

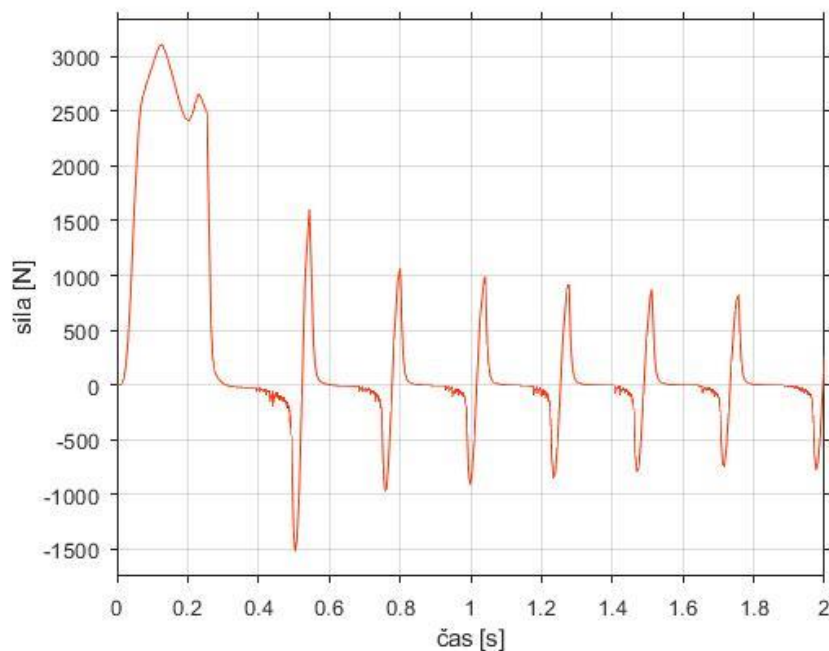
Proporcionální složka P	15.0790843061143
Integrační složka I	69.8672400083443
Derivační složka D	0.440748676848375

Tabulka 6 Parametry PID regulátoru

Při použití PID regulátoru dosáhneme rychlejšího utlumení vnějšího impulsu působícího na dveře a dojde k menšímu vychýlení dveří z původní polohy (Obr. 38). Taktéž průběh síly v magnetoreologickém tlumiči je lehce příznivější než v předchozím případě bez využití PID regulátoru (Obr. 39), ale stále trvá stavěči velmi dlouhou dobu, než se dostane do klidové polohy a průběh není plynulý. Tento problém se dá vyřešit volbou vhodných parametrů řízení, které získáme z optimalizace v kapitole 9.



Obr. 38 Průběh natočení dveří při použití PID regulátoru



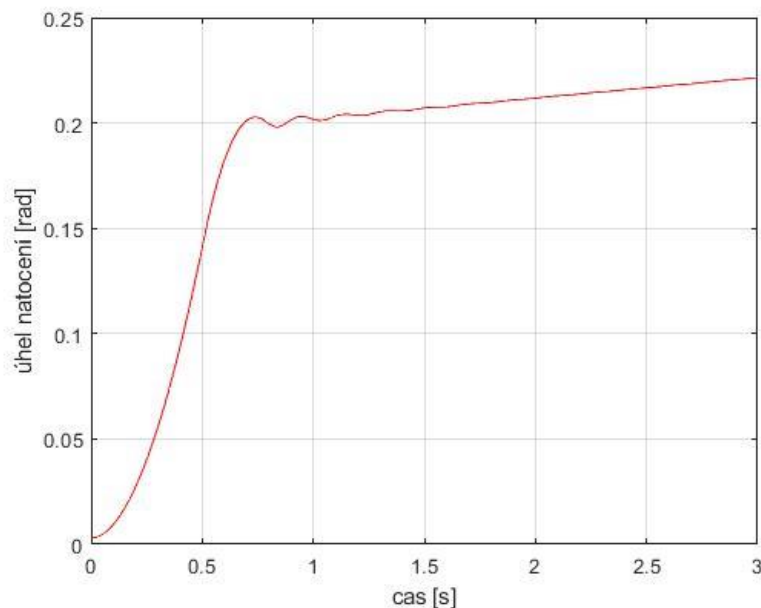
Obr. 39 Průběh síly při zastavování dveří s využitím PID regulátoru

8.2 Řízení 2

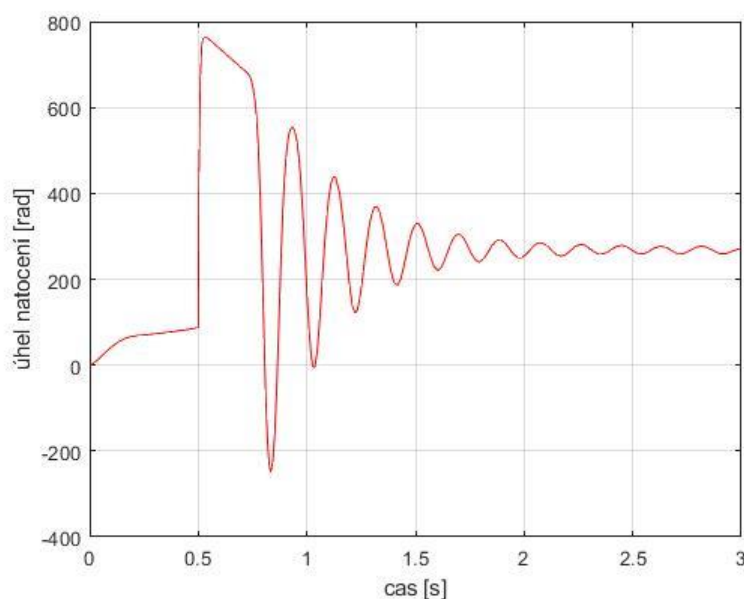
Druhá řídicí logika zajišťuje zastavení v případě, kdy se v dráze pohybu dveří objeví překážka. Pro detekci překážek je nutné použít senzor, dostačující je proximní snímač vzdálenosti. Takovým senzorem může být ultrazvukový snímač vzdálenosti vhodně nastavený na požadovanou vzdálenost dveří a překážky. Jedná se o stejný princip jako parkovací senzory v automobilech.

Při otevírání dveří uživatelem (kterého představuje konstantní moment M_e) má průběh natočení dveří dle (Obr. 26) v kapitole 7.2. V momentě, kdy přijde z proximního snímače informace, že je v cestě překážka, dojde k zapnutí řídicího napětí v tlumiči. Průběh natočení dveří v čase, jestliže v čase 0,5 sekundy přišel signál o přítomnosti překážky (Obr. 40). V takovém případě dojde k utlumení pohybu dveří a při stále působícím vnějším momentu se ustálí síla v tlumiči (Obr. 41) na takové hodnotě, kdy se budou dveře pod působícím momentem velice nepatrně pohybovat přibližně rovnoměrným pohybem. Velikost řídicího napětí, které v případě potřeby je aplikováno v tlumiči, lze vyladit na potřebnou tuhost tak, aby plnil funkci stavěče v případě možné kolize s překážkou, ale v případě nouze bylo možno dveře přetlačit a otevřít.

Stejná řídicí logika je vhodně použitelná i pro případ, kdy se dveře přiblíží své maximální poloze otevření. Pokud dojde k překročení mezní hodnoty polohy x (měřená například LVDT senzorem polohy), dojde k utlumení pohybu, aby nedošlo k poškození částí tlumiče nebo dveří.



Obr. 40 Průběh natočení dveří při signalizaci překážky v cestě pohybu



Obr. 41 Průběh síly při zastavení dveří v důsledku přítomnosti překážky

V případě odstranění překážky dojde opět k uvolnění stavěče a je možno pokračovat v procesu otevírání dveří. Jedná se pouze o dva stavy (dva stavy proximityho snímače) – stav 0, kdy není překážka v cestě, řídicí napětí je 0 V a s dveřmi lze manipulovat a stav 1, kdy je v cestě překážka, řídicí napětí je 3 V (řídicí napětí v tomto případě může být i menší nebo větší, podle toho, zda požadujeme plynulejší ztlumení pohybu menším řídicím napětím anebo rychlejší a větší zpomalení pohybu pomocí vyššího řídicího napětí).

9 Optimalizace stavěče pomocí genetických algoritmů

Pro optimalizaci genetickými je nejdůležitější definovat cílovou funkci, jelikož podle ní probíhá výběr vhodných jedinců v populaci. Při uvažování více kritérií definujeme celkovou cílovou funkci jako vážený součet dílčích cílových funkcí. Optimalizace bude prováděna na modelu stavěče s prvním řízením (kapitola 8.1) za stejných provozních podmínek, na které bylo navrhováno řízení, tj. působící impuls vnějšího momentu má průběh dle (Obr. 32). Důvodem je, že druhá řídicí logika vychází pouze ze struktury magnetoreologického tlumiče a řízení není navrženo podle žádného zákona řízení, jedná se pouze o zapnutí/vypnutí napětí v tlumiči dle výstupu ze senzorů. Při optimalizaci byly uvažovány 4 parametry, čtyři parametry ze zákona řízení $p_1 = b$, $p_2 = P$, $p_3 = I$ a $p_4 = D$ (jedná se o parametry PID regulátoru a parametr b jako parametr požadované síly F_d). Jelikož parametry tlumiče jsou uvažovány jako pevně dané ze struktury tlumiče a parametry dveří a umístění tlumiče do dveří jsou taktéž uvažovány jako dané (dveře jsou z výroby, prostor pro umístění tlumiče je velmi omezen).

9.1 Cílová funkce

První dílčí kritérium vychází z požadavku, aby při vnějším impulsu došlo k minimálnímu vychýlení dveří ze své zastavené polohy (x_0 nebo φ_0). Toto kritérium je možno definovat přes proměnnou x nebo φ . Dílčí cílová funkce (CF = cost function) je

$$CF_1 = |x_{max} - x_0| \quad (9.1)$$

Jako další kritérium lze uvažovat požadavek snížit dynamické účinky a tím pádem požadavek na minimalizaci \ddot{x} . Jelikož se jedná o veličinu proměnnou v čase, je potřeba minimalizovat časový integrál zrychlení a aby nedocházelo k odečítání záporných zrychlení bude dílčí kritérium vypadat

$$CF_2 = \int_0^t \ddot{x}^2 dt \quad (9.2)$$

Pro implementaci v Matlabu byla tato dílčí funkce uvažována v numerické podobě

$$CF_2 = \sum_{i=1}^t \left[\left(\frac{\ddot{x}_{i+1} + \ddot{x}_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right]^2 \quad (9.3)$$

Vzhledem k tomu, že by mohl nastat případ, kdy bude zrychlení minimalizované a dveře by mohly být v pohybu, je uvažováno ještě třetí kritérium, kdy minimalizujeme dráhu tlumiče x právě z toho důvodu, aby nedošlo k ustálení na rovnoměrný pohyb, kdy bude zrychlení minimální, ale stavěč nebude plnit svou funkci.

$$CF_3 = \int_0^t |\dot{x}| dt \quad (9.4)$$

V numerické podobě obdobně jako v předchozím případě bude dílčí cílová funkce vypadat

$$CF_3 = \sum_{i=1}^t \left| \left(\frac{\dot{x}_{i+1} + \dot{x}_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right| \quad (9.5)$$

Výsledná cílová funkce je váženým součtem

$$CF = q_1 \cdot CF_1 + q_2 \cdot CF_2 + q_3 \cdot CF_3 \quad (9.6)$$

Výsledek optimalizace je závislý na volbě váhových koeficientů. Podle volby váhových koeficientů se dají ladit výsledné parametry v závislosti na našich požadavcích. Optimalizace pomocí genetických algoritmů byla provedena v Matlabu, soubor má označení *stavec_optim.m*, cílová funkce je v souboru *stavec_cost.m*.

9.2 Výsledky optimalizace

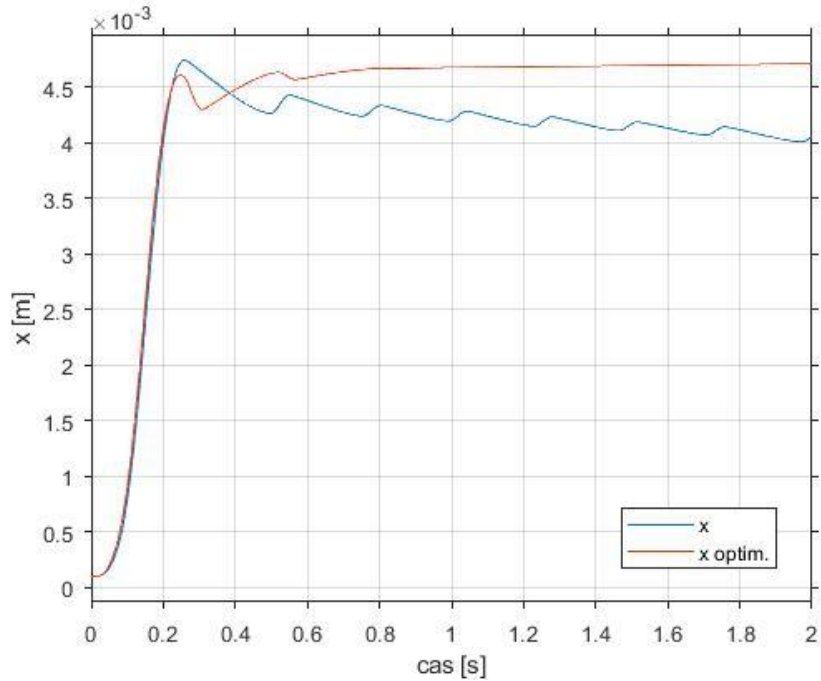
Výsledkem optimalizace není jedno konkrétní řešení, ale množina nejvýhodnějších řešení s ohledem na požadavky optimalizace. Jedno z možných optimalizovaných řešení bylo zvoleno a použito pro simulaci simulačního modelu stejně jako v kapitole 8.1.1.

V tabulce 7 jsou optimalizované parametry použité pro simulaci. V tomto případě byly všechny váhové koeficienty v rovnici (9.6) rovny 1.

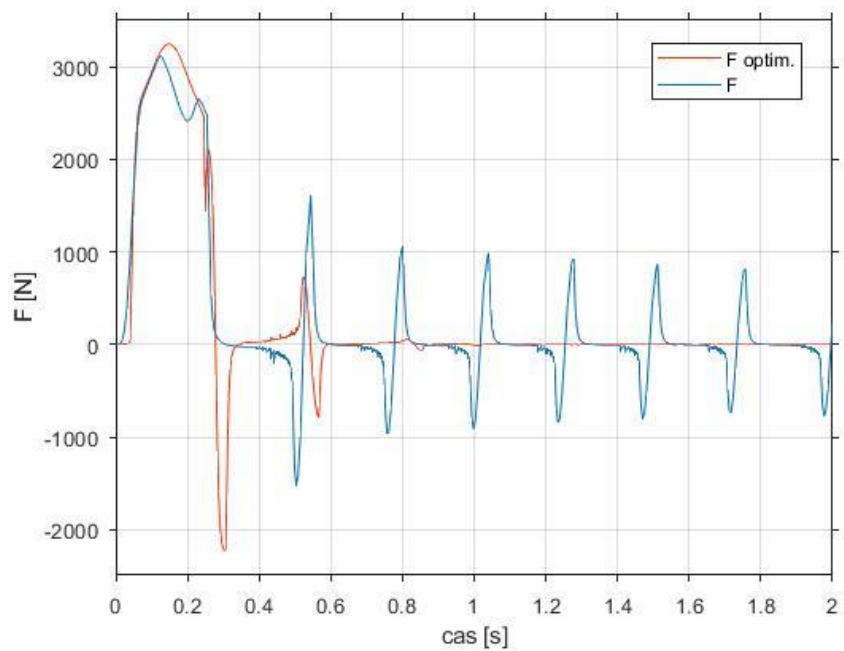
Parametr řízení b	3774.5
Proporcionální složka P	666.8336
Integrační složka I	-514.4293
Derivační složka D	-9.6460

Tabulka 7 Optimalizované parametry použité pro simulaci

Na (Obr. 42) je znázorněno srovnání časového průběhu souřadnice x pro optimalizovanou a neoptimalizovanou variantu modelu. V první části průběhu souřadnice polohy není možnost docílit menší výchylky, protože zde dochází k maximálnímu tlumení, které je dané konstrukcí magnetoreologického tlumiče. V druhé části (přibližně od času 0,2 sekundy) dochází k odeznění působícího momentu a úplnému zastavení pohybu dveří. V případě optimalizované varianty dochází k plynulejšímu a rychlejšímu zastavení pohybu. Úhlové vychýlení dveří je v obou případech mezi 0,1 až 0,15 radiánů, a to i přes poměrně velký vnější impulz dle rovnice (58) v kapitole 8.1. Zmenšení tohoto vychýlení lze docílit použitím většího tlumiče, který je schopen poskytovat větší síly.



Obr. 42 Srovnání průběhu polohy x optimalizovaného a neoptimalizovaného modelu



Obr. 43 Srovnání průběhu sil optimalizovaného a neoptimalizovaného modelu

Na (Obr. 43) je srovnání průběhů síly. V optimalizované variantě dochází k velice rychlému utlumení (v čase 0,2 sekundy přestává úplně působit vnější moment a v čase 0,6 sekundy dochází v podstatě k úplnému utlumení mechanismu a tlumič negeneruje žádnou sílu). Tento příznivější průběh vychází z druhého a třetího kritéria pro optimalizaci, kapitola 9.1. Parametry modelu stavěče jsou optimalizovány pro provozní režim z kapitoly 8.1 s amplitudou vnějšího momentu 100 Nm, ale simulační model dává podobně uspokojivé výsledky i pro menší amplitudy vnějšího momentu

10 Závěr

Práce se zabývala možností nahrazení běžného pasivního mechanismu stavěče dveří automobilu umožňující zastavení pouze v několika málo předem definovaných polohách mechanismem novým využívající magnetoreologický tlumič. Požadavkem bylo získat funkční a bezpečný mechanismus stavěče schopný s pomocí senzorů reagovat na okolní podněty při zavírání, respektive otevírání dveří a při fixaci dveří v požadované poloze.

V první části práce byla provedena rešerše stávajících a používaných mechanismů stavěče dveří automobilu. Z různých možných přístupů ke konstrukci mechanismu stavěče bylo zvoleno využití semiaktivního prvku – magnetoreologického tlumiče, protože poskytuje možnost řízení řídicím napětím, eliminuje nebezpečí destabilizace systému a také protože nevytváří přídatnou sílu pro otevírání, ale plní pouze jen funkci zastavení nebo zpomalení pohybu. Vzhledem k využití magnetoreologického tlumiče v mechanismu byly provedeny rozборы různých fenomenologických modelů magnetoreologického tlumiče. V závěru první části byl stručně nastíněn princip optimalizace genetickými algoritmy.

Hlavní náplní práce byla tvorba simulačního modelu stavěče dveří automobilu. Navržený mechanismus obsahuje jako svou hlavní část magnetoreologický tlumič, a proto byly vytvořeny simulační modely tří různých fenomenologických modelů a byla provedena simulace chování jednotlivých modelů při harmonické výchylce polohy. Pro další využití byly vybrány pouze biviskózní hysterezní model a upravený Bouc-Wen model, jelikož pro jednoduchý model nebyly k dispozici vhodné parametry tlumiče, které by věrohodně popisovaly skutečné chování. S využitím zmíněných dvou modelů tlumičů byly vytvořeny simulační modely celého mechanismu stavěče vestavěného do dveří automobilu a byly provedeny simulace reakce na působení vnějšího momentu. Při porovnání hodnot generovaná síla/rozměry se skutečnými reálně použitelnými magnetoreologickými tlumiči vycházel jako nejpřesnější model ten, který používal Bouc-Wen model. S tímto jediným modelem se pracovalo ve zbytku práce.

Pro simulační model stavěče byly navrženy dva případy řízení. První případ pro zajištění polohy otevřených dveří v případě vnějšího impulzu momentu síly působícího na dveře a druhý případ zabráňující kolizi s překážkou v cestě při otevírání dveří.

Nakonec byla provedena optimalizace navrženého mechanismu stavěče pomocí genetických algoritmů. Vzhledem k povaze navržených přístupů k řízení, bylo postačující provést optimalizaci pouze pro první řídicí logiku. Optimalizací bylo dosaženo příznivějších dynamiky mechanismu a bylo docíleno rychlejší utlumení pohybu. Velikost výchylky se ovlivní optimalizací pouze minimálně, jelikož je závislá především na vlastnostech samotného magnetoreologického tlumiče.

11 Literatura

- [1] **Schmoll, T., Plasberg, G., Hoffmann, P., Heinrichs, G., Duning, R.** Door arrester. Patent US 7552953 B2. 2009.
- [2] **Matsuki, K.** Door checker for automobile. Patent US 7383614 B2. 2008.
- [3] **Maas, J., Kern, S.** Mechatronic Vehicle Door Assistant. In: *2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Zurich*. 2007.
- [4] **Hooton, J.** Infinite check link system. Patent US 9598890 B1. 2017.
- [5] **Yezerky, G., Cilibrise, G.** Door check mechanism providing an infinite number of stable positions. Patent US 6370732 B1. 2002.
- [6] **Johnson, L.** Hinge apparatus with check mechanism. Patent US 7096536 B2. 2006.
- [7] **Rajalu, M., Harrison, T.** Infinitely variable door check. Patent EP 2011942 A1. 2009.
- [8] **Dey, D., Kovie, D.** Hinge hydraulic infinite check structure. Patent US 9562383 B2. 2017.
- [9] **Eger, G., Srock, R.** Control mechanism for a door of a motor vehicle with a reciprocating safety valve. Patent US 4689849. 1987.
- [10] **Gruber, R., Daniels, A.** Vehicle door system with infinite door check. Patent US 2017/0328097 A1. 2017.
- [11] **Stephan, C., Ginder, J., Mozurkewich, G., Dosedall, J., Elie, L., Freeland, M., Potter, T., Vassell, B., Clark, S.** A Magnetorheological Door Check. *JOURNAL OF PASSENGER CARS: ELECTRONIC AND ELECTRICAL SYSTEMS*. 2001, vol. 110, pp. 261-265.
- [12] *Fotonávod - demontáž čalounění dveří* [Online]. Available: <https://www.mazdaclub.cz/clanek/fotonavod-demontaz-calouneni-dveri-tapecirungu-m6-gg-56>.
- [13] *LORD Corporation* [Online]. Available: <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work>.
- [14] *Magneride active suspension system* [Online]. Available: <https://www.bwigroup.com/magneride-active-suspension-system/>.

- [15] *AMT Magnetorheological MR damping solution* [Online]. Available: <https://arusmrtech.com/amt-magnetorheological-mr-damping-solutions/>.
- [16] **Spencer, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., Carlson, J. D.** Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997, vol. 123, 3, pp. 230-238.
- [17] **Min-Sang Seong, Seung-BokChoi, Young-Min Han.** Damping force control of a vehicle MR damper using a Preisach hysteretic compensator. *Smart Materials and Structures*. 2009, vol. 18, 7.
- [18] **Xiao Qing Ma, Rakheja, S., Chun-Yi Su.** Relative Assessments of Current Dependent Models for Magneto-Rheological Fluid Dampers. In: *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Ft. Lauderdale*. 2006.
- [19] **Wereley, N. M., Pang, L., Kamath, G. M.** Idealized Hysteresis Modeling of Electro-rheological and Magneto-rheological Dampers. *J. of Intelligent Material Sys. & Struc.* 1998, vol. 9, pp. 642-649.
- [20] **Houck, C., Joines, J., Key, A.** *A Genetic Algorithm for Function Optimization: A MATLAB Implementation*. North California State University, 1994.
- [21] **Coello, C.** Evolutionary Multiobjective Optimization: Current and Future Challenges. In: *Benitez, J., Cordon, O., Hoffmann, F., and Roy, R., (ed.): Advances in Soft Computing Engineering, Design and Manufacturing*, Springer-Verlag. 2003, pp. 243-256.
- [22] **Ortmann, M.** Multi-criterion optimization of robot trajectories with evolutionary strategies. *FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics*. 2001, vol. 14, 1, pp. 19-32.
- [23] **Valášek, M., Bauma, V., Šika, Z., Belda, K., Píša, P.** Design by Optimization and Control of Redundantly Actuated Parallel Kinematics Sliding Star. *Multibody System Dynamic*. 2005, vol. 14, 3-4, pp. 251-267.
- [24] **Strolz, M., Mortl, A., Graf, M., Buss, M.** Development, Control, and Evaluation of an Actuated Car Door. *IEEE Transactions on Haptics*. 2009, vol. 2, 3, pp. 170-180.