



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE ELEKTRONICKY ŘIDITELNÉHO TLUMIČE PRO TLUMENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU DĚL

DESIGN OF AN ELECTRONICALLY CONTROLLABLE DAMPER FOR THE RECOIL OF GUNS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radoslav Bajza

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubík, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Radoslav Bajza
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Michal Kubík, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce elektronicky říditelného tlumiče pro tlumení zpětného rázu děl

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vhodné tlumení zpětného rázu při střelbě z děla zásadně ovlivňuje rychlost a přesnost střelby. Předpokládá se, že s elektronicky říditelným systémem tlumení je možné výrazně zvýšit efektivnost tohoto systému. Progresivním způsobem může být použití tzv. chytrého materiálu pro řízení tlumení. Vhodným kandidátem se jeví použití magnetoreologické kapaliny.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je konstrukční návrh elektronicky říditelného tlumiče pro tlumení zpětného rázu děl.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- analýza dynamického chování děla a samotného tlumiče zpětného rázu,
- analýza současných konstrukcí tlumičů s popisem jejich výhod a nedostatků,
- sestavení zjednodušeného matematického modelu chování MR tlumiče za vysokých pístových rychlostí,
- koncepční návrhy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, návrhový výkres, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

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

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

LI, Z C a J WANG. A gun recoil system employing a magnetorheological fluid damper. Smart Materials and Structures [online]. 2012, 21(10) [cit. 2022-10-18]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/21/10/105003

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá využitím magnetoreologických technológií pri tlení spätného rázu diel. Bežne používané pasívne tlmiče spätného rázu využívajú zložité mechanizmy na dosiahnutie potrebnej tlmiacej sily, čo negatívne vplýva na ich spoľahlivosť. Tento problém by bolo možné vyriešiť použitím magnetoreologického tlmiča, ktorého odporová sila je ovládateľná elektronicky.

Navrhnutý tlmič je jednoduchej konštrukcie s priechodnou piestnicou. K magnetizácii pracovnej kvapaliny dochádza v bypasse mimo valec tlmiča. V bypasse dochádza k magnetizácii kvapaliny v paralelných drážkach.

Prínosom tejto práce je teoretické preskúmanie správania sa magnetoreologického tlmiča pri rázovom zaťažení pri tlení spätného rázu diel veľkého kalibru. Hlavným výsledkom tejto práce je konštrukčný návrh magnetoreologického tlmiča schopného pracovať pri vysokých rýchlostiach a silách.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Magnetoreologický, tlmič, spätný ráz, delo

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with usage of magnetorheologic technologies for damping the recoil of artillery guns. Commonly used passive recoil dampers use complex mechanisms in order to achieve the needed damping force, which negatively impacts their reliability. This problem can be solved by use of a magnetorheologic damper, where the damping force can be controlled electronically.

The designed damper is of simple construction with double sided piston rod. The damper fluid is magnetized in a bypass, which is located externally of the damper cylinder. The liquid goes through magnetisation in parallel grooves, which are located within the bypass.

The contribution of this thesis is theoretical exploration of behavior of magnetorheological damper under impact loading of recoil of large caliber artillery. The main outcome of this thesis is the design of a magnetorheologic damper, which is able to function at high velocities and under the load of large forces.

KEYWORDS

Magnetorheological, damper, recoil, artillery

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BAJZA, Radoslav. *Konstrukce elektronicky říditelného tlumiče pro tlumení zpětného rázu děl* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149787>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Michal Kubík, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som sa rád poďakoval doc. Ing. Michalovi Kubíkovi, Ph.D. za jeho odborné vedenie pri vypracovávaní tejto bakalárskej práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že bakalársku prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing. Michala Kubíka, Ph.D. Zároveň prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	14
2.1	Spätný ráz	14
2.2	Brzdovratné mechanizmy	15
2.3	Charakteristické priebehy piestových rýchlostí, zrýchlení a síl	16
2.4	Požiadavky na brzdovratný systém	21
2.5	Konštrukčné riešenia pasívnych brzdovratných zariadení	22
2.5.1	Hydro-pružinové brzdovratné zariadenia	23
2.5.2	Hydro-pneumatické brzdovratné zariadenia	23
2.6	Typy hydro-pneumatických brzdovratných zariadení	25
2.6.1	Typ Puteaux	25
2.6.2	Typ St. Chamond	26
2.6.3	Typ Filloux	26
2.7	MR technológie	28
2.7.1	Magnetoreologické kvapaliny	28
2.8	Konštrukcie MR tlmičov	29
2.8.1	Jednoplášťový jednostranný MR tlmič	30
2.8.2	Dvojplášťový jednostranný MR tlmič	30
2.8.3	MR tlmič s prechádzajúcou piestnicou	31
2.8.4	Ďalšie koncepcie MR tlmičov	32
2.9	Matematický model MR tlmiča	33
2.9.1	Pasívna sila tlmiča	34
2.9.2	Viskózna pasívna sila	34
2.9.3	Zmena viskozity s teplotou	35
2.9.4	Vplyv miestnych strát	35
2.9.5	Ovládateľná sila tlmiča	36
2.9.6	Medza toku MR kvapaliny	40
2.10	Využitie MR technológii pri tlení spätného rázu	40
2.10.1	MR tlmič spätného rázu pušky kalibru .50 BMG	40
2.10.2	MR tlmič spätného rázu dela kalibru 30 mm	42
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE	45
3.1	Analýza dynamického správania sa tlmiča spätného rázu	45
3.2	Analýza konštrukcií tlmičov	45

3.3	Analýza problému	47
3.4	Ciele práce	48
4	KONCEPČNÉ RIEŠENIA	49
4.1	Požiadavky na konštrukčné riešenie	49
4.2	Metóda hodnotenia koncepčných riešení	49
4.3	Koncepčné riešenia	50
4.3.1	Koncept 1	50
4.3.2	Koncept 2	51
4.3.3	Koncept 3	52
4.3.4	Koncept 4	53
4.3.5	Koncept 5	54
4.4	Zhodnotenie konceptov	55
5	KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE	57
5.1	Vstupné parametre	57
5.1.1	Konštrukčné prvky	57
5.1.2	Priebehy síl a rýchlostí	58
5.1.3	Sila pneumatického rekuperátora	60
5.1.4	Sila tlmiča	60
5.2	Konštrukcia valca s piestom	61
5.3	Konštrukcia magnetického pólu	64
5.4	Vyhodnotenie	65
6	DISKUSIA	69
7	ZÁVER	71
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	72
9	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	74
9.1	Použité skratky	74
9.2	Použité fyzikálne veličiny	74
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	76
11	ZOZNAM PRÍLOH	80

1 ÚVOD

Pri streľbe z akejkoľvek strelnej zbrane je neoddeliteľnou súčasťou výstrelu spätný ráz. V prípade ručných zbraní spôsobuje strelcovi diskomfort a znižuje jeho presnosť streľby. V delostrelectve má spätný ráz ďaleko väčší dopad, pretože hmotnosti a veľkosti používaných projektilov a výmetných náplní sú väčšie a teda aj sila spätného rázu má vyššiu veľkosť.

V minulosti boli hlavne diel pevne uložené na svojich lafetách a pri streľbe vplyvom spätného rázu došlo k ich výraznému odskoku. Preto museli byť po každom výstrele dotlačené naspäť do palebnej pozície a znovu zamerané. To výrazne znižovalo možnú rýchlosť streľby. Ďalším negatívom bolo príliš vysoké zaťaženie pôsobiace na lafetu, vďaka čomu bolo potrebné jej konštrukciu patrične nadimenzovať a teda zbrane vyšších kalibrov mali kvôli hmotnosti zhoršenú mobilitu.

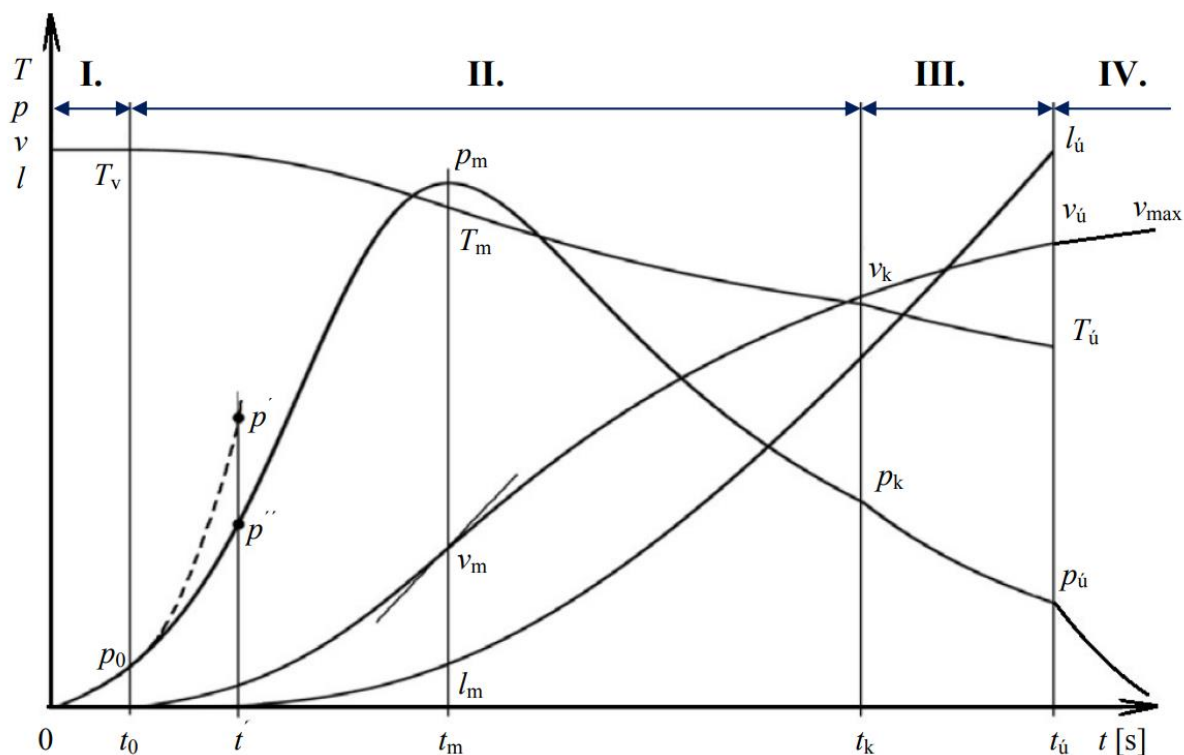
Problém vysokého spätného rázu riešia brzdo vratné zariadenia. Ich cieľom je preniesť krátky impulz vysokej sily spätného rázu na dlhšie trvajúci impulz sily menšej veľkosti pôsobiacej na uloženie dela. Dosahujú toho pomocou hydraulických tlmičov, ktoré brzdia hlavneň pri pohybe vzad vo vedení v kolíske. Ďalšou úlohou brzdo vratného zariadenia je hlavneň vrátiť do palebnej polohy. Tým odpadá nutnosť ďalšieho zameriavania a po nabití je zbraň pripravená páliť na cieľ.

V súčasnej dobe sú na delostrelectvo kladené náročné podmienky, potrebný dostrel sa zvyšuje a zároveň je požadovaná nižšia hmotnosť, aby mohla byť zbraň ľahko prepravovaná terénom aj letecky. To kladie veľké nároky aj na konštrukciu brzdo vratných zariadení, menovite ich tlmičov. Jednou z možností, ako sa tomuto vývoju prispôbiť je použitie magnetoreologických tlmičov, kde je funkcia množstva ovládacích prvkov, ktoré sú na súčasných konvečných tlmičoch riešené mechanicky, prevzatá elektronickým riadením.

2 PREHL'AD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

2.1 Spätný ráz

Spätný ráz je spätý pohyb hlavne a s ňou spojených súčastí, ku ktorému dochádza po výstrele zo strelnej zbrane v reakcii na dopredný pohyb projektilu. Platí tu 3. Newtonov pohybový zákon, teda veľkosť sily pôsobiacej na projektil je rovná veľkosti sily, ktorá pôsobí na dno nábojnice, resp. na záver [1]. Časovo premenlivá sila $B(t)$, ktorá pôsobí na projektil a na záver je rovná súčinu tlaku v komore s plochou prierezu hlavne a má časovo zhodný priebeh s veľkosťou tlaku v komore. Na obrázku 2-1 je znázornený priebeh tlaku p , teploty T povýstrelových plynov, rýchlosť projektilu v a dĺžka dráhy l , ktorú projektil prekonal pri výstrele aj s vyznačenými jednotlivými etapami výstrelu.



Obr. 2-1 Priebeh vnútrobalistických veličín pri výstrele v závislosti na čase [1].

- **I. Etapa** – začína zapálením výmetnej náplne a trvá až do času t_0 , kedy tlak plynov v komore dosiahne potrebnú hodnotu aby strela prekonal pasívne odpory a začala sa pohybovať.

- **II. Etapa** – prebieha od začiatku pohybu strely až po dokončenie horenia hnacej zmesi, kedy dosiahne tlak v hlavni kritickú hodnotu p_k . Horenie prebieha so zväčšujúcim sa objemom a tlak narastá až do momentu t_m kedy dosiahne svoju najvyššiu hodnotu p_m a potom začne klesať, pretože prírastok tlaku od horenia výmetnej náplne je menší než pokles tlaku, ku ktorému dochádza zväčšovaním objemu plynov pohybom strely v hlavni. Preto v momente t_m je zrýchlenie strely a hlavne najväčšie a aj sila spätného rázu dosahuje svoje maximum.
- **III. Etapa** – trvá od skončenia horenia výmetnej zmesi do momentu, kedy strela opustí hlavneň. Tlak počas tejto etapy klesá, ale je ešte stále dostatočný na to aby strelu aj zaklzájúcu hlavneň urýchl'oval.
- **IV. Etapa** – prebieha po tom, čo strela opustí hlavneň. Počas tejto etapy plyny voľne unikajú z hlavne a tlak v komore klesá až na hodnotu tlaku okolitého vzduchu v čase t_f . Počas tejto etapy je hlavneň stále urýchl'ovaná a impulz sily spätného rázu počas tejto etapy v niektorých prípadoch môže tvoriť až štvrtinu celkového spätného rázu [2].

Celý dej sa v závislosti na konštrukčných parametroch zbrane odohráva v čase 5 až 20 ms [2].

Vďaka tomu, že na záver aj na strelu počas výstrelu pôsobí rovnako veľká sila so zhodným časovým priebehom, tak pri spätnom ráze do momentu, kedy strela opustí hlavneň platí aj zákon zachovania hybnosti:

$$m_r \dot{x}_r + m_p \dot{x}_p = 0.$$

Veľkosti hybností projektilu a sústavy konajúcej záklz sa teda rovnajú. Hybnosť zaklzájúcich súčastí v čase t je rovná impulzu sily $B(t)$ pôsojacej na čelo záveru a je daná vzťahom :

$$m_r \dot{x}_r = I = \int_{t_0}^t B(t) dt.$$

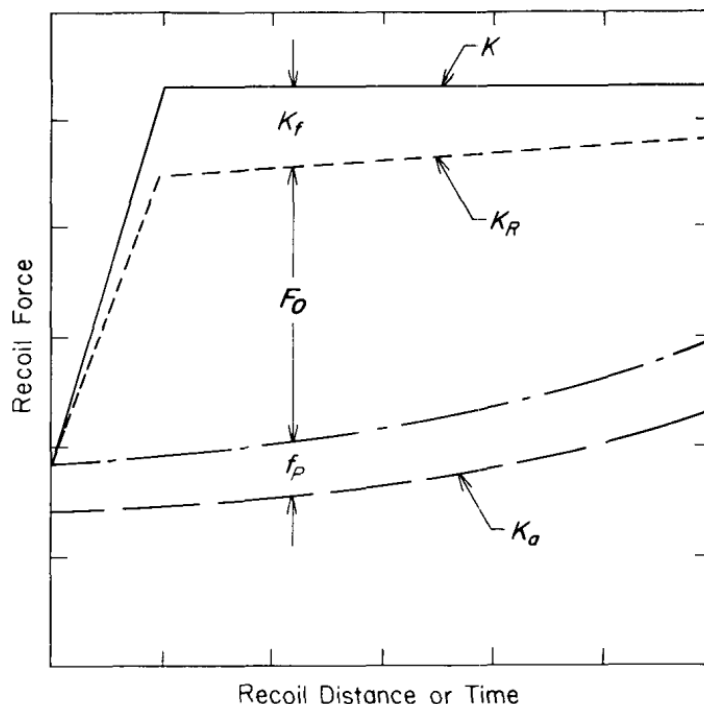
2.2 Brzdovratné mechanizmy

Úlohou brzdovratných mechanizmov je preniesť krátky impulz vysokej sily spätného rázu (trvajúci 5 až 20 ms [2]) na dlhšie trvajúci impulz sily menšej veľkosti na lafetu dela trvajúci 0,2 až 0,5 s [2]. Ďalej musia zabezpečiť návrat súčastí, ktoré vykonali záklz naspäť do prednej polohy a udržať ich tam pri akomkoľvek veľkom uhle námeru. Návrat hlavne do prednej polohy musí byť dostatočne brzdený, aby nedošlo k veľkému rázu pri dosadnutí kolísky do palebnej polohy, v opačnom prípade by mohlo dôjsť k prevráteniu dela dopredu.

Časť kinetickej energie dela je v tlmiči spätného rázu disipovaná vo forme tepla, časť je akumulovaná v rekuperátore vo forme potenciálnej energie a je využitá na návrat do prednej úvrate. Pohyb späť je tiež tlmený a dochádza pri ňom k disipácii energie.

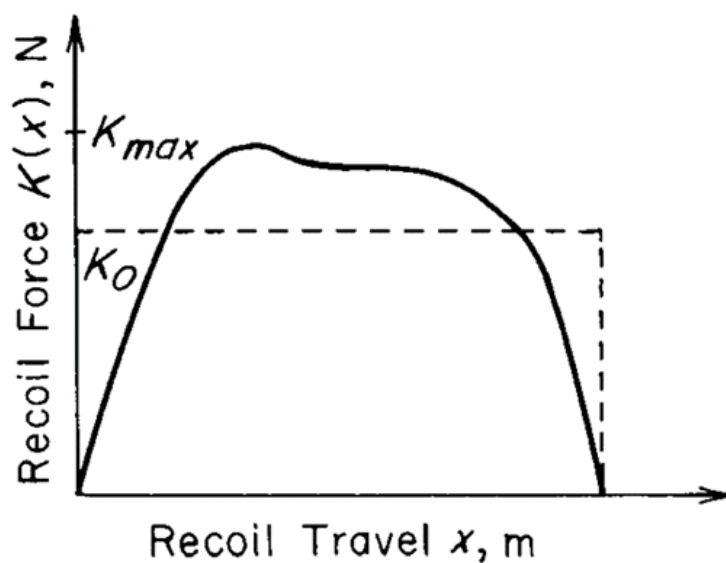
2.3 Charakteristické priebehy piestových rýchlostí, zrýchlení a síl

Pri výstrele z dela vybaveného brzdo vratným zariadením pôsobí od počiatku pohybu proti záklzu časovo premenná sila $K(t)$, ktorá zároveň pôsobí aj na lafetu dela. Je súčtom sily tlmiča F_o , sily rekuperátora K_a , trecej sily v ložiskách a tesneniach f_p , cez ktoré je vedená piestna tyč a trecej sily v uložení hlavne v kolíske dela K_f . Na diagrame na obrázku je znázornený súčet týchto síl, pričom sila K_R je sila, pôsobiaca na piestnu tyč a je rovná súčtu síl $K_R = F_o + K_a + f_p$. Trecie sily v tesneniach a uloženiach sú závislé na súčiniteli trenia, hmotnosti a uhle námeru dela. Sila rekuperátora závisí na tlaku v pneumatickom rekuperátore alebo na tuhosti mechanickej pružiny a samotnom zdvihu. Stláčanie rekuperátora je polytropický dej a priebeh sily $K_a(x_R)$ v závislosti na zdvihu x_R je exponenciálna krivka s polytropickým exponentom n . Sila hydraulického F_o tlmiča je závislá od rozdielu tlakov pred a za piestom, na rýchlosti záklzu a na celkových konštrukčných parametroch tlmiča, ako je veľkosť plochy piestu, plocha a dĺžka škrtiacej drážky, atď. V diagrame na obrázku 2-2 sú znázornené zložky brzdiacej sily.



Obr. 2-2 Zložky brzdiacej sily brzdo vratného zariadenia [2].

Ideálna brzdiaca sila má tvar konštantnej priamky, pričom impulz tejto sily musí byť rovný veľkosti impulzu sily $B(t)$ spätného rázu [2]. Obecne platí, že čím je umožnený dlhší záklz zbrane, tým je potrebná menšia brzdiaca sila na zastavenie pohybu dela, teda brzdiaca sila je závislá aj na dĺžke záklzu. Dosaiahnutie konštantného priebehu sily nie je možné, pretože je sila tlmiča závislá na rýchlosti, teda na začiatku a na konci pohybu tlmič nie je schopný vyvinúť potrebnú brzdiacu silu. Preto je v charakteristickom priebehu tlmiacej sily v závislosti na zdvihu alebo tlaku na začiatku pohybu nábeh tlmiacej sily z nuly a na konci priebehu zase návrat sily na nulu. Na obrázku 2-3 je znázornené porovnanie priebehu ideálnej konštantnej sily a reálnej brzdiacej sily tlmiča. V ideálnom prípade je peak brzdiacej sily K_{max} dosiahnutý na začiatku pohybu a potom má sila klesajúci alebo konštantný charakter.



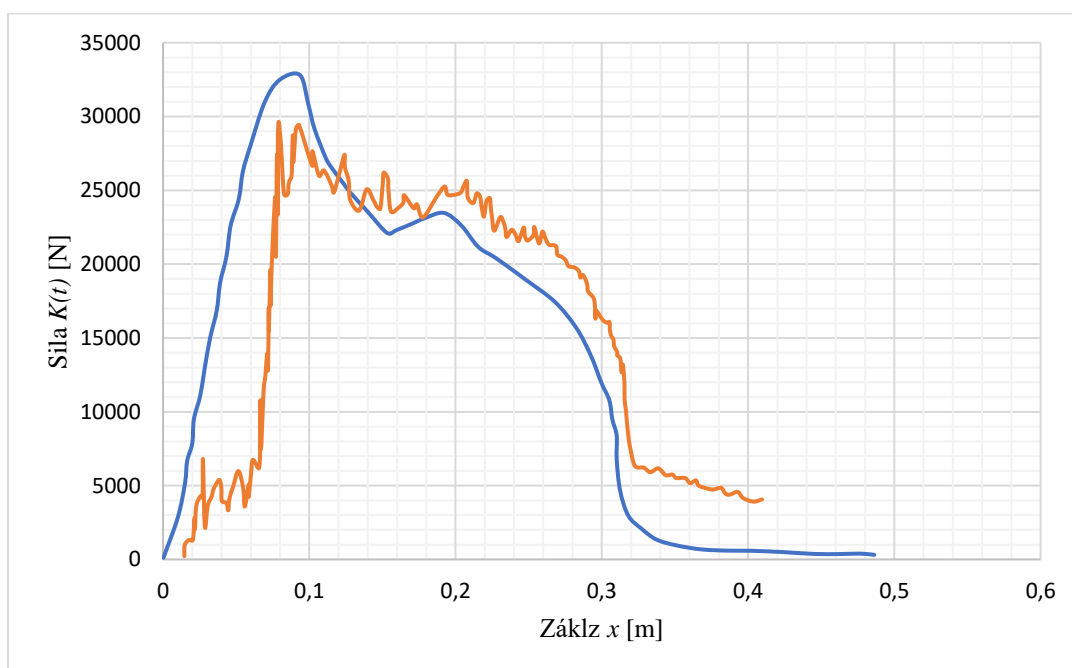
Obr. 2-3 Porovnanie priebehu konštantnej brzdiacej sily s priebehom reálnej brzdiacej sily brzdovratného zariadenia [2].

Priebeh tejto sily je premenlivý, pričom závisí na parametroch, ktoré sú nastavované počas prevádzky dela:

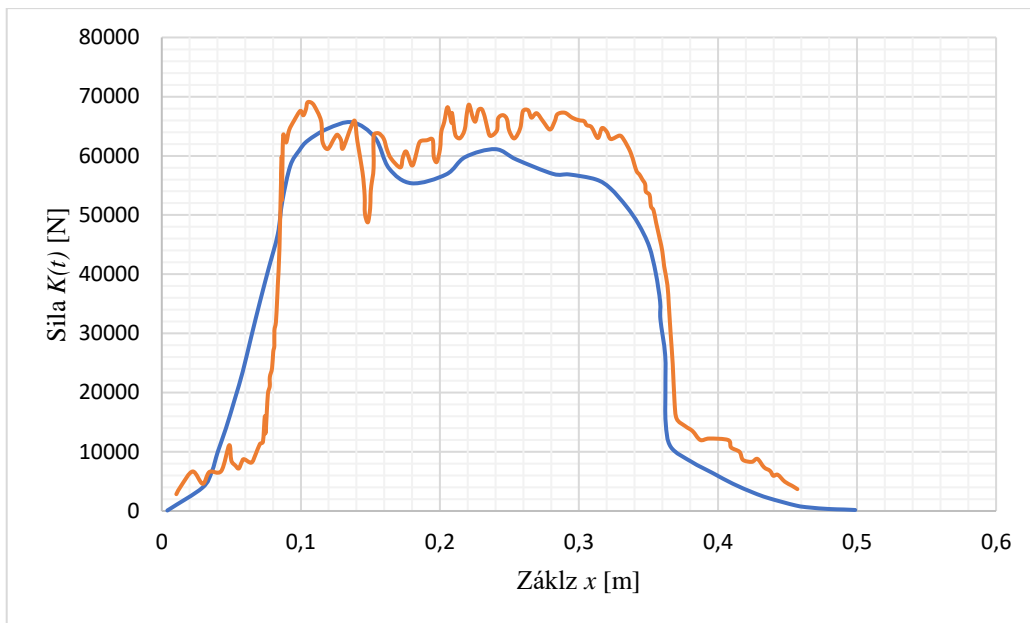
- Dĺžka záklzu, ktorá je pri väčšine súčasných diel variabilná a nastavuje sa podľa veľkosti uhla námeru.
- Hmotnosť projektilu, ktorá závisí od typu použitej munície.
- Hmotnosť použitej výmetnej náplne, ktorá sa volí podľa potrebného dostreľu a hmotnosti strely. V prípade väčšiny ťahaných a samohybných húfníc nie je výmetná náplň súčasťou celkového náboja s nábojnicou a projektilom, ale je balená, dodávaná a používaná samostatne, aby bola zabezpečená lepšia variabilita možností použitia rôznych veľkostí náloží a rôznych typov projektilov. Hmotnosti výmetných náplní sa v prípade používania štandardov

NATO rozdeľujú do 8 zón, pričom nálože zóny 8 produkujú najväčšie tlaky v komore dela [3]. Nie je pravidlom, že by hmotnosť nálože priamou úmerou odpovedala zóne, viac závisí na použitej výmetnej náplni.

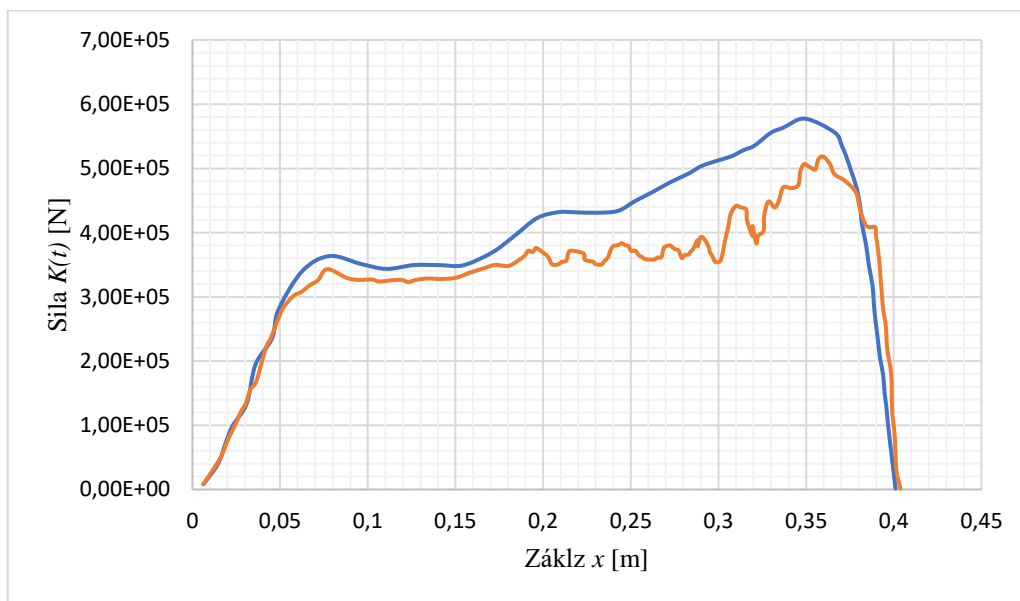
Akçay a Elaldi [4] skúmali veľkosť brzdiacej sily v závislosti na zdvihu svojho brzdovratného zariadenia, ktoré skonštruovali pre delo kalibru 155 mm s dĺžkou hlavne 39 kalibrov. (pozn. bežne je ním vyzbrojená americká samohybná húfnica M109). Toto brzdovratné zariadenie pozostávalo z dvoch hydraulických tlmičov a bolo testované s výmetnými náplňami zón 3, 5 a 8. Na obr. 2-4, 2-5 a 2-6 sú znázornené priebehy brzdiacej sily a sú porovnané s matematickým modelom, ktorý bol určený k predikcii priebehov síl pri jednotlivých náložoch. Tlmiče brzdovratného systému mali boli vybavené mechanizmom, ktorým ovládali veľkosť drážky podľa polohy piestu a tým zabezpečovali priebeh sily čo najbližší konštantnému. Nedostatkom tohto systému je absentujúca možnosť nastavenia tohto mechanizmu podľa použitej munície. So zväčšujúcou sa náložou sa zvyšovali aj dĺžka záklzu a peak maximálnej sily sa premiestnil na koniec pohybu, teda v celkovej brzdennej sile už prevažovala sila pneumatickej pružiny.



Obr. 2-4 Priebeh sily brzdovratného zariadenia pri streľbe z dela ráže 155 mm s výmetnou náplňou zóny 3; upravené podľa [4].



Obr. 2-5 Priebeh sily brzdovratného zariadenia pri streľbe z dela ráže 155 mm s výmetnou náplňou zóny 5; upravené podľa [4].

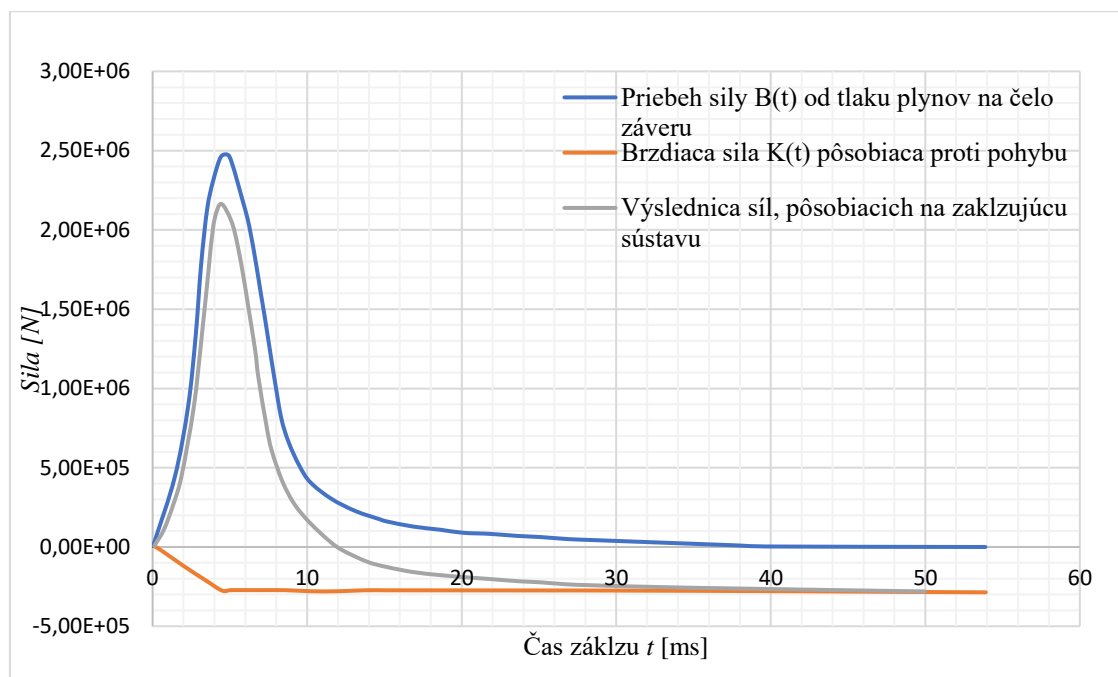


Obr. 2-6 Priebeh sily brzdovratného zariadenia pri streľbe z dela ráže 155 mm s výmetnou náplňou zóny 8; upravené podľa [4].

Zrýchlenie zaklzujucej sústavy je dané 2. Newtonovým zákonom ako:

$$\ddot{x}_r = \frac{B(t) - K(t)}{m_r}$$

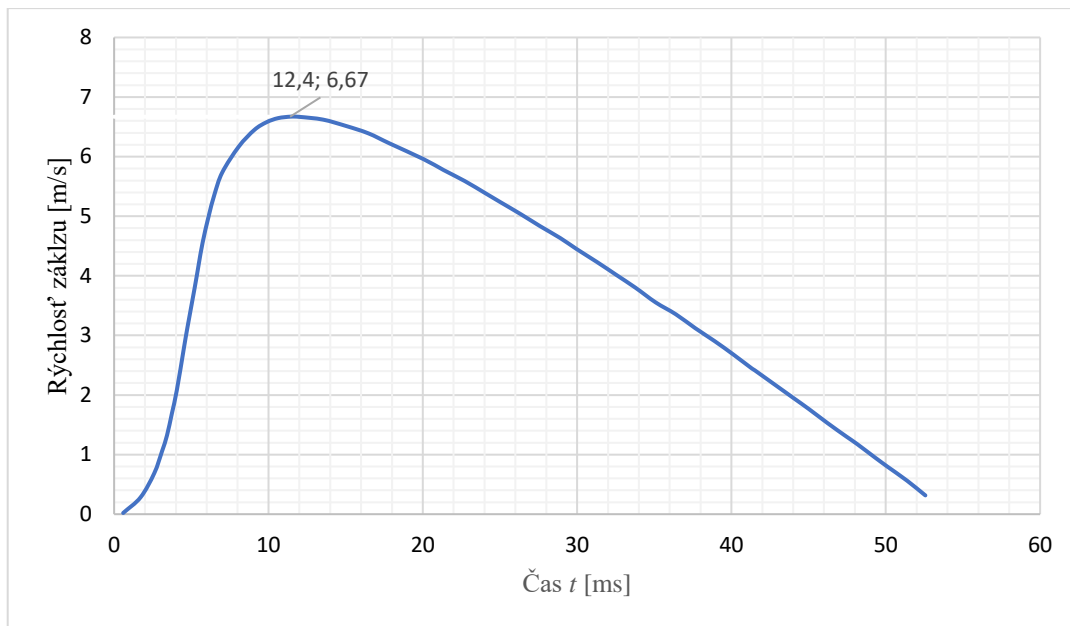
Na obrázku 2-7 je znázornený priebeh zrýchlenia v čase voľného záklzu (krivka 1), zrýchlenia od brzdiacej sily $K(t)$ (krivka 2) a výsledného zrýchlenia vzniknutého kombináciou prípadov 1 a 2 (krivka 3).



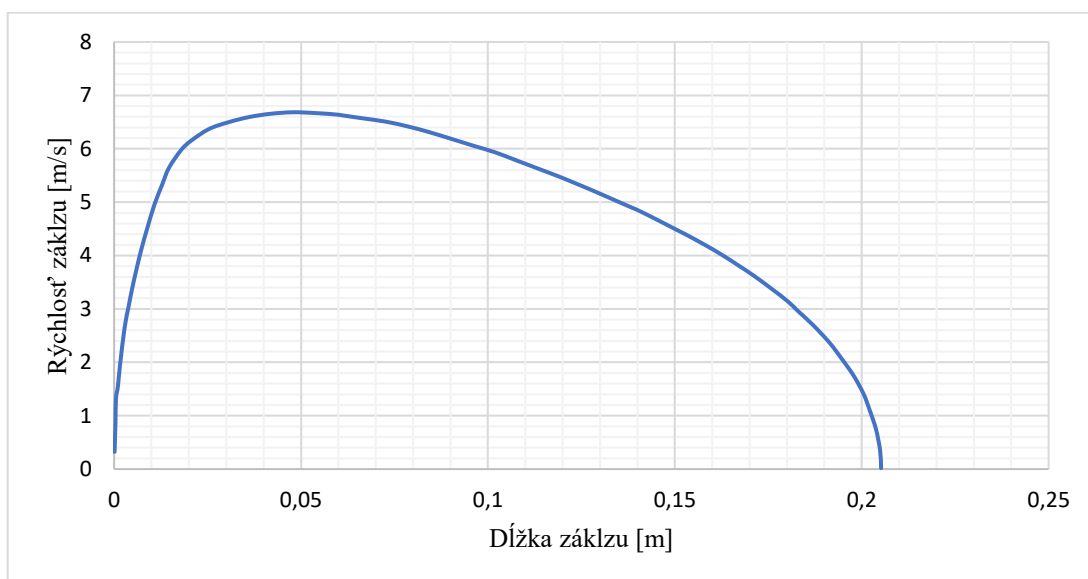
Obr. 2-7 Priebeh sily spätného rázu nebrzdenej a brzdenej sústavy; upravené podľa [5].

Celkové zrýchlenie počas výstrelu kopíruje priebeh sily spätného rázu, pričom vplyvom brzdzenia maximum dosiahne krátko pred momentom, kedy je v komore dela maximálny tlak. V tento moment zároveň svojho maxima dosiahne aj brzdiaca sila $K(t)$. Následne zrýchlenie klesá až na nulu. V tomto momente Sila brzdiaca záklz prevýši silu od tlaku plynov a zrýchlenie začne smerovať proti pohybu. Veľkosť zrýchlenia sa zvyšuje až do momentu, kedy sa tlak v komore vyrovná okolitému tlaku. Potom zrýchlenie odpovedá pôsobeniu brzdiacej sily až do momentu zastavenia pohybu. Následne je vďaka sile akumulovanej vo vratnom zariadení brudovratného mechanizmu hlavne urýchlená vpred.

Rýchlosť záklzu odpovedá priebehu zrýchlenia. Najprv sa zvyšuje až do momentu, kedy zrýchlenie a brzdiaca sila dosiahnu maximum. Klesanie rýchlosti má priebeh blízky lineárnemu vzhľadom ku konštantnému priebehu brzdiacej sily. Na obrázku 2-8 je znázornený časový priebeh modelu rýchlosti záklzu dela ráže 105 mm. Maximálnu rýchlosť, ktorú zaklzájúca hlavne dosiahne je 21,86 stopy za sekundu, teda 6,67 m/s. Na obrázku 2-9 je znázornený priebeh rýchlosti toho istého dela, ale v závislosti na dráhe záklzu.



Obr. 2-8 Charakteristický priebeh rýchlosti záklzu hlavne dela vybaveného brzdovratným mechanizmom v závislosti na čase; upravené podľa [5].



Obr. 2-9 Charakteristický priebeh rýchlosti záklzu hlavne dela vybaveného brzdovratným mechanizmom v závislosti na zdvihu; upravené podľa [5].

2.4 Požiadavky na brzdovratný systém

Design nového záklzového systému musí spĺňať množstvo požiadaviek [2]:

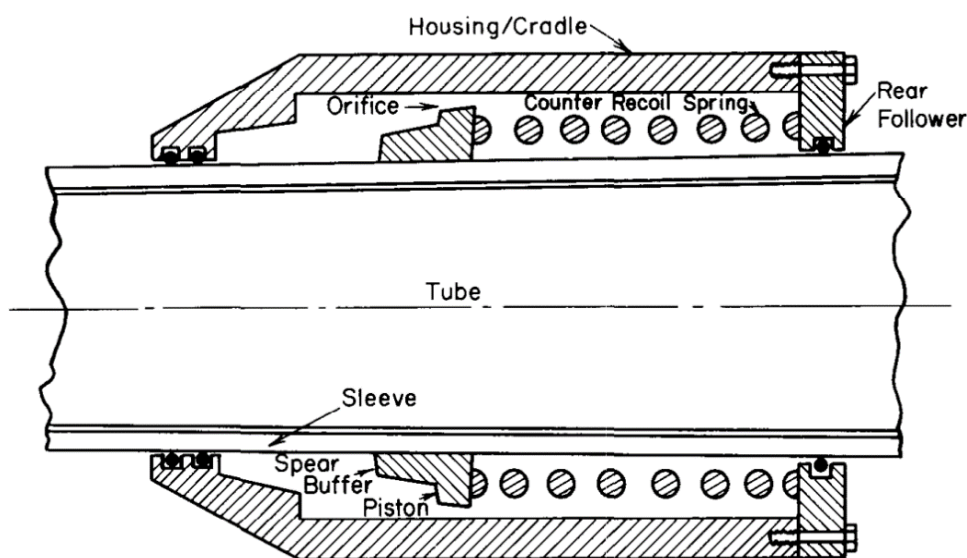
- **Požiadavky balistiky:** potrebný dostrel a hmotnosť projektilu určujú ústovú rýchlosť strely, ktorá ovplyvňuje jej hybnosť a teda aj hybnosť hlavne konajúcej záklz. V modernom delostrelectve sa z diel strieľajú podľa potreby strely s rôznou hmotnosťou, pričom sa na dosiahnutie rôznych potrebných dostrelou používajú výmetné náplne rôznej hmotnosti. Pri každom výstrele musí byť tlmič schopný odpovedať adekvátnou odporovou silou.
- **Požiadavky na rýchlosť streľby:** zadávateľ určuje potrebnú kadenciu dela. Tomu musí byť uspôsobený aj tlmiaci systém, aby túto rýchlosť streľby umožnil a teda vratný pohyb nesmie byť príliš pomalý. Zároveň brzdovratný systém musí byť pri danej rýchlosti schopný pracovať bez poruchy. Tú môže spôsobiť nárast teploty v tlmiči, keďže veľká časť energie spätného rázu je disipovaná trením, turbulenciami v pracovnej kvapaline a inými vplyvmi. Kvapalina preto musí vydržať tieto výkyvy teplôt bez výrazných zmien viskozity, čo by mohlo ohroziť funkciu tlmiča. Ďalej nesmie dôjsť k takému tepelnému rozťahnutiu valca tlmiča, aby tesnenia, zabráňujúcemu úniku pracovnej kvapaliny nestratili tesnosť.
- **Požiadavky na hmotnosť:** brzdovratný mechanizmus tvorí značnú časť hmotnosti celej zbrane. Tá je dôležitá najmä pri ťažnom delostrelectve, ktoré musí byť dostatočne ľahké kvôli ľahkej mobilite dela. Dizajnér preto musí navrhnuť brzdovratný systém dostatočne ľahký, aby neprekročil požiadavky na hmotnosť dela.
- **Požiadavky na spoľahlivosť:** každé delo má danú životnosť hlavne, teda počet rán, ktoré môže vystreliť pred tým, než sa opotrebuje a jej funkcia zlyhá. Počas tejto doby by brzdovratný mechanizmus mal pracovať bez poruchy. Na to je potrebné nadimenzovať súčasti mechanizmu, menovite ložiská a tesnenia. Zároveň musí byť brzdovratný systém schopný odolať náročným podmienkam, pri ktorých býva delo nasadené. Musí byť schopný spoľahlivo fungovať pri akýchkoľvek poveternostných podmienkach, musí odolávať arktickým aj tropickým teplotám, musí spoľahlivo fungovať v prašnom prostredí aj odolávať vplyvu vlhkosti.
- **Požiadavky na jednoduchosť údržby:** brzdovratný mechanizmus musí byť skonštruovaný dostatočne jednoducho, aby umožnil jednoduchú demontáž a údržbu.

2.5 Konštrukčné riešenia pasívnych brzdovratných zariadení

Väčšina súčasných brzdovratných mechanizmov využíva hydraulický tlmič spätného rázu a pneumatický alebo pružinový rekuperátor. Úlohou rekuperátora je stlačením plynu alebo pružiny uložiť potenciálnu energiu akumulovanú pri výstrele a následne ju využiť pre navrátenie hlavne s kolískou naspäť do prednej polohy. Podľa použitia pružinového alebo pneumatického rekuperátora sa brzdovratné mechanizmy delia na hydro-pružinové a hydro-pneumatické.

2.5.1 Hydro-pružinové brzdo vratné zariadenia

Jedná sa o najjednoduchšie brzdo vratné mechanizmy. Hlaveň dela prechádza stredom tlmiča a slúži ako piestna tyč. Je na nej pripevnený prstencový piest, o ktorý sa opiera buď vinutá pružina alebo sústava tanierových pružín. Vôľa medzi piestom a plášťom tlmiča tvorí škrtiacu štrbinu. Vinutá pružina môže byť použitá jedna, koncentrická s hlavňou alebo môže byť použitých viac pružín, ktoré sú symetricky rozmiestnené okolo hlavne. Tento typ brzdo vratného zariadenia je najmenej efektívny v znižovaní sily spätného rázu, ale má veľmi jednoduchú konštrukciu a relatívne malú dĺžku záklzu [2]. Preto sa využíva pri tlení spätného rázu diel tankov, kde je výrazne limitovaná dĺžka záklzu dela kvôli rozmerom veže a samotná konštrukcia tanku je dostatočne robustná, aby absorbovala vyššie rázy. Na obrázku 2-10 je zobrazený rez týmto mechanizmom.



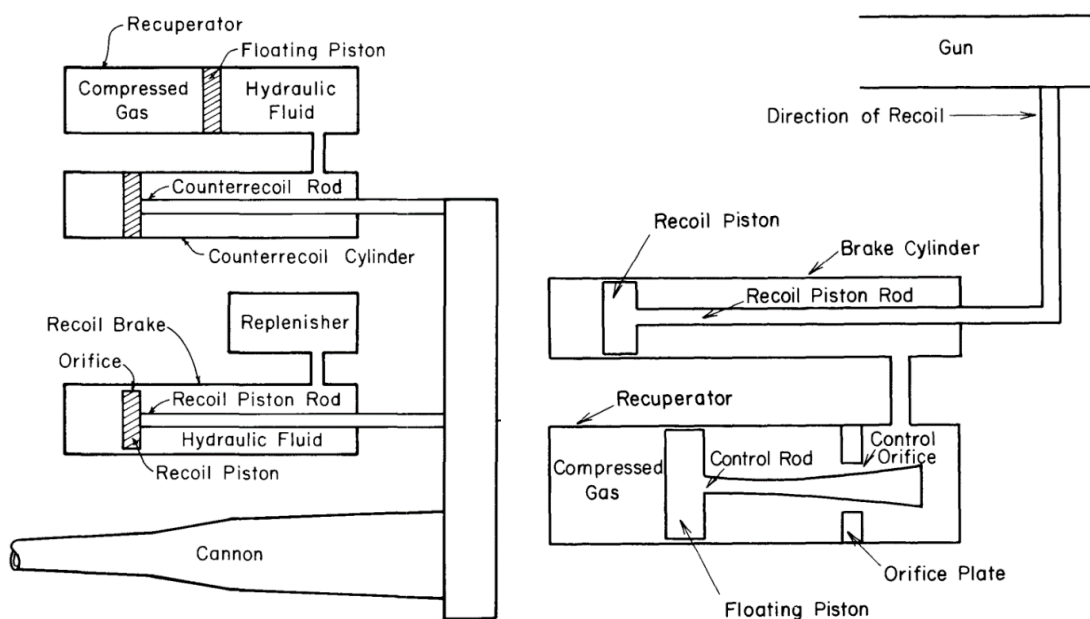
Obr. 2-10 Rez hydro-pružinovým brzdo vratným mechanizmom [2].

2.5.2 Hydro-pneumatické brzdo vratné zariadenia

V delostrelectve majoritne zastúpené hydropneumatické mechanizmy pozostávajú z týchto súčastí: zo samotnej brzdy spätného rázu (tlmiča), vratného mechanizmu, ktorého súčasťou je aj rekuperátor a nárazníkového mechanizmu [2]. Úlohou brzdy, teda tlmiča spätného rázu je dissipovať energiu spätného rázu a tým spomaľovať záklz. Táto sila je generovaná rozdielom tlakov oleja pred a po škrtiacich drážkach v tlmiči, cez ktoré je nútený tiecť. Tento rozdiel tlakov je závislý aj na rýchlosti piestu, teda aj na rýchlosti záklzu. Počas pohybu piestu sa rýchlosť záklzu mení a sila tlmiča je premenlivá. Na dosiahnutie čo najmenej premenlivého priebehu sily sa preto konštruujú tlmiče s premenlivou veľkosťou škrtiacich otvorov, ktorých veľkosť závisí od polohy piestu.

Mnohé tlmiče, ktoré sa používajú najmä v ťažnom delostrelectve majú aj nastaviteľnú veľkosť škrtiacej drážky v závislosti na námere zbrane. Jedná sa teda o mechanizmy s variabilným záklzom, kde je takýmto spôsobom skracovaná a predĺžovaná dĺžka záklzu. Pri ťažných delách o nízkej hmotnosti je potrebný pri nízkom námere dostatočne dlhý záklz, aby bola sila pôsobiaca na lafetu dostatočne malá, a tým bola udržaná stabilita dela a delo nenadskočilo, či sa neodsunulo. Pri vysokom námere je zasa potrebný krátky záklz, keďže tu nehrozí odskočenie dela, ale hrozí náraz záveru do zeme.

Vratný mechanizmus zabezpečuje návrat hlavne naspäť do palebnej pozície. Pri hydro-pneumatických brzdovratných mechanizmoch túto funkciu zabezpečujú rekuperátory plnené inertným plynom, najčastejšie dusíkom. Ten po stlačení pôsobí na plávajúci piest, na ktorého druhej strane sa nachádza olej, pôsobiaci na vratný piest, ktorý je tyčou spojený s kolískou, prípadne s hlavňou. Častejšia je prvá varianta, kde je piest spojený s kolískou a ostatné súčasti brzdovratného mechanizmu sú pripevnené k hlavni a konajú s ňou pohyb. Tým sa zvyšuje celková hmotnosť súčastí konajúcich záklz a teda sa znižuje rýchlosť ich pohybu. Plávajúci piest zabraňuje kontaktu medzi plynom v rekuperátore a pracovnou kvapalinou vratného mechanizmu, čím sa zamedzuje hroziace rozpustenie plynu v kvapaline pri vysokých tlakoch, ktoré vznikajú pri spätnom ráze, čím by sa negatívne zmenili fyzikálne vlastnosti kvapaliny. Vratný mechanizmus môže byť samostatný alebo môže byť spojený s brzdou, kde pracovná kvapalina tlmiča plní aj funkciu pracovnej kvapaliny vratného mechanizmu a brzdiaci piest plní súčasne aj funkciu vratného piestu. Podľa toho sa delia brzdovratné zariadenia na nezávislé a závislé. Závislé zariadenia sa najčastejšie používajú v ťažných delách kvôli svojej nižšej hmotnosti, zatiaľ čo v samohybných delách prevládajú brzdovratné mechanizmy nezávislé. Na obrázku 2-11 sú porovnané schémy hydro-pneumatických zariadení.



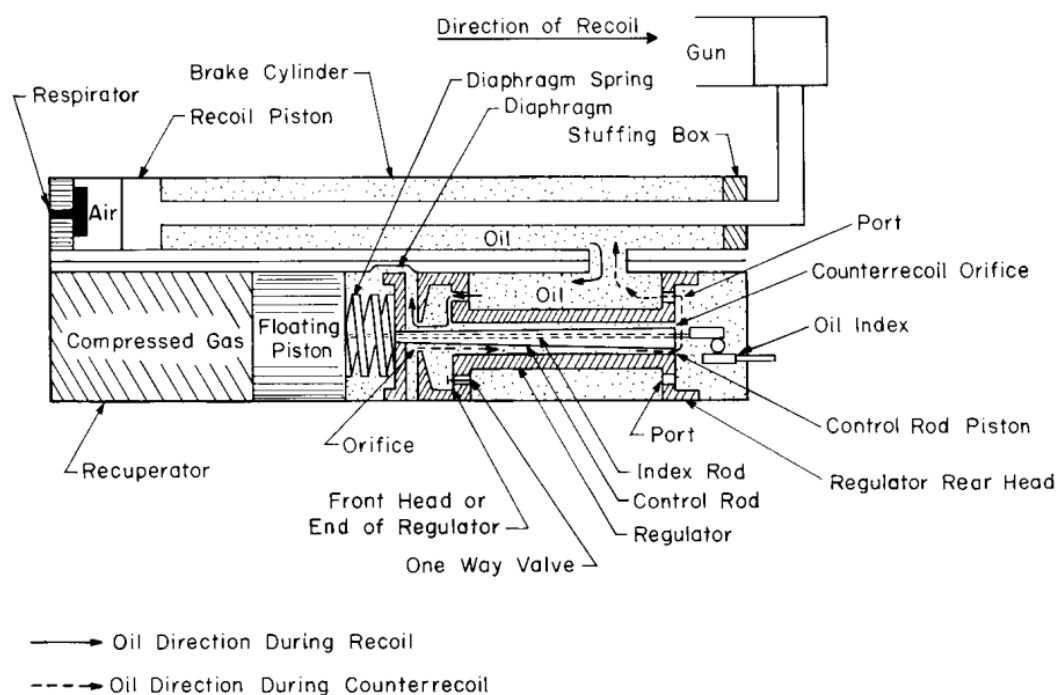
Obr. 2-11 Schéma nezávislého hydro-pneumatického zariadenia (vľavo) a závislého hydro-pneumatického zariadenia (vpravo) [2].

Nárazníkový mechanizmus brzdí vratný pohyb tesne pred dosiahnutím palebnej polohy, aby nedošlo k náhlemu rázu pri dosadnutí do prednej úvrate, čo by mohlo mať za následok nežiaduce rázové namáhanie kolísky dela, prípadné nadskočenie či dokonca prevrátenie dela dopredu. Jeho funkcia je teda podobná tlmiču spätného rázu, aj keď v tomto prípade nedochádza k tak veľkému namáhaniu.

2.6 Typy hydro-pneumatických brzdovratných zariadení

2.6.1 Typ Puteaux

Brzdovratný mechanizmus typu Puteaux je závislý hydropneumatický mechanizmus. Jeho tlmič je jednoduchej konštrukcie, jedná sa o jednoduchý valec, v ktorom sa pohybuje piest spojený piestnou tyčou s hlavňou dela. Piest sa pri záklze pohybuje vzad a vytláča pracovnú kvapalinu cez otvor do pripojenej vratnej jednotky, v ktorej sa nachádza samotné škrtiace zariadenie a rekuperátor. Pri vratnom pohybe olej prechádza inou trasou než pri záklze, jeho pohyb je spomaľovaný a teda aj vratný pohyb dela je regulovaný. V prednej časti tlmiča sa nachádza respirátor, ktorý plní funkciu nárazníka. Pri záklze sa cez jednocestný ventil do respirátora nasáva vzduch a pri vratnom pohybe je vzduch vytlačovaný cez malý otvor, čo brzdí dopredný pohyb hlavne. Na obrázku 2-12 je znázornená schéma brzdovratného zariadenia typu Puteaux.

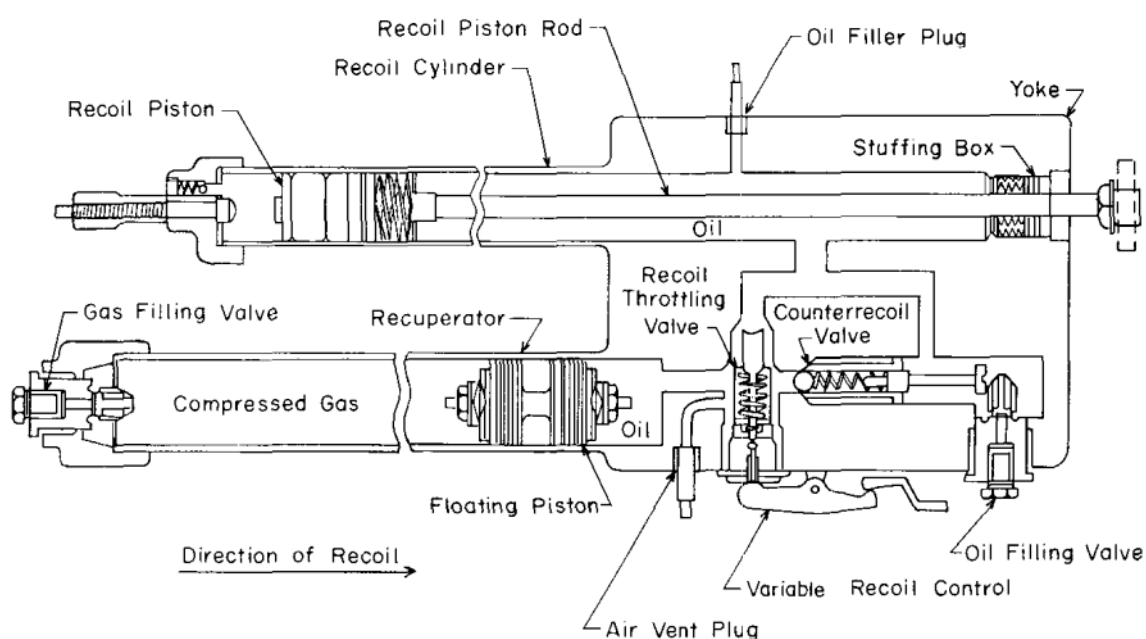


Obr. 2-12 Schéma mechanizmu typu Puteaux [2].

Americký brzdo vratný mechanizmus M45 používaný v ťažnej húfnici M198 ráže 155mm je tohto typu [2].

2.6.2 Typ St. Chamond

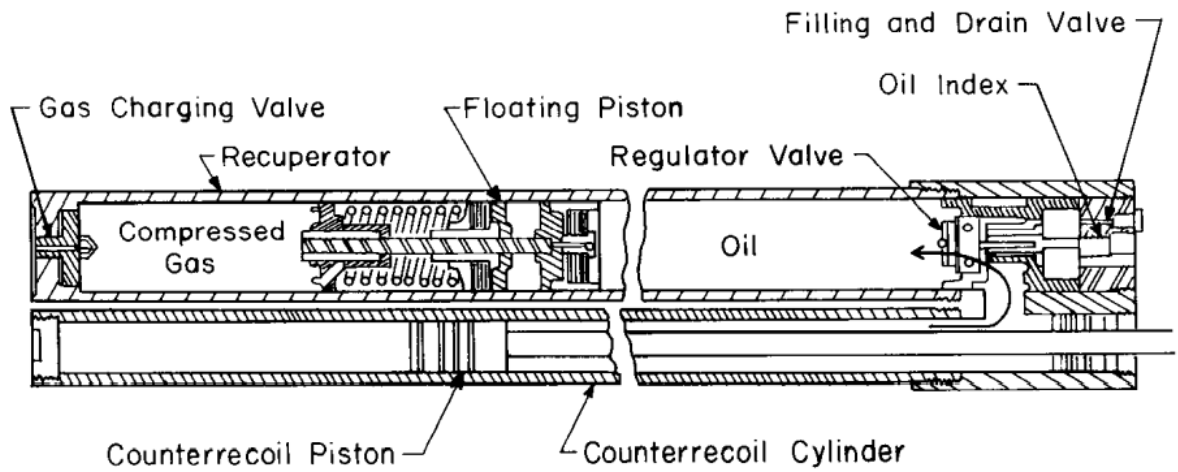
Jedná sa o závislý brzdo vratný mechanizmus s variabilnou dĺžkou záklzu. Je zložený z jednoduchého tlmiča, pneumatického rekuperátora a nezávislého nárazníkového mechanizmu. Škrtenie prúdenia pracovnej kvapaliny je zabezpečené nastaviteľným škrtiacim ventilom, čím sa zabezpečuje aj nastaviteľná dĺžka záklzu. Na obrázku 2-13 je znázornený brzdo vratný mechanizmus St. Chamond.



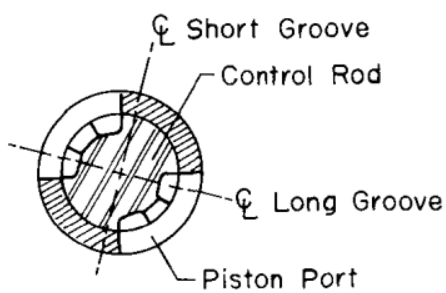
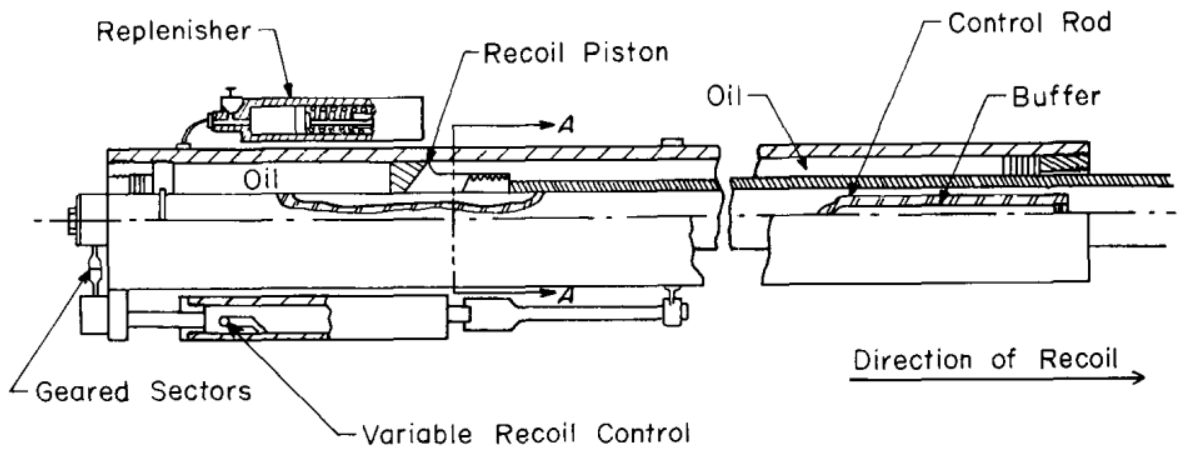
Obr. 2-13 Schéma brzdo vratného mechanizmu typu St. Chamond [2].

2.6.3 Typ Filloux

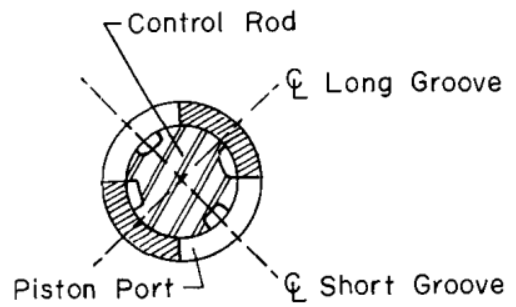
Tento typ brzdo vratného mechanizmu je nezávislý, teda tlmič spätného rázu a vratný mechanizmus sú navzájom oddelené jednotky. Na obrázku 2-14 je znázornený rez vratnou jednotkou mechanizmu a na obrázku 2-15 je zobrazený tlmič a konfigurácie škrtiacich otvorov pre dlhý (1) a krátky záklz (2).



Obr. 2-14 Brzdovratný mechanizmus Filloux - vratný mechanizmus [2].



(1) Long Recoil Position



(2) Short Recoil Position

Obr. 2-15 Brzdovratný mechanizmus Filloux - brzda spätného rázu [2].

Tlmič spätného rázu systému Filloux je tvorený piestom, dutou piestnou tyčou, ovládacou tyčou umiestnenou v piestnej tyči a nárazníkom. V pieste sa nachádzajú otvory, ktorými prúdi olej dovnútra piestnej tyče, kde je umiestnená ovládací tyč, v ktorej sú vyfrézované drážky s premenlivou hĺbkou. Jeden pár drážok je krátky a jeden je dlhý, vďaka čomu pri natočení ovládacej tyče olej prúdi len do krátkych drážok, alebo prúdi do všetkých, čím sa zabezpečuje väčšie škrtenie v prvom prípade a teda kratší záklz a menšia úroveň škrtenia a dlhšia dráha záklzu v prípade druhom. Natočenie ovládacej tyče je závislé na námere dela. Vratný mechanizmus je jednoduchý s regulátorom v prednej časti. Pri vratnom pohybe nedochádza k žiadnemu obmedzovaniu prúdenia kvapaliny. Jediným prvkom brzdiacim vratný pohyb je nárazník umiestnený v tlmiči. Typickým príkladom využívajúcim tento typ brzdo vratného mechanizmu je americká samohybná húfnica M109 [2].

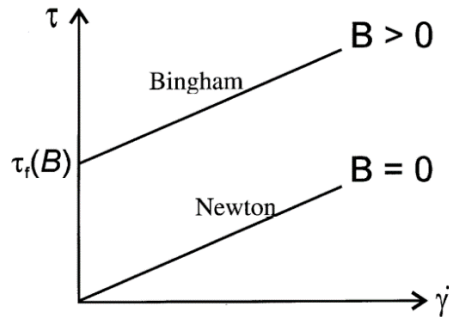
2.7 MR technológie

2.7.1 Magnetoreologické kvapaliny

Magnetoreologická kvapalina je kvapalina, ktorá dokáže po vložení do magnetického poľa zmeniť svoje fyzikálne vlastnosti, teda viskozitu a medzu klzu. Jedná sa o suspenziu mikroskopických magnetických častíc (1-5 μm) [6], väčšinou železa, v nosnej kvapaline, napr. minerálnom oleji, syntetickom oleji, vode alebo etylénglykole [7]. Nosná kvapalina je disperzným médiom a zabezpečuje homogénne rozptýlenie magnetických častíc. Ďalšou súčasťou sú aditíva. Surfaktanty, ktoré sú adsorbované na povrchu častíc zlepšujú povrchové napätie a zvyšujú schopnosť častíc polarizovať sa pri vložení do magnetického poľa. Stabilizátory zase zabráňujú usádzaniu častíc a udržiavajú ich rozptýlené v kvapaline [7]. Pri absencii vonkajšieho magnetického poľa sa MR kvapaliny správajú ako Newtonovské kvapaliny. Pri vložení MR kvapaliny do magnetického poľa ale dochádza k polarizácii magnetických častíc, teda získajú dipólový moment a začnú sa otáčať a usporiadať v smere magnetického poľa a utvoria reťaze v smere magnetického poľa. Tieto zret'azené častice potom tvoria prekážku, ktorú musí tok kvapaliny prekonať. Zmagnetizovaná MR kvapalina sa teda už nespráva ako Newtonovská kvapalina. Na to, aby mohol nastať tok kvapaliny musí dôjsť k prekonaniu medze toku. Takéto chovanie popisujeme Binghamovým modelom. Medza toku je týmto modelom určená ako:

$$\tau(B, \dot{\gamma}, \eta) = \tau_0(B) + \eta_B \dot{\gamma},$$

kde τ je šmykové napätie, τ_0 je medza klzu, B je magnetická indukcia, η_B je Binghamova viskozita a $\dot{\gamma}$ je rýchlosť šmyku [6]. Pri prekonaní medze klzu τ_0 magnetoreologická kvapalina začína tiecť. Pokiaľ je šmykové napätie menšie ako medza klzu, MR kvapalina sa správa ako tuhá látka.



Obr. 2-16 Závislosť viskozity Newtonovej a Binghamovej kvapaliny na šmykovom napätí [6].

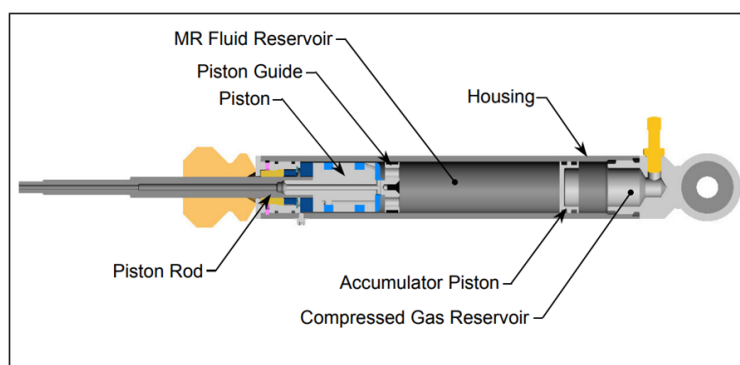
Bežné MR materiály dokážu vyvinúť medzu toku o veľkosti 50 až 100 kPa pri intenzitách magnetického poľa od 150 do 250 kA/m. Medzu toku kvapaliny takisto ovplyvňuje drsnosť povrchu, ktorá je v kontakte s kvapalinou [7]. Viskozitu a medzu toku MR materiálov možno ovládať až do bodu nasýtenia, kedy už sa už nemôže zvýšiť počet zret'azených častíc. Obvykle sa tak deje pri intenzitách okolo 300 kA/m. Pri odstránení magnetického poľa dochádza k takmer okamžitej demagnetizácii častíc, reťazce vymiznú.

2.8 Konštrukcie MR tlmičov

MR tlmiče sa používajú na tlmenie ako aj lineárneho pohybu, tak aj rotačného pohybu. V prípade rotačných tlmičov pracuje MR kvapalina v šmykovom móde, kde rovnobežný pohyb stien tlmiča spôsobuje v kvapaline vznik šmykového napätia, ktoré bráni pohybu týchto stien. Pri lineárnych tlmičov je kvapalina väčšinou namáhaná v tzv. ventilovom móde, kde kvapalina prechádza úzkym škrtiacim otvorom. Rozdiel tlakov pred a za otvorom spôsobuje vznik tlmiacej sily. Aby mohla MR kvapalina správne fungovať vo ventilovom móde, musí mať magnetické pole smer kolmý na tok kvapaliny. Tak dôjde k zret'azaniu častíc v MR kvapaline v smere kolmom na smer prúdenia a zvýši sa medza toku. Najviac bežne sa vyskytujúce lineárne MR tlmiče sa skladajú z plášťa, vo vnútri ktorého sa pohybuje piest, ktorý oddeľuje rezervoár MR kvapaliny a pracovný priestor tlmiča. Piest je pripevnený na piestnej tyči, ktorá môže vychádzať z tlmiča na jednej strane, alebo na oboch stranách. V dutine v strede piestnej tyče je uložené elektrické vedenie, ktoré vedie potrebný prúd do cievky, alebo cievok, ktoré indukujú magnetické pole. Tieto cievky tvoria súčasť piestu. V pieste sa nachádzajú štrbiny, ktorými prechádza MR kvapalina a jej škrtaním prechodom cez štrbiny dochádza k vzniku tlmiacej sily. Otvory nemusia byť umiestnené len v pieste, ale aj vôľa medzi stenou plášťa a stenou piestu môže slúžiť ako škrtiaca štrbina.

2.8.1 Jednoplášťový jednostranný MR tlmič

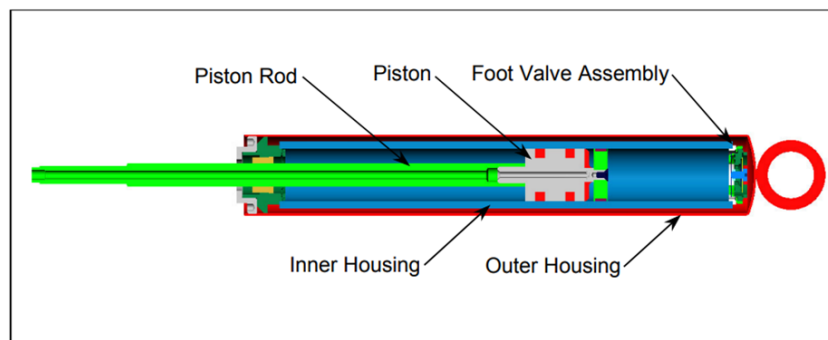
Jedná sa o najviac používaný MR tlmič, kvôli svojej jednoduchosti. Je tvorený jedným plášťom, v ktorom sa nachádza jeden pracovný priestor. Piestna tyč je vyvedená na jednej strane, čím pri jej vsunutí a vysunutí do a von z tlmiča dochádza k zmene objemu pracovného priestoru tlmiča. Na kompenzáciu tejto zmeny obsahuje jednoplášťový tlmič akumulátor. Jedná sa o priestor na opačnom konci tlmiča, ako je umiestnené vedenie piestnej tyče, ktorý je naplnený natlakovaným plynom, väčšinou dusíkom. Akumulátor je od pracovného priestoru tlmiča oddelený buď pružnou membránou alebo plávajúcim piestom. Stláčaním plynu v akumulátore dochádza ku kompenzácii zmeny objemu pracovného priestoru vníkaním piestnej tyče do tlmiča. Výhodou tohto tlmiča je jednoduchosť, nízka hmotnosť a relatívne menšie rozmery. Nevýhodou je vždy prítomné pruženie, spôsobené plynovým akumulátorom.



Obr. 2-17 Rez jednoplášťovým tlmičom [8].

2.8.2 Dvojplášťový jednostranný MR tlmič

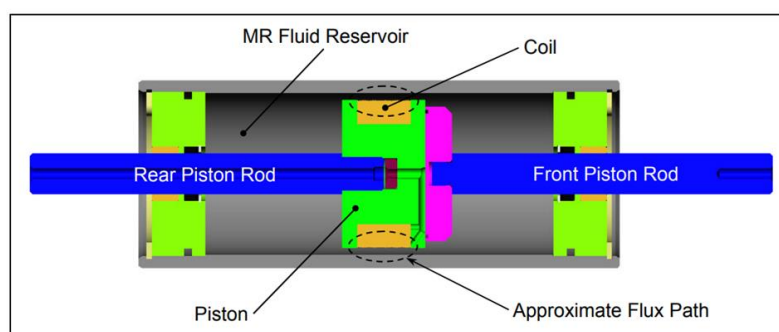
Na rozdiel od jednoplášťového tlmiča má tento typ tlmiča plášte dva a má teda aj dva pracovné priestory. Tieto plášte sú navlečené na sebe, teda vnútorný plášť je uložený v pracovnom priestore vonkajšieho plášťa. Piest aj s piestnou tyčou sa pohybujú v pracovnom priestore vnútorného plášťa, pričom piestna tyč je vyvedená von z tlmiča na jednej strane. Ako v prípade jednoplášťového tlmiča, aj v tomto prípade dochádza k zmene objemu vníkaním piestnej tyče do priestoru. Kompenzáciu zmeny objemu zabezpečuje vonkajší plášť. Pri stláčaní tlmiča z vnútorného pracovného priestoru uniká MR kvapalina cez spätný ventil do pracovného priestoru vonkajšieho plášťa, čím sa vysúva vnútorný plášť z vonkajšieho a kompenzuje sa objem, zmenšený vniknutím piestnej tyče. Výhodou dvojplášťového tlmiča je absentujúce pruženie, pretože nemá akumulátor so stlačeným plynom. Jeho nevýhodou je zvýšená hmotnosti oproti ekvivalentnému jednoplášťovému tlmiču a takisto viac plôch, ktoré musia byť utesnené a teda aj väčšie riziko úniku pracovnej kvapaliny.



Obr. 2-18 Rez dvojplášťovým MR tmičom [8].

2.8.3 MR tmič s prechádzajúcou piestnicou

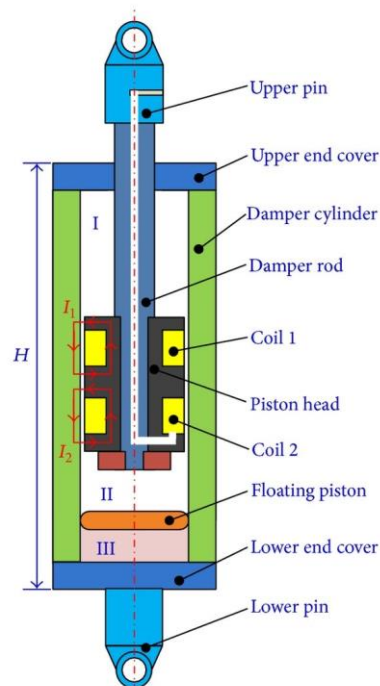
Tmič s prechádzajúcou piestnicou je tmič s jedným plášťom a piestom s cievkou ako v prípade vyššie spomenutého jedноплаšťového tmiča. Na rozdiel od bežného jedноплаšťového a dvojplášťového tmiča má však piestnu tyč vyvedenú von z tmiča na obidve strany. Vďaka tomu nedochádza k zmene objemu pracovného priestoru tmiča pri pracovnom zdvihu, pretože piestna tyč na jednom konci do tmiča vniká a na druhom konci z neho vychádza. Tento tmič preto nepotrebuje žiaden mechanizmus, ktorý by kompenzoval zmenu objemu pracovného priestoru. Výhodou MR tmiča s prechádzajúcou piestnou tyčou je jednoduchosť a spoľahlivosť. Ďalšou výhodou je aj absencia akumulátora, čím sa odstraňuje vplyv pruženia média v akumulátore. Nevýhodou, najmä voči tmiču jednostrannému je skutočnosť, že piestna tyč vystupuje na obidve strany a teda dĺžka tmiča s prechádzajúcou piestnicou je väčšia než u tmiča jednostranného.



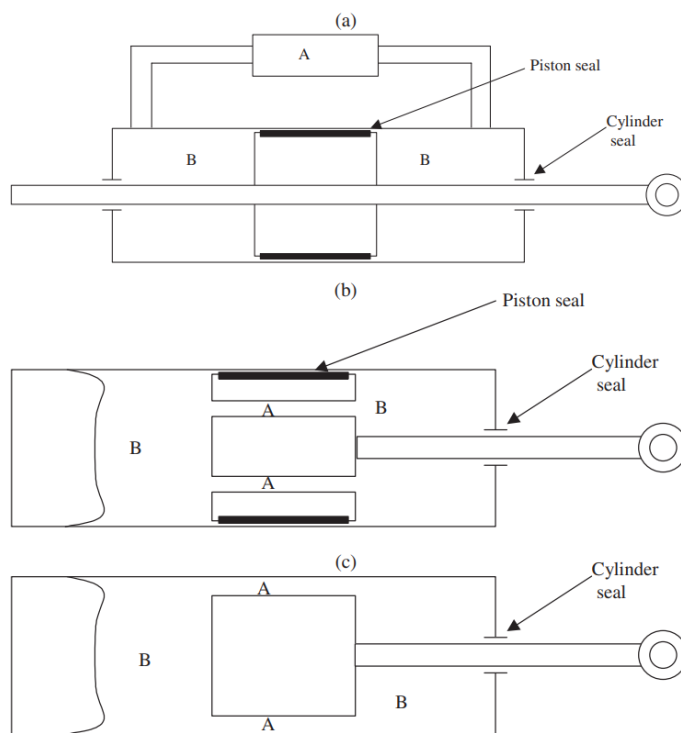
Obr. 2-19 Rez obojstranným MR tmičom [8].

2.8.4 Ďalšie koncepcie MR tlmičov

Okrem vyššie predstavených konštrukcií MR tlmičov existujú samozrejme mnohé ďalšie. Môžu sa líšiť v tvare drážky v pieste, alebo aj v umiestnení cievky a pôsobiaceho magnetického poľa. Niektoré piesty MR tlmičov vôbec neobsahujú drážku na prúdenie MR kvapaliny a k škrteniu toku kvapaliny slúži vôľa medzi piestom a plášťom tlmiča. Príkladom takéhoto tlmiča je tlmič na obrázku 2-20. Výhodou takéhoto typu tlmiča je, že sa v medzere medzi plášťom a piestom kombinuje ventilový a šmykový mód. Ďalšou možnosťou koncepcie magnetoreologického tlmiča je tlmič s tzv. bypassom, kde piest je veľmi jednoduchej konštrukcie, pretože cezeň nepreteká kvapalina, ani sa v ňom nenachádza cievka. Namiesto toho je pri pohybe piestu kanálikom vedená kvapalina mimo tela tlmiča, kde sa nachádza cievka a dochádza teda k magnetizácii kvapaliny mimo telo tlmiča. Kvapalina v samotnom tlmiči je magnetickým poľom neovplyvnená. Využíva sa tu ventilový mód. Porovnanie konštrukčných variant MR tlmičov je znázornené na obrázku 2-21.



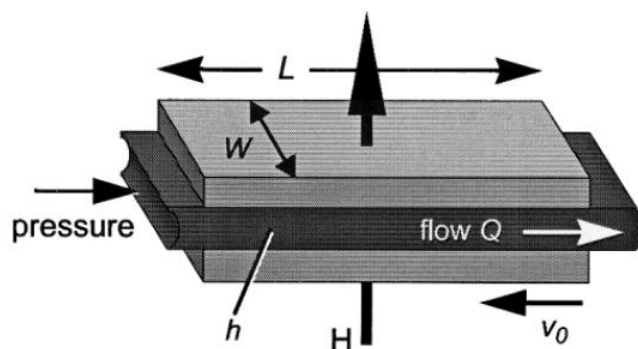
Obr. 2-20 Schéma MR tlmiča s vôľou medzi piestom a plášťom [8].



Obr. 2-21 Porovnanie konštrukčných variantov MR tlmiča: a) tlmič s bypassom, b) tlmič s drážkami v pieste, c) tlmič s vôľou medzi piestom a plášťom [9].

2.9 Matematický model MR tlmiča

Prúdenie MR kvapaliny v kruhovej škrtiacej drážke v pieste tlmiča možno aproximovať pomocou modelu s paralelnými doskami. Rozdiel medzi týmto modelom a axisymetrickým modelom dosahuje 2% [10]. Na obrázku 2-22 je znázornený tento model.



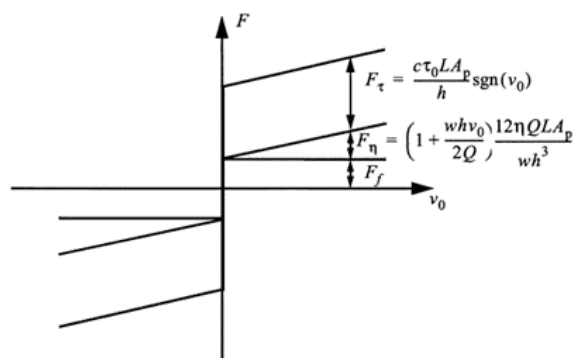
Obr. 1-22 Model toku kvapaliny medzi dvoma paralelnými doskami [10].

L v tomto prípade označuje dĺžku kanála, w jeho šírku, h je výška štrbiny, Q je objemový tok štrbinou a H je intenzita magnetického poľa. Šírka w odpovedá obvodu drážky v pieste rozvinutému do roviny.

Jedným zo základných parametrov popisujúcich MR tlmič je dynamický rozsah. Ten uvádza do pomeru celkovú silu tlmiča F_0 k nekontrolovateľnej pasívnej sile F_{uc} . Vypočíta sa ako:

$$D = \frac{F_0}{F_{uc}}$$

Výsledná veľkosť sily tlmiča odpovedá súčtu nekontrolovateľnej viskózne sily F_η , trecou silou, spôsobenou pohybom piestu vo valci a piestnou tyčou tesneniami, miestnymi vtokovými stratami a ovládateľnou zložkou F_τ [10]. Na obrázku 2-23 je znázornený Binghamov model pre MR kvapalinu so znázornenými zložkami sily tlmiča [10].



Obr. 2-23 Graf závislosti veľkosti sily tlmiča na rýchlosti toku s vyznačenými jednotlivými zložkami sily [10].

2.9.1 Pasívna sila tlmiča

Pasívna sila MR tlmiča je neovládateľná a je pri pohybe piestu vždy prítomná. Jej zložkami sú viskózna pasívna sila F_η , trecie sily v tesneniach piestu a piestnej tyče F_f a sily spôsobené miestnymi stratami F_m , teda platí:

$$F_{uc} = F_\eta + F_f + F_m$$

2.9.2 Viskózna pasívna sila

Viskózna sila F_η je daná rozdielom tlakov pred a za piestom tlmiča pri pohybe:

$$F_\eta = \Delta p_\eta \cdot A_p$$

kde A_p je efektívna plochy čela piestu tlmiča, na ktorú pôsobí tlak MR kvapaliny. Je daná plochou čela piestu, od ktorej je odčítaná plocha prierezu piestnej tyče. Rozdiel tlakov je daný vzťahom [10]:

$$\Delta p_{\eta} = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right) \frac{12\eta QL}{wh^3}$$

kde v_0 je rýchlosť prúdenia štrbinou, η je dynamická viskozita MR kvapaliny τ_0 je medza toku MR kvapaliny v zmagnetizovanom stave a Q je objemový prietok štrbinou.

Objemový tok je určený vzťahom $Q = A_p v_r$, teda súčinu efektívnej plochy čela piestu a piestovej rýchlosti, resp rýchlosti záklzu dela. Vzhľadom k tomu, že platí rovnica kontinuity a objemový tok vo valci tlmiča je rovný objemovému toku v štrbine piestu, možno určiť rýchlosť prúdenia v štrbine v_0 ako:

$$Q = A_p v_r = A_d v_0$$

$$v_0 = v_r \frac{A_p}{A_d}$$

kde A_d je plocha prierezu škrtiacej drážky.

2.9.3 Zmena viskozity s teplotou

Pri modelovaní treba brať do úvahy aj požiadavky na prostredie, v ktorom má tlmič pracovať. Od dela je očakávané, že bude dobre fungovať ako aj v mrazoch tak aj v horúcich púštnych podmienkach, kde bude tlmič výrazne zahrievaný slnečným žiarením. Preto sa dá očakávať, že MR kvapalina tlmiča, MRF – 132 DG bude pracovať v celom rozsahu svojich prípustných teplôt od - 40°C do 130°C [11]. Pri tejto značnej škále teplôt treba počítať so zmenou viskozity kvapaliny. V prípade kvapaliny MRF – 132 DG je zmena viskozity v závislosti na teplote určená vzťahom [12]:

$$\eta = \frac{a}{(b + T)^c}$$

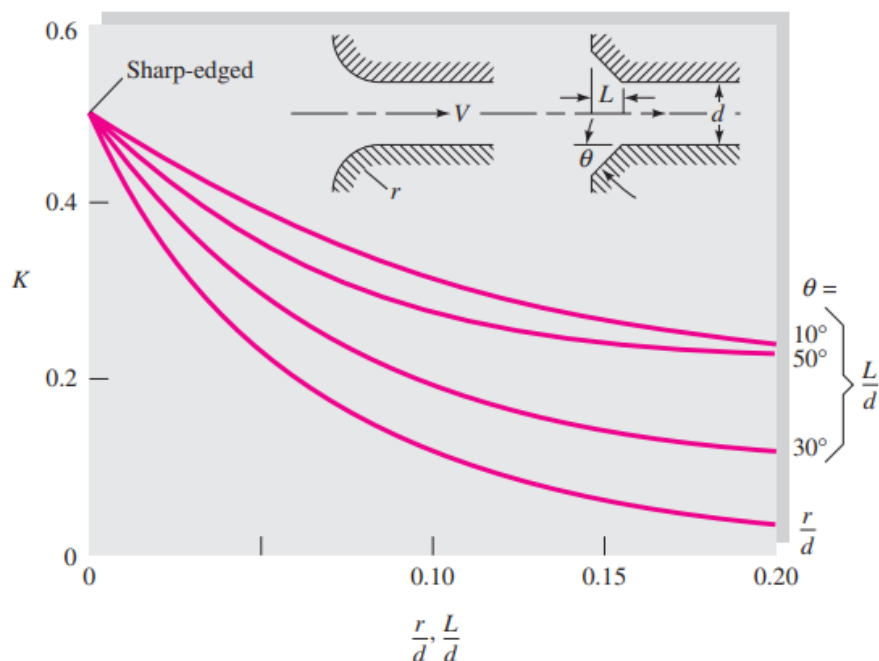
kde T je teplota kvapaliny v °C, $a = 35,07$, $b = 13,48$ a $c = 1,439$.

2.9.4 Vplyv miestnych strát

Do tlmiacej sily sa premieta aj vplyv miestnych strát spôsobených:

- Vtokom kvapaliny z priestoru valca do štrbiny: $\Delta p_{v\text{tok}} = \xi_{vi} \frac{v_0^2}{2} \rho$, kde ξ_{vi} je súčiniteľ strát závislý na tvare vtoku do štrbiny.
- Výtokom kvapaliny zo štrbiny do valca tlmiča $\Delta p_{v\text{ýtok}} = \xi_n \frac{v_0^2}{2} \rho$, kde ξ_n je súčiniteľ strát závislý na tvare výtoku zo štrbiny.
- Zmenou smeru toku kvapaliny v drážke, napr. tým, že je drážka v pieste zahnutá: $\Delta p_t = \xi_s \frac{v_0^2}{2} \rho$, kde ξ_s je súčiniteľ strát závislý na zaoblení a uhle zahnutia drážky.

Miestne straty sa prejavajú zvýšením pasívnej sily tlmiča, ktorá je výsledkom súčiny tlakovej miestnej straty a plochy čela piestu A_p . Na obrázku 2-33 je znázornený diagram pre určenie súčiniteľov strát na vtoku podľa tvaru ústia vtoku. Súčinitele na výtoku pre ostré hrany, zaoblenie aj zkosenie možno uvažovať ako 1 [13].



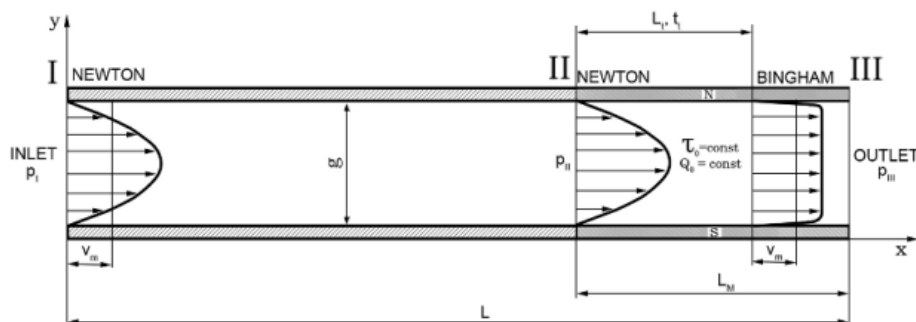
Obr. 2-24 Súčinitele miestnych strát na vtoku do drážky [13].

2.9.5 Ovládateľná sila tlmiča

Vďaka obsahu magnetických častíc, ktoré sa po vložení do magnetického poľa zretážia, možno ovládať medzu toku MR kvapaliny. Tým možno ovládať veľkosť sily tlmiča. Zjednodušený model popisuje zmenu tlaku spôsobenú týmto efektom ako [10]:

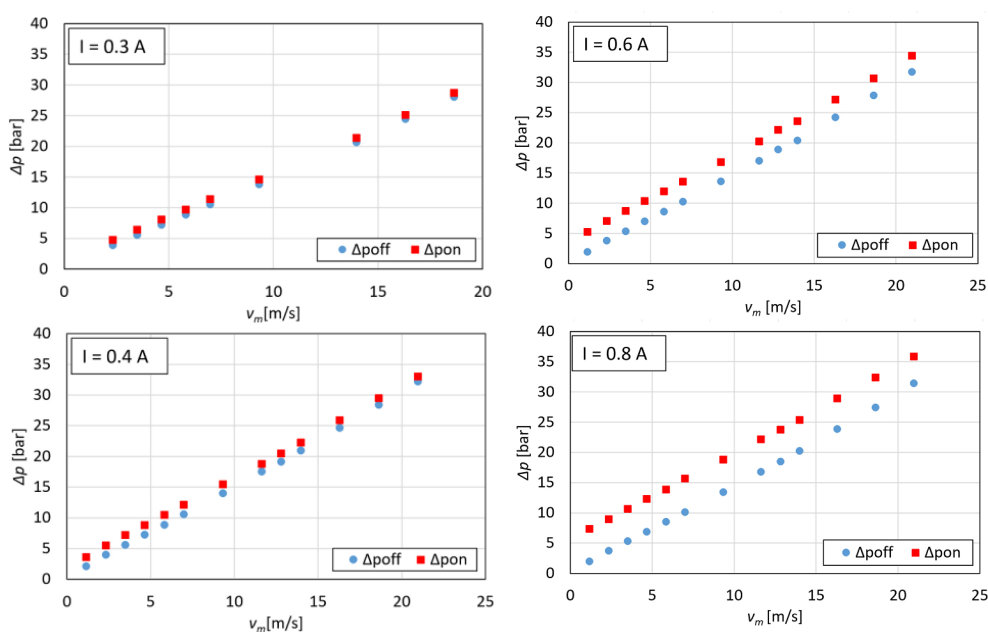
$$\Delta p_\tau = \left(2,07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0,4wh^2\tau_0} \right) \frac{\tau_0 L}{wh^3}$$

Problémom tohoto modelu je však to, že nezahrňuje vplyv času, ktorý je potrebný na to, aby sa kvapalina zmagnetizovala. V prípade tečenia kvapaliny nedostatočne dlhou zmagnetizovanou drážkou za vysokej rýchlosti môže nastať stav, kedy kvapalina bude tiecť len v prechodovom stave a nedôjde k vytvoreniu úplného toku podľa Binghamu. To sa prejaví nižšou medzou toku kvapaliny. Na obrázku 2-25 je v oblasti II až III znázornený prechod z toku, kedy sa kvapalina správa ako Newtonovská do toku, kedy sa správa ako Binghamská.



Obr. 2-25 Znáznorenie toku MR kvapaliny kanálom v nezmagnetizovanom stave (oblast I až II) a zmagnetizovanom stave, kde dochádza k prechodnému javu (oblast II až III) [12].

Kubík a spol. [12] sa vo svojej práci venovali práve popísaniu tohoto javu, kedy zvyšujúca sa rýchlosť toku MR kvapaliny negatívne ovplyvňovala tlakový rozdiel pri toku drážkou. Na obrázku 2-26 sú znázornené grafické závislosti rozdielu tlaku pri zapnutom a vypnutom magnetickom poli s rôznou intenzitou magnetického poľa H spôsobenom rôznymi veľkosťami prúdu I pretekajúceho cievkou.



Obr. 2-26 Závislosti rozdielu tlaku tlmiča od rýchlosti vo vypnutom stave (modrá) a zapnutom stave (červená) pri rôznych prúdoch pretekajúcich cievkou [12].

Na to, aby kvapalina dosiahla požadovaný MR efekt, musí byť magnetizovaná po dostatočne dlhú dobu. Bezrozmerný reakčný čas MR kvapaliny T_r sa určí ako [12]:

$$T_r = \frac{t_r \eta}{\rho h^2}$$

kde t_r je reálny reakčný čas kvapaliny, kedy dosiahne 90% stavu, kedy tečie ako Binghamská kvapalina. Podľa Shermanovho modelu [12] možno bezrozmerný reakčný čas vyjadriť v závislosti na Binghamovom čísle:

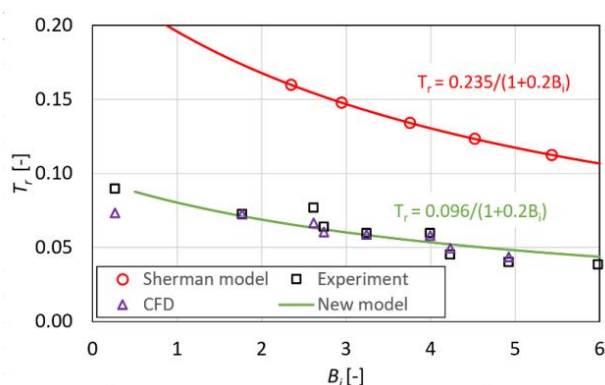
$$T_r = \frac{0,235}{1 + 0,2Bi}$$

Binghamovo číslo Bi dáva do pomeru medzi toku MR kvapaliny k šmykovému napätiu od viskozity kvapaliny:

$$Bi = \frac{\tau_0}{\eta\dot{\gamma}}$$

kde $\dot{\gamma} = \frac{v_0}{h}$ je rýchlosť deformácie charakteristická pre daný systém.

Kubík a spol. [12] experimentálne určili bezrozmerný reakčný čas a porovnali ho so Shermanovým modelom a CFD simuláciou. Na obrázku 2-27 je grafická závislosť bezrozmerného reakčného času na Binghamovom čísle.



Obr. 2-27 Závislosť bezrozmerného času T_r na Binghamovom čísle [12].

Na grafe je možné pozorovať, že experimentálne hodnoty a hodnoty získané CFD simuláciou sa zhodujú. Kubík a spol. tieto hodnoty preložili svojím modelom. Tento model je však možné použiť len v prípade ich experimentálnej konfigurácie. Shermanov model dáva výrazne vyššie hodnoty reakčného času, než sú hodnoty získané experimentom. Použitie Shermanovho modelu pri konštrukcii tlmiča je teda konzervatívny prístup.

Z vyššie uvedeného vzťahu pre výpočet bezrozmerného času možno vyjadriť reálny reakčný čas t_r [12]:

$$t_r = T_r \frac{\rho h^2}{\eta}$$

Na dosiahnutie požadovaného MR efektu musí byť čas magnetizácie kvapaliny t_{dwell} rovný minimálne reakčnému času $t_{dwell} \geq t_r$. Dĺžka magnetického pólu, ktorý zabezpečí 90% magnetizáciu kvapaliny sa určí vzťahom:

$$L_{p,min} = v_0 t_{dwell}$$

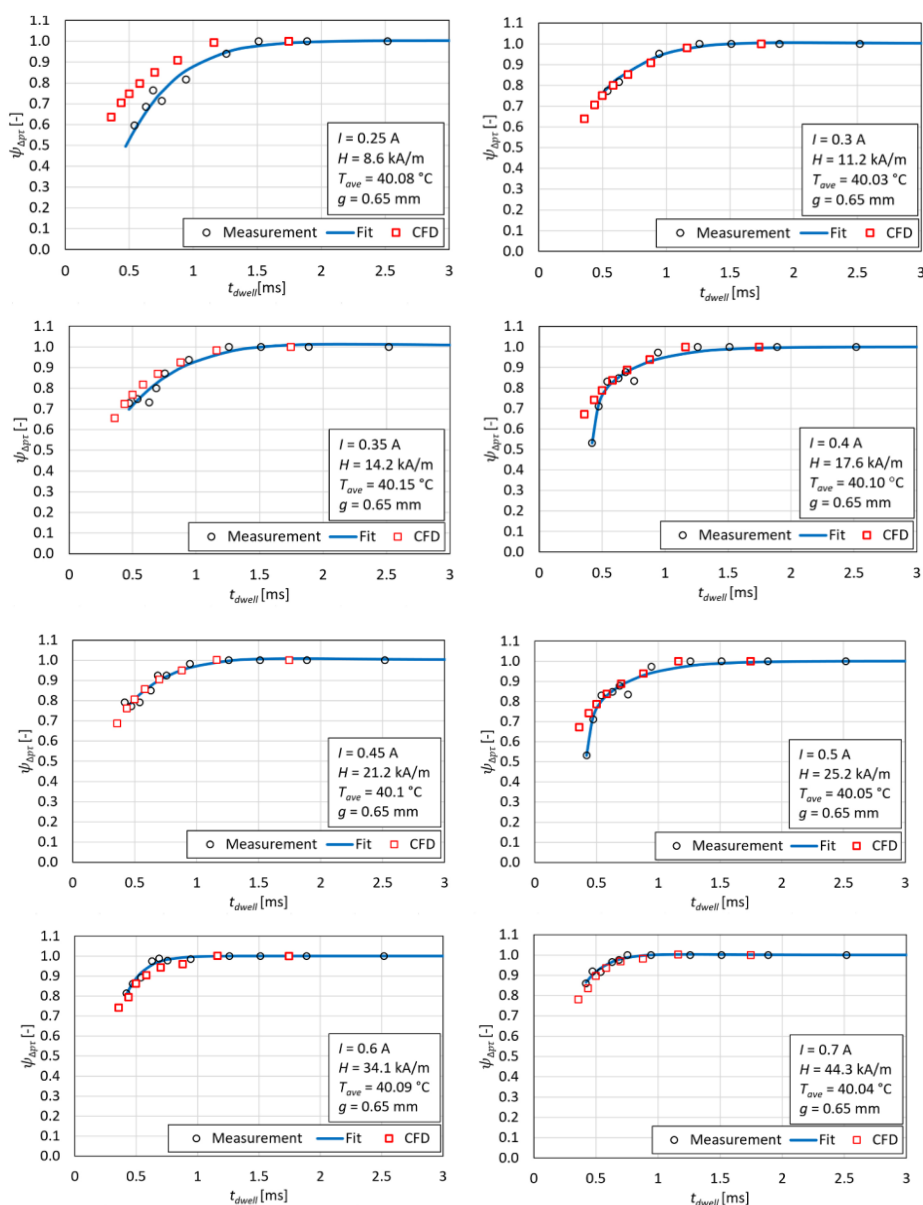
Rozdiel tlakov spôsobený medzou toku kvapaliny po dosiahnutí reakčného času je daný vzťahom [12]:

$$\Delta p_{\tau, max} = \tau_0 \frac{2L_M}{h}$$

V prípade, že reakčný čas nie je dosiahnutý sa rozdiel tlakov vypočíta:

$$\Delta p_{\tau} = \psi_{\Delta p_{\tau}} \Delta p_{\tau, max}$$

kde $\psi_{\Delta p_{\tau}}$ vyjadruje mieru magnetizácie kvapaliny v závislosti na čase magnetizácie a na dobúda hodnoty od 0 do 1. Na obrázku 2-28 sú znázornené grafické závislosti $\psi_{\Delta p_{\tau}}$ na čase magnetizácie kvapaliny t_{dwell} pre rôzne hodnoty intenzity magnetického poľa.



Obr. 2-28 Závislosť miery magnetizácie v závislosti času magnetizácie MR kvapaliny pri rôznych hodnotách intenzity magnetického poľa [12].

Ovládateľná zložka sily je daná vzťahom:

$$F_{\tau} = \Delta p_{\tau} A_p$$

2.9.6 Medza toku MR kvapaliny

Pri použití danej MR kvapaliny MRF – 132 DG od spoločnosti LORD Corporation Nguyen a Choi [14] preložili experimentálne namerané hodnoty medze toku kvapaliny v závislosti na intenzite magnetického poľa kubickým polynómom:

$$\tau_0 = C_0 + C_1 H + C_2 H^2 + C_3 H^3$$

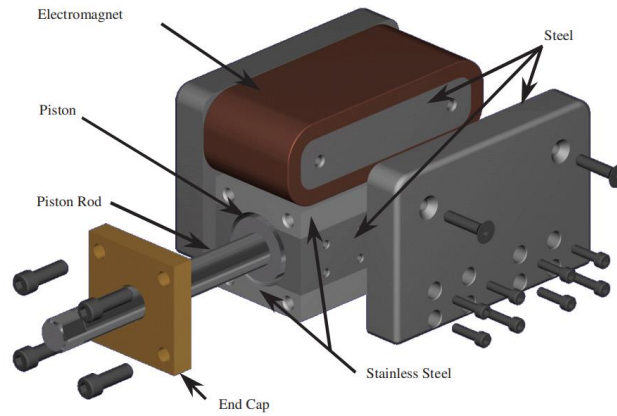
kde C_0 až C_3 sú koeficienty polynómu získané preložením nameraných hodnôt. Ich hodnoty sú: $C_0 = 0,3$, $C_1 = 0,42$, $C_2 = -0,00116$ a $C_3 = 1,05 \cdot 10^{-6}$.

2.10 Využitie MR technológie pri tlmení spätného rázu

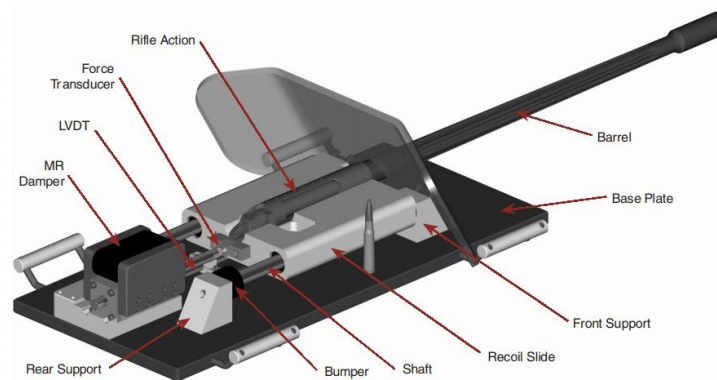
Perspektíva využitia magnetoreologickej záklzovej brzdy sa začala skúmať v deväťdesiatych rokoch 20. storočia, odkedy bolo publikovaných mnoho článkov a prác zaoberajúcich sa aj využitím. Došlo aj k experimentálnemu praktickému odskúšaní týchto MR brzd, ale iba u zbraní s nižším kalibrom. Pri vyšších kalibroch k zásadnému implementovaniu tejto technológie zatiaľ nedošlo.

2.10.1 MR tlmič spätného rázu pušky kalibru .50 BMG

Ahmadian a Poynor [15] zostrojili a v praxi odskúšali magnetoreologický tlmič spätného rázu pri tlmení spätného rázu pušky kalibru .50 BMG (12,7 x 99 mm). Konštrukcia tejto zostavy pozostáva z pušky kalibru .50 BMG, ktorá je umiestnená na klznom vedení a vzadu je spojená s piestnou tyčou tlmiča. MR tlmič má piestnicu vystupujúcu na obidve strany. Škrtiaca drážka je tvorená 2 mm vôľou medzi piestom a plášťom tlmiča. Samotný piest neobsahuje cievku, tá je umiestnená nad tlmičom namotaná na pozdĺžnom jadre s rovnakou dĺžkou ako má tlmič. K jadrú sú na oboch stranách pripevnené oceľové dosky, ktoré sa v spodnej časti dotýkajú plášťa tlmiča a uzatvárajú magnetický obvod. Týmto spôsobom je zabezpečená magnetizácia MR kvapaliny v tlmiči v kolmom smere na pohyb piestu a dochádza k nej po celej dĺžke tlmiča. Na obrázku 2-29 je znázornená konštrukcia tlmiča a na obrázku 2-30 je celá sústava.

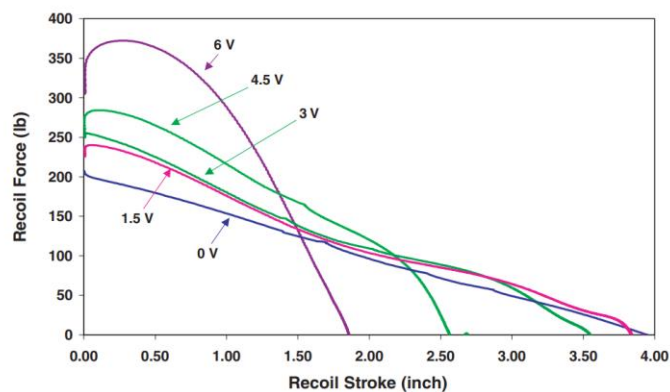


Obr. 2-29 Konštrukcia MR tlmíča spätného rázu pušky kalibru 12,7 mm [15].

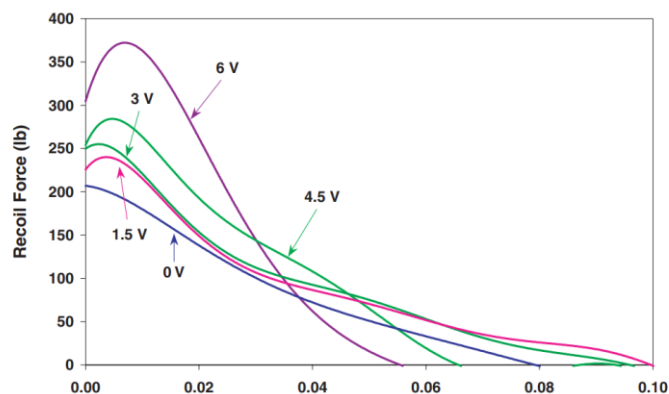


Obr. 2-30 Sústava pušky, jej vedenia, základne a MR tlmíča [15].

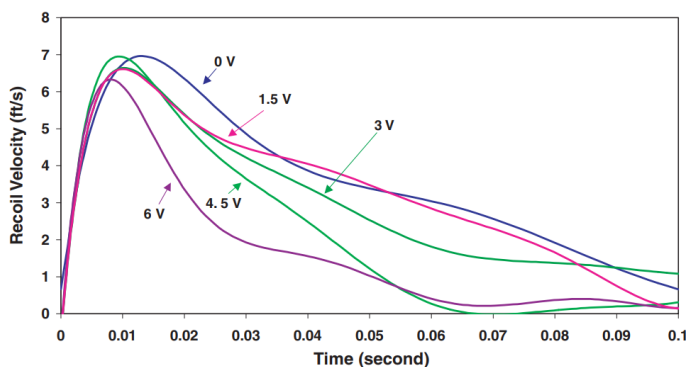
Samotný experiment prebiehal streľbou zo zbrane, zatiaľ čo bola cievka napojená na zdroj jednosmerného napätia. Veľkosti napätia boli počas záklzu konštanté. Meranie síl a dĺžky záklzu boli vykonané pre napätie 0 V, 1,5 V, 3 V, 4,5 V a 6 V. Na základe meraní Ahmadian a spol. zostrojili charakteristické priebehy síl v závislosti na polohe záklzu (obr. 2-31), času (obr. 2 - 32) a tiež zostrojili charakteristické priebehy rýchlosti záklzu v závislosti na čase (obr. 2 - 33).



Obr. 2-31 Závislosť veľkosti sily MR tlmíča na dĺžke záklzu pre rôzne hodnoty napätia v cievke [15].



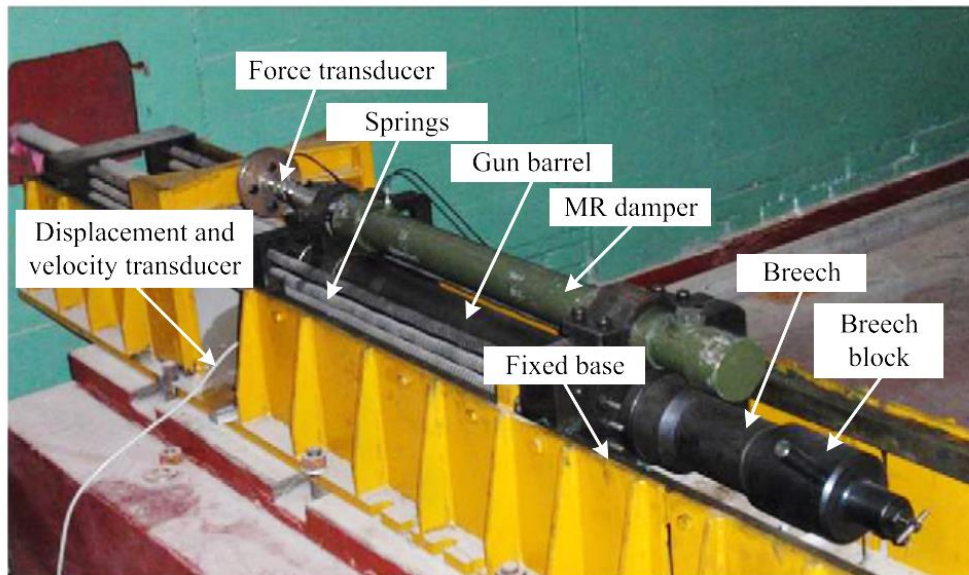
Obr. 2-32 Závislosť veľkosti sily MR tlmiča na čase pre rôzne hodnoty napätia v cievke [15].



Obr. 2-33 Závislosť rýchlosti zázklzu na čase pre rôzne hodnoty napätia v cievke [15].

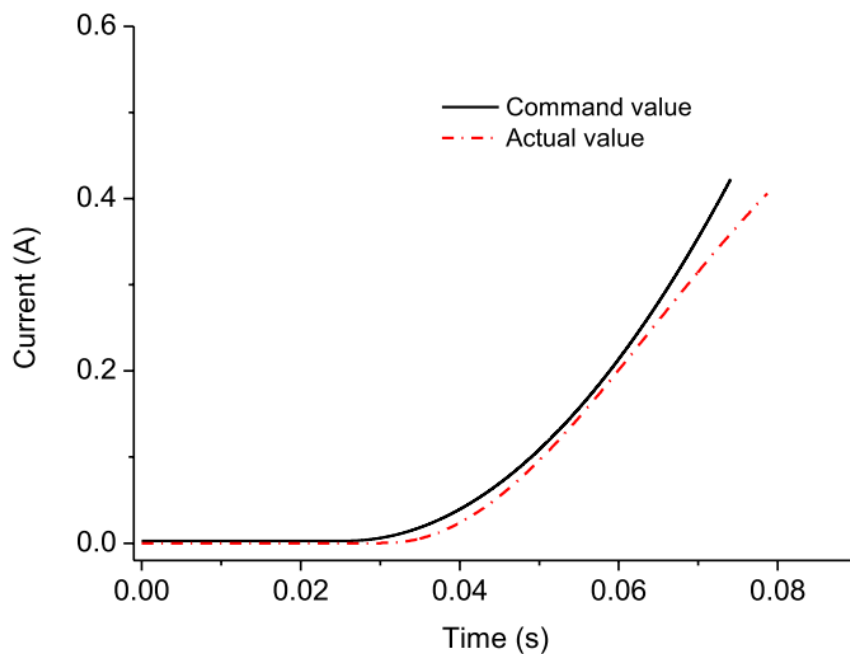
2.10.2 MR tlmič spätného rázu dela kalibru 30 mm

Pre výzkum perspektívy použitia magnetoreologického tlmiča pre tlenie spätného rázu dela Li a Wang [16] skonštruovali MR hydro – pružinový brzdovratný systém, ktorým vybavili ľahký kanón kalibru 30 mm. Konštrukciu tohoto tlmiča zvolili jednostrannú s jednoduchým plášťom. Škrtiacou drážkou bola vôľa medzi piestom a plášťom. Vnútorň priemer plášťa činil 50 mm, vonkajší priemer piestu bol 46 mm a dĺžka piestu bola 60 mm. Dĺžka pracovného zdvihu bola 300 mm [16]. Ako pracovná látka bola použitá MR kvapalina SG-MRF2305 od spoločnosti Sangong [16]. Piestna tyč bola pripevnená k rámu, zatiaľ čo plášť bol spojený s hlavňou a konal vratný pohyb. Na obrázku 2-34 je zobrazená fotografia sústavy kanónu s brzdovratným zariadením a jednoduchým rámom, slúžiacim ako lafeta.



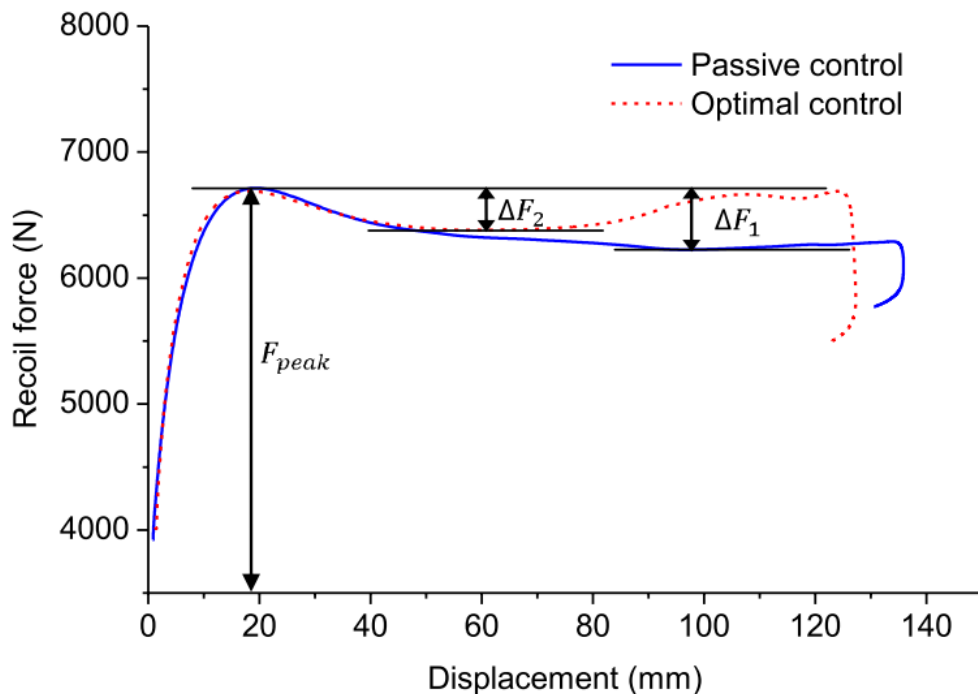
Obr. 2-34 Sústava 30 mm dela s MR brzdovratným mechanizmom [16].

Piest MR tmiča bol vybavený tromi cievkami, ktoré zabezpečovali magnetizáciu MR kvapaliny v štrbine medzi piestom a plášťom. Prúd, prechádzajúci cievkami bol ovládaný riadiacim systémom s otvorenou slučkou, teda nevyžadoval použitie žiadnych senzorov. Na obrázku 2-35 je graf závislosti veľkosti prúdu na čase, kde počiatočným bodom je iniciácia výmetnej náplne.

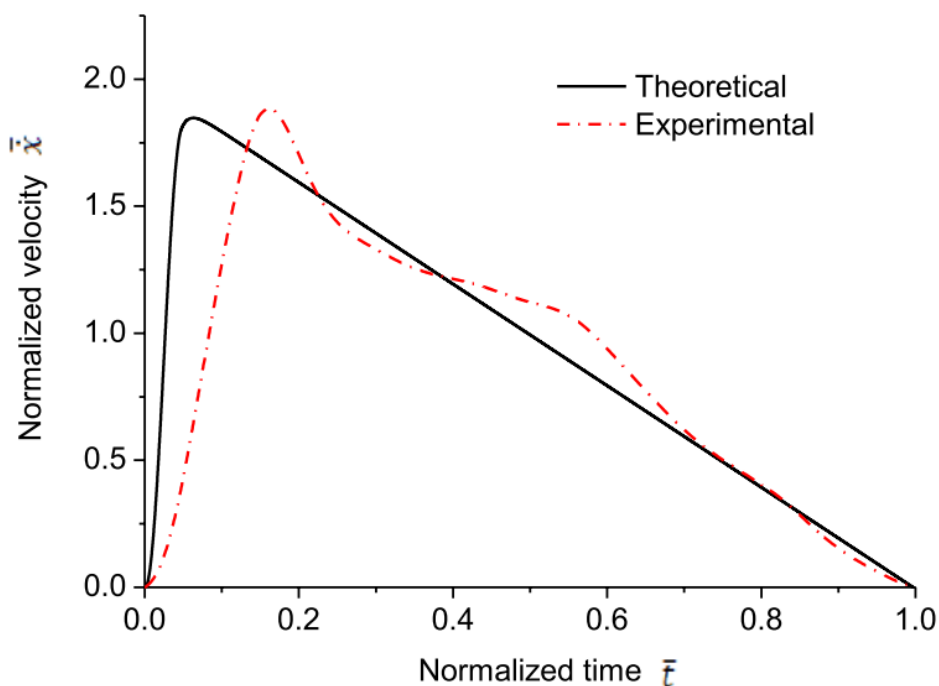


Obr. 2-35 Priebeh veľkosti prúdu cievkami v závislosti na čase [16].

Ako je možné vidieť na grafe, až do 30 ms boli cievky vypnuté a tlmiaca sila bola zabezpečená iba pasívnym účinkom tlmiča. Následne, aby sa potlačil pokles tlmiacej sily s klesajúcou rýchlosťou došlo k nárastu prúdu tečúceho cievkami. Tým sa zabezpečil relatívne konštantný priebeh tlmiacej sily. Jej priebeh je znázornený v grafe na obrázku 2-36 a priebeh rýchlosti záklzu je znázornený na obrázku 2-37.



Obr. 2-36 Priebeh sily brzdo vratného zariadenia v závislosti na polohe počas záklzu [16].



Obr. 2-37 Priebeh rýchlosti záklzu 30 mm dela v závislosti na čase [16].

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3.1 Analýza dynamického správania sa tlmiča spätného rázu

Pri výstrele dochádza k rapídneho nárastu tlaku v hlavni dela, ktorý pôsobí na dno záveru a urýchľuje hlavneň vzad. Po dosiahnutí maxima, kedy sila spätného rázu môže dosahovať až jednotky MN, tlak rýchlo klesá až do momentu, kedy strela opustí hlavneň. Samotný dej výstrelu obvykle trvá 20 ms a menej. Po výstrele z hlavne až do momentu vyrovnania tlaku hlavni s okolím unikajú povýstrelové plyny, ktoré hlavneň ešte urýchľujú. Proti pohybu zaklzujúcej hlavne pôsobí silou brzdovratný mechanizmus. Jeho úlohou je pôsobením sily tlmiča disipovať energiu spätného rázu vo forme tepla. Nie všetka energia je však disipovaná, časť je využitá na stlačenie rekuperátora. Takto uložená potenciálna energia je využitá na navrátenie hlavne do palebnej pozície. Na konštrukcii dela a teda na možnej dĺžke záklzu závisí samotná veľkosť brzdiacej sily a rýchlosť záklzu. Ideálny priebeh brzdiacej sily brzdovratného zariadenia je konštantný. Ten je v skutočnosti nemožné doceliť, pretože veľkosť sily tlmiča závisí na rýchlosti záklzu. Preto má priebeh brzdiacej sily prudký nárast a prudký pokles na začiatku a na konci záklzu. Vzhľadom k tomu, že súčasné pasívne a semiaktívne brzdovratné zariadenia nemožno nastaviť v závislosti na použitej munícii, vykazuje priebeh ich sily maximum buď na začiatku pohybu alebo na konci. Toto maximum dosahuje vyššie hodnoty než ideálna konštantná sila. Je to spôsobené buď dominanciou sily tlmiča (pri použití slabších výmetných náplní) alebo dominanciou sily pružiny či rekuperátora (pri použití silnejších výmetných náplní). Sila brzdovratného zariadenia dosahuje v závislosti na kalibri a konštrukcii dela veľkosti v rádoch jednotiek až stoviek kN. Zároveň zvýši čas pôsobenia spätného rázu na desiatky až stovky ms.

3.2 Analýza konštrukcií tlmičov

Súčasné brzdovratné zariadenia využívajú ako záklzovú brzdu hydraulický tlmič. Ten môže byť pasívny alebo semiaktívny podľa požiadavkov na konštrukciu dela. Pasívne tlmiče sa používajú väčšinou v prípadoch, kedy je dĺžka záklzu dôležitejšou požiadavkou než veľkosť brzdiacej sily napr. pri delách, ktorými sú vybavené tanky alebo pri delách malého kalibru. V prípade ťahaného a samohybného delostrelectva sa používajú semiaktívne záklzové brzdy. Ich konštrukcia umožňuje reguláciu sily tlmiča v závislosti na polohe piestu počas záklzu a na uhle námeru dela. Konštrukcia semiaktívnych brzdovratných zariadení je zložená z troch zásadných častí: záklzovej brzdy, resp. tlmiča spätného rázu, vratného mechanizmu a nárazníka. Rekuperátor vratného mechanizmu býva buď pružinový alebo pneumatický. V prípade použitia pneumatického rekuperátora sa konštrukcie brzdovratných

mechanizmov delia na závislé a nezávislé.

V závislom mechanizme je tlmič prepojený priamo s rekuperátorom. Rekuperátor obsahuje dve komory, jednu naplnenú pracovnou kvapalinou a druhú natlakovaným plynom. Výhodou tohoto mechanizmu je nízka hmotnosť, preto sa používa pri ťahaných delách, kde je dôležitá nízka hmotnosť. Nevýhodou je negatívny vplyv pruženia rekuperátora na chod tlmiča, pretože pri pracovnom zdvihu vznikajú v tlmiči vysoké tlaky.

V nezávislom mechanizme sú tlmič a vratný mechanizmus oddelené, vratný mechanizmus je tvorený dvoma valcami, jeden slúži ako rekuperátor a v druhom pracuje vratný piest. Tieto dva valce sú spojené kanálom, ktorým tečie olej. Výhodou tohoto mechanizmu je odstránenie vplyvu pneumatického rekuperátora na chod tlmiča, pretože sú fyzicky oddelené. Nevýhodou je vysoká hmotnosť v porovnaní so závislým brzdo vratným mechanizmom. Tento typ sa častejšie využíva pri samohybných húfniciach a kanónoch, kde nosnosť podvozku umožňuje zástavbu dela s vyššou hmotnosťou.

Samotná konštrukcia semiaktívnych tlmičov je výrazne zložitá. Na reguláciu sily tlmiča a dĺžky záklzu využívajú primárne mechanizmy, ktoré menia veľkosť škrtiacej drážky. Tieto mechanizmy sú vplyvom veľkých tlakov v tlmiči a drážke značne namáhané. Preto musia byť dizajnované dostatočne robustne, aby svojou životnosťou prevyšovali životnosť vývrtu hlavne dela.

MR tlmiče, ktoré sú schopné pomocou magnetoreologického efektu regulovať svoju silu majú výrazne jednoduchšiu konštrukciu voči vyššie spomenutým tlmičom. Tým, že sú schopné meniť medzu toku MR kvapaliny nevyžadujú použitie zložitých mechanizmov na reguláciu výslednej sily. Základné typy MR tlmičov sú: jednoplášťový s piestnicou vyvedenou na jednu stranu, dvojplášťový s piestnicou vyvedenou na jednu stranu a jednoplášťový s piestnicou prechádzajúcou na obe strany.

Jednoplášťový MR tlmič s piestnicou vychádzajúcou na jednej strane je konštrukčne najjednoduchší a na zástavbový priestor najmenej náročný tlmič. Jeho nevýhodou je však nutnosť použitia plynovej komory na kompenzáciu objemu vnikajúcej piestnice pri zdvihu. Pruženie od plynovej komory sa potom negatívne prejavuje na charakteristike tohoto tlmiča.

Dvojplášťový MR tlmič s piestnicou vychádzajúcou na jednej strane rieši problém kompenzácie objemu vnikajúcej piestnice tým, že umožňuje vnikanie MR kvapaliny do dutiny medzi vonkajším a vnútorným plášťom, ktorým je umožnený vzájomný axiálny pohyb. To však so sebou prináša ďalšie nevýhody oproti jednoplášťovému tlmiču. Dutina medzi vonkajším a vnútorným plášťom vyžaduje prítomnosť tesnenia, čím sa zvyšuje riziko úniku oleja. Navyše je hmotnosť dvojplášťového tlmiča výrazne vyššia práve kvôli použitiu dvoch plášťov namiesto jedného.

Jednoplášťový MR tlmič s prechádzajúcou piestnicou nepotrebuje kompenzovať objem vnikajúcej piestnice, pretože na opačnom konci piestnica z tlmiča vychádza. Jeho konštrukcia je teda výrazne jednoduššia, než konštrukcie tlmičov s jednostrannou

piestnicou. Prítomnosť obojstrannej piestnej tyče však zvyšuje hmotnosť tohoto typu tlmiča. Tlmič je navyše oproti tlmičom s jednostrannou piestnicou výrazne náročnejší na zástavbový priestor. Vďaka absencii plynového akumulátora a jednoduchosť konštrukcie tlmiča s priechodnou piestnicou je práve tento typ používaný vo väčšine prípadov, kedy je testovaná možnosť použitia MR tlmiča na brzdenie spätného rázu.

3.3 Analýza problému

Magnetoreologické tlmiče majú voči bežným tlmičom spätného rázu výrazne jednoduchšiu konštrukciu. Na reguláciu svojej odporovej sily nepotrebujú riešenie využívajúce mechanizmus, pretože sú schopné meniť medzu toku pracovnej kvapaliny elektronicky. To dáva možnosť využitia MR efektu nielen na reguláciu sily tlmiča, aby bol dosiahnutý čo najviac možný konštantný priebeh sily, či zabezpečenie variabilného záklzu dela v závislosti na námere dela, ale aj na nastavenie odporu tlmiča odpovedajúcemu rôznym druhom použitej munície. Použitie MR tlmiča na brzdenie spätného rázu však prináša isté úskalía.

Záklz dela dosahuje rýchlosti v jednotkách, prípadne až desiatkach m/s. Rýchlosť toku MR kvapaliny drážkou v tlmiči je vďaka pomeru plochy čela piestu a plochy drážky výrazne vyššia. Pri vysokej rýchlosti môže nastať problém s dostatočnou magnetizáciou kvapaliny. MR efekt sa v kvapaline neprejavuje okamžite, na potrebné zref'azenie magnetických častíc je potrebný určitý čas. Tento reakčný čas sa v prípade MR kvapalín pohybuje v desatinách až jednotkách ms. V prípade vysokých rýchlostí toku drážkou teda hrozí, že sa kvapalina nestihne dostatočne zmagnetizovať a medza toku bude teda nižšia než je potrebné, prípadne vymizne úplne. Pri konštrukcii MR tlmiča preto treba počítať buď s dostatočnou dĺžkou magnetického pólu na dosiahnutie úplnej magnetizácie kvapaliny alebo so zníženou medzou toku, ak sa kvapalina v póle nestihne dostatočne zmagnetizovať.

Ďalším úskalím je zmena dynamickej viskozity MR kvapaliny s teplotou. S klesajúcou teplotou stúpa viskozita exponenciálne, pričom je nárast výrazne vyšší, ako pri bežne používaných olejoch, ktoré sa využívajú v pasívnych tlmičoch. Táto vlastnosť MR kvapalín môže viesť k problematickej konštrukcii tlmiča, ktorého úlohou je fungovať ako aj za vysokých teplôt pri použití v tropických oblastiach tak aj pri nízkych teplotách pri použití v arktických oblastiach.

Tieto negatíva MR tlmičov neboli dostatočne preskúmané v aplikácii na tlmenie spätných rázov. MR tlmiče sa v praxi na tlmenie spätného rázu nepoužívajú. Perspektíva ich využitia bola potvrdená experimentálne, avšak len pri veľkokalibrových puškách či kanónoch malého kalibru. Piestové rýchlosti boli v týchto prípadoch dostatočne malé na to, aby došlo k dostatočnej magnetizácii MR kvapaliny.

3.4 Ciele práce

Hlavným cieľom tejto práce je konštrukčný návrh elektronicke ovládateľného tlmiča spätného rázu pre delo, teda pracujúceho za vysokých piestových rýchlostí a vysokej miere zaťaženia.

Čiastkové ciele práce:

- Analýza dynamického chovania dela a samotného tlmiča spätného rázu.
- Analýza súčasných konštrukcií tlmičov s popisom ich výhod a nedostatkov.
- Zostavenie zjednodušeného matematického modelu chovania MR tlmiča pri vysokých piestových rýchlostiach.
- Vypracovanie koncepčných návrhov MR tlmičov.

4 KONCEPČNÉ RIEŠENIA

4.1 Požiadavky na konštrukčné riešenie

Konštrukčné riešenie MR brzdovratného zariadenia musí vyhovovať požiadavkam, ktoré spĺňajú konvenčné typy záklzových bŕzd. Tieto požiadavky sú definované v kapitole 2.4 Požiadavky na brzdovratný systém. Tlmič musí teda v súčinnosti s pneumatickou, či mechanicou pružinou poskytovať konštantnú silu na brzdenie záklzu. Musí byť schopný pracovať v teplotách od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zmeny viskozity MR kvapaliny, spôsobené daným rozmedzím teplôt musí byť schopný korigovať. MR tlmič pracuje za vysokých rýchlostí. Konštrukcia tak musí umožňovať dostatočne dlhý čas aktivácie MR kvapaliny, aby sa MR efekt prejavil v požadovanej miere. Konštrukcia tlmiča musí byť jednoduchá, ľahká na demontáž a údržbu, a zároveň spoľahlivá, aby tlmič mal životnosť väčšiu, ako hlaveň dela. Vzhľadom k veľmi krátkym časom, ktoré sú charakteristické pre spätný ráz musí byť magnetický obvod schopný rýchlo zareagovať a vyvinúť magnetické pole s potrebnou intenzitou v potrebný čas. Dynamický rozsah tlmiča musí byť dostatočne veľký, aby umožňoval nastavenie aktívnej zložky sily adekvátne k použitému druhu munície a námeru dela. Dynamický rozsah zároveň musí umožňovať aj núdzové použitie tlmiča v prípade ak iná súčasť brzdovratného zariadenia, napr. rekuperátor, zlyhá.

4.2 Metóda hodnotenia koncepčných riešení

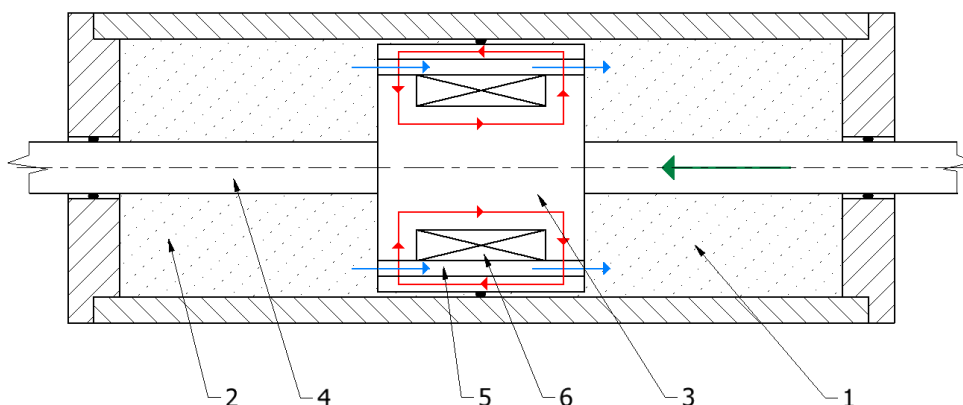
Koncepčné riešenia sú hodnotené v niekoľkých ohľadoch:

- Jednoduchosť konštrukcie – čím je konštrukcia jednoduchšia, tým je tlmič jednoduchší na výrobu a jeho výroba je tak lacnejšia.
- Náročnosť na zástavbový priestor – koncepty sa porovnávajú v tom, ktorý potrebuje väčší priestor na zástavbu, teda ktorý tlmič má menšie rozmery.
- Dynamický rozsah – koncepty sa porovnávajú, u ktorého je možné, s ohľadom na jeho rozmery dosiahnuť čo najlepšiu a najrýchlejšiu aktiváciu MR kvapaliny a u ktorého konceptu je reguláciou magnetického poľa zabezpečený najlepší dynamický rozsah.

Jednotlivé koncepty majú popísané výhody a nevýhody ohľadom vyššie spomenutých bodov, ich porovnaním dochádza k výberu najvhodnejšieho konceptu. Pri porovnaní rozmerov piestu, drážky a reakčného času MR kvapaliny tlmiča je použitý matematický model (Príloha 1), ktorý je upravený do stavu, kde sú rozmery tlmiča, tj. rozmery čela piestu a veľkosti drážok rovnaké a následne je úpravou vzťahov v modeli vyjadrený pomer jednotlivých síl v prípade pasívnych zložiek síl a v prípade aktívnej zložky sily je porovnaný reakčný čas.

4.3 Konceptné riešenia

4.3.1 Koncept 1

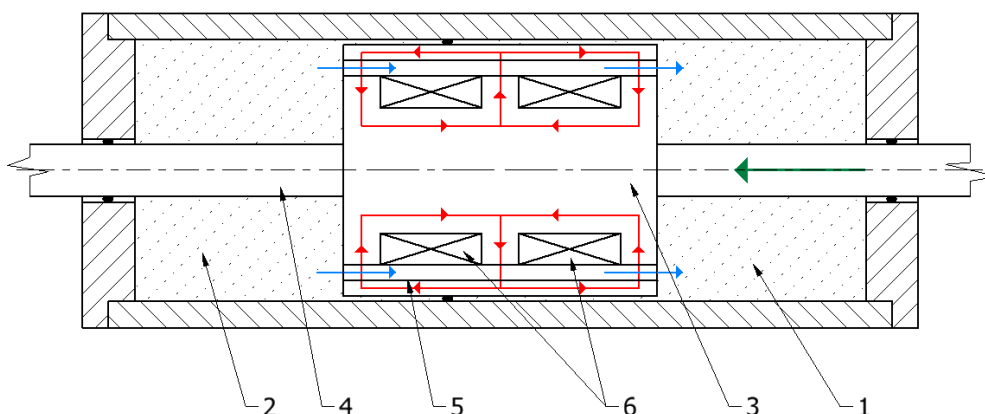


Obr. 2-1 Schéma konceptu 1 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestna tyč, 5 – škrtiaca drážka, 6 – cievka.

Na obrázku 4-1 je znázornená schéma konceptu 1 MR tlmiča pre brzdenie záklzu. Jedná sa o jednoduchý jednoplášťový magnetoreologický tlmič s piestnou tyčou vychádzajúcou na obidvoch stranách (4). Pri pracovnom zdvihu (na obrázku 4-1 znázornený zelenou šípkou) je MR kvapalina vytláčaná z kompresnej komory (2), prechádza prstencovou drážkou (5) (na obrázku 4-1 je tok kvapaliny drážkou znázornený modrou farbou) do odskokovej komory. Počas prechodu drážkou je MR kvapalina magnetizovaná magnetickým poľom (na obrázku 4-1 znázornené červenou farbou) v dvoch aktivačných zónach na začiatku a na konci drážky. Vznik tohoto poľa je zabezpečený prechodom elektrického prúdu cievkou (6). Konštrukcia tlmiča je veľmi jednoduchá. Vďaka použitiu piestnice, ktorá prechádza celým tlmičom nie je potrebný žiaden mechanizmus na kompenzáciu objemu vnikajúcej piestnej tyče.

Nevýhodou tohoto konceptu je veľký zástavbový priestor spôsobený práve obojstrannou piestnicou. Ďalším problémom je potrebná dĺžka magnetického pólu na dostatočnú aktiváciu MR kvapaliny. Aby bola zabezpečená dostatočná brzdiaca sila musí byť dodržaná určitá veľkosť drážky. Pri vysokorýchlostnej aplikácii, ako je práve brzdenie spätného rázu môže rýchlosť v drážke dosahovať desiatky, až sto metrov za sekundu. Pri takej rýchlosti je potrebný dostatočne dlhý magnetický pól na aktiváciu MR kvapaliny.

4.3.2 Koncept 2

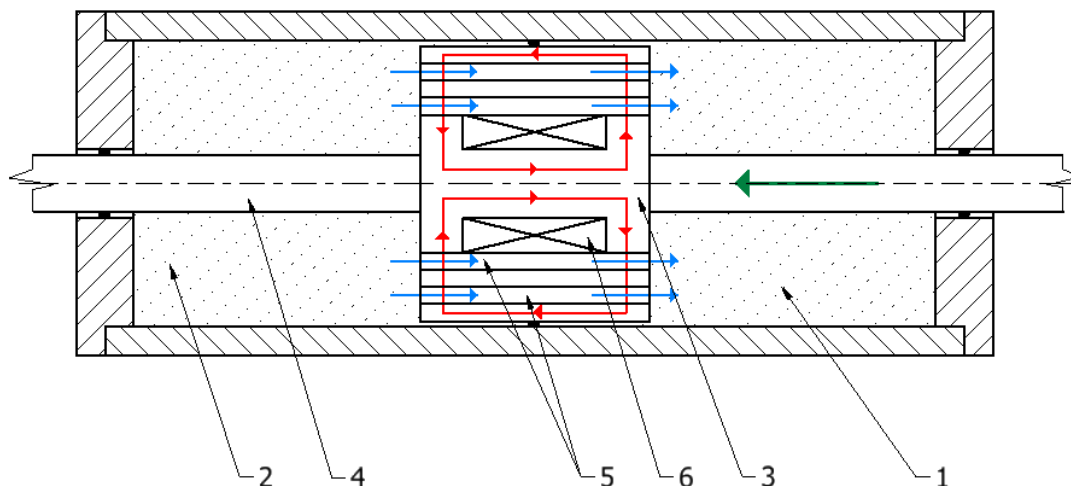


Obr. 4-2 Schéma konceptu 2 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestnica, 5 – škrtiaci drážka, 6 – cievky.

Na obrázku 4-2 je zobrazená schéma konceptu 2 MR tlmiča. Jej konštrukcia je podobná koncepcii 1, avšak využíva piest s dvomi, prípadne viacerými cievkami. Vďaka tomu má drážka piestu viac aktivačných zón. Zároveň dochádza vo vnútorných aktivačných zónach k zosilneniu magnetického poľa tým, že vzájomne susediace cievky majú opačne orientované magnetické póly. V aktivačnej zóne sa tak ich magnetické polia sčítajú. Vďaka tomu pre aktiváciu MR kvapaliny potrebujú menej vinutí cievky či menší prúd prechádzajúci cievkami.

Nevýhodou tohoto konceptu je väčšia dĺžka piestu oproti konceptu 1, pretože viac stupňov cievok potrebuje väčší zástavbový priestor. Tým sa zvyšuje aj celkový zástavbový priestor tlmiča. Keďže sa jedná o MR tlmič s priechodziou piestnicou, tak si so sebou nesie všetky výhody a nevýhody tejto konštrukcie, ktoré sú spomenuté práve pri koncepte 1.

4.3.3 Koncept 3

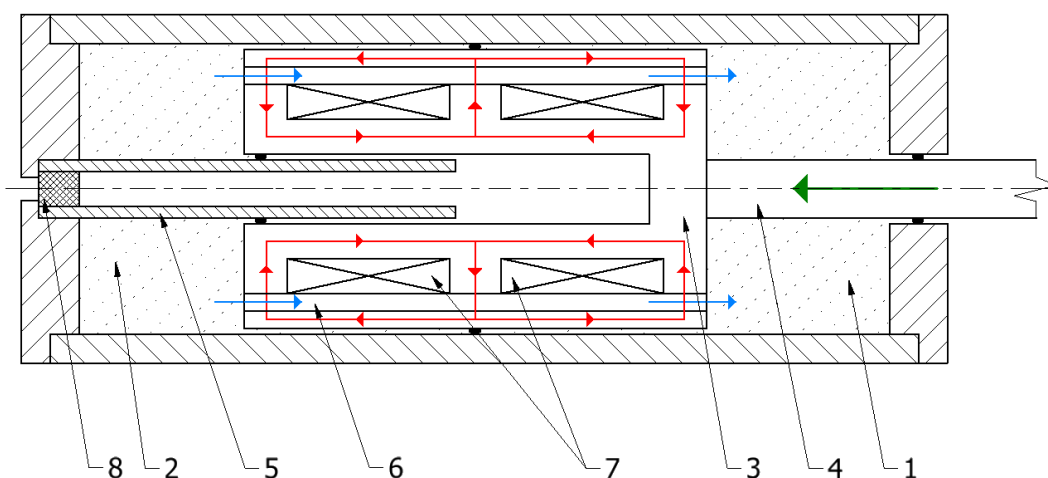


Obr. 4-3 Schéma konceptu 3 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestnica, 5 – škrtiace drážky, 6 – cievka.

Na obrázku 4-3 je znázornená schéma konceptu 3 MR tlmiča. Jedná sa o tlmič s priechodziu piestnou tyčou a paralelnými škrtiacimi drážkami (5). Jeho funkcia je podobná ako pri koncepte 1 a 2, rozdiel je však v prúde MR kvapaliny paralelnými drážkami. Tým je zabezpečená nižšia rýchlosť toku kvapaliny cez drážky než u tlmičov vybavených len jednou drážkou. Zvýši sa tým čas prechodu MR kvapaliny aktivačnou zónou a teda pól, potrebný k magnetizácii kvapaliny je kratší. Dĺžka piestu tohoto konceptu je teda výrazne menšia ako u variant s jednou drážkou pričom s počtom paralelných drážok klesá dĺžka piestu.

Nevýhodou tohoto typu je náročnejšia konštrukcia vzhľadom k počtu drážok. Zároveň je na vyvolanie potrebnej intenzity magnetického poľa potrebný vyšší prúd, pretože magnetický obvod prechádza viac drážkami s MR kvapalinou, ktorej permeabilita kladie tomuto poľu odpor.

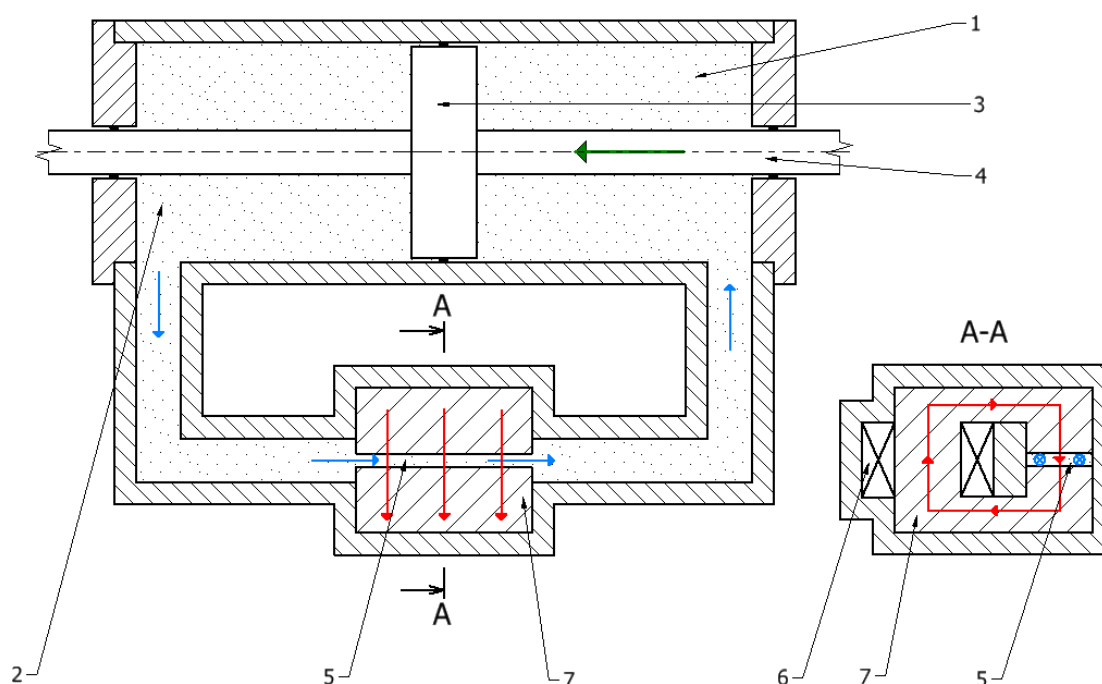
4.3.4 Koncept 4



Obr. 4-4 Schéma konceptu 4 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestnica, pevne spojená s piestom, 5 – dutá piestnica, pevne spojená s vekom valca, 6 – škrtiaca drážka, 7 – cievky, 8 – vzduchový filter.

Koncept 4, ktorého schéma je zobrazená na obrázku 4-4 je variantom MR tlmiča s piestnicou na obe strany. Na rozdiel od konvenčného obojstranného tlmiča však má piestne tyče dve, jedna, pevne spojená s piestom (4) vystupuje z tlmiča. Druhá je pevne spojená vekom valca a pri pohybe piestu vniká do dutiny v pieste (5). Vďaka tomu tlmič nepotrebuje žiaden kompenzačný mechanizmus a zároveň zaberá menší priestor, než ekvivalentný obojstranný tlmič. Piestna tyč, ktorá vniká do piestu musí byť dutá, a na konci tlmiča musí byť otvor, aby bolo vzduchu umožnené uniknúť pri pracovnom pohybe. U takéhoto riešenia je možnosť využitia senzoru polohy zdvihu, prípadne môže byť v otvore inštalovaný respirátor, teda zariadenie škrtiace prúdenie vzduchu, ktoré môže brzdiť vratný pohyb piestu, prípadne slúžiť ako buffer, aby nedošlo k veľkému rázu pri dosednutí dela do prednej polohy. Nutnosťou je tu použitie vzduchového filtra, aby neboli do dutiny piestnice nasávané nečistoty zo vzduchu, ktoré by sa mohli v dutine piestu usádzať. Dutina v piestnici aj v pieste bude navyše vystavená vzduchu z okolitého prostredia, takže si bude vyžadovať náležitú povrchovú úpravu, aby nedochádzalo ku korózii. Nevýhodou tohoto konceptu je, že je možné použiť iba v tom prípade, že je pracovný zdvih menší, než je dĺžka piestu. Jeho využitie je teda vhodné iba v prípade, že dĺžku pólu už nemožno žiadnym spôsobom zmenšiť natoľko, aby bol použitý bežný tlmič s obojstrannou piestnou tyčou.

4.3.5 Koncept 5



Obr. 4-5 Schéma konceptu 5 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestna tyč, 5 – škrtiaca drážka, 6 – cievka, 7 – jadro cievky.

Koncept 5 je MR tlmič s bypassom, jeho schéma je na obrázku 4-5. Piest (3) tohoto tlmiča je jednoduchej konštrukcie, neobsahuje žiadne drážky ani cievky, piestna tyč (4) je ako v predošlých konceptoch obojstranná. Pri pracovnom zdvihu piest kvapalinu vytlačá z kompresnej komory (2) vedením mimo valec tlmiča do samostatného magnetického pólu. Tam prechádza drážkou (5), ktorej vrchnú a spodnú časť tvoria plochy jadra cievky (7). Drážka a rozdiel od predošlých konceptov nie je radiálna, ale je plochá. V tejto drážke dochádza k magnetizácii MR kvapaliny. Po výtoku z pólu sa kvapalina vracia vedením späť do valca tlmiča, do odskokovej komory (2). Výhodou tohoto konceptu je menšia dĺžka tlmiča oproti konceptom, ktoré majú drážky a cievky zabudované v pieste. Piest tohoto riešenia je veľmi jednoduchý a krátky. Ďalšou výhodou je možné využitie viacerých pólov, ktoré možno vedľa seba umiestniť na obe strany drážky tak, aby sa jednotlivé póly dotýkali a vytvárali tak jeden dlhý pól. Týmto spôsobom sa dá do značnej miery eliminovať problém s magnetizáciou MR kvapaliny pri vysokých rýchlostiach. Nevýhodou tohoto konceptu je nutná prítomnosť valca aj externého pólu. Samotný pól obsahuje feromagnetické jadro cievky, ktoré musí byť dostatočne veľké, aby zabezpečilo správnu funkciu magnetického obvodu. Vďaka tomu je hmotnosť takéhoto MR tlmiča výrazne vyššia, než tlmiča takého, ktorý magnetizuje MR kvapalinu vo svojom pieste.

4.4 Zhodnotenie konceptov

Z hľadiska jednoduchosti je najvhodnejším riešením koncept 1. Obsahuje iba jednu cievku, jednu škrtiacu drážku. Je ho problémom je však potreba dostatočne dlhého pólu na dostatočnú magnetizáciu MR kvapaliny. V prípade príliš dlhého pólu môže dochádzať k veľkému magnetickému rozptylu, vďaka čomu môže dôjsť na vzdialených koncoch piestu k výraznému poklesu intenzity magnetického poľa.

Tento problém rieši koncept 2, ktorý má za sebou radené cievky v tzv. stupňoch. Tým je možné po dĺžke kanáliku v pieste umiestniť viac aktívnych zón, kde sa kvapalina magnetizuje a reťazí. Vhodnou orientáciou pólov jednotlivých cievok je navyše možné dosiahnuť súčtu intenzít magnetického poľa od jednotlivých cievok v jednotlivých zónach, takže na dosiahnutie danej intenzity poľa bude potrebná menšia veľkosť prúdu, pretekajúceho cievkami. Nevýhodou tohoto konceptu je nutná dĺžka piestu, o ktorú je tlmič predĺžený voči konceptu 1. Toto predĺženie je potrebné práve z dôvodu použitia viac cievok, ktoré potrebujú väčší zástavbový priestor.

Koncept 3 ponúka možnosť, ako efektívne znížiť dĺžku piestu a teda aj celý zástavbový priestor tlmiča. Jeho piest obsahuje viac paralelných drážok, narozdiel od ostatných konceptov vybavených jednou drážkou. Tým je zabezpečené pomalšie prúdenie MR kvapaliny cez škrtiace otvory. Vďaka tomu sa zvyšuje čas, ktorý daný objem kvapaliny strávi v magnetickom poli a zároveň sa znižuje reakčný čas MR kvapaliny na magnetické pole, ktorý je závislý od Binghamovho čísla. V prílohe 2 je vykonané porovnanie varianty tlmiča s jednou drážkou s variantou, ktorá má drážok viac. V prípade, ak uvažujeme, že drážky v pieste s viacerými kanálikmi sú rovnako veľké a samotný piest má zhodné rozmery s jednodrážkovou variantou, tak je veľkosť pasívnej viskózne sily v oboch prípadoch rovnaká. Porovnané boli aj veľkosti síl od miestnych strát (Príloha 2). Sily od strát sú u viacdrážkovej varianty nižšie, než u jednodrážkovej varianty, pričom sú nepriamo úmerné počtu drážok. U aktívnej sily bol porovnaný reakčný čas jednodrážkovej a viac drážkovej varianty. So zvyšujúcim sa Binghamovým číslom sa pomer v prospech viacdrážkovej varianty zvyšoval, pričom sa asymptoticky blížil k hodnote počtu drážok v pieste. Treba podotknúť, že sa jedná o výpočet približný, pretože nie je možné zabezpečiť rovnakú plochu paralelných drážok, rovnakú rýchlosť drážkami a rovnakú výšku drážky, pretože sa jedná o drážky koncentrické. Reálne je nutné nájsť kompromis medzi týmito parametrami, čo je však možné až v prípade znalosti rozmerov tlmiča. Preto bol v rámci zjednodušenia porovnávací výpočet vykonaný pre drážky s rovnakou veľkosťou, aj keď tú je nemožné doceliť, no možno sa k nej blížiť.

Koncept 4 sa nezaobrá vhodným tvarom drážky, ale zaoberá sa umiestnením piestnej tyče. V prípade, ak je dĺžka piestu kvôli potrebnej dĺžke magnetického pólu väčšia, ako je pracovný zdvih, je vhodné použiť práve koncept 4. Tým, že na jednej strane piestnica vniká do piestu, namiesto toho, aby vychádzala z valca zabezpečuje kompenzáciu vnikajúcej

piestnice rovnako, ako u bežného tlmiča s priechodnou piestnicou, pričom zaberá priestor, ako ekvivalentný jednostranný tlmič. Nevýhodou tohoto riešenia je práve jeho použiteľnosť iba v tomto prípade, ďalej nutnosť špeciálne opracovať dutinu piestnice a piestu, kde vďaka kontaktu s okolitým vzduchom môže dochádzať ku korózii.

Koncept 5 je odlišný od predchádzajúcich konceptov v tom, že k magnetizácii kvapaliny dochádza mimo valec tlmiča. Vďaka tomu je konštrukcia piestu veľmi jednoduchá a samotná dĺžka zástavbového priestoru je oproti predošlým konceptom nižšia. Ďalšou výhodou je, že je MR kvapalina magnetizovaná po celej dĺžke drážky. Tým je u tohoto konceptu možný väčší dynamický rozsah než u konceptoch s drážkou v pieste, pretože kvôli nutnosti zabudovania cievok do piestu je pomer dĺžky pólov k celej dĺžke drážky malý. Nevýhodou tohoto riešenia je zvýšená hmotnosť, pretože okrem valca s piestom obsahuje aj externú jednotku, v ktorej sa nachádza pól, z ktorého má najväčšiu hmotnosť rozmerné jadro cievky. Napriek svojej malej dĺžke je tento variant náročný na zástavbový priestor vzhľadom k svojej výške a šírke.

Napriek svojej vyššej zložitosti sa ako vhodný kandidát na konštrukciu MR tlmiča na tlmenie spätného rázu diel pri vysokých rýchlostiach javí koncept 3. Vďaka použitiu viac paralelných drážok zabezpečuje pomalšie prúdenie kvapaliny než jednodrážkové varianty, vďaka čomu je jednoduchšie tento tlmič elektronicky regulovať. S ohľadom na počet aktívnych miest, kde MR kvapalina prechádza magnetickým pólom, sa javí ako vhodný variant aj koncept 2 s viac cievkami za sebou. Avšak nevýhodou týchto konceptov je nevýhodný pomer dĺžky pólov k dĺžke celej drážky, vďaka čomu majú malý dynamický rozsah. V tomto ohľade je najvýhodnejší koncept 5, pri ktorom možno využiť prvky z konceptov 2 a 3, teda viac paralelných drážok s viacerými pólmi. Tieto póly možno k sebe priradiť natesno, čím sa vytvorí jeden dlhý pól.

5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

Výsledným typom tlmiča, ktorý je konštrukčným riešením tohoto problému je teda tlmič s bypassom, ktorý obsahuje paralelné drážky. V tomto prípade bude súčasťou brzdo vratného mechanizmu samohybnnej húfnice M109A1 Paladin. Jedná sa o húfnicu kalibru 155 mm s nezávislým brzdo vratným mechanizmom typu Filloux s jedným plynovým rekuperátorom a dvoma identickými tlmičmi spätného rázu umiestnenými diagonálne okolo hlavne [2]. Valce tlmičov sú pevne spojené s lafetou dela a piesty spolu s hlavňou konajú záklz. Tento brzdo vratný systém je schopný fungovať v dvoch režimoch pre krátky záklz a dlhý záklz, teda je vybavený variabilným záklzom [2].

5.1 Vstupné parametre

5.1.1 Konštrukčné prvky

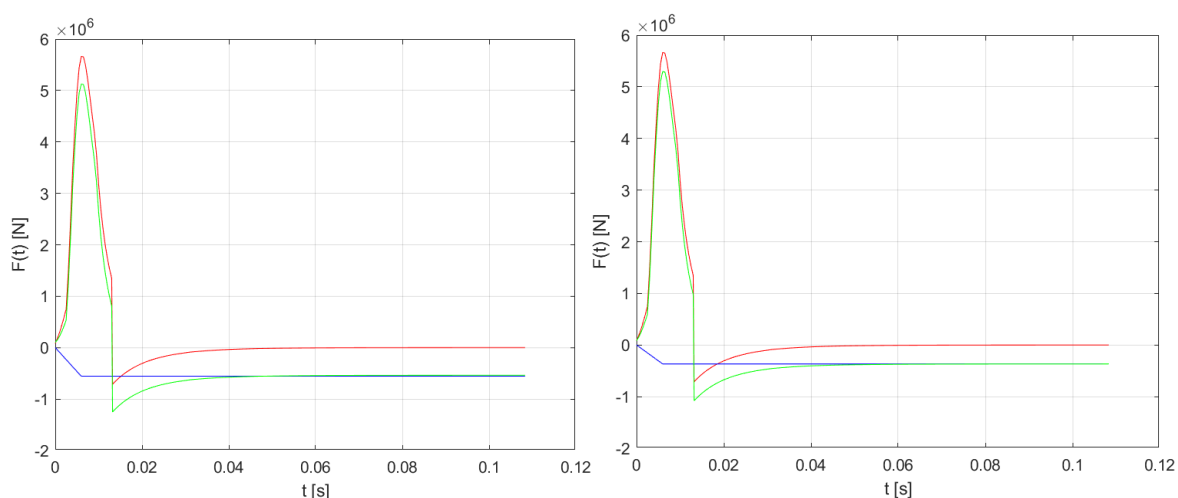
Rozmery a ďalšie vstupné údaje tlmiča spätného rázu, prevzaté z handbooku Recoil Systems [2]:

- Maximálny vnútorný priemer valca: $D_{vmax} = 139,07$ mm.
- Minimálny priemer piestnej tyče: $D_{ptmin} = 76,124$ mm.
- Maximálna dĺžka dlhého záklzu: $L_D = 914,4$ mm.
- Uhol námeru pri použití dlhého záklzu: $\theta = -3^\circ$ až 51° .
- Maximálna dĺžka krátkeho záklzu: $L_K = 660,4$ mm.
- Uhol námeru pre krátky záklz: $\theta = 51^\circ$ až 75° .
- Minimálna hrúbka steny valca: $a_{min} = 13,043$ mm.

Dĺžka valca tlmiča nie je špecifikovaná, vzhľadom k tomu že tlmič je sčasti vysunutý z veže húfnice. Je teda možné použiť aj tlmič s väčšou dĺžkou, než je pôvodne konštruovaný pre túto húfnicu, avšak vyžaduje si to ďalšie konštrukčné úpravy kolísky a hlavne dela.

5.1.2 Priebehy síl a rýchlostí

V roku 1975 bol pri skúšobných streľbách vo Fort McCoy nameraný priebeh sily spätného rázu $B(t)$ pri streľbe z húfnice M109A1 pri použití výmetných náloží XM123 a projektílou M101 kalibru 155 mm [2]. Ďalej je v handbooku Recoil Systems uvedená hodnota maximálnej ekvivalentnej konštantnej sily tlmiča pre krátky záklz $K_{Ok} = 555,108$ kN a pre dlhý záklz $K_{Od} = 367,547$ kN. Hodnoty sily $B(t)$ boli zapísané do MATLAB-ovského skriptu, ktorý je uvedený v Prílohe 3. Následne bol vykreslený priebeh celkovej sily pôsobiacej na zaklzájúcu sústavu. Na obrázku 5-1 je znázornená sila $B(t)$, sila brzdovratného systému a ich súčet pre krátky záklz (vľavo) a pre dlhý záklz (vpravo).



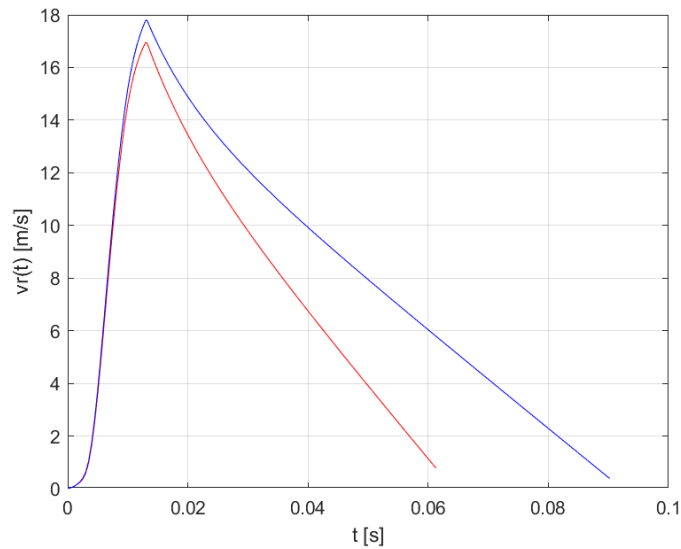
Obr. 3-1 Časový priebeh sily spätného rázu (červená), sily brzdovratného zariadenia (modrá) a ich súčtu (zelená) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).

Priebeh sily $B(t)$ sa od bežných priebehov síl spätného rázu líši prudkým prepadom v čase 0,0125 s, kedy sila zmení smer a pôsobí proti pohybu. Dôvod tohoto poklesu je ten, že v nameranej sile $B(t)$ je zahrnutý vplyv úst'ovej brzdy, ktorou je húfnica M109A1 vybavená.

Podielom síl $F_k(t)$ a $F_d(t)$ pôsobiacich na zaklzájúcu sústavu jej hmotnosťou $m_r = 1977,91$ kg [2] boli získané hodnoty priebehu zrýchlenia sústavy $a_{rd}(t)$ pre dlhý záklz a $a_{rk}(t)$ pre krátky záklz. Numerickou integráciou pomocou obdĺžnikovej metódy boli získané priebehy hodnôt rýchlostí krátkeho a dlhého záklzu. Okamžitá hodnota rýchlosti $v_{r,i}$ je vyjadrená ako:

$$v_{r,i} = \frac{a_{r,i} - a_{r,i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) + v_{r,i-1},$$

kde $a_{r,i}$ je hodnota zrýchlenia v čase t_i , $a_{r,i-1}$ je hodnota zrýchlenia v čase t_{i-1} a $v_{r,i-1}$ je okamžitá rýchlosť v čase t_{i-1} . Priebeh okamžitej rýchlosti v čase t je znázornená na obrázku 5-2, kde rýchlosť krátkeho záklzu je znázornená červenou farbou a rýchlosť dlhého záklzu je znázornená modrou farbou.



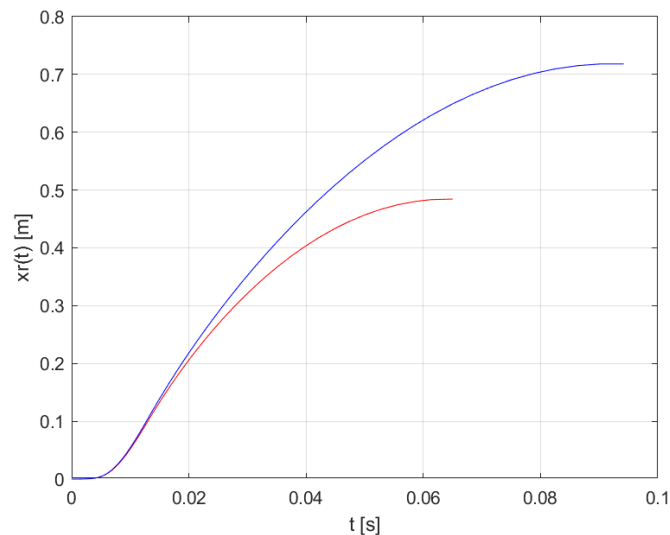
Obr. 5-2 Závislosť rýchlosti záklzu $v_r(t)$ krátkeho záklzu (červená) a dlhého záklzu (modrá) na čase záklzu.

Maximálnou rýchlosťou, ktorú dosahuje záklz dela pri krátkom záklze je 16,96 m/s a pri dlhom záklze je maximálna rýchlosť 17,80 m/s.

Ďalšou integráciou obdĺžnikovou metódou boli získané polohy dela $x_r(t)$ počas konania pohybu vzad. Okamžitá poloha $x_{r,i}$ v čase t_i je daná ako:

$$x_{r,i} = \frac{v_{r,i} - v_{r,i-1}}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) + x_{r,i-1}.$$

Priebeh dráhy záklzu $x_r(t)$ je zobrazený na obrázku 5-3, kde červenou farbou je zaznačená dráha krátkeho záklzu $x_{rk}(t)$ a modrou farbou je zobrazená dráha dlhého záklzu $x_{rd}(t)$.



Obr. 5-3 Časový priebeh dráhy krátkeho záklzu $x_{rk}(t)$ (červená) a dráhy dlhého záklzu $x_{rd}(t)$ (modrá).

Celková dráha krátkeho záklzu tak dosahuje hodnotu 0,484 m a pre dlhý záklz dosahuje 0,718 m.

5.1.3 Sila pneumatickeho rekuperatora

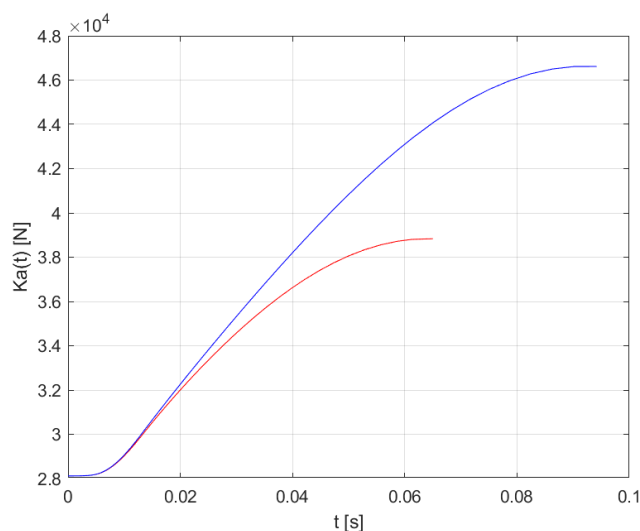
Brzdovratny mechanizmus samohybného dela M109A1 je vybavený jedným pneumatickým rekuperátorom. Jeho vplyv je nutné započítať do celkovej sily brzdovratného zariadenia. Z handbooku Recoil Systems [2] sú prevzaté následné údaje o rekuperátore:

- Vnútorňy priemer valca: $D_r = 98,425$ mm.
- Priemer piestnej tyče $D_{pr} = 41,224$ mm.
- Plocha čela piestu: $A_r = 6,2738 \cdot 10^{-3}$ m².
- Tlak, na ktorý je dusík vo valci natlakovaný: $p_0 = 4,482$ MPa.
- Polytropický exponent: $n = 1,6$.
- Objem rekuperátora v nestlačenom stave: $V_0 = 1,6633 \cdot 10^{-5}$ m³.

Sila rekuperátora v akomkoľvek bode dráhy záklzu sa určí pomocou vzťahu:

$$K_{ai} = A_r \cdot p_0 \cdot \left(\frac{V_0}{V_0 - A_r \cdot x_r} \right)^n$$

Dosadením za x_r hodnoty polohy pre krátky a dlhý záklz bol získaný časový priebeh sily rekuperátora pre obidva režimy záklzu. Priebehy sú znázornené na obrázku 5-4.



Obr. 5-4 Časový priebeh sily rekuperátora pre krátky záklz (červená) a dlhý záklz (modrá).

5.1.4 Sila tlmiča

Potrebná sila, ktorú musí tlmič vyvinúť je určená rozdielom, kde sa od konštantnej ideálnej sily K_0 odčítajú jednotlivé zložky od komponentov brzdovratného mechanizmu. Sila tlmiča F_0 je tak určená ako:

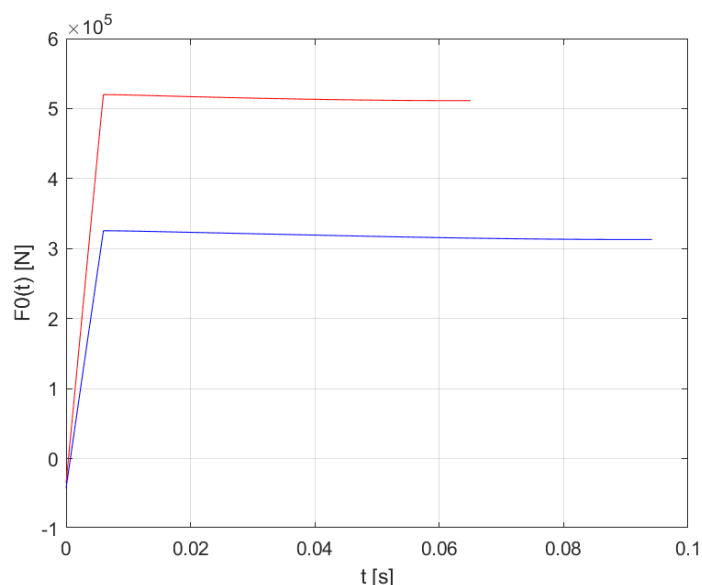
$$F_0 = K_0 - K_a - K_f - f_p.$$

Trecia sila od tesnení f_p sa dá zistiť jedine praktickou skúškou, takže je pri návrhu zanedbaná. Trecia sila v uložení dela k_f je známa a jej veľkosť je určená vzťahom [2]:

$$K_f = (13809,4 - 8096,5 \cdot x_r) \cdot \cos(\theta),$$

kde θ je uhol námeru. Pre dlhý záklz je uhol námeru $\theta_d = 0^\circ$, pre krátky záklz uhol námeru zvolený $\theta_k = 60^\circ$. Tieto uhly boli zvolené s ohľadom na to, že práve s takýmto námerom boli vykonané skúšobné streľby.

Výsledkom rozdielu jednotlivých zložiek brzdiacej sily od celkovej ideálnej je časový priebeh ideálnej sily tlmiča F_{0k} pre krátky záklz a F_{0d} pre dlhý záklz zobrazený na obrázku 5-5. Maximálna hodnota F_{0k} je 519,970 kN, F_{0d} dosahuje najviac 325,530 kN.



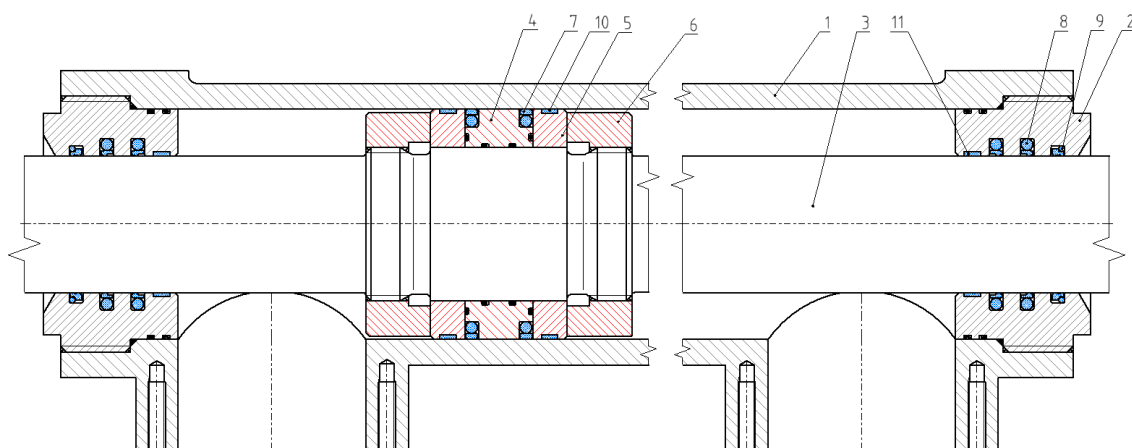
Obr. 5-5 Časový priebeh ideálnej sily tlmiča spätného rázu pri krátkom záklze (červená) a dlhom záklze (modrá).

5.2 Konštrukcia valca s piestom

Zvolený variant MR tlmiča pre konštrukciu je tlmič s bypassom, teda k magnetizácii dochádza mimo priestor valca tlmiča. Samotný valec aj piest sú teda jednoduchej konštrukcie. Na obrázku 5-6 je znázornený schematický rez valcom MR tlmiča s piestom. Jedná sa o tlmič s prechádzajúcou piestnicou, takže nepotrebuje kompenzovať objem vnikajúcej piestnej tyče. Sústava valca s piestom je zložená z týchto komponentov:

- Plášť (1) – jedná sa o dutý valec s dĺžkou 1430 mm, na obidvoch koncoch rozšírený na pripájací rozmer $\varnothing 180$ h8. Na vnútornej strane sa na obidvoch koncoch nachádzajú závit M150x3, do ktorých sa zašróbujú veká tlmiča. Vnútorň rozmer

plášťa je $\varnothing 135$ H9, tolerančné pole je dané katalógom Hydraulic Seals – Linear od spoločnosti Trelleborg [17]. Vo vzdialenosti 69 mm od koncov sú kolmo na os plášťa umiestnené otvory $\varnothing 110$ H9/d9 [18]. Tolerančné pole tohto uloženia je vhodné práve pre tesnenia, tesniace veká, atď. [18]. Tieto otvory slúžia na pripojenie hydraulického vedenia, cez ktoré prúdi pri pohybe piestu MR kvapalina von z kompresnej komory a dnu do odskokovej komory. Na pripojenie vedenia slúži 10 závitových M10 na každý pripájací otvor. Valec je zostrojený z konštrukčnej ocele S335J2.

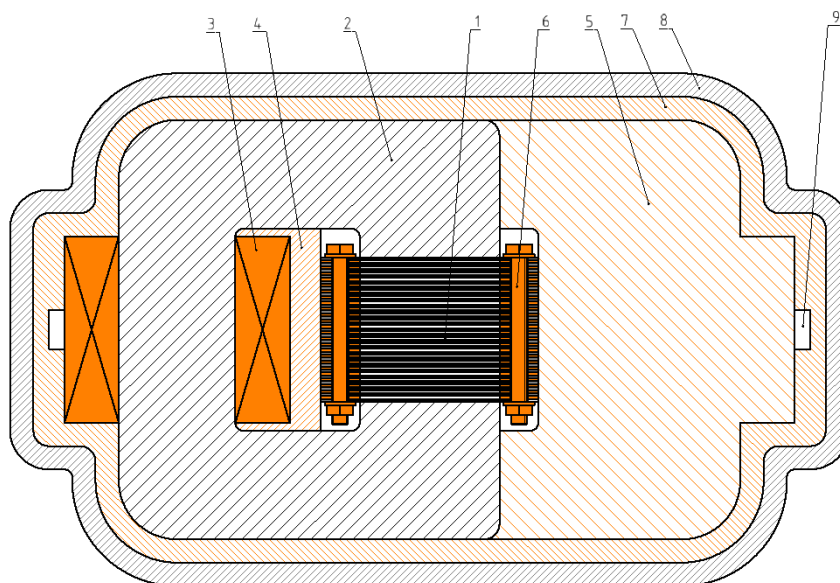


Obr. 5-6 Schematický rez valcom MR tlmiča. 1 – plášť tlmiča (valec), 2 – veko tlmiča, 3 – piestna tyč, 4 - stredný diel piestu, 5 – okrajový diel (čelo) piestu, 6 – prítlačná matica, 7 – piestové tesnenie, 8 – piestnicové tesnenie, 9 – stieracie tesnenie, 10 – vodiaci krúžok piestu, 11 – vodiaci krúžok piestnej tyče.

- Veko (2) – tlmič je na obidvoch koncoch uzavretý pomocou dvoch viek, cez ktoré prechádza piestnica. Otvor pre piestnicu má rozmer $\varnothing 80$ H9/f8, uloženie je zas dané katalógom Hydraulic Seals – Linear od spoločnosti Trelleborg [17]. Vo vnútri veka sa nachádzajú vyfrézované drážky pre piestnicové tesnenia, vodiaci krúžok a stieracie tesnenie. Na vonkajšom obvode má veko strediaci priemer $\varnothing 135$ H9/d9 [18] a závit M150x3. Ďalej sú na vonkajšom obvode vyfrézované dve drážky pre tesniace O – krúžky. Veko je vyrobené z ocele S355J2.
- Piestna tyč (3) – dĺžka piestnej tyče nie je presne určená, pretože nie sú známe jej pripájacie rozmery ku kolíske dela. Jej priemer je $\varnothing 80$ H9/f8, teda väčší ako je minimálny potrebný podľa Recoil Systems [2]. V strede piestnice sa nachádza rozšírený priemer $\varnothing 90$ H8/h7 [18]. Na tomto povrchu sú navlečené súčasti tvoriace teleso piestu. Na oboch stranách tejto plochy sú závit M90x2, na ktorých sú umiestnené prítlačné matice, prítlačajúce súčasti piestu k sebe. Piestnica je tiež vyrobená z S355J2.

- Vnútorý diel piestu (4) – tvorí strednú časť piestu, sú v ňom obrobené drážky pre piestové tesnenia a O – krúžky, ktoré zabráňujú prietoku MR kvapaliny medzi piestnicou a piestom a medzi čelom vnútorného dielu piestu a čela piestu. Vonkajší polomer je $\varnothing 135$ H9/f8, uloženie je dané katalógom Hydraulic Seals – Linear [17]. Súčasť je vyrobená z konštrukčnej ocele S355J2.
- Okrajový diel (čelo) piestu (5) – tieto diely sú z oboch strán pritlačené maticami (6) na vnútorný diel (5). Dôvod delenej konštrukcie piestu je jednoduchá montáž piestových tesnení. Na vonkajšom priemeru je obrobená drážka pre vodiaci krúžok. Materiál tejto súčasti je konštrukčná oceľ S355J2.
- Prítlačná matica (6) – matice sú namontované z oboch strán piestu na závitoch M90x2 na piestnici, ich úlohou je pritláčať k sebe jednotlivé súčasti piestu. Matica je vyrobená z konštrukčnej ocele S355J2.
- Piestové tesnenie Turcon Glydring (7) – jedná sa o teflónové piestové tesnenie zospodu podopreté O – krúžkom vyrábané firmou Trelleborg [17]. Je konštruované pre vysoké rýchlosti lineárneho pohybu, pretlak až 60 MPa a prevádzkové teploty -45 °C až 200 °C [17]. Pre vonkajší priemer piestu $\varnothing 135$ je volené tesnenie PG4401350 [17]. Tesnenia sú použité dve pre zvýšenie spoľahlivosti tesnenia.
- Piestnicové tesnenie Turcon Stepseal 2K (8) – toto tesnenie utesňuje vôľu medzi piestnicou a otvorom vo veku. Tesnenie je tvorené teflónovým krúžkom, ktoré sa na vonkajšom priemere opiera o O – krúžok. Výrobcom je firma Trelleborg [17]. Toto tesnenie je tiež konštruované pre vysoké rýchlosti, tlaky 60 MPa a teploty -45 °C až 200 °C [17]. Pre priemer piestnice $\varnothing 80$ je volené tesnenie RSK400800 [17]. Použité sú na každej strane tlmiča dve tesnenia.
- Stieracie tesnenie Turcon Excluder 5 (9) – úlohou tohto tesnenia je stieranie nečistôt z povrchu piestnej tyče a zabrániť ich vniknutiu do priestoru tlmiča. Kvôli použitiu pri vysokých rýchlostiach je tiež vyrobené z teflónu, jeho výrobcom je Trelleborg [17]. Takisto ako predošlé tesnenia môže pracovať za teplôt od -45 do 200 °C [17]. Pre priemer piestnice $\varnothing 80$ je z katalógu zvolené tesnenie WE5200800 [17].
- Vodiace krúžky Turcite Slydring (10, 11) – pre zabezpečenie správnej funkcie piestu a k zníženiu opotrebenia plášťa a piestu, resp. piestnice a veka oterom musí byť piest aj veko vybavené vodiacim krúžkom. Pre vysoké rýchlosti boli zvolené teflónové krúžky Turcite Slydring od firmy Trelleborg [17]. Pre piest boli zvolené krúžky GP6901350 a pre piestnicu GR6900800 [17].
- Gumené O-krúžky Rubena – na zabránenie úniku MR kvapaliny z tlmiča po vonkajšom povrchu veka sú použité na každú stranu tlmiča tri O – krúžky PN 02 9281.9 Rubena – 130x3 [19]. Na utesnenie piestu a piestnice sú použité dva krúžky PN 02 9281.9 Rubena 90x3 [19] a PN 02 9281.9 110x3 [19].

5.3 Konštrukcia magnetického pólu



Obr. 5-7 Schématický priečný rez magnetickým pólom bypassu MR tlmiča. 1 – zväzok lamiel, 2 – jadro cievky, 3 – cievka, 4 – centrálna bronzová vložka, 5 – bronzová prepážka, 6 – mosadzná skrutka s maticou, 7 – bronzové puzdro, 8 – oceľový plášť, 9 – drážka pre elektrické vedenie.

Externý magnetický pól bol navrhnutý na základe vstupných parametrov tak, aby pri teplote MR kvapaliny $T_{MRF} = 40^{\circ}\text{C}$ a pri maximálnej hodnote intenzity magnetického poľa $H = 150 \text{ kA/m}$ bola jeho sila pri najvyššej rýchlosti plne ovládateľná v rozmedzí od F_{0d} do F_{0k} .

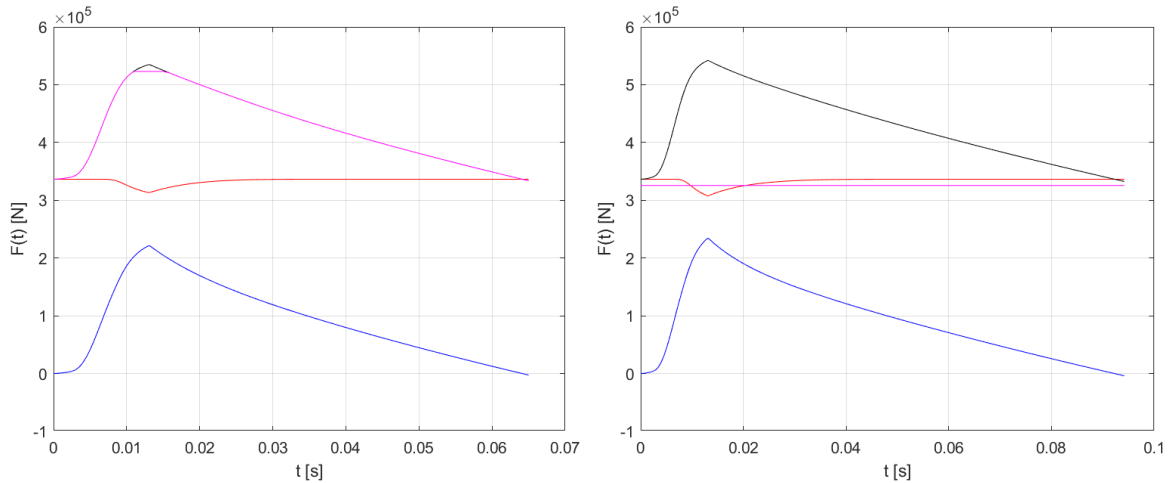
Dĺžka celového pólu L_p bola stanovená na 0,8 m, aby mohlo byť bypass umiestnený pred štít lafety dela. Bypass bude umiestnený vo vertikálnej polohe, teda s drážkami vertikálne na pravej strane hlavne dela. Jeho výška činí 540 mm a šírka je 330 mm. Jeho základnými komponentmi sú:

- Zväzok lamiel (1) – jedná sa o zväzok oceľových lamiel o hrúbke 2 mm, ktoré sú od seba oddelené bronzovými dištančnými doskami s hrúbkou 1,8 mm. Tým sú medzi lamelami vytvorené drážky o výške $h = 1,8 \text{ mm}$, šírke $w = 90 \text{ mm}$ a dĺžke pólu L_p . Na okrajoch lamiel sú vyvrtané diery $\varnothing 11$ pre skrutky ČSN EN ISO 4014 z mosadze. Tieto skrutky sú umiestnené pozdĺž celej dĺžky pólu rozmiestnené v 50 mm rozstupoch, na obidve strany pólu treba 32 kusov. Mosadzné skrutky a príslušné matice stláčajú k sebe lamely a zabraňujú tak úniku MR kvapaliny mimo drážky.

- Jadro cievky (2) – na krajné lamely zväzku (1) dosadajú vnútorné plochy jadra cievky. Jadro zabezpečuje uzavretý magnetický obvod. Na telese jadra ja namotaná cievka s kruhovým prierezom. V mieste cievky má teda jadro kruhový prierez $\varnothing 80$ mm. V mieste pólu je však potrebný obdĺžnikový prierez s rozmermi 90 mm a 80 mm, preto od cievky do miesta pólu dochádza k postupnej zmene prierezu jadra z kruhového na obdĺžnikový. Jadro je vyrobené z konštrukčnej ocele S235JR. Celkový pól s dĺžkou L_p je tvorený desiatimi takýmito čiastkovými pólmi, ktoré sú vedľa seba tesne naskladané prekladaným spôsobom, teda cievky susediacich čiastkových pólův sú vzájomne na opačných stranách lamelového zväzku.
- Cievka (3) – cievka, navinutá na jadre (2) má kruhový prierez jej vnútorný priemer je $\varnothing 80$ mm a vonkajší $\varnothing 150$ mm, jej výška činí 120 mm. Napájanie cievky je zabezpečené elektrickým vedením umiestneným v drážkach bronzového puzdra (9). Cievky sú zapojené paralelne.
- Centrálna bronzová vložka (4) – vložka, vložená dovnútra jadra cievky, oddeľuje cievku a zväzok lamiel, čím zabraňuje rozptylu magnetického poľa v dutine jadra.
- Bronzová prepážka (5) – oddeľuje od seba čiastkové póly s cievkami umiestnenými na jednej strane, zabraňuje magnetickým stratám v priestore medzi nimi. Prepážka je odliata z bronzu, pričom jej čelá tvoria plochy, do ktorých zapadajú boky čiastkových pólův.
- Bronzové puzdro (7) – jedná sa o bronzový plášť s hrúbkou 15 mm, ktorého profil odpovedá tvaru sustavy čiastkových pólův. Tieto póly sú do puzdra vsunuté. Úlohou puzdra je zabrániť prechodu magnetického poľa do vonkajšieho oceľového plášťa.
- Vonkajší oceľový plášť (8) – je to plášť, vyrobený z konštrukčnej ocele S355J2, nasunutý na bronzovom puzdre. Chráni celú sústavu pólův pred vonkajšími vplyvmi.

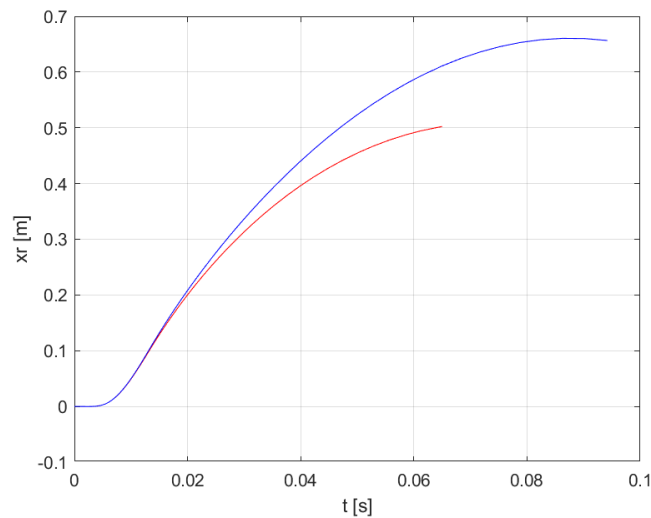
5.4 Vyhodnotenie

Po výbere parametrov bol pomocou modelu chovania MR tlmiča (Príloha 1) vykonané porovnanie neovládateľnej a ovládateľnej sily, ktoré je tlmič schopný vyvinúť s požiadavkami, teda bolo overené, či je schopný vyvinúť priebeh sily porovnateľný so silami F_{ok} a F_{od} . Na obrázku 5-8 je porovnanie pasívnej a aktívnej zložky sily tlmiča, ich súčtu a príslušnej kontrolovanej sile, odpovedajúcej maximálnym hodnotám F_{ok} a F_{od} . ako je vidieť z grafu pre dlhý záklz, tlmič je vďaka svojej regulovateľnosti schopný vyvinúť konštantnú brzdiacu silu počas celého záklzu. V prípade dlhého záklzu to však neplatí a konštantnú silu vyvíja iba v malom časovom úseku, v ostatných kopíruje maximálnu dosiahnuteľnú silu, ktorú reprezentuje čierna krivka. Po vykonaní rovnakého postupu ako pri získaní vstupných údajov, pričom za F_{ok} a F_{od} boli dosadené priebehy z grafov v obrázku 5-8, boli získané dráhy záklzu pre krátky a dlhý záklz.



Obr. 5-8 Porovnanie pasívnej sily (modrá), maximálnej aktívnej sily (červená), ich súčtu (čierna) a regulovanej tlmiacej sily (fialová) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).

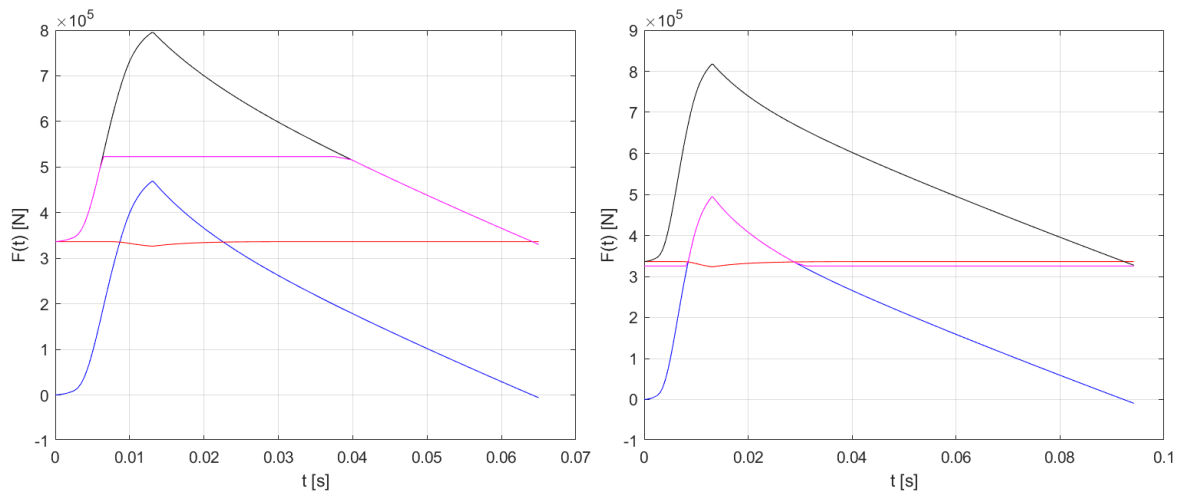
Na obrázku 5-9 je zobrazená časová závislosť dráhy záklzu pre krátky a dlhý záklz.



Obr. 5-9 Časový priebeh dráhy dela pri krátkom záklze (červená) a dlhom zklze (modrá).

Dlhý záklz dosahuje 660,5 mm a krátky záklz dosahuje 510,4 mm. Obidve dĺžky záklzu sú menšie ako zadané hodnoty 660,4 mm pre krátky záklz a 914,4 mm pre dlhý záklz. Tlmič teda pri teplote 40 °C plní svoju funkciu.

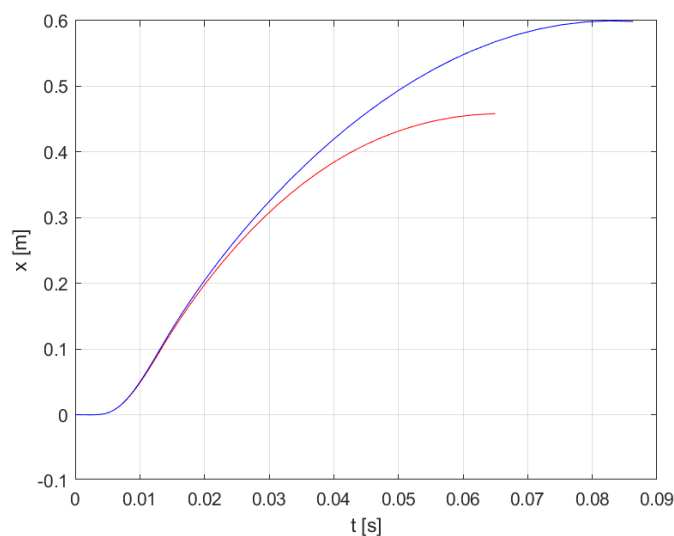
Pri teplote $T_{MRF} = 20$ °C dochádza k výraznému nárastu viskozity, čo sa prejavuje aj na priebehu síl. Na obrázku 5-10 sú porovnané priebehy síl pre krátky a dlhý záklz pri tejto teplote.



Obr. 5-10 Porovnanie pasívnej sily (modrá), maximálnej aktívnej sily (červená), ich súčtu (čierna) a regulovanej tlmiacej sily (fialová) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).

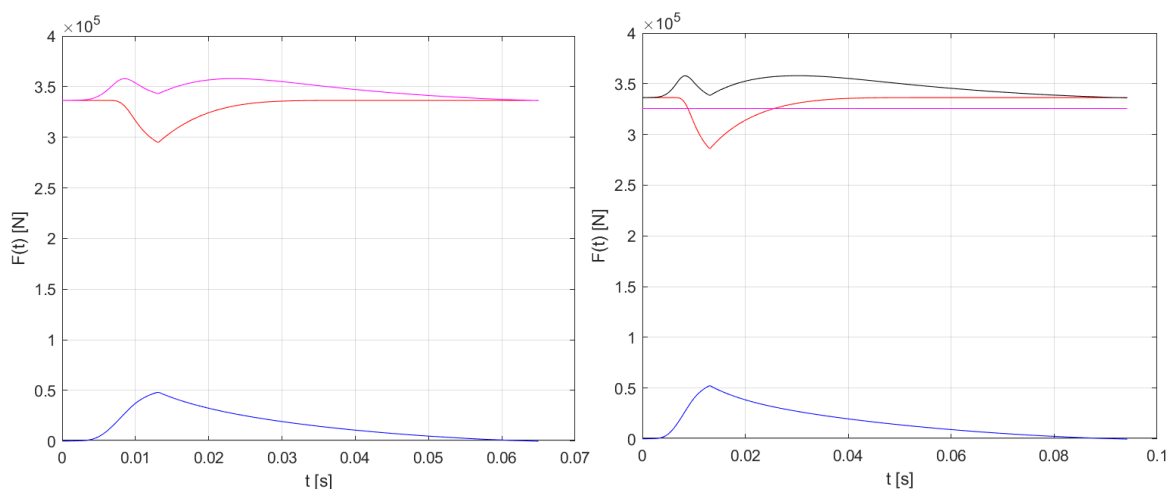
Pasívna zložka sily MR tlmiča sa v prípade dlhého záklzu blíži k maximálnej hodnote dlhého záklzu. Tlakový rozdiel v takej chvíli dosahuje $\Delta p_{max} = \frac{F_{0k}}{A_p} = 55,99 \text{ MPa}$. Piestové a piestnicové tesnenia použité vo valci s piestom sú dimenzované na maximálny tlak 60 MPa [17]. Vďaka exponenciálnemu nárastu viskozity MR kvapaliny s klesajúcou teplotou pri nižších teplotách hrozí, že hodnota tlaku presiahne tlak, ktorý sú použité tesnenia vydržať a môže dôjsť k úniku MR kvapaliny z tlmiča. Preto sa o teplote 20 °C dá hovoriť ako o najnižšej novej prevádzkovej teplote, kedy ešte možno bezpečne prevádzkovať tento MR tlmič.

Na obrázku 5-11 je zobrazený priebeh dlhého a krátko záklzu v čase. Dĺžka je v oboch prípadoch dostatočne nízka.



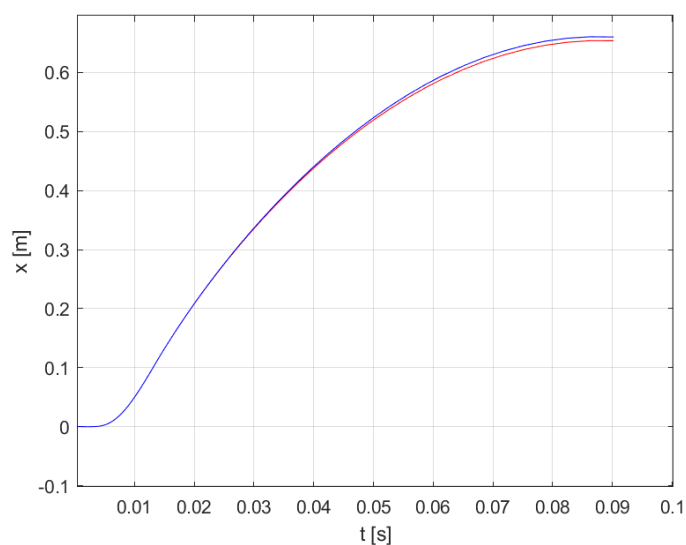
Obr. 5-11 Časový priebeh dráhy dela pri krátkom záklze (červená) a dlhom záklze (modrá).

Blízko maximálnej teploty, pri ktorej je kvapalina schopná pracovať, $T_{MRF} = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$ dochádza k poklesu viskozity, čo sa prejavuje aj na veľkosti brzdiacej sily tlmiča. Na obrázku 5-12 sú sily krátkeho a dlhého záklzu.



Obr. 5-12 Porovnanie pasívnej sily (modrá), maximálnej aktívnej sily (červená), ich súčtu (čierna) a regulovanej tlmiacej sily (fialová) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).

Z priebehov možno usúdiť, že pri takejto vysokej teplote takmer vymizne rozdiel medzi krátkym a dlhým záklzom. V prípade dlhého záklzu možno stále reguláciou dosiahnuť konštantnú brzdiacu silu, pri krátkom záklze, kedy intenzita poľa dosahuje už iba svoju maximálnu hodnotu dostaneme brzdiacu silu o málo väčšiu. Na obrázku 5-13 sú porovnané dráhy záklzu v čase. Sú takmer identické. Dĺžka záklzu je pre obidva režimy takmer rovnaká, pre dlhý záklz je $L_d = 660,5 \text{ mm}$, pre krátky záklz je $L_k = 653,8 \text{ mm}$. MR tlmič teda ešte stále plní svoju funkciu.



Obr. 5-13 Časový priebeh dráhy dela pri krátkom záklze (červená) a dlhom záklze (modrá).

6 DISKUSIA

Cieľom tejto práce bol konštrukčný návrh magnetoreologického tlmiča, pracujúceho pri vysokých piestových rýchlostiach, ktorého úlohou bolo tlmiť vysoké dynamické rázy.

V rešeršnej časti práce boli popísané dynamické deje pri výstrele z dela, rozobrané typy pasívnych brzdovratných zariadení, ich výhody a nedostatky. Ďalej boli určené požiadavky, ktoré musí brzdovratný systém vybavený magnetoreologickým tlmičom spĺňať. Následne boli popísané rôzne typy magnetoreologických tlmičov, ich funkcia a ich prednosti a nedostatky. Veľká pozornosť bola venovaná správaniu magnetoreologickej kvapaliny pri toku drážkou za vysokých rýchlostí. Boli spísané príklady využitia magnetoreologických tlmičov na tlmenie spätného rázu, avšak vo všetkých prípadoch sa jednalo o zbrane malého kalibru. Pomocou modelu paralelných dosiek a nových poznatkov o správaní sa magnetoreologickej kvapaliny pri vysokých rýchlostiach bol vytvorený matematický model popisujúci správanie sa magnetoreologického tlmiča.

Na základe analýzy rešeršnej časti práce boli sformulované požiadavky na magnetoreologický tlmič pre tlmenie spätného rázu. Bolo vytvorených 5 konceptov, ktoré boli porovnané a bol vybraný koncept 5, teda tlmič s bypassom, do ktorého boli implementované prvky z konceptov 2 a 3, teda vyšší počet paralelných drážok a viac pólov radených za sebou, vytvárajúcich jeden dlhý pól.

Pre konštrukčný návrh bola vybraná samohybná húfnica M109A1. Údaje z jej pokusných strelieb boli použité na stanovenie počiatkových parametrov, rýchlostí, pri ktorých bude musieť tlmič pracovať a síl, ktoré bude musieť vyvinúť. S použitím modelu chovania tlmiča bol zostavený skript v programe MATLAB, v ktorom sú všetky vstupné údaje okrem piestovej rýchlosti parametrizované. Výstupom výpočtu tohto programu je silová charakteristika magnetoreologického tlmiča so zvolenými parametrami. Vhodné parametre boli určené iteračným procesom. Po určení parametrov tlmiča bol vypracovaný konštrukčný návrh valca s piestom, ku ktorému bol vypracovaný aj návrhový výkres. Vypracovaný bol aj návrh pólu v bypasse tlmiča. Zistené silové charakteristiky boli použité na porovnanie sily a dĺžky záklzu s počiatkovými parametrami.

Vďaka dostatočne dlhému pólu a značnému množstvu paralelných drážok v bypasse mala kvapalina dostatočne dlhý čas pobytu v magnetickom poli, aby sa zmagnetizovala. Problémom tohoto konštrukčného riešenia sú však teplota a zástavbový priestor. Vplyvom klesajúcej teploty výrazne rastie viskozita magnetoreologickej kvapaliny, čím tiež rastie tlakový rozdiel v kompresnej a odskokovej komore tlmiča. Pri poklese teploty pod 20°C už pasívna zložka tlakového rozdielu začína dosahovať vysoké hodnoty a presahuje tlak, na ktorý sú dimenzované tesnenia. Vysoké sily tlmiča týmto spôsobené tiež namáhajú uloženie dela viac, než na čo boli dimenzované, prípadne narúšajú stabilitu vozidla pri streľbe. Naopak pri stúpajúcej teplote až do 125 °C, síce vymizne rozdiel medzi krátkym a dlhým

záklzom, ale dráha záklzu má stále požadovanú dĺžku. Vďaka tomu možno tento tlmič využiť aj pri rýchlej paľbe, kedy sa brzdo vratné zariadenia disipáciou energie v tlmiči rýchlo zohrievajú. Problémom je ale streľba, keď je tlmič vychladnutý. Vtedy by pomohol ohrev bypassu vlastnými cievkami, na ohrev valca s piestom by mohla byť použitá odporová fólia, ale musela by byť zabudovaná do plášťa.

Zvolená konštrukcia tlmiča je viac náročná na zástavbový priestor. Tlmič totiž používa priechodziu piestnicu, takže pre zabudovanie tlmiča by musel byť pridaný úchyt predného konca piestnice k hlavni. Takto exponovaná piestna tyč by zároveň bola vystavená vonkajším vplyvom a riskovalo by sa jej poškodenie. Bypass tohoto tlmiča má síce menšiu dĺžku ako valec s piestom, ale jeho výška a šírka je podstatne väčšia. Bypass má zároveň masívnu konštrukciu, ktorá je vyžadovaná práve veľkým rozmrom pólu a cievok. Dá sa preto očakávať, že hmotnosť magnetoreologického tlmiča je vyššia ako hmotnosť pôvodného pasívneho tlmiča. Použitie tohoto tlmiča by si vyžadovalo ďalšie konštrukčné úpravy húfnice. Zameriavač pre priamu streľbu by musel byť posunutý, pretože by mu vo výhlade prekážal bypass. Použitie magnetoreologického tlmiča vyžaduje aj inštaláciu ďalšej elektroniky do priestoru osádky.

7 ZÁVER

Cieľom tejto práce bol konštrukčný návrh elektronicky ovládateľného tlmiča pre tlmenie spätného rázu dela. Súčasne používané záklzové brzdy používajú množstvo mechanických prvkov. Tým je ovplyvnená ich spoľahlivosť. Použitím magnetoreologického tlmiča, ktorý žiadne mechanizmy nevyužíva by sa teda mohla zvýšiť spoľahlivosť brzdovratných zariadení.

Analýzou rešeršnej časti tejto práce boli zistené nedostatky a prednosti pasívnych brzdovratných zariadení ako aj magnetoreologických tlmičov. Na základe analýzy bol vytvorený matematický model, popisujúci správanie magnetoreologického tlmiča a boli vytvorené koncepčné návrhy. Vybraný bol koncept 5 kvôli možnosti dosiahnutia magnetického pólu po celej dĺžke škrtiacej drážky. Zároveň boli doňho implementované prvky z konceptov 2 a 3, a to menovite viac pólov radených za sebou, ktoré spolu vytvárajú dlhý pól a viacero paralelných drážok, ktorými pracovná kvapalina preteká súčasne, čím sa zníži rýchlosť jej prúdenia drážkou.

Konštrukčným riešením je teda magnetoreologický tlmič spriechodzu piestnou tyčou a bypassom, kde sa nachádza magnetický pól. Zo zadaných veľkostí síl a rozmerov niektorých konštrukčných prvkov pre brzdovratné zariadenie samohybnéj húfnice M109A boli určené vstupné parametre pre konštrukciu MR tlmiča. Na ich základe boli po viacerých iteráciách určené vhodné parametre tlmiča a boli následne porovnané s požiadavkami na konštrukciu. Porovnaním boli zistené úskalia magnetoreologických tlmičov v takejto náročnej aplikácii. Navrhnutý tlmič je schopný fungovať aj pri vysokých teplotách, ale pri teplotách pod 20 °C dochádza vplyvom nárastu viskozity magnetoreologickej kvapaliny k výraznému nárastu odporovej sily tlmiča. Tlmič je tiež náročnejší na zástavbový priestor kvôli nutnosti použitia priechodzej piestnice a kvôli rozmerom bypassu.

Výstupom tejto práce je teda konštrukčný návrh magnetoreologického tlmiča s bypassom a priechodzu piestnicou a k tomu náležiacie výpočty.

V nadväznosti na túto prácu je možné vykonať experimentálne overenie funkcie tohoto tlmiča, prepracovať návrh presnejším modelom, či vyriešiť problematiku riadenia tohoto tlmiča vzhľadom na malé časy, v ktorých treba reagovať na zmenu rýchlosti a sily spätného rázu.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. JANKOVÝCH, R. *Hlavňové zbraně a střelivo*. Brno: Vysoké učení technické, 2012. 115 s. ISBN 978-80-260-2384-5.
2. USA. *Recoil Systems Metric: Military Handbook*. Washington D.C.: Department of Defence, 1988. [cit. 2022-10-14]. Dostupné z: http://everyspec.com/DoD/DoD-HDBK/DOD-HDBK-778_16860/
3. USA. *Technical manual: Army ammunition data sheets – artillery ammunition – guns, howitzers, mortars, recoilless rifles, grenade launchers, and artillery fuzes*. Washington D.C.: Headquarters, Department of the Army, 2003. [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: http://everyspec.com/ARMY/TM-Tech-Manual/TM_43-0001-28-3_CHG-11_53626/
4. AKÇAI, M., ELALDI, F., *Design and Testing of Recoil Mechanism Used For Self Propelled Howitzers*, *Bulletin of the Technical University of Istanbul*. [online], 1996, 315 [cit. 2022-11-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/315843503_Design_and_Testing_of_Recoil_Mechanism_Used_For_Self_Propelled_Howitzers
5. USA. *Engineering design handbook. Carriages and mounts series recoil systems*. Alexandria, VA: Army Materiel Command, 1963. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0830281>
6. ZIPSER, L., RICHTER, L., LANGE, U., *Magnetorheologic fluids for actuators*. In FRENCH, J. P. (ed.), *Sensors and actuators*, 1. vyd. Kodaň: Elsevier, 2001, s. 318–325. [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/222587936_Magnetorheologic_fluids_for_actuators
7. KCIUK, M., TURCZYN, R. Properties and application of magnetorheological fluids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, roč. 14, č. 18, s. 127–130 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/42107402_Properties_and_application_of_magnetorheological_fluids
8. POYNOR, J.C., *Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers*. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
9. SIMS, N. D; HOLMES, N. J; STANWAY, R. A unified modelling and model updating procedure for electrorheological and magnetorheological vibration dampers. *Smart materials and structures*, [online] 2003. 102 [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/13/1/012>
10. YANG, G., SPENCER, B.F., CARLSON, J.D., SAIN, M.K. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering structures* [online]. 2002, 309-323 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029601000979>

11. MRF-132DG Magneto – Rheological Fluid. *In: Parker LORD* [online]. North Carolina, USA: Parker Hannifin Corp, 2020 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://lordfulfillment.com/pdf/44/DS7015_MRF-132DGMRFfluid.pdf
12. KUBÍK, M et al. Hydrodynamic response time of magnetorheological fluid in valve mode: model and experimental verification. *Smart materials and structures* [online]. 2021, [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/355744277_Hydrodynamic_response_time_of_magnetorheological_fluid_in_valve_mode_model_and_experimental_verification
13. WHITE, Frank M. *Fluid mechanics*. New York: McGraw-Hill, 2011. s. 393. ISBN 978-0-07-352934-9.
14. NGUYEN, Quoc-Hung, CHOI, Seung-Bok. *Optimal Design Methodology of Magnetorheological Fluid Based Mechanisms* [online]. 2012, [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/39986>
15. AHMADIAN, M., POYNOR, J. C., An evaluation of magneto rheological dampers for controlling gun recoil dynamics. *Shock and Vibration*. [online]. 2001, [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2001/674830/>
16. LI, Z. C., WANG, J., A gun recoil system employing a magnetorheological fluid damper. *Smart Materials and Structures*. [online]. 2012, roč. 21, č. 10 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/21/10/105003>
17. Hydraulic seals – linear. *In: Trelleborg* [online]. Trelleborg, Švédsko: Trelleborg Group, 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.trelleborg.com/seals/-/media/tss-media-repository/tss_website/pdf-and-other-literature/catalogs/hydraulic_complete_gb_en.pdf?rev=d39eea956a4c4e40bdf1bba5c2e203fc?&openpdf=1
18. SVOBODA, Pavel, BRANDEJS, Jan. *Základy konstruování*. Vydání osmé, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2020, 264 s. ISBN 978-80-7623-034-7.
19. SVOBODA, Pavel, BRANDEJS, Jan. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vydání šesté, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019, 236 s. ISBN 978-80-7623-010-1.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

9.1 Použité skratky

BMG	Browning machine gun (gul'omet Browning)
CFD	Computational fluid dynamics (výpočtová dynamika tekutín)
MR	Magnetoreologický

9.2 Použité fyzikálne veličiny

B	magnetická indukcia
$B(t)$	sila spätného rázu, závislá na čase
D	dynamický rozsah
f_p	trečia sila v tesneniach
F_0	sila tlmiča spätného rázu
F_m	sila od miestnych odporov
F_{uc}	pasívna sila
F_η	zložka pasívnej sily spôsobená viskóznym prúdením
F_τ	aktívna zložka sily tlmiča
h	výška drážky
H	intenzita magnetického poľa
$K(t)$	sila brzdovratného zariadenia závislá na čase
K_a	sila pneumatického rekuperátora
K_f	trečia sila v uložení dela
K_{max}	maximálne hodnota sily brzdovratného zariadenia
K_R	súčet sily tlmiča, trecej sily v tesneniach a sily rekuperátora
l	dráha
L	dĺžka drážky
m_p	hmotnosť projektilu

m_r	hmotnosť zaklzujúcej sústavy
p	tlak
p_k	kritický tlak
p_m	maximálna hodnota tlaku v hlavni
Q	objemový tok
t	čas
t_0	čas, za ktorý strela opustí hlavneň
t_m	čas, kedy tlak v hlavni dosiahne maximum
T	teplota
v	rýchlosť
w	šírka drážky
x	poloha dela počas záklzu
\dot{x}_p	rýchlosť strely
\dot{x}_r	rýchlosť záklzu
$\dot{\gamma}$	rýchlosť šmyku kvapaliny
η_B	Binghamova viskozita
τ	šmykové napätie
τ_0	medza toku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Priebeh vnútrobalistických veličín pri výstrele v závislosti na čase [1].....	14
Obr. 2-2	Zložky brzdiacej sily brzdovratného zariadenia [2].....	16
Obr. 2-3	Porovnanie priebehu konštantnej brzdiacej sily s priebehom reálnej brzdiacej sily brzdovratného zariadenia [2].....	17
Obr. 2-4	Priebeh sily brzdovratného zariadenia pri streľbe z dela ráže 155 mm s výmetnou náplňou zóny 3; upravené podľa [4].....	18
Obr. 2-5	Priebeh sily brzdovratného zariadenia pri streľbe z dela ráže 155 mm s výmetnou náplňou zóny 5; upravené podľa [4].....	19
Obr. 2-6	Priebeh sily brzdovratného zariadenia pri streľbe z dela ráže 155 mm s výmetnou náplňou zóny 8; upravené podľa [4].....	19
Obr. 2-7	Priebeh sily spätného rázu nebrzdenej a brzdenej sústavy; upravené podľa [5].....	20
Obr. 2-8	Charakteristický priebeh rýchlosti záklzu hlavne dela vybaveného brzdovratným mechanizmom v závislosti na čase; upravené podľa [5].....	21
Obr. 2-9	Charakteristický priebeh rýchlosti záklzu hlavne dela vybaveného brzdovratným mechanizmom v závislosti na zdvihu; upravené podľa [5].....	21
Obr. 2-10	Rez hydro-pružinovým brzdovratným mechanizmom [2].....	23
Obr. 2-11	Schéma nezávislého hydro-pneumatického zariadenia (vľavo) a závislého hydro-pneumatického zariadenia (vpravo) [2].....	24
Obr. 2-12	Schéma mechanizmu typu Puteaux [2].....	25
Obr. 2-13	Schéma brzdovratného mechanizmu typu St. Chamond [2].....	26
Obr. 2-14	Brzdovratný mechanizmus Filloux - vratný mechanizmus [2].....	27
Obr. 2-15	Brzdovratný mechanizmus Filloux - brzda spätného rázu [2].....	27
Obr. 2-16	Závislosť viskozity Newtonovej a Binghamovej kvapaliny na šmykovom napätí [6].....	29
Obr. 2-17	Rez jednoplášťovým tlmičom [8].....	30
Obr. 2-18	Rez dvojplášťovým MR tlmičom [8].....	31

Obr. 2-19 Rez obojstranným MR tmičom [8].....	31
Obr. 2-20 Schéma MR tmiča s vôľou medzi piestom a plášťom [8].....	32
Obr. 2-21 Porovnanie konštrukčných variantov MR tmiča: a) tmič s bypassom, b) tmič s drážkami v pieste, c) tmič s vôľou medzi piestom a plášťom [9].....	33
Obr. 4-22 Model toku kvapaliny medzi dvoma paralelnými doskami [10].....	33
Obr. 2-23 Graf závislosti veľkosti sily tmiča na rýchlosti toku s vyznačenými jednotlivými zložkami sily [10].....	34
Obr. 2-24 Súčinitele miestnych strát na vtoku do drážky [13].....	36
Obr. 2-25 Znázornenie toku MR kvapaliny kanálom v nezmagnetizovanom stave (oblast I až II) a zmagnetizovanom stave, kde dochádza k prechodnému javu (oblast II až III) [12].....	37
Obr. 2-26 Závislosti rozdielu tlaku tmiča od rýchlosti vo vypnutom stave (modrá) a zapnutom stave (červená) pri rôznych prúdoch pretekajúcich cievkou [12].....	37
Obr. 2-27 Závislosť bezrozmerného času T_r na Binghamovom čísle [12].....	38
Obr. 2-28 Závislosť miery magnetizácie v závislosti času magnetizácie MR kvapaliny pri rôznych hodnotách intenzity magnetického poľa [12].....	39
Obr. 2-29 Konštrukcia MR tmiča spätného rázu pušky kalibru 12,7 mm [15].....	41
Obr. 2-30 Sústava pušky, jej vedenia, základne a MR tmiča [15].....	41
Obr. 2-31 Závislosť veľkosti sily MR tmiča na dĺžke záklzu pre rôzne hodnoty napätia v cievke [15].....	41
Obr. 2-32 Závislosť veľkosti sily MR tmiča na čase pre rôzne hodnoty napätia v cievke [15].....	42
Obr. 2-33 Závislosť rýchlosti záklzu na čase pre rôzne hodnoty napätia v cievke [15].....	42
Obr. 2-34 Sústava 30 mm dela s MR brzdo vratným mechanizmom [16].....	43
Obr. 2-35 Priebeh veľkosti prúdu cievkami v závislosti na čase [16].....	43
Obr. 2-36 Priebeh sily brzdo vratného zariadenia v závislosti na polohe počas záklzu [16].....	44
Obr. 2-37 Priebeh rýchlosti záklzu 30 mm dela v závislosti na čase [16].....	44

- Obr. 5-1 Schéma konceptu 1 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestna tyč, 5 – škrtiaca drážka, 6 – cievka.....50
- Obr. 4-2 Schéma konceptu 2 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestnica, 5 – škrtiaca drážka, 6 – cievky.....51
- Obr. 4-3 Schéma konceptu 3 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestnica, 5 – škrtiace drážky, 6 – cievka.....52
- Obr. 4-4 Schéma konceptu 4 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestnica, pevne spojená s piestom, 5 – dutá piestnica, pevne spojená s vekom valca, 6 – škrtiaca drážka, 7 – cievky, 8 – vzduchový filter.....53
- Obr. 4-5 Schéma konceptu 5 MR tlmiča; 1 – odskoková komora, 2 – kompresná komora, 3 – piest, 4 – piestna tyč, 5 – škrtiaca drážka, 6 – cievka, 7 – jadro cievky.....54
- Obr. 6-1 Časový priebeh sily spätného rázu (červená), sily brzdo vratného zariadenia (modrá) a ich súčtu (zelená) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).....58
- Obr. 5-2 Závislosť rýchlosti záklzu $v_r(t)$ krátkeho záklzu (červená) a dlhého záklzu (modrá) na čase záklzu.....59
- Obr. 5-3 Časový priebeh dráhy krátkeho záklzu $x_{rk}(t)$ (červená) a dráhy dlhého záklzu $x_{rk}(t)$ (modrá).....59
- Obr. 5-4 Časový priebeh sily rekuperátora pre krátky záklz (červená) a dlhý záklz (modrá).60
- Obr. 5-5 Časový priebeh ideálnej sily tlmiča spätného rázu pri krátkom záklze (červená) a dlhom záklze (modrá).....61
- Obr. 5-6 Schematický rez valcom MR tlmiča. 1 – plášť tlmiča (valec), 2 – veko tlmiča, 3 – piestna tyč, 4 - stredný diel piestu, 5 – okrajový diel (čelo) piestu, 6 – prítlačná matica, 7 – piestové tesnenie, 8 – piestnicové tesnenie, 9 – stieracie tesnenie, 10 – vodiaci krúžok piestu, 11 – vodiaci krúžok piestnej tyče.....62
- Obr. 5-7 Schématický priečny rez magnetickým pólom bypassu MR tlmiča. 1 – zväzok lamiel, 2 – jadro cievky, 3 – cievka, 4 – centrálna bronzová vložka, 5 – bronzová prepážka, 6 – mosadzná skrutka s maticou, 7 – bronzové puzdro, 8 – oceľový plášť, 9 – drážka pre elektrické vedenie.....64
- Obr. 5-8 Porovnanie pasívnej sily (modrá), maximálnej aktívnej sily (červená), ich súčtu (čierna) a regulovanej tlmiacej sily (fialová) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).....66

Obr. 5-9 Časový priebeh dráhy dela pri krátkom záklze (červená) a dlhom zklze (modrá)...	66
Obr. 5-10 Porovnanie pasívnej sily (modrá), maximálnej aktívnej sily (červená), ich súčtu (čierna) a regulovanej tlmiacej sily (fialová) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).....	67
Obr. 5-11 Časový priebeh dráhy dela pri krátkom záklze (červená) a dlhom zklze (modrá).	67
Obr. 5-12 Porovnanie pasívnej sily (modrá), maximálnej aktívnej sily (červená), ich súčtu (čierna) a regulovanej tlmiacej sily (fialová) pre krátky záklz (vľavo) a dlhý záklz (vpravo).....	68
Obr. 5-13 Časový priebeh dráhy dela pri krátkom záklze (červená) a dlhom záklze (modrá).....	68

11 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Matematický model brzdovratného zariadenia

Príloha 2: Porovnanie konceptov tlmičov s jednou drážkou a s viacerými paralelnými drážkami

Príloha 3: Skript programu MATLAB použitý k výpočtu pri konštrukcii MR tlmiča

Príloha 4: Návrhový výkres valca tlmiča

Príloha 1 – Matematický model brzdovratného zariadenia

Výpočet plôch čela piestu a drážky

$$\text{Plocha čela piestu: } A_p = \frac{\pi \cdot (D_v^2 - D_p^2)}{4}$$

$$\text{Plocha drážky: } A_d = w \cdot h$$

Výpočet prietoku a rýchlosti toku kvapaliny v drážke

$$\text{Prietok: } Q = A_p \cdot v_r$$

$$\text{Rýchlosť toku v drážke: } v_0 = \frac{Q}{A_d}$$

Výpočet dynamickej viskozity

$$\text{Dynamická viskozita MRF – 132 DG: } \eta = \frac{35,07}{(13,48 + T_{MRF})^{1,439}}$$

Výpočet pasívnej zložky sily tlmiča

$$\text{Tlaková strata vplyvom viskózneho toku: } \Delta p_\eta = \left(1 + \frac{w \cdot h \cdot v_0}{2 \cdot Q}\right) \cdot \left(\frac{12 \cdot \eta \cdot Q \cdot L}{w \cdot h^3}\right)$$

$$\text{Tlaková strata od miestnych strát: } \Delta p_m = (\xi_{vi} + \xi_n) \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot \rho_{MRF}$$

$$\text{Pasívna zložka sily tlmiča: } F_{uc} = A_p \cdot (\Delta p_\eta + \Delta p_m)$$

Výpočet medze toku MR kvapaliny

$$\tau_0 = (0,3 + 0,42 \cdot H - 0,00116 \cdot H^2 + 1,05 \cdot 10^{-6} \cdot H^3)$$

Výpočet aktívnej zložky sily tlmiča

$$\text{Binghamovo číslo: } Bi = \frac{\tau_0 \cdot h}{\eta \cdot v_0}$$

$$\text{Bezrozmerný reakčný čas: } T_r = \frac{0,235}{1 + 0,2 \cdot Bi}$$

$$\text{Reakčný čas: } t_r = T_r \cdot \frac{\rho_{MRF} \cdot h^2}{\eta}$$

$$\text{Minimálna dĺžka pólu: } L_{p,min} = v_0 \cdot t_r$$

$$\text{Miera magnetizácie kvapaliny: } \psi_{\Delta p\tau} = 1 - e^{-\frac{t_{dwell}}{t_r \cdot 3}} \cdot \frac{2}{2}$$

$$\text{Tlakový rozdiel: } \Delta p_\tau = \psi_{\Delta p\tau} \cdot \tau_0 \cdot \frac{2 \cdot L_p}{h}$$

$$\text{Aktívna zložka sily MR tlmiča: } F_\tau = \Delta p_\tau \cdot A_p$$

$$\text{Celková sila MR tlmiča: } F_0 = F_{uc} + F_\tau$$

$$\text{Dynamický rozsah tlmiča: } D = \frac{F_0}{F_{uc}}$$

Matematický model správania sa rekuperátora

Plocha čela piestu rekuperátora: $A_r = \frac{\pi \cdot D_r^2}{4}$

Objem rekuperátora v nestlačenom stave: $V_i = A_r \cdot x_i$

Tlak plynu v rekuperátore: $p_r = p_i \cdot \left(\frac{V_i}{V_i - A_r \cdot x_r}\right)^n$

Sila rekuperátora: $K_a = p_r \cdot A_r$

Celková sila brzdo vratného zariadenia: $K = F_0 + K_a$

Poznámka: v modeli nie je zahrnutá trecia sila tesnení a uloženia.

Príloha 2 – Porovnanie konceptov tlmičov s jednou drážkou a s viacerými paralelnými drážkami

Porovnanie pasívnych síl tlmičov s jednou drážkou (index 1) a n paralelnými drážkami (index n)

Pre porovnanie sú rozmery drážok piestov tlmičov zvolené zhodné, teda dĺžka, výška a šírka drážky tlmiča s 1 drážkou je rovná dĺžke drážok tlmiča s n drážkami:

$$L_1 = L_n = L,$$

$$h_1 = h_n = h,$$

$$w_1 = w_n = w.$$

Plochy drážok A_d sú teda zhodné. Zároveň, pretože sa jedná o porovnanie síl tlmičov s rovnakými rozmermi, aj plochy prierezov valcov, piestnic a čiel piestov sú navzájom zhodné. Objemový tok drážkami sa určí ako:

$$Q_1 = v_{01} \cdot A_d,$$

$$Q_n = v_{0n} \cdot A_d,$$

kde pri prítoku Q_n je prítok jednou z paralelných drážok. Rýchlosť prúdenia kvapaliny drážkou sa určí ako:

$$v_{01} = v_r \cdot \frac{A_p}{A_d},$$

$$v_{0n} = v_r \cdot \frac{A_p}{n \cdot A_d},$$

v prípade rýchlosti v_{0n} je plocha drážky pre násobená dvomi, z dôvodu prítomnosti viac drážok. Platí teda:

$$v_{0n} = \frac{v_{01}}{n}.$$

Po dosadení do vzťahu pre určenie objemového toku dostaneme:

$$Q_2 = \frac{v_{01}}{n} \cdot A_d = \frac{Q_1}{n}.$$

Pasívna sila tlmiča s jednou drážkou sa vyjadrí ako:

$$F_{\eta 1} = \left(1 + \frac{w \cdot h \cdot v_{01}}{2 \cdot Q_1}\right) \cdot \frac{12 \cdot \eta \cdot Q_1 \cdot L \cdot A_p}{w \cdot h^3}.$$

Pasívna sila tlmiča s dvomi paralelnými drážkami je daná:

$$F_{\eta 2} = \left(1 + \frac{w \cdot h \cdot v_{0n}}{2 \cdot Q_n}\right) \cdot \frac{12 \cdot \eta \cdot Q_n \cdot L \cdot A_p}{w \cdot h^3}.$$

Po dosadení rýchlostí a prietokov pre n drážok vyjadrené pomocou rýchlostí a prietokov pre tlmič s jednou drážkou dostaneme:

$$F_{\eta 2} = \left(1 + \frac{w \cdot h \cdot \frac{v_{01}}{n}}{2 \cdot \frac{Q_1}{n}}\right) \cdot \frac{12 \cdot \eta \cdot \frac{Q_1}{n} \cdot L \cdot A_p}{w \cdot h^3}.$$

Vykrátením n vo vzťahu dostaneme:

$$F_{\eta 2} = \left(1 + \frac{w \cdot h \cdot \frac{v_{01}}{n}}{2 \cdot \frac{Q_1}{n}}\right) \cdot \frac{12 \cdot \eta \cdot \frac{Q_1}{n} \cdot L \cdot A_p}{w \cdot h^3} = \left(1 + \frac{w \cdot h \cdot v_{01}}{2 \cdot Q_1}\right) \cdot \frac{12 \cdot \eta \cdot \frac{Q_1}{n} \cdot L \cdot A_p}{w \cdot h^3} = \frac{F_{\eta 1}}{n}.$$

Z toho vyplýva, že pasívna sila n drážok je n – násobne menšia ako pasívna sila jednej drážky.

Porovnanie pasívnych síl, spôsobených miestnymi stratami na vtoku a výtoku

Miestne tlakové straty pre tlmič s jednou drážkou sú dané vzťahom:

$$\Delta p_{m1} = (\xi_{vi} + \xi_n) \cdot \frac{v_{01}^2}{2} \cdot \rho.$$

Miestne tlakové straty pre tlmič s n drážkami sú dané vzťahom:

$$\Delta p_{mn} = (\xi_{vi} + \xi_n) \cdot \frac{v_{0n}^2}{2} \cdot \rho.$$

Po dosadení $v_{0n} = \frac{v_{01}}{n}$ do vzťahu pre miestne straty piestu s n drážkami dostaneme:

$$\Delta p_{mn} = (\xi_{vi} + \xi_n) \cdot \frac{v_{01}^2}{2 \cdot n^2} \cdot \rho = \frac{1}{n^2} \cdot (\xi_{vi} + \xi_n) \cdot \frac{v_{01}^2}{2} \cdot \rho = \frac{\Delta p_{m1}}{n^2}.$$

Sila od miestnych strát sa vypočíta ako súčin tlakovej straty a plochy čela piestu. Čelo piestu pri oboch tlmičoch je rovnako veľké preto sily od strát porovnávaných tlmičov sú dané ako:

$$F_{mn} = \frac{F_{m1}}{n^2}.$$

Sila spôsobená miestnymi stratami je teda u tlmiča s n drážkami n^2 – krát nižšia ako u tlmiča s jednou drážkou.

Porovnanie aktívnych síl tlmiča s jednou drážkou a tlmiča s n paralelnými drážkami

Keďže rozmery drážok u tlmiča s 1 drážkou a u tlmiča s n drážkami sú zhodné, tak sa Binghamovo číslo pre obidva prípady určí ako:

$$Bi_1 = \frac{\tau_0 \cdot h}{\eta \cdot v_{01}},$$

$$Bi_n = \frac{\tau_0 \cdot h}{\eta \cdot v_{0n}} = \frac{\tau_0 \cdot h \cdot n}{\eta \cdot v_{01}} = n \cdot Bi_1.$$

Bezrozmerný reakčný čas MR kvapaliny pri prechode magnetickým poľom sa určí ako:

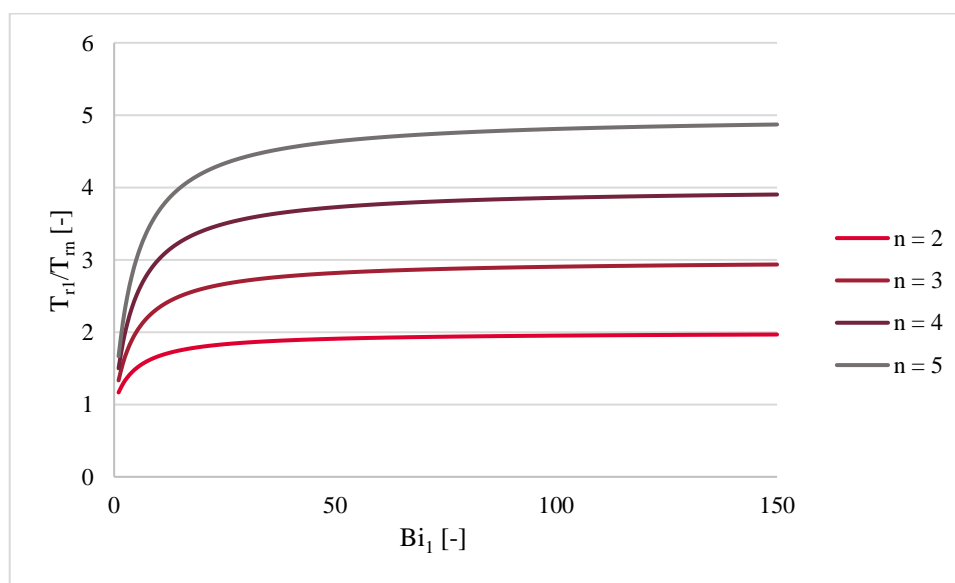
$$T_{r1} = \frac{0,235}{1+0,2 \cdot Bi_1},$$

$$T_{rn} = \frac{0,235}{1+0,2 \cdot Bi_n} = \frac{0,235}{1+0,2 \cdot n \cdot Bi_1}.$$

Pomer bezrozmerných reakčných časov sa dá vyjadriť ako:

$$\frac{T_{r1}}{T_{rn}} = \frac{1+0,2 \cdot n \cdot Bi_1}{1+0,2 \cdot Bi_1}.$$

Tento pomer teda závisí iba na Binghamovom čísle a možno ho graficky znázorniť. Na obrázku 13-1 je grafické znázornenie pomeru bezrozmerných reakčných časov pre $n = 2, 3, 4, 5$ v závislosti na Binghamovom čísle pre piest s jednou drážkou.



Obr. 13-1 Grafické porovnanie pomeru bezrozmerných reakčných časov pre piest s jednou drážkou a piest s n drážkami.

Reakčný čas je u tlmiča s viac drážkami nižší, pričom tento trend rastie s narastajúcim Binghamovým číslom. S väčším počtom drážok je tento pomer vyšší, pričom sa asymptoticky blíži k hodnote príslušného n počtu drážok.

Príloha 3 – Skript programu MATLAB použitý k výpočtu pri konštrukcii MR tlmiča

Tento skript obsahuje tri časti: v prvej sú určené vstupné parametre tlmiča, v druhej je výpočet správania sa tlmiča, v tretej je správanie sa tlmiča porovnané s počiatočnými parametrami.

```
clear all;
clc;
mr=1977.91;
T=[0 0.0005 0.001 0.0015 0.002 0.0025 0.003 0.0035 0.004
0.0045 0.005 0.0055 0.006 0.0065 0.007 0.0075 0.008 0.0085
0.009 0.0095 0.01 0.0105 0.011 0.0115 0.012 0.0125 0.013
0.0132 0.0137 0.0143 0.015 0.0158 0.0167 0.0177 0.0188 0.02
0.0213 0.0227 0.0242 0.0258 0.0275 0.0293 0.0312 0.0332
0.0353 0.0375 0.0398 0.0422 0.0447 0.0473 0.05 0.0528 0.0557
0.0587 0.0613 0.0650 0.0683 0.0717 0.0752 0.0788 0.0825
0.0863 0.0902 0.0942 0.0983 0.1083];
B=[83822 182324 301380 437051 584857 747782 1477122 2427582
3464440 4278647 4970826 5444997 5664135 5653739 5474969
5193842 4863490 4517856 4184300 3755024 3163260 2691228
2310313 1999262 1742320 1527755 1346770 -711720 -667607 -
618588 -566325 -512444 -458456 -405673 -355186 -307839 -
264220 -224684 -189392 -158312 -131298 -108492 -86149 -71785
-57960 -46542 -37178 -29563 -23407 -18456 -14506 -11365 -8879
-6917 -5378 -4177 -3234 -2504 -1935 -1495 -1152 -890 -685 -
529 -409 0];
%určenie zrýchlenia pre dlhý záklz
Kd=[0 30628.91667 61257.83333 91886.75 122515.6667
153144.5833 183773.5 214402.4167 245031.3333 275660.25
306289.1667 336918.0833 367547 367547 367547 367547 367547
367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547
367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547
367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547
367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547 367547
367547];
Kd=-1*Kd;
Fd=B+Kd;
Ad=Fd/mr;
o=ones(1,66);
%určenie rýchlosti pre dlhý záklz
Vd=o;
Vd(1,1)=0;
for i=2:66
    Vd(1,i)=(((Ad(1,i)+Ad(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1)))+Vd(1,i-1);
end
```

```

%určenie zrýchlenia pre krátky záklz
Kk=[0 46509 93018 139527 186036 232545 279054 325563 372072
418581 465090 511599 555108 555108 555108 555108 555108
555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108
555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108
555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108
555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108
555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108 555108
555108];
Kk=-1*Kk;
Fk=B+(mr*9.81*sin(3.14159/3))+Kk;
Ak=Fk/mr;
o=ones(1,66);
%určenie rýchlosti krátkeho záklzu
Vk=o;
Vk(1,1)=0;
for i=2:66
    Vk(1,i)=(((Ak(1,i)+Ak(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1)))+Vk(1,i-1);
end
%určenie dráhy v čase dlhého záklzu
Ld=o;
Ld(1,1)=0;
for i=2:66
    Ld(1,i)=(((Vd(1,i)+Vd(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1)))+Ld(1,i-1);
end
%určenie dráhy v čase krátkeho záklzu
Lk=o;
Lk(1,1)=0;
for i=2:66
    Lk(1,i)=(((Vk(1,i)+Vk(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1)))+Lk(1,i-1);
end
%REKUPERÁTOR
Vi=0.016633;
Ar=6.2738e-03;
pi=4482000;
n=1.6;
%dlhý záklz
pxd=pi*((Vi./(Vi-(Ar.*Ld))).^n);
Kad=pxd.*Ar;
%krátky záklz
pxk=pi*((Vi./(Vi-(Ar.*Lk))).^n);
Kak=pxk.*Ar;
%TRECIA SILA ULOŽENIA V KOLÍSKE
%trecia sila uloženia pre námer 0° (dlhý záklz)
Kfd=(13809.4-8096.5*Ld)*cos(0);
%trecia sila uloženia pre námer 60° (krátky záklz)
Kfk=(13809.4-8096.5*Lk)*cos(3.14159/3);

```

```

%SILA TLMIČA
%dlhý záklz
F0d=(-1*Kd)-Kad-Kfd;
%krátký záklz
F0k=(-1*Kk)-Kak-Kfk;
%MODEL TLMIČA
Tmrf=40;
Romrf=(2.95+3.15)/2*1000;
Dv=0.135;
Dp=0.08;
Ap=3.14159*(Dv^2-Dp^2)/4;
Epsvtok=0.5;
Epsvytok=1;
H1=150;
h=0.0018;
w1=0.09;
Ad=24*w1*h;
%Krátký záklz
Qd=Ap.*Vk;
V0k=(Ap/(Ad)).*Vk;
etak=4.65*(10^(-7)).*exp(3879./(Tmrf+273.15));
Lpk=0.8;
dpnk=1.5.*((12*etak.*V0k.*Lpk)./(h^2));
dpmk=(Epsvtok+Epsvytok).*((V0k.^2)./2).*Romrf;
Fukc=1.*Ap.*(dpnk+dpmk);
Tau01k=(0.3+0.42*H1-0.00116*(H1^2)+0.00000105*(H1^3))*1000;
Bilk=(Tau01k*h)./(etak.*V0k);
Tr1k=0.235./(1+0.2.*Bilk);
tr1k=Tr1k.*Romrf*(h^2)/etak;
Lpmin1k=V0k.*tr1k;
tdwell1k=Ldk./V0k;
psitau1k=1-exp(-(tdwell1k./(tr1k./(2/3))));
dptd1k=psitau1k.*Tau01k.*2.*Ldk./h;
Ftau1k=1.*dptd1k.*Ap;
Ftauk=Ftau1k;
F0kc=Fukc+Ftauk;
Dk=F0kc./Fukc;
%Dlhý záklz
Qd=Ap.*Vd;
V0d=(Ap/(Ad)).*Vd;
etad=4.65*(10^(-7)).*exp(3879./(Tmrf+273.15));
Lpd=0.8;
dpnd=1.5.*((12*etad.*V0d.*Lpd)./(h^2));
dpmd=(Epsvtok+Epsvytok).*((V0d.^2)./2).*Romrf;
Fucd=1.*Ap.*(dpnd+dpmd);
plot(T,Fucd);
hold on
grid on
Tau01d=(0.3+0.42*H1-0.00116*(H1^2)+0.00000105*(H1^3))*1000;
Bild=(Tau01d*h)./(etad.*V0d);
Tr1d=0.235./(1+0.2.*Bild);

```



```

tr1d=Tr1d.*Romrf*(h^2)/etad;
Lpmin1d=V0d.*tr1d;
tdwell1d=Ldd./V0d;
psitauld=1-exp(-(tdwell1d./(tr1d./(2/3))));
dptd1d=psitauld.*Tau01d.*2.*Ldd./h;
Ftauld=1.*dptd1d.*Ap;
Ftaud=Ftauld;
F0cd=Fucd+Ftaud;
Dd=F0cd./Fucd;
%Aplikácia zistenej sily krátkeho záklz
Fkk=522970;
for i=1:66
    if F0kc(i) > Fkk
        if Fukc(i) > Fkk
            F0cak(i)=Fukc(i);
        else F0cak(i)=Fkk;
        end
    else F0cak(i)=F0kc(i);
    end
end
%Aplikácia zistenej sily dlhého záklz
Fdd=325530;
for i=1:66
    if F0cd(i) > Fdd
        if Fucd(i) > Fdd
            F0cad(i)=Fucd(i);
        else F0cad(i)=Fdd;
        end
    else F0cad(i)=F0cd(i);
    end
end
plot(T,F0cak,T,F0cad)
%celková sila krátkeho záklz
Kcak=F0cak+Kak+Kfd;
Kcak=-1.*Kcak;
Fka=B+(mr*9.81*sin(3.14159/3))+Kcak;
Aka=Fka/mr;
Vka=0;
Vka(1,1)=0;
for i=2:66
    Vka(1,i)=((Aka(1,i)+Aka(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1))+Vka(1,i-1);
end
Lka=0;
Lka(1,1)=0;
for i=2:66
    Lka(1,i)=((Vka(1,i)+Vka(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1))+Lka(1,i-1);
end
%celková sila dlhého záklz
Kcad=F0cad+Kad+Kfd;

```

```

Kcad=-1.*Kcad;
Fda=B+Kcad;
Ada=Fda/mr;
Vda=o;
Vda(1,1)=0;
for i=2:66
    Vda(1,i)=((Ada(1,i)+Ada(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1))+Vda(1,i-1);
end
Lda=o;
Lda(1,1)=0;
for i=2:66
    Lda(1,i)=((Vda(1,i)+Vda(1,i-1))/2)*(T(1,i)-T(1,i-1))+Lda(1,i-1);
end

```